



Fundamentos de Ensaio de Vazamento e Estanqueidade

J. da Cruz Payão Filho,
W. Schmidt, G. Schröder



Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralabteilung Technologie

Fundamentos de Ensaio de Vazamento e Estanqueidade

João da Cruz Payão Filho

Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)
Brazil

Wilfried Schmidt

Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP)
Germany

Gerald Schröder

Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralabteilung Technologie (ZAT)
Germany

German-Brazilian-Cooperation
in Scientific Research and Technological Development

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Allgemeines / General

Band 1

ISSN 1433-5565 ISBN 3-89336-278-9

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Payão, João da Cruz:

Fundamentos de ensaio de vazamento e estanqueidade / João da Cruz Payão Filho ; Wilfried Schmidt ; Gerald Schröder. Forschungszentrum Jülich GmbH. - Jülich : Forschungszentrum, Zentralbibliothek, 2000
(Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Allgemeines ; Band 1)
ISBN 3-89336-278-9

Herausgeber und Vertrieb /
Edição e distribuição:

Forschungszentrum Jülich GmbH
ZENTRALBIBLIOTHEK
D-52425 Jülich
Telefon (0 24 61) 61-53 68 · Telefax (0 24 61) 61-61 03
e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de/zb

Redaktion und Layout /
Redação e leiaute:

Gerald Schröder
Zentralabteilung Technologie
Forschungszentrum Jülich GmbH

Umschlaggestaltung /
Leiaute da capa:

Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck / *Impressão:*

Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Auflage / *Tiragem:*

500 (2000)

Copyright / *Direitos autorais:* Forschungszentrum Jülich 2000

Das Buch wurde finanziert mit Mitteln des deutschen Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

Este livro foi financiado com recursos do Ministério Federal de Educação e Pesquisa (BMBF), Alemanha.

Schriften des Forschungszentrums Jülich

Reihe Allgemeines / General, Band / Volume 1

Publicações do Centro de Pesquisa de Jülich, Série Geral, Volume 1

ISSN 1433-5565

ISBN 3-89336-278-9

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

PREFÁCIO

Este trabalho sobre

FUNDAMENTOS DE ENSAIO DE VAZAMENTO E ESTANQUEIDADE

foi elaborado dentro da Cooperação Alemã - Brasileira no campo de Ensaios Não Destrutivos. Tal cooperação é apoiada pelo Ministério Federal de Educação e Pesquisa (BMBF), Alemanha, através da Agencia Internacional do BMBF (FZJ), e pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), Brasil, através do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

O projeto de ensaios não destrutivos engloba já há alguns anos diversos subprojetos, coordenados pelo Prof. Dieter Stegemann, da Universidade de Hannover. Estes subprojetos são de ensaio de correntes parasitas, de inspeção subaquática e técnica de radiografia microfoco. O subprojeto de ensaio de estanqueidade e vazamento foi realizado pelo lado alemão pelo Departamento Central de Tecnologia (ZAT) do Centro de Pesquisa de Jülich (FZJ). Em 1995, foi realizado na ABENDE, em Limeira (SP), o primeiro seminário de ensaio de estanqueidade e vazamento.

Este livro, e um outro intitulado *EXERCÍCIOS TEÓRICOS E PRÁTICOS DE ENSAIO DE VAZAMENTO E ESTANQUEIDADE [1.8]*, foram escritos para serem usados como material didático nos cursos de estanqueidade e vazamento no Brasil. Sem a ajuda dos dois co-autores eu não poderia tê-los escrito. Agradeço, portanto, ao Dr. Wilfried Schmidt, da Associação Alemã de Ensaios Não Destrutivos (DGZfP), pela sua cooperação na compilação dos livros, e ao Prof. João Payão Filho, da Coordenação dos Programas de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE / UFRJ), pela sua ajuda na redação, tradução e revisão dos livros. Agradeço também ao Eng^o Fred Pauly (FZJ / ZAT) pela revisão dos exercícios teóricos e práticos, bem como pelas suas observações e sugestões.

Dezembro 2000

Gerald Schröder

ÍNDICE

Capítulo

- Prefácio
- 1 Introdução
- 2 Introdução à Localização de Vazamento e ao Ensaio de Estanqueidade
- 3 Fundamentos da Física
- 4 Escoamento de Gases em Vazamentos
- 5 Medidores de Pressão e Vácuo
- 6 Bombas de Vácuo I (Bombas de Expulsão)
- 7 Bombas de Vácuo II (Bombas de Alto Vácuo)
- 8 Fundamentos do Ensaio de Estanqueidade
- 9 Método da Bolha
- 10 Localização de Vazamento com Ultra-som
- 11 Método da Variação da Pressão
- 12 Método do Gás de Ensaio - Sobrepressão
- 13 Detecção de Vazamento de Fluido Frigorígeno
- 14 Detectores de Vazamento e Estanqueidade de Hélio
- 15 Ensaio com Detector de Vazamento de Hélio
- 16 Exemplos de Cálculo
- 17 Medida de Pressão Parcial e Análise de Gás Residual
- 18 Escolha do Método de Ensaio
- 19 Vazamentos Reais e Virtuais
- 20 Registro dos Resultados e Certificado de Teste de Vazamento / Estanqueidade
- 21 Procedimento de Ensaio
- 22 Literatura, Referências Bibliográficas e Informações Gerais

Anexos

- A.1 Lista de Fórmulas
- A.2 Dados, Tabelas de Conversão, etc.
- A.3 Símbolos Importantes na Tecnologia de Vácuo
- A.4 Certificado de Teste de Vazamento / Estanqueidade

1 Introdução

O curso de "Detecção de Vazamento e Ensaio de Estanqueidade" é realizado anualmente, desde 1995, pela Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos (ABENDE) [6.2], dentro do projeto de cooperação internacional Brasil-Alemanha. Para os participantes destes cursos, foram redigidas apostilas, de maneira que os mesmos pudessem acompanhar com maior facilidade as aulas teóricas e práticas ministradas.

Por ocasião da revisão do material didático preparado para utilização nos cursos, constatou-se não haver literatura em língua portuguesa sobre ensaios não destrutivos que abordasse um assunto tão importante como o dos Ensaio de Localização de Vazamento e de Estanqueidade. Esta constatação nos estimulou a transformar, através de algumas modificações introduzidas, este material didático disponível em um livro técnico que pudesse ser publicado e utilizado pelos diferentes profissionais que atuam nesta área dos ensaios não destrutivos.

Este livro fornece tanto conhecimentos básicos como avançados sobre os ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade, necessários para a realização de uma inspeção não destrutiva de maneira correta e precisa. Nele são abordados temas como:

- os fundamentos da física (lei dos gases, pressão, escoamento de gás através de descontinuidade, etc.);
- os equipamentos, os instrumentos e os acessórios (manômetros, bombas de vácuo, etc.);
- os conhecimentos específicos e os materiais empregados na tecnologia do vácuo;
- os ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade (aprofundamento dos conhecimentos, escolha do ensaio, etc.)
 - ensaio da bolha;
 - ensaio de ultra-som;
 - ensaio da variação de pressão;
 - ensaio com gás rastreador;
 - detecção de vazamento de halogênio;
 - ensaio com hélio;
 - ensaio de análise de gás residual;
- a manutenção de equipamentos, os cuidados com os equipamentos e a sua proteção contra a corrosão;
- o procedimento de ensaio e a elaboração de relatório de inspeção;

- o limite de detectabilidade dos ensaios e visão geral sobre outras técnicas;
- as normas, as diretrizes e as especificações.

Entretanto, dos equipamentos e instrumentos da tecnologia do vácuo supracitados, serão vistos detalhadamente somente aqueles mais empregados nos ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade, como os manômetros e as bombas de vácuo.

Os temas abordados neste livro são os mesmos tratados nos cursos da "Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V." – DGZfP (Associação Alemã de Ensaio Não Destrutivo) [6.1] destinados à formação de inspetor nível 2 em ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade. A diretriz de qualificação de inspetor nível 2 de ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade da DGZfP [6.1], bem como a norma DIN EN 473 [4.1], especifica que o inspetor nível 2 deve ser capaz de:

- escolher, manusear e ajustar os equipamentos e instrumentos de ensaio;
- realizar corretamente o ensaio e fiscalizar a sua condução;
- elaborar um relatório com os resultados do ensaio e avaliá-los segundo o que especificam as normas, os regulamentos ou outros documentos;
- identificar o campo de aplicação dos processos de ensaio para os quais está qualificado;
- elaborar, por escrito, procedimento de ensaio;
- organizar ensaio de simples execução;
- sugerir a realização de ensaio complementar;
- orientar e fiscalizar inspetor com qualificação nível 1.

Na elaboração deste livro foram pesquisadas publicações das empresas:

- Leybold [2.1];
- Balzers [2.2];
- Pfeiffer [2.3];
- Alcatel [2.4];
- Varian [2.5];

bem como citadas informações contidas no livro "Theorie und Praxis der Vakuumtechnik", de M. Wutz, H. Adam e W. Walcher [1.2]. Os autores agradecem às firmas Leybold, Balzers, Alcatel e Varian pela autorização de uso das figuras. Outras fontes bibliográficas também foram utilizadas, sendo porém mencionadas ao longo do texto.

Os preços de equipamentos e instrumentos citados neste livro servem somente para dar uma noção do valor dos mesmos.

Introdução à Localização de Vazamento e ao Ensaio de Estanqueidade

- 2.1 A localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade na antigüidade e atualmente
- 2.2 A importância e a finalidade da localização de vazamento e do ensaio de estanqueidade
- 2.3 O que o inspetor deve saber antes de começar a inspeção
- 2.4 O conceito Taxa de Vazamento e sua importância

2 Introdução à localização de vazamento e ao ensaio de estanqueidade

2.1 A localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade na antigüidade e atualmente

A história da localização de vazamento e do ensaio de estanqueidade é longa, visto que os romanos já realizavam na antigüidade estas inspeções não destrutivas em seus barris de vinho. Os barris, feitos com juntas vedadas com resina, eram imersos em um tanque contendo água. Se fosse constatado o desprendimento de bolhas de ar através de uma junta de um determinado barril, então era porque ela não estava bem vedada. Neste caso, o vinho precioso que viesse a ser armazenado neste barril poderia se transformar em vinagre.

Existem diversos métodos simples de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade que são bastante conhecidos dos leigos. Na figura 2.1 são apresentados alguns exemplos de inspeções realizadas com estes métodos sem o emprego de equipamentos ou instrumentos auxiliares, isto é, feitas simplesmente utilizando-se os sentidos do ser humano.

O desenvolvimento tecnológico, entretanto, fez com que os métodos de inspeção mencionados acima não ficassem restritos somente ao emprego dos sentidos humanos. A utilização de equipamentos complexos e específicos permitiu ampliar bastante a faixa de medição e melhorar muito a precisão destes métodos de ensaio. Desta maneira, os primeiros métodos de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade se transformaram, conforme mostrado abaixo, em métodos de ensaio altamente sofisticados e precisos.

Método visual (olho)	⇒	Ensaio hidrostático
Método do cheiro (nariz)	⇒	Método do gás rastreador (por exemplo, ensaio com hélio)
Inspeção de pneu (olho, intuição)	⇒	Método da variação de pressão
Método da bolha (olho)	⇒	Diferentes técnicas de localização de vazamento com o método da bolha
Método do ruído (ouvido)	⇒	Localização de vazamento com ultrassom

Além dos métodos supracitados, existe uma série de outros métodos específicos de inspeção, que também serão apresentados neste livro.



Figura 2.1: Métodos fundamentais de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade.

2.2 A importância e a finalidade da localização de vazamento e do ensaio de estanqueidade

A localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade já se encontram bem incorporados à família dos ensaios não destrutivos, ao lado da radiografia, das correntes parasitas, do ultra-som e dos líquidos penetrantes, para citar alguns dos

ensaios mais importantes. A localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade têm adquirido uma importância cada vez maior ao longo do tempo, visto que as especificações de estanqueidade para produtos fabricados pela indústria estão se tornando cada vez mais severas. Esta tendência se deve não somente a motivos econômicos ou ecológicos, como também ao fato dos fabricantes estarem implantando em suas instalações fabris sistemas de garantia da qualidade (por exemplo, segundo a norma DIN EN ISO 9000 [4.12]) e oferecendo uma garantia maior para seus produtos.

Há muito tempo a localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade não são realizados somente em juntas fixas de recipientes. As especificações de estanqueidade de recipientes, de equipamentos e de instalações se tornaram muito severas nas últimas décadas. Atualmente, não são somente os equipamentos ou as instalações dos mais diversos tipos que operam com vácuo que devem ter a sua estanqueidade avaliada ou inspecionados com o objetivo de localizar vazamentos. Produtos da linha branca (geladeiras e freezers), recipientes contendo gás ou líquido (botijão de gás de cozinha ou cilindros com gases industriais ou medicinais), bem como componentes eletroeletrônicos especiais (relé contendo gás, termostatos contendo líquido ou componentes eletrônicos), muitas vezes têm que ser inspecionados, freqüentemente durante o próprio processo da fabricação em série. Embalagens, barris ou tonéis, latas, assim como recipientes de metal ou de plástico dos mais variados tipos, estão sendo cada vez mais inspecionados, não só com o objetivo de se adequarem às especificações de qualidade, como também às de proteção ao meio ambiente [1.2]. Finalmente, os órgãos regulamentadores da área nuclear estabelecem, no que diz respeito à estanqueidade, especificações extremamente severas para as tubulações, os vasos de pressão e os componentes de reatores nucleares. Estas especificações muitas vezes não são relativas somente ao ensaio de estanqueidade e à quantificação da taxa de vazamento. No caso de componentes caros, o local por onde ocorre o vazamento deve ser identificado, de maneira que o defeito possa ser reparado.

Os vazamentos que ocorrem através dos diferentes tipos de descontinuidades existentes podem ser classificados em [2.1]:

- vazamento em junta que não pode ser desfeita (por exemplo, junta soldada, brasada ou colada);
- vazamento em junta que pode ser desfeita (por exemplo, junta flangeada, aparafusada ou com tampa);
- vazamento em poro ou trinca (ocorre especialmente após a conformação mecânica ou a solicitação térmica do material);
- vazamento frio ou quente (que é reversível, visto que a descontinuidade por onde ele ocorre se abre e se fecha conforme a temperatura aumenta ou diminui);

- vazamento virtual (devido à liberação de gás proveniente, por exemplo, do interior de uma cavidade, de uma fresta ou de um volume aprisionado, bem como à vaporização de resto de líquido);
- vazamento indireto (que ocorre em tubulação, de água ou de ar, por exemplo, em um sistema de vácuo ou de um forno).

Um fenômeno que faz com que um objeto seja considerado como não sendo estanque, que porém não constitui um defeito, é a permeação, ou seja, a passagem natural de gás através dos diferentes materiais, como, por exemplo, através de mangueira de borracha ou de um O-ring de elastômero.

Pode ocorrer que uma descontinuidade seja estanque quando a pressão for maior de um lado, mas que permita que ocorra um vazamento se a pressão maior for do outro lado do objeto. Por isso, um objeto de ensaio deve ser inspecionado segundo as mesmas condições de serviço, isto é, o lado (interno ou externo) de maior pressão deste objeto de ensaio deve ser aquele que se encontrará sob maior pressão quando ele estiver em serviço. Se for possível e tecnicamente viável, um objeto que trabalha com pressão interna maior que a atmosférica deve ser inspecionado, então, com uma pressão interna maior que 1bar.

2.3 O que o inspetor deve saber antes de começar a inspeção

Os métodos de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade podem ser classificados em dois grupos, conforme mostrado na figura 2.2. Se a pressão interna de um objeto a ser ensaiado for maior que a pressão externa, então a pressão em seu interior fará com que o fluido (gás ou líquido) que ele contém escape para fora através de uma descontinuidade relativamente grande que porventura possa existir. Se a diferença entre a pressão interna e externa for muito grande, a quantidade de fluido que escapará (taxa de vazamento) será maior que aquela que escaparia caso esta diferença fosse pequena (figura 2.2, à esquerda). O outro caso que pode ocorrer é aquele em que a pressão interna é menor que a externa. Neste caso, o fluido que se encontra no lado de fora do objeto de ensaio irá penetrar nele através de uma descontinuidade até que a pressão externa e interna se igualem (figura 2.2, à direita).

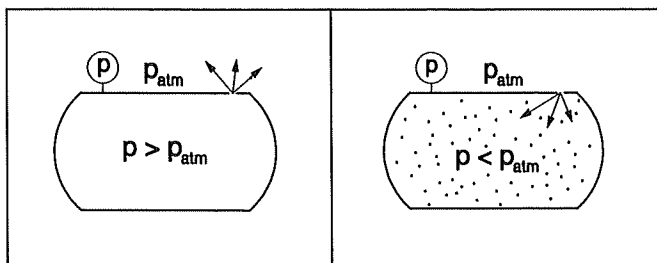


Figura 2.2:
Direções de escoamento de fluido em um vazamento quando se emprega os métodos de ensaio da sobrepressão (esquerda) e do vácuo (direita).

No parágrafo anterior foram descritas, com base na figura 2.2, as duas condições fundamentais para a localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade. Estas duas condições encontram-se apresentadas mais uma vez, porém de maneira resumida, abaixo:

1. um objeto só pode ser ensaiado quando a região (parede) a ser inspecionada estiver sujeita a uma diferença de pressão;
2. deve haver transporte de matéria através de uma descontinuidade, sendo que este transporte de matéria, isto é, o vazamento, tem que poder ser detectado ou quantificado através de um método de inspeção adequado.

O simples fato de uma substância passar por uma descontinuidade de um recipiente, entretanto, não significa que este recipiente não esteja em condições de ser utilizado pelo usuário. A adequação para uma dada finalidade dependerá, naturalmente, a que o recipiente se destina. Uma pequena descontinuidade pode não permitir a passagem de líquido, porém pode deixar passar por ela uma quantidade enorme de gás, visto que a viscosidade das moléculas dos líquidos é maior que a das moléculas ou átomos dos gases. A taxa de vazamento máxima admissível é que determinará se um dado objeto com uma descontinuidade, ou seja, que não é 100 % estanque, é ou não adequado para uma finalidade específica.

Existem diversas definições para o termo "tecnicamente ESTANQUE". Este termo, logicamente, encontra-se definido na TRB 600 [5.2]. Segundo esta norma, um objeto é dito ESTANQUE quando a sua taxa de vazamento, medida com um método de ensaio adequado e com sensibilidade suficiente, é menor que a taxa de vazamento máxima admissível.

Antes de iniciar a inspeção, o inspetor precisa saber qual é a taxa de vazamento máxima admissível para o objeto de ensaio em questão, bem como para qual diferença de pressão e para qual meio de ensaio ela foi especificada. Uma taxa de vazamento máxima admissível que não esteja acompanhada destas duas informações relativas às condições de ensaio, não tem significado algum. Além disso, o inspetor deve saber como proceder quando a taxa de vazamento do objeto de ensaio medida for maior que a taxa de vazamento máxima admissível, isto é, se é ou não preciso localizar o vazamento e, caso isso seja necessário, como realizar a localização. Quando é economicamente vantajoso ou existe o perigo contaminar o meio ambiente, é sempre necessário reparar o local por onde ocorre o vazamento. Com esse objetivo, faz-se um ensaio de estanqueidade local ou, como normalmente se diz, localiza-se o vazamento (figura 2.3, à esquerda). Se não for necessário reparar o objeto de ensaio, o que normalmente ocorre quando se inspeciona objetos baratos fabricados em série, como lâmpadas incandescentes, pequenos recipientes, latas, etc., então o objetivo da inspeção é somente saber qual é a taxa de vazamento do objeto de ensaio. Neste caso, faz-se um ensaio de estanqueidade adequado para o tipo de inspeção desejada, sendo este ensaio conhecido também como ensaio de estanqueidade integral. No ensaio de estanqueidade integral é

medido o somatório das taxas de vazamento de todas as discontinuidades do objeto de ensaio (figura 2.3, à direita).

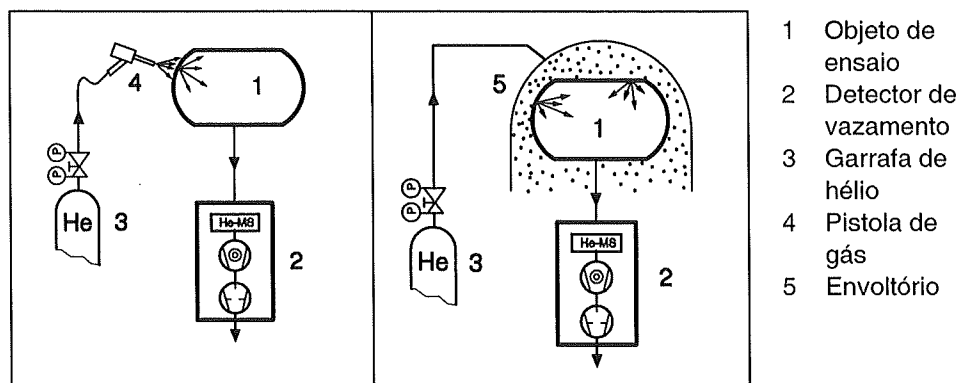


Figura 2.3: Representação esquemática do ensaio de estanqueidade local (esquerda) e integral (direita).

O inspetor tem que conhecer uma série de informações antes de decidir como será feito o ensaio, como:

- qual a diferença de pressão que será empregada na inspeção;
- se o objeto de ensaio pode ser pressurizado ou evacuado;
- qual será o meio de ensaio (gás ou líquido);
- se o objeto de ensaio é resistente ao meio de ensaio;
- qual é a taxa de vazamento máxima admissível (com qual meio de ensaio, com que diferença de pressão e, se for o caso, a que temperatura ela deverá ser determinada);
- se o ensaio a ser realizado é local ou integral.

Somente quando estes pontos estiverem esclarecidos é que o inspetor poderá escolher o método de ensaio correto.

2.4 O conceito Taxa de Vazamento e sua importância

A taxa de vazamento, isto é, a quantidade de massa que atravessa uma dada discontinuidade em um determinado intervalo de tempo e nas condições estabelecidas (tipo de fluido e diferença de pressão), pode ser calculada empregando-se a equação 2.1.

$$q_L = \frac{\Delta(p \cdot V)}{\Delta t} \quad (\text{equação 2.1})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento;
- p é a pressão ou a variação de pressão, em [mbar];
- V é o volume ou a variação de volume, em [ℓ];
- Δt é o intervalo de tempo, em [s].

Em vista das unidades dos parâmetros empregados no cálculo da taxa de vazamento, a taxa de vazamento é expressa em:

$$[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{ou} \quad \left[\frac{\text{mbar} \cdot \ell}{\text{s}} \right]$$

Atualmente, a taxa de vazamento no Sistema Internacional (SI) é expressa em [$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]. Também é possível expressar a taxa de vazamento em outras unidades, como, por exemplo, em [$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), unidade esta que é muito empregada nos Estados Unidos, ou em [$\text{g} \cdot \text{ano}^{-1}$], que é bastante utilizada na indústria de refrigeração, ou em Watt [W]. Os fatores de conversão de uma unidade de taxa de vazamento em outra podem ser obtidos no anexo deste livro.

Uma taxa de vazamento de $1 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ significa, tomando-se o exemplo de um recipiente fechado de um litro de volume e com vácuo, que a sua pressão aumenta um milibar em um segundo (ou diminui 1 mbar em 1 s, caso o recipiente estivesse pressurizado). Os exemplos apresentados a seguir ajudam a compreender o significado da taxa de vazamento e a visualizar melhor a quantidade de material que atravessa uma determinada descontinuidade. O modelo utilizado nestes exemplos é o de uma descontinuidade que se torna gradualmente menor, permanecendo a diferença de pressão entre os dois lados do recipiente que contém esta descontinuidade, porém, sempre constante e igual a 1 bar.

Um poro muito pequeno (ou uma trinca capilar, que é uma descontinuidade freqüentemente encontrada na prática) permite a passagem de um determinado líquido somente se o seu diâmetro for maior que o diâmetro da molécula do líquido. Se o seu diâmetro for menor, então este poro será bloqueado pelo líquido. O impedimento da passagem de um dado líquido por uma descontinuidade dependerá, dentre outras coisas, da viscosidade do fluido. O mel, por exemplo, não passa através de uma descontinuidade que muitas vezes é considerada como sendo grande; a gasolina, por outro lado, já consegue passar através de descontinuidade que não permite a passagem de água e que é considerada, por isso mesmo, como sendo "estanche". Entretanto, uma descontinuidade que é tida como estanche no que se refere à passagem de líquido, pode ser considerada como sendo gigantesca quando se trata de gases de baixa viscosidade. A tabela 2.1 fornece uma visão geral da relação existente entre as diferentes taxas de vazamento, as dimensões das descontinuidades e as quantidades de material que passam por elas.

Tabela 2.1: Comparação das diferentes taxas de vazamento ($\Delta p = 1 \text{ bar}$).

Taxa de vazamento, q_L [mbar·ℓ·s ⁻¹]	Tamanho (diâmetro) da descontinuidade	Vazamento através de uma descontinuidade para $\Delta p = 1 \text{ bar}$
10^{+2}	1,0 mm	(expresso em quantidade de água)
$10^0 = 1$	0,1 mm	Como uma torneira pingando
10^{-2}		Não deixa passar água
10^{-3}	30 μm (corresponde, aproximadamente, ao diâmetro de um fio de cabelo)	Aprox. 1 bolha de ar (= 1 mm ³) por segundo
10^{-6}		Aprox. 1 cm ³ de perda de gás ^{*)} em 12 dias
10^{-8}	Diâmetro capilar de 0,4 μm (para uma espessura de parede de 2 mm), isto é, uma relação diâmetro/comprimento = 1/5000	Aprox. 3 mℓ de perda de gás ^{*)} em um ano
10^{-10}		“Tecnicamente estanque”
10^{-11}		Aprox. 1 cm ³ de perda de gás ^{*)} em 3.000 anos (!)

^{*)} Relativo ao hélio, que é um gás de ensaio freqüentemente empregado na localização de vazamento e no ensaio de estanqueidade.

Os valores apresentados na tabela 2.1 só servem para visualização e avaliação grosseira da ordem de grandeza de um vazamento. A taxa de vazamento real depende de diferentes fatores, como, por exemplo, da viscosidade do meio de ensaio, da geometria da descontinuidade através da qual ocorre o vazamento e do tipo de escoamento do meio de ensaio por esta descontinuidade.

A perda de 3 mℓ de gás em um ano ($q_L = 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$) através de uma descontinuidade de alguns décimos de milésimo de milímetro (0,4 μm) de diâmetro, por exemplo, pode dar a impressão de que por essa descontinuidade não pode passar “nada”. Esta aparência engana, visto que por esta descontinuidade podem atravessar, a cada segundo, 250.000.000.000 de átomos de hélio. Apesar disso, a taxa de vazamento máxima admissível para a maior parte dos casos de aplicação técnica gira em torno de 10^{-6} a $10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, o que permite classificar o objeto como sendo ESTANQUE.

Não se deve esquecer, todavia, que em um volume de um litro (isto é, em 1.000 cm³ ou em 1.000.000 mm³), à pressão ambiente, existem cerca de

25.000.000.000.000.000.000.000 (ou $2,5 \cdot 10^{22}$)

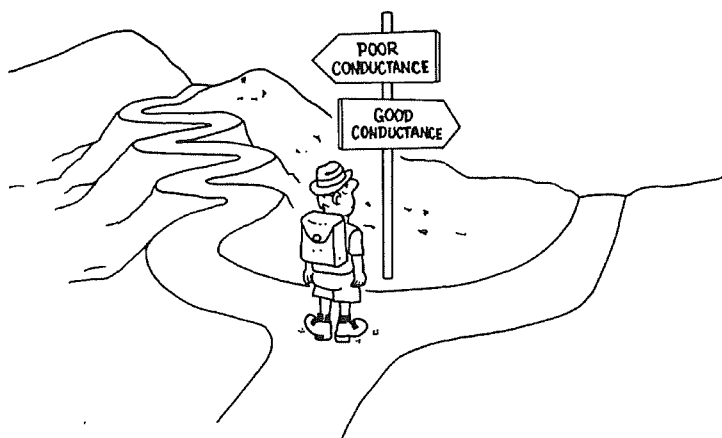
de átomos.

Com base nos dados dos exemplos apresentados acima, pode-se constatar claramente o quanto o termo “taxa de vazamento máxima admissível” é importante para um dado objeto. Um recipiente que tenha uma taxa de vazamento de $1 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, por exemplo, apresenta uma estanqueidade boa o suficiente para ser utilizado em uma instalação que opera com água, visto que ele não deixará em hipótese alguma vazar água. Contudo, se este mesmo recipiente for usado em uma indústria química para a produção de gases tóxicos, provavelmente somente um milésimo (ou menos) desta taxa de vazamento máxima, ou seja, $1 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, pudesse ser tolerado. No caso deste recipiente ser usado em um equipamento de ultra-alto vácuo, como, por exemplo, em um ciclotron ou em um equipamento de implantação de íons, até mesmo uma taxa de vazamento desta ordem de grandeza ($1 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$) seria intolerável, visto que através de uma descontinuidade que apresentasse esta taxa de vazamento passaria uma enorme quantidade de átomos para dentro do recipiente. Neste último caso, então, a taxa de vazamento máxima admissível deveria ser reduzida para um décimo de milésimo deste valor, ou seja, para $1 \cdot 10^{-11} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, que corresponde ao limite de detecção de um detector de vazamento de hélio em boas condições de operação.

Os exemplos apresentados acima mostram que o ensaio de estanqueidade permite medir taxas de vazamento que variam dentro de uma faixa muito ampla e que abrange mais de 12 ordens de grandeza. É fácil compreender, naturalmente, que não existe um único método de ensaio de estanqueidade que permita medir taxa de vazamento dentro de toda esta ampla faixa. Comparativamente, caso isso fosse possível, seria o mesmo que dizer que se consegue realizar uma inspeção radiográfica em materiais de 1mm a vários metros de espessura empregando um feixe de raio X com uma mesma energia. Felizmente existem diversos métodos de ensaio de estanqueidade que se complementam e que cobrem esta ampla faixa de taxas de vazamento (veja capítulo 18). Dentre estes diferentes métodos de inspeção, o mais utilizado, entretanto, é a localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade com hélio como gás de ensaio ou rastreador. Por isso, estes métodos de inspeção serão tratados neste livro exaustiva e detalhadamente.

Fundamentos da Física

- 3.1 Introdução
- 3.2 Fundamentos da teoria da cinética dos gases
 - 3.2.1 Leis dos gases
 - 3.2.2 Composição do ar atmosférico
 - 3.2.3 Pressão parcial
 - 3.2.4 Pressão de vapor
 - 3.2.5 Livre percurso médio
 - 3.2.6 Difusão
- 3.3 Fundamentos do ensaio de estanqueidade
 - 3.3.1 Especificação de estanqueidade



Livre percurso médio [1.1]

3 Fundamentos da física

3.1 Introdução

Muitos objetos, como, por exemplo, um minirrelé ou um vaso de pressão de um reator nuclear, não podem apresentar nenhum tipo de vazamento e devem, por isso, satisfazer a diferentes requisitos de estanqueidade previamente estabelecidos. A estanqueidade destes objetos muitas vezes precisa ser avaliada, o que exige, portanto, a realização de ensaios não destrutivos. Existem vários motivos que tornam necessária a detecção de vazamento e a realização de ensaio de estanqueidade, dentre os quais pode-se citar:

- o fato da vida útil e da capacidade de um determinado objeto desempenhar suas funções corretamente serem muito influenciadas pela sua estanqueidade (por exemplo, no caso de uma lâmpada, de um marcapasso, de componentes eletrônicos);
- a necessidade de uma máquina, ou instalação de fabricação, não poder permitir a penetração de impurezas em seu interior, de modo que se possa fabricar produtos isentos de contaminação e de alta qualidade (por exemplo, no caso da fabricação de produtos químicos e farmacêuticos);
- a necessidade de ter que empregar algum tipo de envoltório, como uma carcaça, um vaso de contenção ou uma redoma, por exemplo, para evitar a emissão de poluentes no meio ambiente (por exemplo, na área nuclear e em instalações petroquímicas);
- o fato de vazamentos em uma instalação reduzirem sua eficiência e prejudicarem o processo de fabricação (por exemplo, em instalações de fabricação envolvendo vácuo e componentes empregados em usinas elétricas).

Os exemplos apresentados acima mostram que o campo de aplicação da detecção de vazamento e do ensaio de estanqueidade é muito vasto, fato este que exigiu o desenvolvimento de vários processos de ensaio.

Um objeto, ou um sistema constituído de diversos componentes, nunca é absolutamente estanque. Entretanto, este objeto, ou sistema, ao ser inspecionado com determinadas condições de ensaio muito bem definidas (meio de ensaio, pressão e temperatura), pode ser classificado como sendo ou não estanque. Um objeto que não deixa passar líquido, por exemplo, pode permitir a passagem de gás, o que demonstra que as expressões "estanque" e "não estanque" são de natureza estritamente qualitativa.

3.2 Fundamentos da teoria da cinética dos gases

3.2.1 Leis dos gases

O estado de um gás é definido pelas variáveis termodinâmicas pressão, volume e temperatura, conforme mostra a equação 3.1.

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (\text{equação 3.1})$$

onde

- p é a pressão absoluta, em [mbar];
- V é o volume, em [ℓ];
- m é a massa de gás, em [g];
- M é o peso molecular do gás, em [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$];
- R é a constante universal dos gases, em [$\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];
- T é a temperatura absoluta, em [K].

A equação 3.1, onde $R = 83,14 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, é conhecida como equação de estado de um gás ideal, ou equação de estado de Van der Waals, sendo o conceito gás ideal baseado nas seguintes suposições:

- que as partículas (átomos ou moléculas) de gás estejam permanentemente em movimento desordenado;
- que o volume inerente às partículas de gás seja desprezível quando comparado com o volume do recipiente que as contém;
- que o choque das partículas de gás entre si e contra a parede do recipiente que as contém seja de natureza elástica.

A pressão de um gás ideal pode ser correlacionada com o choque das partículas de gás contra a parede do recipiente que as contém. A pressão é definida pela relação entre a força que as partículas de gás exercem perpendicularmente sobre a parede do recipiente e a área desta parede (equação 3.2).

$$p = \frac{F}{A} \quad (\text{equação 3.2})$$

onde

- p é a pressão, em [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$] ou [Pa];
- F é a força que as partículas exercem sobre a parede do recipiente, em [N];
- A é a área da parede do recipiente onde a força F atua, em [m^2].

O Pascal [Pa] é uma unidade de pressão, sendo que $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Outra unidade de pressão é o bar, sendo que $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 10^5 \text{ Pa}$.

Obs.: Neste livro, entretanto, a pressão será expressa somente em [bar] ou [mbar], em vez de [Pa].

Visto que um recipiente de 1 cm^3 contendo ar tem à pressão atmosférica cerca de 10^{19} partículas de gás, as oscilações de pressão que ocorrem em um curto período de tempo, devidas aos choques estáticos de cada uma dessas partículas contra a parede do recipiente, não podem ser detectadas. A pressão medida representa, portanto, um valor médio obtido em um determinado momento, sendo este valor dependente da massa específica do gás, bem como da velocidade média das partículas. A velocidade média das partículas será maior quanto maior for a temperatura. Este comportamento do gás, descrito pela equação 3.3, constitui o fundamento para a medida de pressão.

$$p \sim \rho \cdot T \quad (\text{equação 3.3})$$

sendo

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{equação 3.4})$$

e

$$m = n \cdot M \quad (\text{equação 3.5})$$

onde

- p é a pressão;
- ρ é a massa específica do gás;
- T é a temperatura;
- m é a massa de gás;
- V é o volume ocupado pelas partículas do gás;
- n é o número de mols do gás;
- M é o peso molecular do gás.

A pressão absoluta zero ($p = 0 \text{ Pa}$) seria atingida quando não existisse mais nenhuma partícula de gás dentro do recipiente. Este estado, todavia, nunca pode ser obtido, assim como a temperatura absoluta zero ($T = 0 \text{ K}$), quando as partículas não possuem mais energia cinética, ou seja, velocidade, também não pode ser conseguida.

Muitas vezes se emprega uma escala de pressão cujo valor zero corresponde à pressão de 1000 mbar. A pressão medida é então denominada sobrepressão, sendo que seu símbolo deve vir acompanhado de um subíndice "e" (de excedente). A

equação 3.6 mostra a relação existente entre a pressão absoluta e a pressão excedente.

$$p = p_e + 1 \text{ bar} \quad (\text{equação 3.6})$$

onde

- p é a pressão absoluta;
- p_e é a pressão excedente.

A faixa de pressão abaixo da pressão ambiente ($p_{\text{amb}} = 1000 \text{ mbar}$) é definida como vácuo. A escala desta faixa de pressão abrange várias ordens de grandeza, sendo o vácuo subdividido em:

- vácuo grosseiro $p = 10^3 \text{ mbar}$ até 1 mbar ;
- médio vácuo $p = 1 \text{ mbar}$ até 10^{-3} mbar ;
- alto vácuo $p = 10^{-3} \text{ mbar}$ até 10^{-7} mbar ;
- ultra-alto vácuo $p = < 10^{-7} \text{ mbar}$.

O número de mols (n), ou quantidade de matéria, que é n expresso em [mol], está correlacionado a um determinado número de partículas de gás. O número de partículas de 1 mol de uma matéria é exatamente igual ao número de átomos que 12 g de isótopo de carbono (^{12}C) contém. Este número de partículas por mol, determinado experimentalmente, é denominado constante de Avogadro (N_A). A constante de Avogadro corresponde a

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

A massa de uma partícula de gás é expressa em quilograma [kg]. Em várias situações, por outro lado, é comum considerar o ^{12}C como átomo padrão. A massa correspondente a 1/12 da massa do ^{12}C é denominada unidade de massa atômica (amu), sendo

$$1 \text{ amu} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

A correlação existente entre a massa de uma partícula atômica (m_a) e a unidade de massa atômica é denominada massa atômica relativa (A_r) ou peso molecular relativo (M_r). O peso molecular dos gases é expresso com base nas massas atômica ou molecular relativas. Os valores A_r e M_r podem ser obtidos na tabela periódica dos elementos químicos, sendo

$$M_M = M_r [\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}].$$

3.2.2 Composição do ar atmosférico

O ar atmosférico é uma mistura de diferentes gases. Mais de 99 % do ar atmosférico é constituído de nitrogênio e oxigênio, sendo o restante constituído de outros gases. A tabela 3.1 apresenta a composição do ar atmosférico à pressão de 1024 mbar e à temperatura de 20°C.

Tabela 3.1: *Composição do ar atmosférico c_i [% , em volume] à pressão de 1024 mbar e a 20°C.*

Gás	Concentração, c_i [%]
Nitrogênio	78,09
Oxigênio	20,95
Argônio	0,93
Dióxido de carbono	0,03
Neônio	0,0018
Hélio	0,0005
Criptônio	0,000114
Hidrogênio	0,00005
Xenônio	0,0000087

3.2.3 Pressão parcial

Pressão parcial (p_i) é a pressão exercida por um único gás em uma mistura gasosa. As pressões parciais dos diferentes gases que constituem o ar atmosférico podem ser obtidas multiplicando-se o valor da concentração volumétrica destes gases no ar atmosférico (c_i), conforme apresentado na tabela 3.1, pela pressão total (p_{tot}).

A soma de todas as pressões parciais de uma mistura gasosa corresponde à pressão total desta mistura (equação 3.7).

$$p_{tot} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n \quad (\text{equação 3.7})$$

É muito importante salientar que um gás de uma mistura gasosa que se encontra em um recipiente fechado não se separa mais. Não é verdade, portanto, que o He de uma mistura de He com ar se separa e vai para a parte superior do recipiente.

3.2.4 Pressão de vapor

A passagem de um líquido ou de um sólido para o estado gasoso é denominada vaporização ou sublimação, respectivamente. O gás que se forma, denominado

vapor, exerce, como todo gás, uma pressão, denominada pressão de vapor. A tabela 3.2 apresenta a pressão de vapor de diferentes líquidos à temperatura de 20°C. Este vapor pode passar novamente para o estado líquido ou sólido, sendo este fenômeno denominado condensação ou sublimação, respectivamente. Todos os vapores têm uma pressão de vapor de saturação. Quando a pressão de um sistema se torna maior que a pressão de vapor de saturação, então o vapor se condensa ou sublima. De maneira análoga, enquanto houver líquido em um sistema, não é possível baixar a sua pressão, através de evacuação, para um valor menor que a pressão de vapor de saturação. A água e seu vapor recebem uma atenção especial na tecnologia do vácuo, visto que o ar atmosférico apresenta grande quantidade de vapor de água, também denominado umidade. A tabela 3.3 apresenta a pressão de vapor da água a diferentes temperaturas. Em sistemas com vácuo é muito difícil remover a água.

Tabela 3.2: Pressão de vapor (p) de diferentes líquidos a 20°C.

Líquido	Pressão, p [mbar]
Álcool metílico	127,7
Álcool etílico	58,3
Acetona	245,8
Água	23,3
Tetracloreto de carbono	121,0
Óleo p/ bomba de alto vácuo	10^{-7} a 10^{-9}

Tabela 3.3: Pressão de vapor da água (p) a diferentes temperaturas (T).

Temperatura, T [°C]	Pressão, p [mbar]
100	1010,8
50	130,3
25	31,7
0	7,3
-40	0,13
-78,5	$7,7 \cdot 10^{-3}$
-196	$1,3 \cdot 10^{-24}$

3.2.5 Livre percurso médio

A distância que uma partícula de gás ou de vapor percorre em média antes de colidir com outra partícula de gás ou vapor é definida como livre percurso médio. Em alto vácuo (no caso de escoamento molecular) esta distância é tão grande que a partícula apenas colide com as paredes do recipiente que a contém. O livre percurso médio de uma partícula de gás ou de vapor pode ser calculado empregando-se a equação 3.8. A tabela 3.4 apresenta o livre percurso médio de diversos gases e do vapor de água a 20°C e diferentes pressões obtido usando-se a equação 3.8.

$$\bar{l} = 116,4 \cdot \left(\frac{\eta}{p} \right) \cdot \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \quad (\text{equação 3.8})$$

onde

- $\bar{l}$ é o livre percurso médio, em [m];
- η é a viscosidade do gás, em [Pa·s];
- p é a pressão absoluta, em [Pa];
- T é a temperatura absoluta, em [K];
- M é o peso molecular do gás, em [g·mol⁻¹].

Tabela 3.4: Livre percurso médio ($\bar{l}$) de diferentes gases a 20°C e diferentes pressões (p).

Livre percurso médio ($\bar{l}$) de gases a 20°C e diferentes pressões (p)					
p [Pa]	10^{-6}	10^{-3}	10^0	10^3	10^6
p [mbar]	10^{-8}	10^{-5}	10^{-2}	10	10^4
$\bar{l}$	km	m	mm	μm	nm ^{*)}
Ar	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
Argônio	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
CO ₂	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
H ₂	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Vapor de água	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
Hélio	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6
Nitrogênio	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Neônio	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
Oxigênio	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2

^{*)} 1 nm (1 nanômetro) = 10⁻⁹ m

3.2.6 Difusão

O movimento de partículas de gás é denominado difusão. A difusão tem como objetivo fazer com que as partículas de gás se distribuam o mais uniformemente possível em todo o volume de espaço disponível. Se em algum lugar qualquer de um gás, como o ar atmosférico, por exemplo, se encontra outro gás, este gás se espalha gradualmente por todo o espaço ocupado pelo ar atmosférico, até que ele exerça em todos os lugares a mesma pressão parcial. Quanto maior for a velocidade média da partícula de gás e o seu livre percurso médio no ar atmosférico, mais rápida será a sua difusão.

3.3 Fundamentos do ensaio de estanqueidade

A quantidade de gás que se encontra em um recipiente pode ser calculada, quando se conhece a temperatura e o tipo de gás, utilizando-se a equação 3.9.

$$Q = p \cdot V \quad (\text{equação 3.9})$$

onde

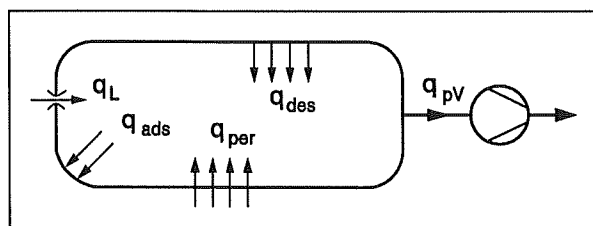
- Q é a quantidade de gás no recipiente, em $[\text{mbar} \cdot \ell]$;
- p é a pressão exercida pelo gás no recipiente, em $[\text{mbar}]$;
- V é o volume do recipiente, em $[\ell]$.

O fluxo de gás é definido como a variação da quantidade de gás em um intervalo de tempo, conforme expresso pela equação 3.10. A figura 3.1 apresenta exemplos de fluxo de um gás em um objeto com vácuo. Os tipos de fluxo de matéria que podem ocorrer em um objeto com vácuo serão abordados novamente no capítulo 14.

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (\text{equação 3.10})$$

onde

- q é o fluxo de gás, em $[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}]$;
- ΔQ é a variação da quantidade de gás, em $[\text{mbar} \cdot \ell]$;
- Δt é o intervalo de tempo, em $[\text{s}]$.



- q_L é a taxa de vazamento;
- q_{pV} é a taxa de bombeamento;
- q_{ads} é a taxa de adsorção;
- q_{des} é a taxa de dessorção;
- q_{per} é a taxa de permeação.

Figura 3.1: Exemplo de fluxos de gás em um recipiente com vácuo.

A identificação do tipo de fluxo é feita através de seu subíndice. Uma taxa de vazamento q_L significa que se trata de um fluxo de gás através de um "canal" na parede do objeto em questão. A condição *sine qua non* para que ocorra um fluxo de gás é que exista uma diferença de pressão entre os dois lados do canal, conforme descrito pela equação 3.11.

$$\Delta p = |p_{\text{ens}} - p_{\text{amb}}| \neq 0 \quad (\text{equação 3.11})$$

onde

- Δp é a diferença de pressão entre os dois lados do canal;
- p_{ens} é a pressão de ensaio (dentro do objeto);
- p_{amb} é a pressão ambiente (fora do objeto).

O caso ideal seria quando o canal de vazamento fosse um tubo capilar com dimensões geométricas bem definidas. Neste caso, a taxa de vazamento pode ser calculada empregando-se a equação de Knudsen (3.12).

$$q_L = C \cdot \Delta p \quad (\text{equação 3.12})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento;
- C é a condutância do tubo capilar;
- Δp é a diferença de pressão.

A condutância do capilar é um parâmetro que depende da geometria do tubo capilar, do tipo de escoamento de gás e da sua variação com a pressão, bem como do gás de ensaio. Na maioria das vezes não se conhece as dimensões do canal de vazamento, de maneira que se convencionou que a caracterização de um vazamento fosse feita medindo-se a sua taxa de vazamento. Esta taxa de vazamento, contudo, só estará correta quando as condições de ensaio (gás de ensaio e a diferença de pressão) forem mencionadas. Quando um objeto de ensaio tem um volume constante, a sua taxa de vazamento é calculada através da equação 3.13.

$$q_L = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot V \quad (\text{equação 3.13})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento, em $[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}]$;
- Δp é a variação de pressão do objeto de ensaio, em $[\text{mbar}]$;
- Δt é o intervalo de tempo, em $[\text{s}]$;
- V é o volume do objeto de ensaio, em $[\ell]$.

A variação da pressão em função do tempo expressa na equação 3.13 (não confundir com Δp da equação 3.11) pode significar uma variação de pressão total

(processo de variação de pressão) ou, também, uma variação da pressão parcial (processo de gás de ensaio).

As causas da ocorrência de vazamento são numerosas e muito diversificadas. Além das causas correlacionadas com o material, como a existência de trinca, poro ou outras descontinuidades no objeto ou em suas soldas, defeitos de fabricação ou manipulação e utilização incorretas dos elementos de vedação também podem ocasionar vazamento.

3.3.1 Especificação de estanqueidade

É comum mencionar a estanqueidade especificada para um objeto quando se realiza ensaio de estanqueidade. A estanqueidade especificada normalmente é expressa na forma de maior taxa de vazamento admissível ($q_{L,adm}$). Neste caso, as condições de realização do ensaio devem ser estabelecidas de uma maneira bastante clara. Um objeto é considerado estanque quando, sob condições bem específicas, a taxa de vazamento total é menor que a maior taxa de vazamento admissível ($q_L < q_{L,adm}$).

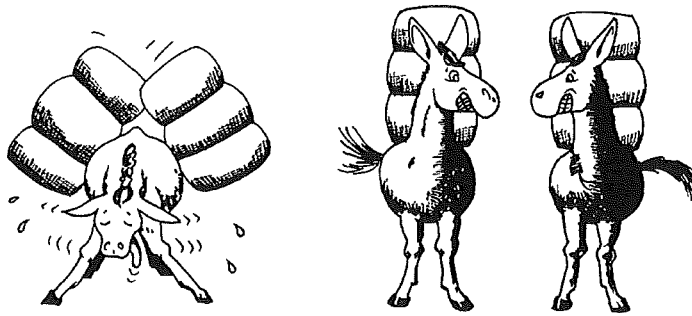
A taxa de vazamento admissível para um objeto que esteja sendo ensaiado ou em serviço pode ser relativa às condições normais de temperatura e pressão. Quando as condições de ensaio variam, a taxa de vazamento admissível deve ser corrigida. Neste caso, tem-se que levar em consideração a influência da pressão, conforme mostram as equações 3.14 e 3.15. Este assunto será visto mais detalhadamente adiante.

$$q_L \sim p_2^2 - p_1^2 \quad (\text{para escoamento laminar}) \quad (\text{equação 3.14})$$

$$q_L \sim p_2 - p_1 \quad (\text{para escoamento molecular}) \quad (\text{equação 3.15})$$

A taxa de vazamento admissível pode ser mais facilmente entendida quando é expressa em $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, sob condições normais de temperatura e pressão, em vez de $\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, conforme mostrado no exemplo a seguir. Uma taxa de vazamento admissível $q_{L,adm} \leq 1 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ pode ser, à primeira vista, difícil de ser compreendida por algumas pessoas. Esta taxa de vazamento admissível significa que em 10^5 s , ou cerca de 28 h, um recipiente só pode deixar escapar para a atmosfera no máximo um volume de gás de 1 cm^3 .

Ao se escolher o processo de ensaio a ser empregado em uma dada inspeção e avaliar a sua eficiência, freqüentemente ocorrem algumas incoerências. Por exemplo, se o limite de detecção do método da bolha, sob determinadas condições especiais de ensaio, é $q_L \approx 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, então, sob o ponto de vista econômico, este ensaio não seria mais realizável, visto que para uma bolha de 1 mm^3 de volume se desprender, haveria necessidade de transcorrer 10^3 s , ou seja, aproximadamente 17 minutos.



[1.1]

Escoamento de Gases em Vazamentos

- 4.1 Escoamento viscoso
 - 4.1.1 Escoamento turbulento
 - 4.1.2 Escoamento laminar
- 4.2 Escoamento molecular
- 4.3 Escoamento transiente

4 Escoamento de gases em vazamentos

4.1 Escoamento viscoso

Quando a pressão em um dado objeto é maior do que aproximadamente 10^{-2} mbar, então as partículas de gás ou de vapor que se encontram em seu interior se comportam como um líquido. A distância entre estas partículas é tão pequena, que elas se chocam constantemente umas contra as outras. Ao serem retiradas do objeto com uma bomba de vácuo, ou saírem dele devido à existência de uma diferença de pressão, elas fluem juntas, sendo este escoamento denominado viscoso. O escoamento viscoso é dividido em dois grupos:

- escoamento viscoso turbulento;
- escoamento viscoso laminar.

A tabela 4.1 permite identificar o tipo de escoamento que ocorre quando se conhece a taxa de vazamento.

Tabela 4.1: Tipo de escoamento de um gás em função da taxa de vazamento [1.2].

Escoamento	Taxa de vazamento, q_L [mbar·ℓ·s ⁻¹]
Turbulento	$> 10^{-2}$
Laminar	10^{-1} a 10^{-4}
Transiente	10^{-4} a 10^{-7}
Molecular	$< 10^{-7}$

4.1.1 Escoamento turbulento

O escoamento turbulento ocorre como um turbilhão (figura 4.1) e acontece somente quando a taxa de vazamento é grande e a pressão elevada. Para isto, é necessário que a velocidade do fluxo de gás seja elevada. Apenas o vazamento com escoamento turbulento "assobia", de forma que o local que está emitindo som, ou ultra-som,

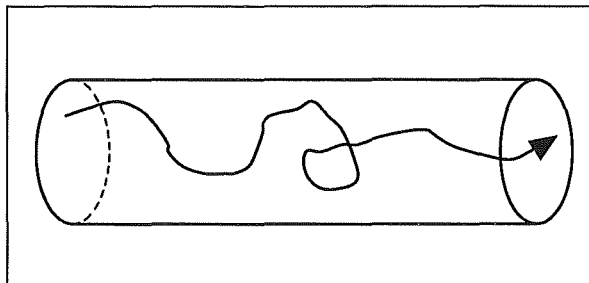


Figura 4.1:
Ilustração do caminho percorrido por uma partícula de gás em um vazamento de gás em um vazamento com escoamento turbulento.

pode ser localizado. Como a taxa de vazamento em um escoamento turbulento é grande, normalmente não há necessidade de medi-la, bastando simplesmente detectar o local do vazamento e realizar seu reparo.

4.1.2 Escoamento laminar

O escoamento laminar de um gás é definido como sendo aquele que ocorre em um tubo quando as partículas de gás se movimentam paralelamente às paredes do tubo. Neste caso, a distribuição da velocidade das partículas de gás ao longo da seção transversal do tubo é parabólica, conforme ilustra a figura 4.2. Nesta figura, as setas simbolizam o valor da velocidade das partículas de gás em relação às paredes do tubo.

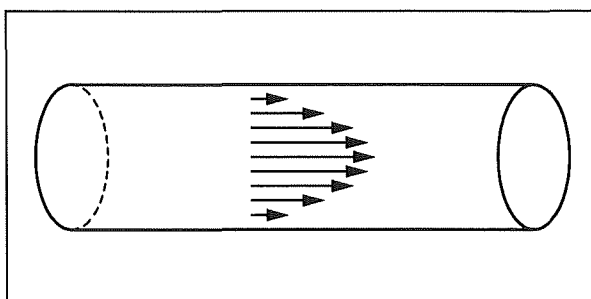


Figura 4.2:
Escoamento laminar de partículas de gás em um tubo.

A equação mais empregada na determinação do escoamento laminar de um gás é a de Poiseville (equação 4.1). Esta equação descreve o comportamento de um gás com escoamento laminar dentro de um tubo capilar reto e com seção transversal circular.

$$q_{L, \text{lam}} = \frac{\pi \cdot r^4}{16 \cdot \eta \cdot \ell} \cdot (p_1^2 - p_2^2) \quad (\text{equação 4.1})$$

onde

- $q_{L, \text{lam}}$ é a taxa de vazamento quando se tem escoamento laminar, em $[\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$;
- r é o raio do tubo capilar reto com seção transversal circular, em $[\text{m}]$;
- η é a viscosidade do gás, em $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$;
- ℓ é o comprimento do tubo capilar reto com seção transversal circular, em $[\text{m}]$;
- p_1 é a pressão maior, em $[\text{Pa}]$;
- p_2 é a pressão menor, em $[\text{Pa}]$.

Quando se supõe que as dimensões de uma descontinuidade através da qual ocorre um vazamento, que geralmente não são conhecidas, não mudam durante a detecção

de vazamento ou ao longo do ensaio de estanqueidade, então pode-se agrupar a constante π e os fatores geométricos (r e ℓ) da equação 4.1 em um único fator (K). Tem-se, então, a equação 4.2.

$$q_{L, \text{lam}} = K \cdot \frac{p_1^2 - p_2^2}{\eta} \quad (\text{equação 4.2})$$

sendo

$$K = \frac{\pi \cdot r^4}{16 \cdot \ell} \quad (\text{equação 4.3})$$

Quando a diferença de pressão entre os dois lados da descontinuidade varia, porém o gás é o mesmo, então a taxa de vazamento varia proporcionalmente com a diferença do quadrado da pressão, de acordo com as equações 4.4 e 4.5.

$$q_A : (p_{A1}^2 - p_{A2}^2) = q_B : (p_{B1}^2 - p_{B2}^2) \quad (\text{equação 4.4})$$

$$\frac{q_A}{p_{A1}^2 - p_{A2}^2} = \frac{q_B}{p_{B1}^2 - p_{B2}^2} \quad (\text{equação 4.5})$$

onde

- q_A é a taxa de vazamento quando o ensaio é realizado na condição A;
- p_{A1} é a pressão maior quando o ensaio é realizado na condição A;
- p_{A2} é a pressão menor quando o ensaio é realizado na condição A;
- q_B é a taxa de vazamento quando o ensaio é realizado na condição B;
- p_{B1} é a pressão maior quando o ensaio é realizado na condição B;
- p_{B2} é a pressão menor quando o ensaio é realizado na condição B;

sendo

- condição A quando se tem p_{A1} e p_{A2} ;
- condição B quando se tem p_{B1} e p_{B2} .

Pode-se aumentar a taxa de vazamento aumentando-se a pressão de ensaio. É possível diminuir o custo da inspeção de grandes objetos quando eles são inspecionados com gás de ensaio e se usa sonda aspiradora, visto que neste caso é possível trabalhar com uma concentração de gás de ensaio pequena sem diminuir a sensibilidade do ensaio. As prescrições de segurança relativas às pressões empregadas devem, naturalmente, ser respeitadas quando se utiliza o recurso do aumento da pressão de ensaio. A seguir, é apresentado um exemplo interessante sobre a diferença de taxa de vazamento quando se usa sonda aspiradora e o processo de realização de vácuo.

Exemplo 1

Este exemplo é bastante interessante, pois mostra a diferença entre a taxa de vazamento obtida em um ensaio com o recipiente sob pressão (sonda aspiradora) e a taxa de vazamento obtida no mesmo recipiente com vácuo. A geometria da descontinuidade por onde passa o gás, o gás e a diferença de pressão empregada na inspeção em ambos os casos, que é de 1 bar, são iguais. A única diferença é que no ensaio realizado com vácuo tem-se uma diferença de pressão de 1 bar para "zero bar" e no ensaio com a sonda aspiradora tem-se uma diferença de pressão de 2 bar para 1 bar (pressão absoluta).

- Técnica do vácuo: $q_A = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$
 $p_{A1} = 1 \text{ bar}$
 $p_{A2} = 0 \text{ bar}$

- Técnica da sonda: $q_B = ?$
 $p_{B1} = 2 \text{ bar}$
 $p_{B2} = 1 \text{ bar}$

$$q_B = \frac{5 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} \cdot (2 \text{ bar}^2 - 1 \text{ bar}^2)}{1 \text{ bar}^2 - 0 \text{ bar}^2} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Neste exemplo, pode-se constatar que a taxa de vazamento quando se emprega a técnica da sonda aspiradora é três vezes maior do que aquela quando se realiza o ensaio com vácuo, apesar da diferença de pressão ser a mesma em ambos os casos.

Observando-se a equação 4.1, constata-se que a taxa de vazamento em regime de escoamento laminar é inversamente proporcional à viscosidade do gás. Isto significa que se o gás mudar, então a taxa de vazamento também irá variar. A tabela 4.2 apresenta a viscosidade a 15°C dos gases mais comuns. Como se verifica nesta tabela, as viscosidades dos diferentes gases são aproximadamente iguais.

Tabela 4.2: Viscosidade a 15°C de alguns gases conhecidos.

Gás	Viscosidade a 15°C, η [Pa·s]
Ar	$18,0 \cdot 10^{-6}$
Nitrogênio	$16,3 \cdot 10^{-6}$
Oxigênio	$19,9 \cdot 10^{-6}$
Argônio	$22,0 \cdot 10^{-6}$
Hélio	$19,2 \cdot 10^{-6}$
Freon (R12)	$11,6 \cdot 10^{-6}$
Freon (R22)	$12,0 \cdot 10^{-6}$

A tabela 4.3 apresenta o fator de conversão da taxa de vazamento de hélio ($q_{L,He}$) em taxa de vazamento de um outro gás ($q_{L,gás}$) quando se tem escoamento laminar. Como pode ser observado nesta tabela, no caso de escoamento laminar, a diferença entre as taxas de vazamento do hélio e do ar é de apenas 8 %, isto é, menor que a precisão de medida dos detectores de hélio. Daí o fato de se utilizar na prática o mesmo valor para a medida da taxa de vazamento do hélio quando se utiliza uma mistura ar-hélio. Por exemplo, ao se utilizar uma mistura de 90 % de ar com 10 % de hélio, pode-se dizer que a taxa de vazamento mostrada é 10 % da taxa de vazamento total. Neste caso o erro de medida é menor ainda (90 % dos 8 % ou seja 0,064).

Tabela 4.3: Cálculo da taxa de vazamento de diferentes gases (em escoamento laminar) a partir da taxa de vazamento do hélio ($q_{L,He}$).

Conversão de $q_{L,He}$ para taxa de vazamento de	Multiplicar $q_{L,He}$ por (fator de conversão)
Argônio	0,883
Neônio	0,626
Hidrogênio	2,23
Nitrogênio	1,12
Ar	1,08
Vapor	2,09

4.2 Escoamento molecular

O escoamento molecular ocorre em pequenos vazamentos e a baixas pressões (veja tabela 4.1). No escoamento molecular, também através de uma descontinuidade com geometria de um tubo capilar fictício com seção transversal circular, as partículas de gás se deslocam independentemente umas das outras. O livre percurso médio destas partículas é maior que o diâmetro do tubo capilar por onde ocorre o vazamento, sendo que desta forma é possível uma partícula de gás

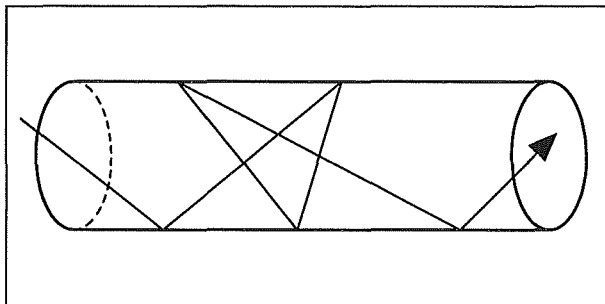


Figura 4.3:
Ilustração do caminho percorrido por uma partícula em um vazamento com escoamento molecular.

caminhar em sentido contrário ao sentido da queda de pressão, ou seja, ao do fluxo gasoso. Neste caso, as partículas de gás não se tocam, ocorrendo apenas sua colisão com as paredes do capilar. Apesar da possibilidade de ocorrer um contra-fluxo, o fluxo principal de partículas no escoamento molecular segue do lado onde reina elevada pressão para o lado onde se tem baixa pressão (figura 4.3).

A equação 4.6, denominada equação de Knudsen, permite determinar a taxa de vazamento em regime de escoamento molecular.

$$q_{L,mol} = \frac{\sqrt{2\pi}}{6} \cdot \sqrt{\frac{RT}{M}} \cdot \frac{d^3}{\ell} \cdot (p_1 - p_2) \quad (\text{equação 4.6})$$

onde

- $q_{L,mol}$ é a taxa de vazamento quando se tem escoamento molecular;
- R é a constante universal dos gases;
- T é a temperatura absoluta;
- M é o peso molecular;
- d é o diâmetro do tubo capilar reto com seção transversal circular;
- ℓ é o comprimento do tubo capilar reto com seção transversal circular;
- p_1 é a pressão maior;
- p_2 é a pressão menor.

A equação de Knudsen mostra que, ao contrário do escoamento laminar, no escoamento molecular a taxa de vazamento é diretamente proporcional à diferença de pressão (equação 4.7). A conversão da taxa de vazamento de um determinado gás em taxa de vazamento de outro gás quando se utiliza o método de inspeção da variação de pressão e se tem escoamento em regime molecular é feita de acordo com a equação 4.8.

$$q_A : (p_{A1} - p_{A2}) = q_B : (p_{B1} - p_{B2}) \quad (\text{equação 4.7})$$

$$\frac{q_A}{p_{A1} - p_{A2}} = \frac{q_B}{p_{B1} - p_{B2}} \quad (\text{equação 4.8})$$

onde

- q_A é a taxa de vazamento quando o ensaio é realizado na condição A;
- p_{A1} é a pressão maior quando o ensaio é realizado na condição A;
- p_{A2} é a pressão menor quando o ensaio é realizado na condição A;
- q_B é a taxa de vazamento quando o ensaio é realizado na condição B;
- p_{B1} é a pressão maior quando o ensaio é realizado na condição B;
- p_{B2} é a pressão menor quando o ensaio é realizado na condição B;

sendo

- condição A quando se tem p_{A1} e p_{A2} ;
- condição B quando se tem p_{B1} e p_{B2} .

No escoamento molecular, segundo a equação 4.6, a taxa de vazamento é inversamente proporcional à raiz quadrada do peso molecular do gás. Conseqüentemente, ao contrário do que ocorre no caso do escoamento laminar, no escoamento molecular pode haver uma grande diferença nas taxas de vazamento quando se tem diferentes gases (equação 4.9). Esta diferença da taxa de vazamento pode ser mais facilmente constatada nos exemplos apresentados a seguir.

$$\frac{q_A}{q_B} = \frac{\sqrt{M_B}}{\sqrt{M_A}} \quad (\text{equação 4.9})$$

Exemplo 2

Qual a taxa de vazamento de ar de um objeto que apresenta uma taxa de vazamento de hélio de $1 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$?

- Taxa de vazamento de ar: $q_{L,ar} = ?$
- Taxa de vazamento de hélio: $q_{L,He} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$
- Peso molecular do hélio: $M_{He} = 4 \text{ g}$
- Peso molecular do ar: $M_{ar} = 29 \text{ g}$

$$q_B = \frac{q_A \sqrt{M_A}}{\sqrt{M_B}} = \frac{1 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} \sqrt{4 \text{ g}}}{\sqrt{29 \text{ g}}} = 3,7 \cdot 10^{-9} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Os catálogos de equipamentos de detecção de vazamento de hélio geralmente apresentam, ao lado da menor taxa de vazamento de hélio detectável, a taxa de vazamento de ar equivalente, que é 2,7 vezes menor que a menor taxa de vazamento de hélio detectável. Isto pode gerar erros, visto que este fator de conversão só é válido para o escoamento molecular, e não para toda a faixa de medição do equipamento de detecção de vazamento de hélio.

Exemplo 3

Na indústria de refrigeração é comum especificar a taxa de vazamento na forma de perda de massa em um determinado intervalo de tempo. A perda de 0,01 g de freon (R12) por ano corresponde a uma taxa de vazamento de $6,4 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. No caso de escoamento molecular, e para uma diferença de pressão constante, qual é a taxa de vazamento de hélio?

- Taxa de vazamento de hélio: $q_{L,He} = ?$
- Taxa de vazamento de freon (R12): $q_{L,R12} = 6,4 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$
- Peso molecular do hélio: $M_{He} = 4$
- Peso molecular do freon (R12): $M_{R12} = 121$

$$q_A = \frac{q_B \sqrt{M_B}}{\sqrt{M_A}} = \frac{6,4 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} \sqrt{121 \text{ g}}}{\sqrt{4 \text{ g}}} = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

O exemplo 3 não corresponde à realidade, pois na prática o vazamento de freon ocorre em regime de escoamento laminar (os fabricantes de equipamentos de refrigeração garantem uma taxa de vazamento máxima entre 1 e 10 gramas por ano, ou seja, uma taxa de vazamento bem maior que a usada neste exemplo). Este exemplo serviu apenas para mostrar que a taxa de vazamento de freon é 5,5 vezes menor que a de hélio. A tabela 4.4 apresenta o fator de conversão da taxa de vazamento de hélio para a taxa de vazamento de um outro gás quando se tem escoamento molecular.

Tabela 4.4: Fator de conversão para o cálculo da taxa de vazamento de diferentes gases (em escoamento molecular) a partir da taxa de vazamento do hélio.

Conversão de $q_{L,He}$ para taxa de vazamento de	Multiplicar $q_{L,He}$ por (fator de conversão)
Argônio	0,316
Neônio	0,447
Hidrogênio	1,410
Nitrogênio	0,374
Ar	0,374
Vapor	0,469

4.3 Escoamento transiente

A transição do escoamento laminar para o escoamento molecular ocorre gradualmente. Ambos os escoamentos coexistem no escoamento transiente, porém primeiro um, e depois o outro, prevalece. Isto pode ser melhor compreendido caso se imagine que logo após o gás entrar no capilar reina o escoamento laminar, e que pouco antes das partículas de gás abandonarem o capilar elas se movimentam com escoamento molecular. A representação matemática do escoamento transiente é bastante difícil. Existem várias equações que descrevem este tipo de escoamento de um gás, porém todas apresentam algum tipo de restrição. A equação mais simples empregada no cálculo do escoamento transiente é a de Burrow (equação 4.10), que combinou, em uma única expressão matemática, os escoamentos laminar e molecular.

$$q_{L,trans} = \frac{\pi \cdot r^4}{16 \cdot \eta \cdot \ell} \cdot (p_1^2 - p_2^2) + \frac{\sqrt{2} \pi}{6} \cdot \sqrt{\frac{RT}{M}} \cdot \frac{d^3}{\ell} \cdot (p_1 - p_2) \quad (\text{equação 4.10})$$

onde

- $q_{L,trans}$ é a taxa de vazamento quando se tem escoamento transiente;
- r é o raio do tubo capilar reto com seção transversal circular;
- η é a viscosidade do gás;
- ℓ é o comprimento do tubo capilar reto com seção transversal circular;
- p_1 é a pressão maior;
- p_2 é a pressão menor;
- R é a constante universal dos gases;
- T é a temperatura absoluta;
- M é o peso molecular;
- d é o diâmetro do tubo capilar reto com seção transversal circular.

A equação 4.10 é empregada quando se deseja calcular aproximadamente a taxa de vazamento em regime de escoamento transiente através de um tubo capilar ideal e fictício (tubo reto de seção transversal circular e com comprimento maior que o diâmetro). Neste caso, estima-se se o escoamento que prevalece é o laminar ou o molecular e, então, emprega-se a equação de Poiseville (equação 4.1) ou de Knudsen (equação 4.6) para calcular as dimensões do tubo capilar ideal e fictício.

Ao se realizar cálculos referentes a ensaios de detecção de vazamento e de estanqueidade, como aqueles apresentados neste capítulo, é preciso tomar cuidado com as unidades, isto é, as unidades de uma equação devem estar absolutamente corretas. Com o objetivo de realçar ainda mais a importância das unidades nos cálculos, é apresentado, a seguir, um exemplo empregando a equação de escoamento laminar (Poiseville).

$$q_{L,lam} = \frac{\pi \cdot r^4}{16 \cdot \eta \cdot \ell} \cdot (p_1^2 - p_2^2)$$

$$q_{L,lam} = \left[\frac{\text{Pa}^2 \cdot \text{m}^4}{\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}} \right] = \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{s}} \right] = \left[\frac{\text{mbar} \cdot \ell}{\text{s}} \right]$$

Medidores de Pressão e Vácuo

- 5.1 Introdução
- 5.2 Medidores de pressão total
 - 5.2.1 Medidores de pressão total independentes do tipo de gás
 - 5.2.1.1 Manômetro Bourdon
 - 5.2.1.2 Manômetro de extensômetro
 - 5.2.1.3 Manômetro piezorresistivo
 - 5.2.1.4 Manômetro piezelétrico
 - 5.2.1.5 Manômetro capacitivo
 - 5.2.2 Medidores de pressão total dependentes do tipo de gás
 - 5.2.2.1 Manômetro de condutibilidade térmica
 - 5.2.2.2 Manômetro de viscosidade
 - 5.2.2.3 Manômetro de ionização de catodo frio
- 5.3 Equipamentos de medição de pressão parcial
 - 5.3.1 Espectrômetro de massa de campo setorial
 - 5.3.2 Espectrômetro de massa quadrupolo
- 5.4 Instrumentos empregados no processo de variação de pressão
 - 5.4.1 Manômetros de sobrepressão
 - 5.4.2 Manômetros de vácuo
- 5.5 Instrumentos de detecção de gás de ensaio
 - 5.5.1 Detecção na atmosfera
 - 5.5.1.1 Detecção com transdutor de condutibilidade térmica
 - 5.5.2 Detecção no vácuo
 - 5.5.2.1 Detecção com manômetro dependente do tipo de gás
 - 5.5.2.2 Detecção com espectrômetro de massa

5 Medidores de pressão e vácuo

5.1 Introdução

A medição de pressão é a mais importante das medições feitas nos ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade. As medidas de pressão vão de valores infinitamente pequenos, denominados ultra-alto vácuo, até aqueles extremamente elevados, como mais de 100 bar. O instrumento que mede pressão é denominado manômetro, sendo que a diversidade de manômetros existentes é muito maior que a de outros instrumentos de medição. Neste capítulo são apresentados os medidores de pressão mais empregados nos ensaios não destrutivos de localização de vazamento e de estanqueidade, bem como descritos seus princípios gerais de funcionamento e comentadas suas características mais importantes.

5.2 Medidores de pressão total

Os manômetros de pressão total são classificados, de acordo com o tipo de pressão citado na norma DIN 1314 [3.1], em basicamente três tipos:

- de pressão absoluta (pressão física);
- de pressão diferencial (pressão exercida sobre um outro sistema);
- de sobrepressão (pressão positiva) ou de subpressão (pressão negativa, expressão esta que não é mais aceita).

Ao se determinar a taxa de vazamento, geralmente se emprega um manômetro de pressão absoluta, pois, caso contrário, a variação da pressão atmosférica impossibilitaria a constatação da presença de um vazamento. Em casos especiais, também pode ser conveniente o emprego de um manômetro de pressão diferencial. Um manômetro de sobrepressão pode ser no máximo empregado na realização de ensaios grosseiros e quando não se tem disponível um manômetro de pressão absoluta.

5.2.1 Medidores de pressão total independentes do tipo de gás

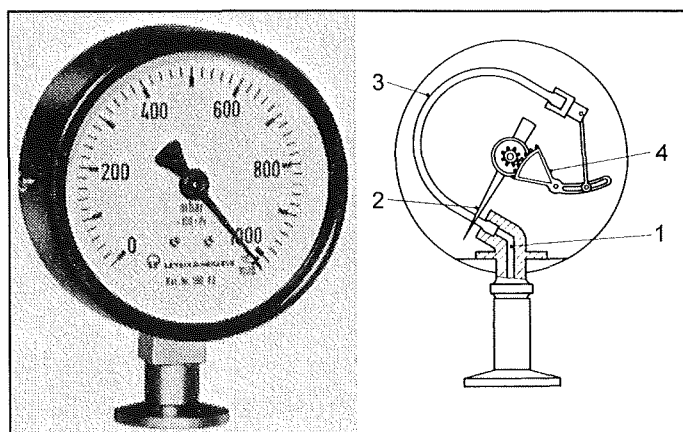
O medidor de pressão que independe do tipo de gás é um instrumento que mede a pressão como força mecânica atuante por unidade de área. Trata-se, na maioria das vezes, de um instrumento que contém um transdutor constituído de um elemento elástico (normalmente uma membrana), com uma determinada área, cuja deflexão, sob a ação de determinada força de pressão, é o parâmetro empregado na medida da pressão reinante. Este princípio é usado quase que exclusivamente em manômetros de sobrepressão, mas também pode ser empregado na fabricação de manômetros especiais de vácuo. A membrana geralmente é de metal, mas também pode ser de cerâmica ou silício (no caso de transdutor semicondutor). Alguns manômetros podem conter, simultaneamente, uma membrana e uma haste flexível

ou uma mola como elemento elástico. Neste caso, porém, a membrana serve somente como meio de separação, não atuando como elemento elástico.

Para medir a pressão, de qualquer maneira, há necessidade de se medir uma distância (deflexão da membrana), sendo que os diferentes métodos empregados na medição desta distância conferem seus nomes aos diversos tipos de manômetros. Neste livro serão abordados somente os manômetros de pressão total mais empregados nos ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade. Todos os tipos mencionados são geralmente encontrados no mercado como modelos de pressão absoluta, de pressão diferencial ou de sobrepressão.

5.2.1.1 Manômetro Bourdon

No manômetro Bourdon (figura 5.1), a pressão a ser medida atua em um tubo encurvado, geralmente com forma de semicírculo (em "C"), denominado tubo de Bourdon. O tubo de Bourdon, que além da forma em "C" também pode ser encontrado na forma de espiral ou de hélice, é nada mais nada menos que um tubo redondo, que é achatado e depois dobrado em "C", espiral ou hélice. Este tubo é lacrado em uma de suas extremidades e fixado a um mecanismo de indicação. Quando a pressão atuante sobre a extremidade aberta do tubo de Bourdon aumenta, a curvatura do tubo também aumenta. Ao tender a endireitar-se, o tubo de Bourdon exerce uma força que movimenta, na maioria da vezes, um setor dentado, cuja função é ampliar a intensidade do movimento do tubo, facilitando, desta maneira, a leitura da medida e aumentando a sua resolução. No caso do manômetro de hélice, a pressão acarreta uma deformação de uma membrana, sendo esta deformação transferida para um ponteiro por meio de um dispositivo mecânico constituído de um segmento dentado e um pinhão. Os manômetros deste tipo têm uma precisão limitada, porém são muito baratos. Em alguns casos, eles podem possuir uma saída elétrica.

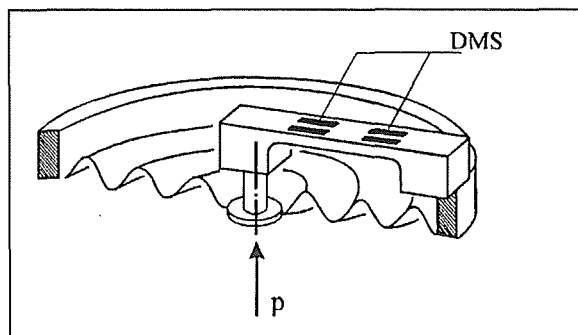


- 1 Conexão do tubo de Bourdon com o flange
- 2 Ponteiro
- 3 Tubo de Bourdon
- 4 Segmento dentado

Figura 5.1:
Manômetro de Bourdon (vista frontal e seção esquemática) [1.3].

5.2.1.2 Manômetro de extensômetro

Transdutor é um dispositivo que converte um tipo de movimento ou sinal em um outro. No caso do transdutor de pressão, um movimento mecânico gerado por forças de pressão é convertido em um sinal elétrico ou eletrônico que, por sua vez, é empregado na medição ou no controle da pressão. O manômetro de extensômetro possui, como seu próprio nome sugere, um transdutor de pressão de extensômetro (figura 5.2). A pressão a ser medida deforma uma membrana ou uma haste flexível, sendo esta deformação, então, medida pelo extensômetro. Neste caso, há necessidade de se determinar, na maioria das vezes através de uma ponte de Wheatstone de grande sensibilidade, a variação da resistência à passagem de corrente elétrica que ocorre no extensômetro fixado na membrana ou na haste flexível, variação esta devida à mudança de sua seção transversal. Transdutores de pressão deste tipo medem com muita precisão pressões com uma dinâmica relativamente pequena (na maioria das vezes a pressão é medida dentro de uma faixa de uma ordem de grandeza) e têm uma relação preço/rendimento muito boa, visto que podem ser fabricados em série.

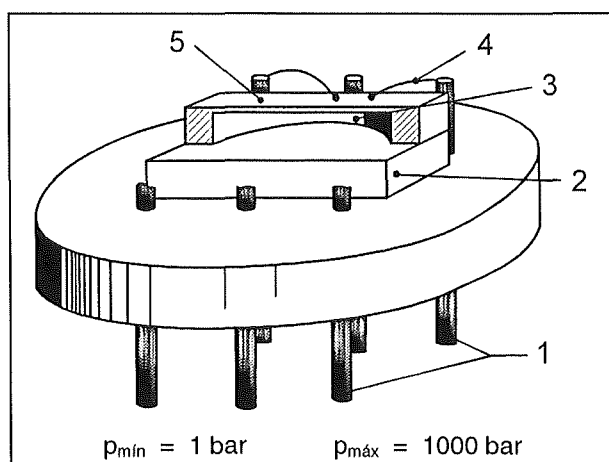


DMS = Extensômetro
 p = Pressão

Figura 5.2:
 Transdutor de pressão de extensômetro [1.2].

5.2.1.3 Manômetro piezorresistivo

O transdutor de um manômetro piezorresistivo (figura 5.3) possui uma membrana de silício, cuja deflexão é medida diretamente em um chip. Esta deflexão é determinada medindo-se a resistência à passagem de corrente elétrica que é gerada diretamente na superfície da membrana. A variação de pressão provoca uma expansão ou contração da membrana de silício que, por sua vez, devido ao efeito piezorresistivo, acarreta uma variação de sua resistência elétrica. O valor desta resistência elétrica é, então, empregado na determinação da pressão reinante. A vantagem do manômetro piezorresistivo é o seu pequeno tamanho e reduzido preço. Sua desvantagem, porém, é que o valor de pressão zero se desloca bastante quando se tem variações de temperatura, o que limita sua dinâmica (pressão medida no máximo em uma faixa de três ordens de grandeza). Além disso, há necessidade de usar uma membrana de separação quando se mede a pressão na presença de meios corrosivos, visto que, nestes casos, a membrana de silício não é suficientemente resistente à ação da pressão.



- 1 Fonte de tensão e saída de sinal
- 2 Base de silício
- 3 Vácuo de ressonância
- 4 Resistência de medição
- 5 Membrana

Figura 5.3:
Transdutor de pressão
piezorresistivo [1.2].

5.2.1.4 Manômetro piezelétrico

O manômetro piezelétrico possui um transdutor (figura 5.4) constituído de um cristal piezelétrico, geralmente cristal de quartzo ou titanato de bário, que gera um sinal elétrico quando deformado fisicamente por pressão (não havendo, portanto, necessidade de emprego de fonte de tensão), sinal este que é medido em um amperímetro. Os transdutores piezoelétricos suportam elevadas temperaturas de serviço (150°C continuamente ou 230°C em operação intermitente, quando se emprega cristal de quartzo ou de titanato de bário), todavia só permitem medição de pressões que variam com o tempo (pressões dinâmicas), seja com baixa ou alta frequência de variação. Em vista disso, o manômetro piezelétrico não é muito adequado para a detecção de vazamento e a realização de ensaio de estanqueidade.

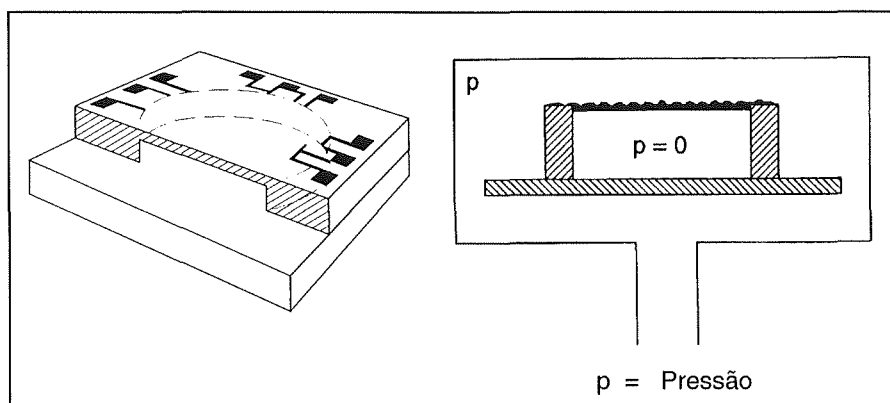
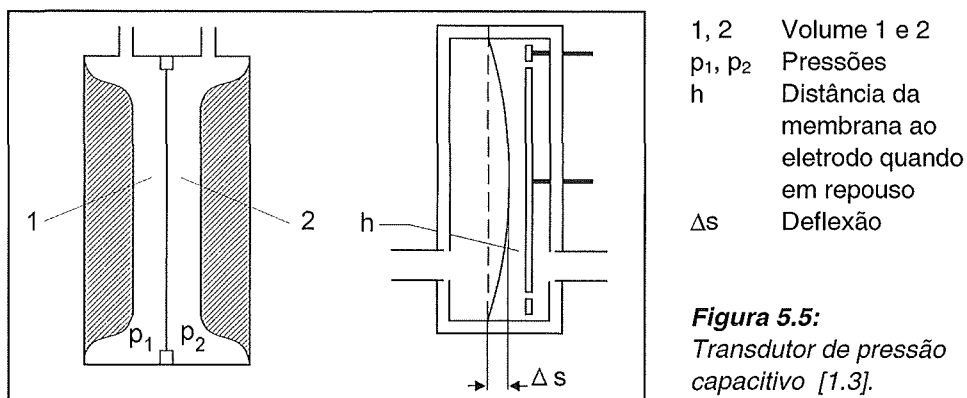


Figura 5.4: Transdutor de pressão piezelétrico [1.2].

5.2.1.5 Manômetro capacitivo

O deslocamento de uma placa de um capacitor simples induz uma variação da capacitância, variação esta que é utilizada como princípio de funcionamento do transdutor de pressão capacitivo. O transdutor de pressão do manômetro capacitivo (figura 5.5) é na realidade um diafragma flexível que atua como a placa móvel de um capacitor. Este diafragma se encontra separado da placa fixa do capacitor por meio de um dielétrico compressível, sendo o sistema inteiro montado dentro de uma caixa de pressão de capacidade adequada à pressão de aplicação. Este tipo de medida de deflexão do diafragma é muito sensível, o que torna possível o emprego deste instrumento na medição com precisão de pressões em uma faixa de 4 a 5 ordens de grandeza, como, por exemplo, de 10^3 mbar a 10^{-1} mbar. Além de possuírem frequência de resposta muito boa, os manômetros capacitivos apresentam outras vantagens, como a construção relativamente simples, a grande utilidade nas medições estáticas e dinâmicas, o deslocamento volumétrico pequeno para uma massa mínima de diafragma e resolução contínua. As desvantagens são o seu preço relativamente elevado e a sua limitada resistência mecânica, que o torna muito suscetível a danos quando muito solicitado. Os novos modelos de manômetro capacitivo vêm equipados com diafragma de material cerâmico e podem ser empregados na medição de pressão em ambiente corrosivo.

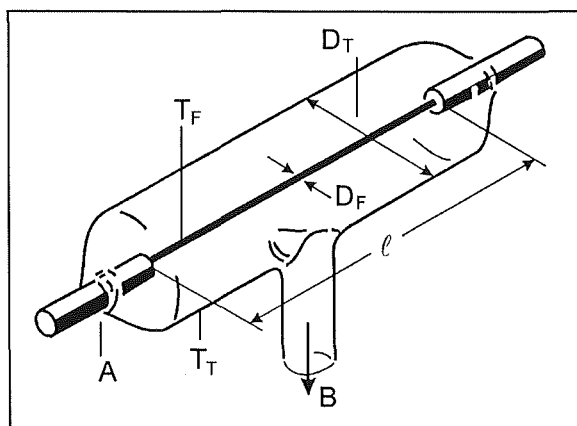


5.2.2 Medidores de pressão total dependentes do tipo de gás

Manômetros que dependem do tipo de gás medem indiretamente a pressão, visto que na realidade o que se mede são propriedades físicas que dependem da pressão. Estes instrumentos geralmente são empregados só para medir vácuo, pois, neste caso, a força que atua em uma dada superfície é pequena, não permitindo uma medida direta da mesma. Além da condutividade térmica e da viscosidade, a densidade de partículas no vácuo também é usada na medição da pressão. Todos os manômetros deste tipo medem a pressão absoluta, pelo fato de utilizarem uma propriedade física do gás para medir a sua pressão.

5.2.2.1 Manômetro de condutibilidade térmica

O manômetro de condutibilidade térmica baseia-se no princípio de que a condutividade térmica de um gás na faixa de pressão de 10 mbar a 10^{-3} mbar é proporcional à sua pressão total. Tanto esta faixa de pressão como o valor absoluto da condutividade térmica dependem bastante do tipo de gás em questão, de maneira que a pressão "real" só pode ser determinada com o auxílio da curva de calibração correspondente. Por outro lado, a construção de um manômetro de condutibilidade térmica é muito simples e barata. O manômetro Pirani, por exemplo, possui um transdutor de pressão constituído somente de um arame fino (diâmetro na faixa de micron) dentro de um tubo (de diâmetro também na faixa de micron) mantido a uma temperatura constante, conforme ilustra a figura 5.6. Se o arame for aquecido com uma potência constante, então a sua temperatura (ou seja, a sua resistência elétrica) pode ser usada como parâmetro de condução de calor para o tubo e, desta maneira, para medir a pressão. O tempo que o instrumento necessita para acusar uma mudança de pressão é grande, visto que o filamento precisa atingir uma nova temperatura. Com o objetivo de diminuir este tempo, utiliza-se um instrumento que trabalha segundo o princípio da temperatura constante, sendo a potência elétrica utilizada empregada na medida da pressão. Devido à perda inevitável de calor por irradiação e condução, a curva característica pressão / temperatura para pressões elevadas e baixas é plana. A faixa de pressão em que este instrumento de medição trabalha vai, em vista disso, de somente de cerca de 10^2 mbar a aproximadamente 10^{-3} mbar. A qualidade do transdutor de pressão de condutibilidade térmica depende bastante da maneira como é realizada a compensação de temperatura do ambiente .



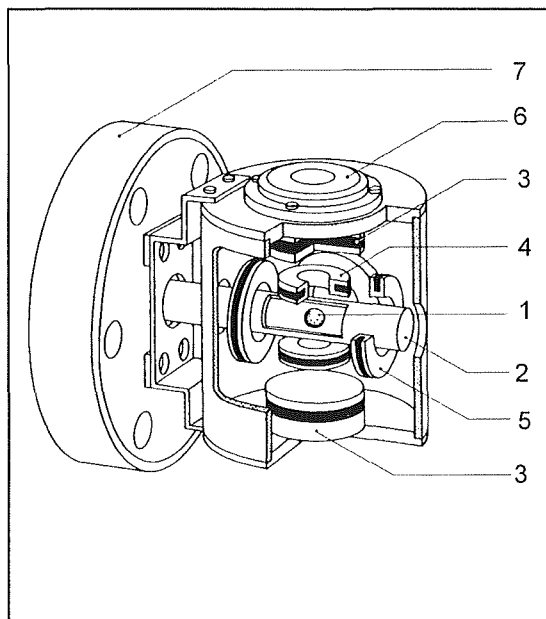
- D_F Diâmetro do filamento
- D_T Diâmetro do tubo
- l Comprimento do filamento
- T Temperatura
- A Dispositivo de fixação do arame e solda
- B Conexão com o recipiente

Figura 5.6:
Transdutor de pressão de condutibilidade térmica (Pirani) [1.2].

5.2.2.2 Manômetro de viscosidade

A pressão exercida por um determinado gás em regime de escoamento molecular depende da sua viscosidade, característica esta que constitui o princípio de construção do manômetro de viscosidade (figura 5.7). Se a pressão for menor que

10^{-2} mbar, o escoamento do gás é considerado como sendo molecular, sendo possível, portanto, o emprego do manômetro de viscosidade na sua medição. A medida da viscosidade de um gás é realizada determinando-se a frenagem de uma superfície que se movimenta rapidamente em um vácuo. Na maioria das vezes esta superfície em alta velocidade é a superfície de uma esfera de aço em rotação ou de um quartzo em vibração. Visto que a viscosidade dos diversos gases é muito diferente, este instrumento de medição depende do tipo de gás. O manômetro de viscosidade apresenta uma diferença decisiva em relação aos outros instrumentos de medição de vácuo que dependem do tipo do gás, que é a possibilidade de medir pressões na faixa de 10^{-2} mbar a 10^{-6} mbar com a maior precisão e estabilidade possíveis. Isto se deve ao fato de, principalmente no caso da esfera rotativa, ser possível calcular a pressão com elevada precisão levando-se em conta características básicas da esfera e do gás presente. Em vista disso, o manômetro de viscosidade é freqüentemente empregado como instrumento de calibração. O manômetro de viscosidade de esfera (também denominado "SRG" – Spinning Rotor Gauge) é um instrumento relativamente caro pelo fato de exigir um dispositivo eletrônico para controlar o movimento da esfera e interpretar os sinais obtidos, enquanto que se pode encontrar no mercado diversos modelos de manômetros de viscosidade de quartzo a preços bem acessíveis. Uma propriedade importante do manômetro de viscosidade, ao contrário do que ocorre no caso do manômetro de ionização, é o fato de não haver variação de composição química do gás residual. No caso do manômetro de ionização, esta variação pode constituir um efeito prejudicial.



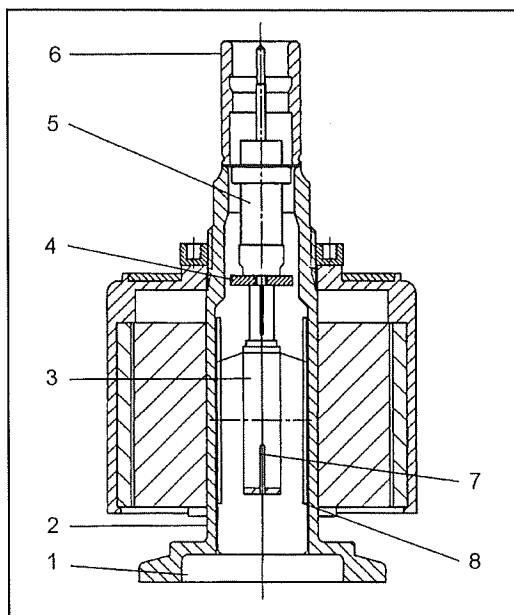
- 1 Esfera de aço inoxidável
- 2 Tubo de medição selado em uma das extremidades e soldado no flange 7
- 3 Ímã permanente
- 4 Bobina de estabilização
- 5 Quatro bobinas de acionamento
- 6 Libélula nível
- 7 Flange de conexão da unidade de medição com o sistema com vácuo

Figura 5.7:

Corte do transdutor de pressão de viscosidade do manômetro de viscosidade de esfera do tipo Viscovac[®], modelo UM210, da firma Leybold [1.3].

5.2.2.3 Manômetro de ionização de catodo frio

No caso do manômetro de catodo frio, mede-se a corrente elétrica gerada por moléculas de gás ionizadas que se chocam contra um eletrodo. Os íons, que são gerados inicialmente por meio de uma descarga de alta tensão no gás e, posteriormente, através do choque de elétrons com as moléculas e com os átomos deste gás, são, em sua grande maioria, íons positivos. Para aumentar a captura de íons, e com isso a sensibilidade do manômetro, emprega-se um campo magnético externo, que torna o percurso percorrido pelos elétrons o mais longo possível (os elétrons se movimentam fazendo uma trajetória circular ou cicloidal). A corrente de íons que se forma, e que é utilizada na medida da pressão, é da ordem de μA , caso a pressão não seja muito pequena, de maneira que ela pode ser medida sem a necessidade de emprego de dispositivo eletrônico complexo. Visto que a captura de íons durante a ionização varia, este princípio de funcionamento do instrumento de medida de pressão depende do tipo de gás. A faixa de pressão que pode ser medida com o manômetro de vácuo de ionização de catodo frio vai de aproximadamente 10^{-2} mbar a 10^{-10} mbar, ou até a pressões menores que esta última, de acordo com o tipo de instrumento. Os tipos de manômetros de ionização de catodo frio mais comuns são o Penning (eletrodo anelar ou de placa e campo magnético transversal), apresentado na figura 5.8, e o Magnetron (eletrodos cilíndricos concêntricos e campo magnético axial). A principal vantagem deste manômetro é o fato de ser um instrumento robusto. A precisão de medida, especialmente a sua linearidade e estabilidade durante longo tempo (indicação de pressão muito baixa quando se tem a presença de sujeira, como hidreto de carbono), não satisfaz às exigências mais severas. A relação preço/rendimento é boa.



- 1 Flange
- 2 Caixa
- 3 Anodo anelar com ignitor
- 4 Placa de cerâmica
- 5 Condutor de corrente
- 6 Conexão
- 7 Anodo
- 8 Chapa do catodo

Figura 5.8:

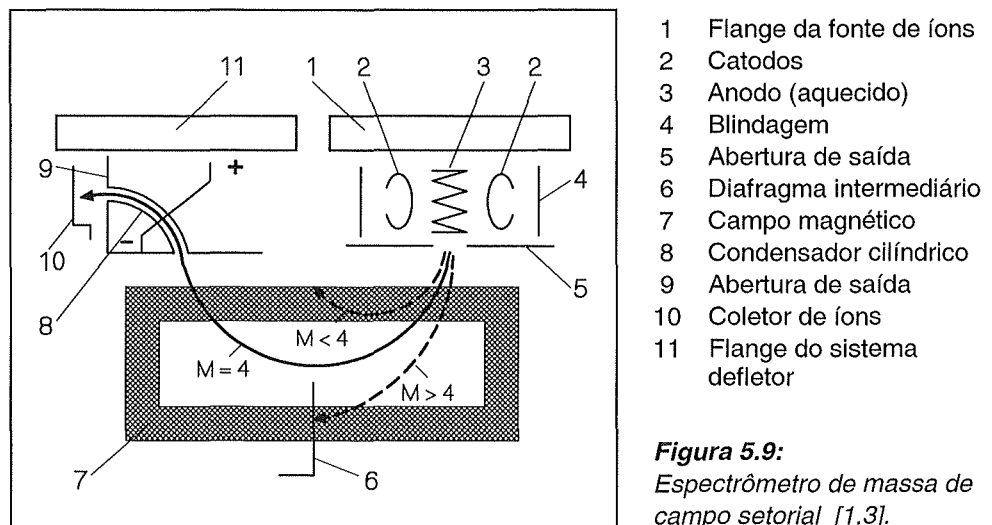
Desenho esquemático de uma seção transversal de um transdutor Penning (tipo Penningvac PR 35, da firma Leybold) [1.3].

5.3 Equipamentos de medição de pressão parcial

É possível medir com precisão a pressão parcial de um gás ou vapor em uma dada mistura gasosa. Esta medição da pressão parcial pode ser feita com maior precisão principalmente quando se tem vácuo, visto que, neste caso, as partículas de diferentes tipos de gás ou de vapor se movimentam independentemente umas das outras. O espectrômetro de massa é o equipamento de medição de pressão parcial no vácuo mais sofisticado que existe, porém sua utilização se limita à medição de pressão parcial quando a pressão total é menor que 10^{-4} mbar. Seu princípio de funcionamento é comparável ao do manômetro de ionização de catodo quente, mas ele possui um sistema de separação de íons atuando entre os setores de geração e de detecção de íons. Existem vários tipos de espectrômetro de massa, que se diferenciam uns dos outros pelos seus sistemas de separação de íons.

5.3.1 Espectrômetro de massa de campo setorial

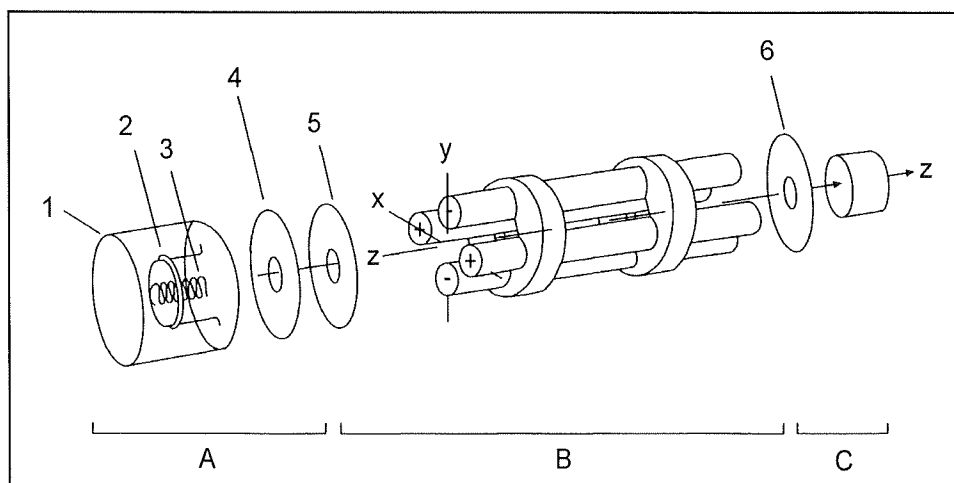
O espectrômetro de massa de campo setorial deve seu nome ao fato de possuir um ímã de formato setorial (figura 5.9), em cujo campo magnético ocorre a separação dos íons. Os íons com diferentes relações carga/massa (e/m) se movimentam, com energia constante, perpendicularmente ao campo magnético atuante, que faz com que eles percorram trajetórias circulares de diferentes raios. Um captador de íons, que se encontra fixo em uma determinada posição, identifica os íons que possuem uma determinada relação e/m preestabelecida. A corrente de íons de gás capturados é proporcional à pressão parcial que este gás exerce. Pode-se variar a energia de ionização ou o campo magnético, de maneira a detectar íons com outras relações e/m .



As vantagens do espectrômetro de massa de campo setorial são a sensibilidade constante para todos os tipos de íons, a elevada resolução que pode possuir e a boa estabilidade ao longo do tempo. Ele é, contudo, relativamente grande (quanto maior for, maior é a faixa de massa de íon detectável) e pesado, devido ao ímã que possui. Estes motivos fazem com que o espectrômetro de massa seja empregado mais na análise da composição química de gases. Para simplesmente verificar a presença de vazamentos, existem dispositivos específicos que detectam a presença de um determinado gás e que são instalados nos equipamentos de detecção de vazamento encontrados no mercado.

5.3.2 Espectrômetro de massa quadruplo

O espectrômetro de massa quadruplo (figura 5.10) é constituído de um sistema de separação de íons composto de quatro eletrodos, com uma geometria ideal (hiperbólica), formando, desta maneira, um campo elétrico quadruplo. Quando se sobrepõe a estes eletrodos um campo de alta tensão alternada de alta frequência (alguns MHz), é possível separar íons de diferentes relações e/m . Estes íons descrevem, então, trajetórias distintas, sendo que somente íons com uma determinada relação e/m preestabelecida conseguem atravessar o campo de alta



1 Blindagem	6 Diafragma de saída do quadrupolo
2 Catodo	
3 Anodo	A Fonte de íons
4 Diafragma de focalização	B Sistema quadrupolo
5 Diafragma de saída da fonte de íons (medição da pressão total)	C Detector de íons

Figura 5.10: Desenho esquemático mostrando o funcionamento de um espectrômetro de massa quadrupolo [1.3].

tensão. Uma característica deste princípio é o fato de, através de uma simples variação da amplitude de alta frequência, ser possível selecionar o tipo de íon que pode atravessar o campo magnético e, por meio de alteração do componente de tensão contínua, ser capaz de modificar a capacidade de resolução do espectrômetro. Esta característica, além do fato de ser um equipamento compacto sem ímã, fez com que este tipo de espectrômetro encontrasse ampla utilização na análise da composição química de gases residuais em alto e ultra-alto vácuo. Existe no mercado um número muito grande de modelos deste equipamento, cujos preços variam dentro de uma ampla faixa.

5.4 Instrumentos empregados no processo de variação de pressão

Nos itens a seguir serão abordados os manômetros de pressão total já descritos anteriormente, no que diz respeito à adequação destes instrumentos para a detecção de vazamento e para o ensaio de estanqueidade quando se emprega os processos de variação (aumento e queda) de pressão. Os critérios de seleção de um manômetro são a faixa de taxa de vazamento a ser medida, a influência dos parâmetros de ensaio mais importantes (especialmente a temperatura) e o seu preço. Na prática, entretanto, também é muito interessante saber quais são as influências que diferentes características dos instrumentos, que operam com o mesmo princípio, mas que são fabricados por diferentes empresas, podem ter na realização de um ensaio. As principais características de um manômetro são a sua robustez, confiabilidade, segurança e facilidade de operação. Não é possível, todavia, abordar neste livro todos estes tópicos com detalhes. Além disso, as áreas especiais de utilização de um determinado instrumento também são muito importantes. Por isso, antes de se adquirir estes instrumentos caros, é conveniente testá-los minuciosamente durante um determinado período e ser orientado por diferentes fabricantes.

5.4.1 Manômetros de sobrepressão

Os manômetros de pressão absoluta que medem pressões maiores que 1bar são empregados no ensaio de estanqueidade em objetos que trabalham com uma pressão maior que a pressão atmosférica. Na maioria das vezes estes objetos são relativamente grandes, de maneira que, devido à expansão que experimentam durante a realização do ensaio de estanqueidade ou à dificuldade de se ter acesso a determinados locais do mesmo, não podem ser inspecionados com gás de ensaio. Neste caso, emprega-se o método da queda de pressão. Dependendo da precisão de ensaio exigida e da ordem de grandeza da taxa de vazamento que se espera medir, deve-se empregar um manômetro que leve em consideração estas características. Para isto, faz-se uso das equações 5.1 e 5.2.

$$q_L = V \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (\text{equação 5.1})$$

$$q_L = C \cdot (p - p_{amb}) \quad (\text{equação 5.2})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento, em $[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}]$;
- V é o volume do objeto de ensaio, em $[\ell]$;
- Δp é a variação de pressão do objeto de ensaio durante a realização do ensaio, em $[\text{mbar}]$;
- Δt é a duração do ensaio de estanqueidade, em $[\text{s}]$;
- C é a condutância, em $[\ell \cdot \text{s}^{-1}]$;
- p é a pressão no objeto de ensaio, em $[\text{mbar}]$;
- p_{amb} é a pressão ambiente, em $[\text{mbar}]$.

A equação 5.1 permite constatar que, para uma dada taxa de vazamento, as especificações do manômetro são mais rigorosas quanto maior for o volume do objeto de ensaio. A equação 5.2 mostra a influência da pressão do objeto de ensaio que está variando sobre a taxa de vazamento e, conseqüentemente, sobre a precisão de medição da taxa de vazamento. Na realidade, esta influência só é importante quando se faz ensaio de estanqueidade em um objeto pequeno e que apresenta grande taxa de vazamento. Um fator que influencia significativamente o resultado do ensaio é a temperatura. Ao se realizar um ensaio, deve-se verificar a influência da temperatura no valor zero e se a sensibilidade do manômetro satisfaz aos requisitos especificados para a faixa de temperatura em questão. A norma DIN 16086 fornece também informações sobre outros fatores, como impacto, vibração, local de montagem, etc.

Um exemplo típico de recipiente grande é o vaso de pressão de uma usina nuclear. A norma DIN 25436 [3.6] foi elaborada para realizar ensaio de estanqueidade com o método da variação da pressão absoluta neste recipiente. Como exemplo, são apresentadas algumas das especificações de manômetros feitas nesta norma:

- resolução: $\leq 0,01 \%$ (menor variação visível do mostrador);
- imprecisão de medida: $\leq 0,03 \%$ (desvio do valor médio obtido a partir de diversas medidas);
- erro de medida $\leq 1 \%$ (desvio máximo do valor correto).

As definições precisas dos termos empregados podem ser encontradas na norma DIN 1319. Os percentuais citados acima referem-se sempre ao valor máximo que pode ser medido com o instrumento. As especificações citadas acima são muito rigorosas, visto que o vaso de pressão de uma usina nuclear precisa apresentar elevada segurança, daí a taxa de vazamento admissível ser muito pequena, além de seu volume ser muito grande.

O preço de um manômetro depende, naturalmente, das especificações que são feitas. Na maioria das vezes utiliza-se instrumentos que custam cerca de pouco mais de US\$ 500. Os instrumentos melhores (por exemplo, aqueles com boa compensação da temperatura), entretanto, chegam a custar até US\$ 1.500. Alguns

manômetros possuem uma saída (por exemplo, de 4 mA a 20 mA) para conexão com microcomputador. Porém, quando se detecta vazamento ou se faz um ensaio de estanqueidade no campo, o uso de um microcomputador freqüentemente dificulta a realização da inspeção, sendo, por isso, os instrumentos que indicam a pressão no mostrador, e que custam pouco mais de US\$ 50, os mais indicados.

5.4.2 Manômetros de vácuo

O manômetro de vácuo é empregado quando se inspeciona um objeto com o método do aumento da pressão. Muitas vezes o objeto já está equipado com um manômetro destinado à medição da sua pressão de serviço, porém sua precisão nem sempre é conhecida, visto que os manômetros que medem a pressão de trabalho, devido às condições em que operam, se degradam rapidamente ao longo do tempo. O mais conveniente é usar, sempre que possível, um manômetro independente do tipo de gás. Este instrumento mede a pressão correta, independentemente da natureza do gás presente, e permite, assim, determinar a verdadeira taxa de vazamento. No caso do vácuo, pode-se empregar somente o manômetro capacitivo, visto que é possível encontrar vários modelos deste tipo de instrumento no mercado que servem para a medição vácuo em uma faixa de pressão de várias ordens de grandeza. Os modelos mais sensíveis permitem medir variações de pressão quando se tem vácuo na faixa de até 10^{-4} mbar. As imprecisões de medição são relativamente pequenas e a reprodutibilidade dos resultados é muito boa.

O método de aumento de pressão só é empregado quando o objeto de ensaio é muito grande, se a pressão for menor que 10^{-4} mbar e quando não se pode utilizar hélio. Neste caso, utiliza-se um manômetro dependente do tipo de gás (manômetro de viscosidade ou de ionização), visto não haver outro instrumento de medida de pressão total. A dessorção de vapor de água das paredes do manômetro de vácuo, porém, constitui um problema adicional quando a pressão é menor que 10^{-1} mbar, visto que os manômetros de pressão total sempre medem a pressão de vapor de água. O aumento de pressão decorrente da dessorção poderia ser interpretado, erroneamente, pelo inspetor, como sendo devido à presença de um vazamento real inexistente. O cálculo da taxa de vazamento pode ser feito empregando-se as mesmas fórmulas usadas no ensaio com o método da queda de pressão.

O preço do manômetro de vácuo geralmente é maior que o preço do manômetro de sobrepressão. O manômetro de vácuo mais barato, e também o mais impreciso, é o de condutibilidade térmica, e seu modelo mais simples custa pouco menos de US\$ 700. Entretanto, sua dependência do tipo de gás e da temperatura durante a medição do aumento da pressão geralmente prejudica muito a realização do ensaio. Manômetros de ionização, dependendo da faixa de pressão em que operam, podem ser adquiridos por preços a partir de US\$ 2.000, porém o preço de um sistema de montagem oscila entre US\$ 70 e US\$ 1.000. Instrumentos destinados à medição de pressões de serviço muito baixas custam até US\$ 4.000. O manômetro mais caro é o de viscosidade com esfera rotativa, que custa cerca de pouco menos de US\$ 15.000.

Trata-se, todavia, de um manômetro de precisão insuperável para medição de pressão na faixa de 10^{-2} mbar a 10^{-6} mbar, adequado especialmente para medir vácuo em objetos de pequeno volume, visto que não apresenta dessorção de gás. A sua grande sensibilidade à vibração pode, às vezes, prejudicar seu funcionamento. Por outro lado, a velocidade de medida de pressão praticamente não influencia o resultado de ensaio quando o método empregado é o de aumento de pressão.

5.5 Instrumentos de detecção de gás de ensaio

5.5.1 Detecção na atmosfera

Quando se faz detecção de vazamento em um objeto, como, por exemplo, em um vaso de pressão, utilizando o método do gás de ensaio, sempre há necessidade de se detectar este gás rastreador que está escapando. A detecção do gás de ensaio é realizada, com exceção de casos especiais, na atmosfera, de maneira que é preciso empregar um transdutor que possa medir seletivamente a menor concentração possível do gás de ensaio à pressão atmosférica.

5.5.1.1 Detecção com transdutores de condutibilidade térmica

No caso do transdutor de condutibilidade térmica que opera em contato com o ar atmosférico, não se utiliza o princípio da variação da condutividade térmica com a pressão (como foi descrito anteriormente no caso do manômetro de condutibilidade térmica) e, sim, a diferença de condutividade térmica dos diferentes gases. Detectores de vazamento que trabalham segundo este princípio, denominados sondas aspiradoras (cheiradores), sugam o ar da vizinhança do local que está sendo inspecionado, ou seja, o ar que está na ponta da sonda aspiradora. Este ar é conduzido a um transdutor de condutibilidade térmica (de maneira semelhante à do caso do manômetro de condutibilidade térmica). Ao mesmo tempo, o ar atmosférico que se encontra em um outro local bem longe da ponta da sonda aspiradora também é sugado, através de um outro duto de aspiração, e conduzido a um segundo transdutor de condutibilidade térmica. Estes dois transdutores formam uma ponte de Wheatstone, de maneira que pequenas diferenças de condutividade térmica entre o ar atmosférico destes dois locais podem ser detectadas, medidas e utilizadas para indicar a presença de gás de ensaio. A menor taxa de vazamento que pode ser detectada com este método gira em torno de $5 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. A seletividade do gás de ensaio não é muito grande, visto que se mede toda diferença de condutividade térmica.

5.5.2 Detecção no vácuo

Quando um objeto com vácuo é inspecionado com gás de ensaio (após um jateamento de gás de ensaio sobre o objeto ou se estiver sendo utilizada a técnica do envoltório), na maioria das vezes o que se faz é detectar o gás rastreador que penetra no objeto de ensaio. As especificações referentes à sensibilidade do

equipamento de inspeção dependem do que se deseja: se detectar vazamento ou medir a taxa de vazamento integral. Na inspeção de um objeto com vácuo, o tempo de resposta e a estabilidade do mostrador do manômetro são dois fatores muito importantes.

5.5.2.1 Detecção com manômetro dependente do tipo de gás

A localização de vazamento em um objeto que trabalha com vácuo pode muitas vezes ser realizada com o próprio manômetro, de condutibilidade térmica ou de ionização, destinado à medição da pressão de trabalho, que este objeto normalmente possui. Neste caso, utiliza-se a dependência do tipo de gás do manômetro para localizar o vazamento. Ao se soltar um jato de gás de ensaio na região onde se encontra o vazamento, ou quando ela é envolvida com um plástico e o gás de ensaio é introduzido dentro deste envoltório plástico, o ar que passa pelo vazamento é substituído momentaneamente pelo gás de ensaio, e o manômetro do objeto que está sendo inspecionado acusa, em maior ou menor grau de intensidade, uma variação de pressão.

A curva de calibração do manômetro de condutibilidade térmica mostra que gases mais leves ou pesados que o nitrogênio acarretam variações bem distintas no mostrador de pressão. Os gases que apresentam mudanças significativas são o hidrogênio e o hélio. No caso do hidrogênio, o mostrador de pressão indica uma pressão dez vezes maior quando a pressão é maior que 10 mbar. Pressões menores também apresentam mudanças no mostrador, porém o valor da pressão, neste caso, é aproximadamente duas vezes maior. Para localizar um vazamento, é importante que o tempo de resposta seja pequeno (melhor seria utilizar um manômetro Pirani) e que a resolução do mostrador do manômetro seja boa (digital). O hélio é o melhor gás de ensaio, visto que existe o perigo de explosão quando se usa hidrogênio, o que torna este gás não recomendável.

Se a pressão do objeto de ensaio for baixa, então também é possível empregar, de maneira análoga, o manômetro de ionização. Neste caso, a pequena variação da pressão é causada pela pequena probabilidade de ionização dos gases leves. A pressão do hélio, por exemplo, é acusada pelo instrumento como sendo cerca de sete vezes menor que a mesma pressão do nitrogênio. Quando se detecta vazamento com manômetro dependente do tipo de gás, deve-se sempre levar em consideração que o fluxo de gás que passa por uma descontinuidade corresponde a somente uma parcela da pressão que é acusada pelo mostrador do instrumento e que, portanto, o mostrador indicará somente uma pequena variação da pressão, ao contrário do que ocorreria caso se tivesse somente gás de ensaio. Neste caso, a capacidade de sucção do equipamento é muito importante. O exemplo apresentado a seguir mostra com clareza esta importância.

Exemplo

Capacidade de sucção do equipamento: $100 \text{ } \ell \cdot \text{s}^{-1}$ (quase independente do tipo de gás).

Taxa de vazamento: $10^{-6} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ (ar atmosférico).

Pressão final sem vazamento: 10^{-7} mbar (por causa da dessorção de água).

Nestas condições, a pressão indicada devida ao vazamento é de somente $10^{-6} / 100 = 10^{-8} \text{ mbar}$, isto é, somente 10 % da pressão final indicada. Ao se substituir completamente o fluxo de ar do vazamento por hélio, o manômetro de ionização dependente do vazamento registraria uma mudança de pressão de 10^{-8} para $1/7$ de 10^{-8} , isto é, uma mudança de valor de pressão de somente $8,6 \cdot 10^{-9} \text{ mbar}$ ou 8,6 % da pressão indicada inicialmente.

5.5.2.2 Detecção com espectrômetro de massa

A separação do ruído de fundo devido à dessorção da variação causada pelo vazamento não é possível de ser realizada com um manômetro de pressão total. Os espectrômetros de massa, ao contrário, permitem fazer esta separação e podem, além disso, medir quantitativamente a pressão parcial do gás de ensaio.

No caso mais simples, o ar que entra no espectrômetro de massa pode ser identificado (relação do pico do oxigênio para o de nitrogênio de aproximadamente 1 para 4). Quando se conhece a capacidade de sucção do equipamento, pode-se determinar, aproximadamente, a taxa de vazamento a partir da pressão parcial do nitrogênio (p_{N_2}) medida, conforme descrito pela equação 5.3.

$$q_L = p_{N_2} \cdot S \quad (\text{equação 5.3})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento, em $[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}]$;
- p_{N_2} é a pressão parcial do nitrogênio, em $[\text{mbar}]$;
- S é a capacidade de sucção do equipamento, em $[\ell \cdot \text{s}^{-1}]$.

Este procedimento pode ser empregado quando não se tem disponível um gás de ensaio específico, servindo, desta maneira, como controle constante do vazamento. Para se localizar o vazamento, solta-se um jato de gás de ensaio em direção ao objeto de ensaio e se observa se houve aumento do pico de massa correspondente ao gás de ensaio em questão. O espectrômetro de massa, entretanto, deve ser capaz de mostrar os resultados separadamente ou ser ajustado para um determinado pico, quando se observa o sinal de saída correspondente. Os espectrômetros de massa quadruplo mais modernos possuem um módulo de detecção de vazamento com características específicas, inclusive com um sistema de emissão de sinal acústico, que auxilia na localização do vazamento.

O comportamento do espectrômetro de massa empregado ao longo do tempo é muito importante quando se deseja localizar um vazamento. Somente se o tempo de

resposta (tempo decorrente entre o momento do jateamento do objeto com gás de ensaio e o momento em que este gás é detectado pelo espectrômetro) for pequeno é que é possível detectar um vazamento. Quando o vazamento é pequeno ou a capacidade de sucção do equipamento é grande, o sinal do gás de ensaio pode ser tão pequeno que o tempo de medida necessário será muito longo. Neste caso, pode-se empregar um amplificador de sinal. Não se deve esquecer, entretanto, que só se pode empregar um amplificador de sinal quando a pressão total for menor que 10^{-5} mbar.

As características descritas até o presente momento se referem quase que exclusivamente ao espectrômetro de massa quadruplo, visto que este instrumento normalmente é o mais empregado na tecnologia do vácuo. O uso destes equipamentos apresenta restrições, especialmente quando se tem que detectar o hélio, pelo fato de sua sensibilidade ser limitada e pelo seu comportamento quando a pressão total é elevada. Quando a pressão total no espectrômetro de massa é maior ou igual a aproximadamente 10^{-4} mbar, a detecção dos íons de hélio é muito prejudicada, pois, além dos íons de hélio, íons de outros gases e vapores também passam pelo seletor de íons e chegam até o coletor. A corrente iônica referente a estas partículas mais pesadas é, então, medida juntamente com a corrente gerada pelos íons de hélio, não havendo, portanto, condição de determinar em separado a pressão parcial exercida pelo hélio. Espectrômetros de massa de campo setorial especiais são os mais indicados, como aqueles empregados nos detectores de vazamento de hélio, por detectarem partículas com massa 2, 3 e 4 com uma sensibilidade insuperável, especialmente se a pressão total é relativamente elevada ou quando não se tem condições adequadas de ultra-alto vácuo. Existem no mercado módulos de detecção de vazamento, alguns com bomba de vácuo extra (veja item 5.6.1.3, detector de vazamento de hélio de contra-fluxo), e aplicativos para computador especialmente desenvolvidos para a detecção de vazamento em indústrias.

Os espectrômetros de massa empregados na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade são relativamente baratos quando comparados com os espectrômetros de massa utilizados na análise da composição química de gases. Os equipamentos que detectam gases de massa variando entre 0 amu e 100 amu podem ser adquiridos no mercado por preços a partir de cerca de US\$ 7.000. Os equipamentos mais caros, que na maioria da vezes vêm equipados com amplificador de sinal, podem ser adquiridos por US\$ 17.000. Estes modelos mais completos também podem analisar gás residual e, com base no pico de massa do ar atmosférico, controlar vazamentos, de maneira que têm uma utilidade dupla.

Bombas de Vácuo I
(Bombas de Expulsão)

- 6.1 Introdução
- 6.2 Bombas de vácuo mecânicas seladas a óleo
 - 6.2.1 Bombas de vácuo de palheta de um estágio
 - 6.2.2 Bombas de vácuo de palheta de dois estágios
 - 6.2.3 Dados técnicos das bombas de vácuo
 - 6.2.4 Capacidade de sucção
 - 6.2.5 Remoção de vapor com bomba de vácuo selada a óleo
 - 6.2.5.1 Dispositivo de gás de lastro
 - 6.2.5.2 Condensador e armadilha
- 6.3 Bomba Roots
 - 6.3.1 Funcionamento
 - 6.3.2 Válvula de pressão diferencial
- 6.4 Combinação de bombas

6 Bombas de vácuo I (bombas de expulsão)

6.1 Introdução

Na produção industrial e na pesquisa são empregados diversos processos que exigem a realização de diferentes tipos de vácuo. Para obter estes diferentes tipos de vácuo, há necessidade de remover partículas de gás ou de vapor de um determinado objeto, o que exige o emprego de bombas de vácuo bem distintas. Além de fazer vácuo, as bombas de vácuo têm como função a manutenção e a melhoria do vácuo em um determinado objeto. A figura 6.1 apresenta alguns dos processos industriais de fabricação que necessitam de vácuo, bem como suas respectivas faixas de pressão.

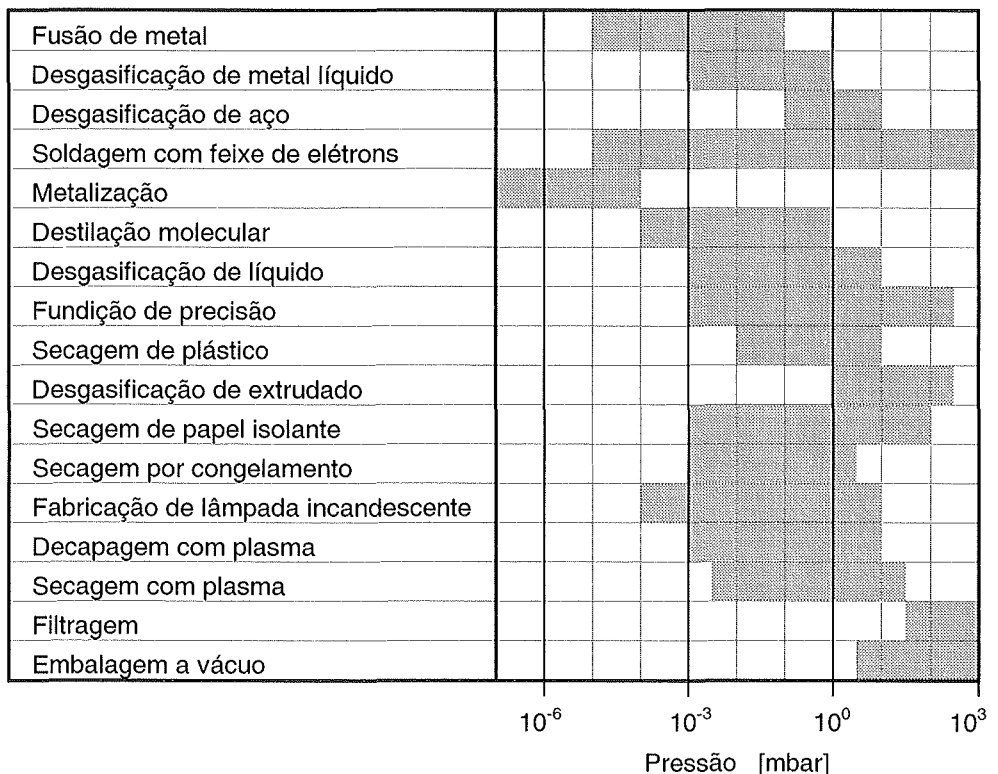


Figura 6.1: Faixas de pressão dos processos industriais de fabricação mais importantes que exigem a realização de vácuo [1.3].

A figura 6.2 apresenta as faixas de pressão de trabalho mais comuns das bombas de vácuo mecânicas empregadas na tecnologia do vácuo.

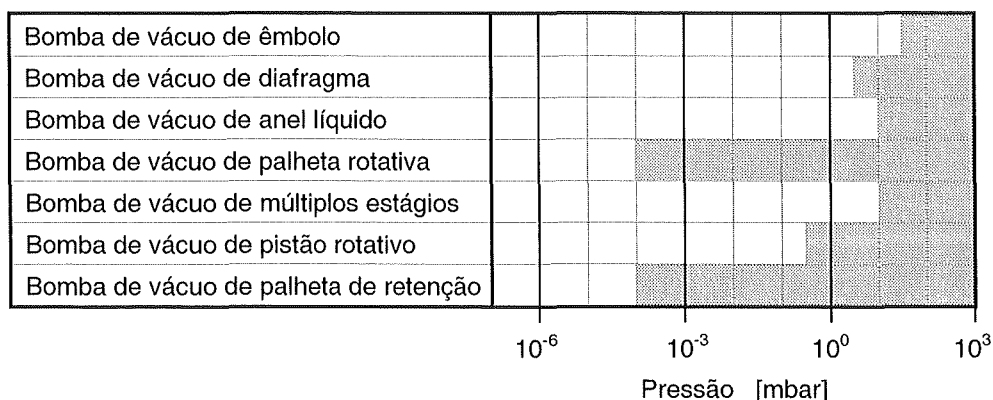


Figura 6.2: Faixas de pressão de trabalho mais comuns das bombas de vácuo mecânicas [1.3] (segundo a norma DIN 28 400 [3.7]).

As condições de trabalho constituem o fator decisivo na escolha do tipo de bomba ou da combinação de bombas que, sob o ponto de vista econômico, constituiria a melhor solução para um determinado problema encontrado na prática. Ao se escolher uma bomba ou combinação de bombas, deve-se levar em consideração uma série de parâmetros relativos ao processo em questão. Estes parâmetros são:

- tipo de matéria a ser removida (gás, vapor ou mistura gás-vapor, bem como tóxico, corrosivo, radioativo ou explosivo);
- a pressão do processo (vácuo grosseiro, bem como médio, alto ou ultra-alto vácuo);
- modo de trabalho (funcionamento contínuo ou intermitente);
- energia disponível e meio de trabalho.

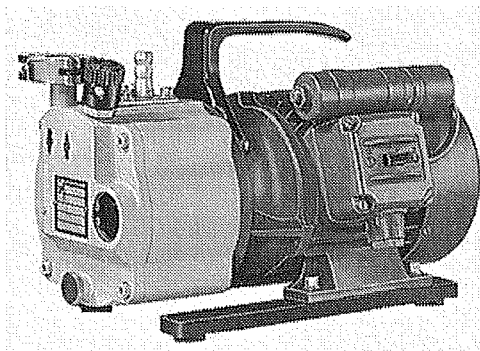
Além dos parâmetros principais supracitados, existem fatores muito importantes a serem observados, como a proteção do meio ambiente e o obedecimento de leis específicas, de forma que a escolha de uma bomba ou combinação de bombas deve ser tomada levando-se em conta também a emissão de poluentes, a poluição sonora, a reciclagem do meio de trabalho da produção, bem como o consumo de energia e de meio de trabalho.

A seguir, serão apresentadas as bombas de vácuo mecânicas que trabalham segundo o princípio de expulsão. Entre os diversos tipos existentes, pode-se citar a bomba de palheta rotativa e a de palheta de retenção, que necessitam de um meio de trabalho (na maioria das vezes, óleo) atuando como selo de vedação, e a bomba Roots, que opera sem meio de trabalho (selagem a seco).

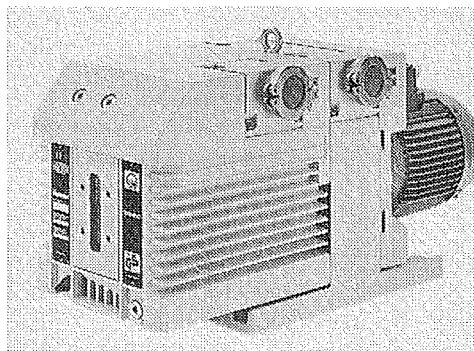
6.2 Bombas de vácuo mecânicas seladas a óleo

6.2.1 Bombas de vácuo de palheta de um estágio

As bombas mecânicas são encontradas nos diferentes segmentos da tecnologia do vácuo, indo desde o emprego em laboratórios, onde se encontram bombas com capacidade de sucção igual ou maior que $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$, até a utilização em instalações industriais metalúrgicas, eletrônicas ou químicas, onde a capacidade de sucção destas bombas pode atingir até $1000 \text{ m}^3/\text{h}$. As bombas mecânicas podem ser de estágio simples ou duplo (figura 6.3).



Capacidade de sucção = $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



Capacidade de sucção = $65 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Figura 6.3: Bomba de vácuo de palheta [2.1].

A bomba de vácuo de palheta possui um corpo cilíndrico, também denominado estator, dentro do qual gira um tambor excêntrico, ou rotor, como é denominado por muitos especialistas. Nas ranhuras do rotor excêntrico são colocadas duas ou três palhetas radiais, que são impelidas, por força centrífuga, quando o rotor excêntrico gira em torno de seu eixo, contra o anel da bomba (anel de Wittig) que se encontra fixado na parede interna do estator. O rotor se encontra apoiado de uma maneira tal em um determinado ponto situado entre as aberturas de sucção e de descarga da parede interna do estator, que, juntamente com as palhetas radiais, se formam dentro do estator quatro câmaras de trabalho com a geometria de uma foice. Dentro destas câmaras, devido ao movimento do rotor excêntrico, as partículas de gás e de vapor removidas por sucção do objeto que está sendo evacuado são comprimidas e, por fim, expelidas através da válvula de escape selada a óleo.

A bomba de vácuo de palheta possui uma válvula de admissão na abertura de sucção que mantém o vácuo dentro do objeto que está sendo evacuado caso a bomba seja desligada ou quando falta energia, mesmo se estiver sendo utilizado gás de lastro. Quando a bomba para de funcionar, a sua câmara interna de trabalho se enche de ar, porém a válvula de admissão se fecha e protege, de maneira bastante

eficiente, o objeto que está sendo evacuado do ar ou de uma possível contaminação com óleo proveniente da bomba de vácuo.

6.2.2 Bombas de vácuo de palheta de dois estágios

Se houver necessidade de obter uma pressão final menor, como, por exemplo, em uma instalação de secagem, ou se for necessário aumentar a capacidade de sucção da bomba na faixa de médio vácuo ou mantê-la constante em uma outra faixa de pressão, então conecta-se a abertura de sucção da bomba de vácuo que trabalha contra a atmosfera com um outro estágio de bombeamento. O estágio de vácuo grosseiro (VV) da bomba é conectado em série com um estágio de médio vácuo (FV), que atua, na realidade, como uma bomba de vácuo prévio (pré-bomba), conforme mostra a figura 6.5. O estágio FV remove as partículas do objeto que está sendo evacuado e as expulsa, por meio de compressão, através de um canal sem válvulas, em direção à conexão de sucção do estágio VV. Como o estágio FV trabalha contra uma atmosfera de vácuo prévio, ele pode, devido à pequena diferença de pressão existente, operar com pouco ou até mesmo sem selo de óleo.

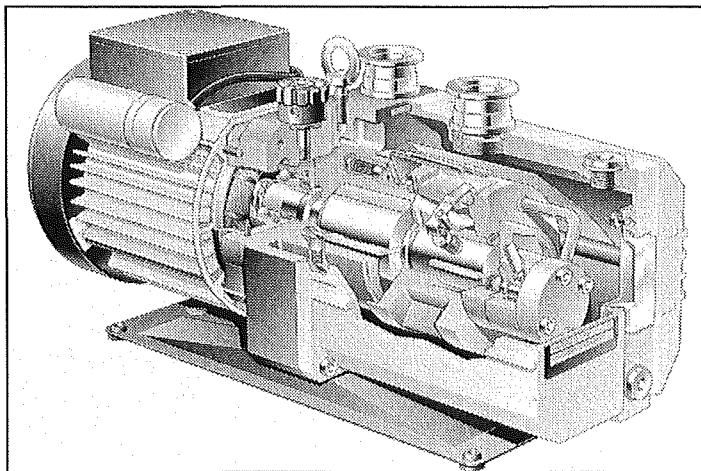
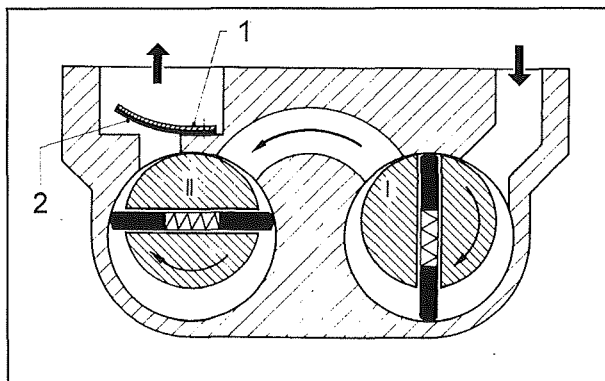


Figura 6.4:
*Vista interna de
uma bomba
mecânica de
palheta de dois
estágios [1.3].*

A pressão final que se consegue com uma bomba de vácuo de palheta de dois estágios é cerca de duas ordens de grandeza menor que a de uma bomba de um estágio somente, visto que a bomba de duplo estágio protege melhor o objeto que está sendo evacuado do ar atmosférico, que há uma maior degasagem do óleo que penetra no estágio FV e que a pressão de vapor de saturação do óleo diminui. As bombas de vácuo de palheta de dois estágios podem ser construídas com uma capacidade de sucção de até 200 m³/h.



- 1 Abertura da válvula
- 2 Mola da válvula
- I Estágio de alto vácuo
- II Estágio de vácuo prévio

Figura 6.5:

Esquema de uma bomba vácuo de palheta rotativa de dois estágios [1.3].

6.2.3 Dados técnicos das bombas de vácuo

A escolha entre um ou outro tipo de bomba de vácuo mecânica é feita com base em características técnicas especiais muito importantes. Estas características são:

- a pressão final, expressa em mbar, que é a menor pressão que se pode atingir com uma bomba de vácuo mecânica em perfeito estado de funcionamento sem que haja admissão unilateral de gás;
- a pressão parcial final sem gás de lastro (segundo PNEUROP [6.7]), que é a menor pressão do ar, em mbar, que uma bomba de vácuo em funcionamento estacionário consegue atingir. A pressão parcial final é medida com um manômetro de vácuo conectado com uma armadilha, que retém todas as partículas de vapor. Esta pressão constitui um importante indicador do estado dos componentes mecânicos da bomba de vácuo;
- a pressão total final com gás de lastro (segundo PNEUROP [6.7]), que é a menor pressão total com a válvula de gás de lastro aberta. A pressão total final constitui um importante indicador do estado do óleo da bomba de vácuo;
- a pressão de trabalho, que é a pressão total, em hPa (mbar), que se obtém quando se atinge o estado de equilíbrio, definido pela capacidade de sucção da bomba e pela remoção de partículas de gás e de vapor inerentes ao processo de evacuação, na conexão de sucção da bomba. A pressão de trabalho desejada é um parâmetro importantíssimo na escolha de um determinado tipo de bomba de vácuo.

6.2.4 Capacidade de sucção

A figura 6.6 apresenta a variação da capacidade de sucção das bombas de palhetas de monoestágio, com ou sem válvula de gás de lastro, em função da pressão reinante na abertura de sucção. Muito importante nesta figura é o fato da capacidade

de sucção, tanto para gases como para vapores, ser praticamente constante em uma faixa grande de pressão. Este comportamento da curva “capacidade de sucção” versus “pressão na conexão de sucção” das bombas de vácuo de compressão seladas a óleo, no entanto, é bastante diferente daquele apresentado pelas bombas seladas com outros sistemas. A pressão de trabalho de uma bomba de vácuo de palheta de monoestágio deve ser maior ou igual a 1 mbar e sua pressão parcial final gira em torno de 10^{-2} mbar. A estabilidade durante o funcionamento das bombas de vácuo seladas a óleo é importante para inúmeras aplicações, abre um leque muito grande de possibilidades de regulação e oferece boas condições para sua utilização conjunta com bombas Roots.

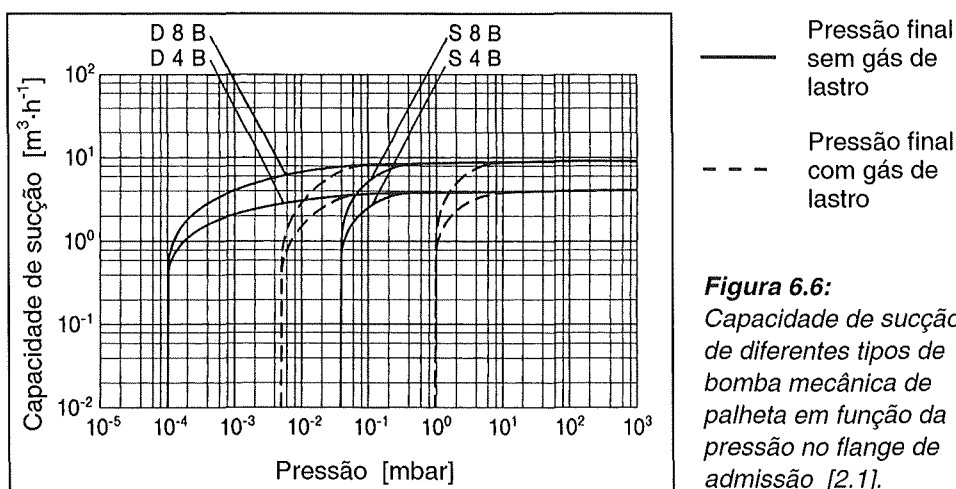


Figura 6.6:
Capacidade de sucção de diferentes tipos de bomba mecânica de palheta em função da pressão no flange de admissão [2.1].

6.2.5 Remoção de vapor com bomba de vácuo selada a óleo

Até poucos anos atrás, o campo de utilização das bombas de vácuo de palheta seladas a óleo abrangia somente os processos físicos a seco, nos quais, para uma dada temperatura de trabalho e faixa de pressão da bomba, era removida matéria não condensável. Em alguns casos de realização de vácuo, contudo, tem-se que remover vapores, de maneira que, além da pressão de trabalho e da capacidade de sucção, a tolerância da bomba de vácuo ao vapor também deve ser avaliada. A remoção de partículas de vapor ou de uma mistura gás-vapor com uma bomba de vácuo rotativa selada a óleo pode promover, durante a fase de compressão do material que está sendo removido, uma condensação dentro da bomba, isto é, uma formação de fase líquida em seu interior. O condensado que se forma se mistura com o óleo da bomba de vácuo, formando emulsão, e influencia, desta maneira, a viscosidade do óleo ou modifica as propriedades físicas ou químicas do óleo pelo fato de se encontrar dissolvido ou por ter reagido com o mesmo.

6.2.5.1 Dispositivo de gás de lastro

O dispositivo de gás de lastro injeta gás (na maioria das vezes, ar atmosférico), durante a fase de compressão na câmara de trabalho da bomba, que se mistura com o vapor removido do objeto que está sendo evacuado. A injeção de gás é dosada de tal maneira que, com o prosseguimento da compressão, a pressão de vapor não ultrapassa o valor da pressão de saturação, ou seja, ela permanece abaixo da pressão que condensa as partículas de vapor. Com a entrada do gás de lastro, aumenta necessariamente o fluxo de gás na bomba de vácuo e, conseqüentemente, a temperatura de trabalho. Com isso, a faixa crítica é deslocada para um lado seguro de um ponto de condensação mais elevado. Como a injeção de gás de lastro ocorre após o estágio de sucção, o uso de lastreamento não modifica a capacidade de sucção da bomba de vácuo. Porém, devido à maior pressão na câmara de trabalho da bomba, a pressão final que se atinge é maior. A quantidade de vapor de água que se pode remover continuamente quando se usa gás de lastro nas condições normais de funcionamento da bomba de vácuo é definida como tolerância ao vapor de água e é expressa em mbar.

6.2.5.2 Condensador e armadilha

As bombas de vácuo seladas a óleo devem trabalhar de uma maneira tal que os gases e os vapores bombeados passem por ela sem lhe causar prejuízo. Qualquer tipo de separador que venha a ser empregado diminui a solicitação à qual a bomba de vácuo é submetida em serviço, porém ele não pode evitar que a bomba se desgaste ao longo do tempo. Este desgaste da bomba de vácuo é uma questão de tempo de serviço e depende muito da periodicidade com que as revisões são feitas.

As partículas de vapor de uma mistura de gás-vapor podem ser retidas em condensadores refrigerados a água. O condensador, que na realidade funciona como uma bomba de vapor com elevada capacidade de sucção, protege a bomba de vácuo selada a óleo, de maneira que a bomba de vácuo pode ser dimensionada para remover uma quantidade menor de gás misturado com vapor. A regulação da pressão no condensador com uma válvula de estrangulamento, quando se tem um processo de bombeamento estável, constitui uma solução simples e segura.

A armadilha ainda é vista como uma solução praticável para determinados problemas que ocorrem em laboratório. Na realidade, ela é, assim como o condensador, uma bomba que remove parte das partículas de uma mistura gasosa, pois, devido à temperatura do meio frigorígeno extremamente baixa, como, por exemplo, à do nitrogênio líquido (LN_2), retém todos os vapores e gases que possuem baixa pressão parcial. Em vista disso, a armadilha é considerada como a proteção mais eficiente que uma bomba mecânica selada a óleo pode ter.

6.3 Bomba Roots

As bombas Roots, que pertencem ao grupo das bombas de expulsão, são fabricadas há mais de 100 anos e trabalham segundo o princípio Roots. Elas são empregadas na tecnologia do vácuo há mais de 30 anos quase que exclusivamente em combinação com bombas de pré-vácuo seladas a óleo, como a bomba de palheta rotativa, a bomba de palheta de retenção, a bomba trocoidal e a bomba de anel líquido. A pressão final que se pode atingir com estas combinações de bomba de vácuo, que tanto pode ser de um ou de dois estágios (conexão em série), vai de aproximadamente 10^{-4} mbar até 10^2 mbar, para expulsão na atmosfera. As bombas Roots operam, nestes casos, expulsando as partículas removidas do objeto que está sendo evacuado para uma outra bomba que, por sua vez, expulsa estas partículas para a atmosfera. Nos últimos anos, foram desenvolvidas bombas de vácuo Roots que expulsam as partículas diretamente na atmosfera. Dentre estas bombas, pode-se citar as bombas Roots com refrigeração na conexão de sucção, que, devido ao sistema de refrigeração interno que possuem, podem ser de um estágio somente, caso a diferença de pressão entre a conexão de sucção e a conexão de expulsão seja de até no máximo 850 mbar.

6.3.1 Funcionamento

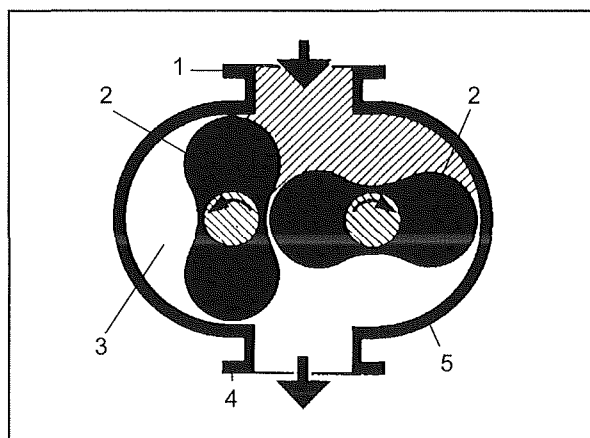
O princípio de Roots consiste na remoção de partículas de gás ou de vapor com dois rotores com formato de “oito”, que operam girando sincronizadamente em sentido contrário (figura 6.7) dentro de uma câmara de trabalho cilíndrica, sem, no entanto, tocar um no outro ou na parede interna desta câmara. A distância entre os rotores e a parede interna da câmara cilíndrica, dependendo do tamanho da bomba Roots, pode ser de apenas alguns décimos de milímetro.

O movimento sincronizado dos rotores é controlado por engrenagens que se situam na parte anterior da câmara de trabalho. A lubrificação do mancal é feita por meio de discos injetores sobre o eixo de transmissão ou pelas engrenagens da bomba Roots. Como os rotores trabalham sem contato físico um com o outro ou com a parede interna da câmara de trabalho, eles não precisam de lubrificante. A ausência de óleo de lubrificação nos rotores, ou seja, o fato da bomba ser selada a seco, oferece vantagens no que diz respeito à utilização da bomba Roots na indústria química quando se deseja recuperar o produto ou remover gases ou vapores reativos de um determinado equipamento ou de uma dada instalação.

O acionamento da bomba Roots é feito por meio de um motor de flange externo comum. A vedação do furo na carcaça da bomba de vácuo por onde passa o eixo do motor é feita por dois anéis dinâmicos de vedação radial imersos em líquido (óleo). O assento sobre o qual estes elementos de vedação se movimentam é uma camisa de cilindro resistente ao desgaste abrasivo, de maneira a garantir a proteção do eixo do motor. Deste modo, pode-se utilizar na bomba Roots motores de flange dos mais variados tipos ou classes de proteção (umidade, isolamento ou outras intempéries),

ensões e frequências. A taxa de vazamento integral deste tipo de motor empregado é menor que $10^{-4} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. Caso seja necessária uma taxa de vazamento menor que $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, então a bomba Roots é construída com um motor, denominado motor de tubo com folga, cujo rotor se encontra na câmara de vácuo sobre o eixo da bomba e é separado do estator por meio de um tubo paramagnético e hermético em vácuo. A refrigeração do enrolamento do estator é feita por uma ventoinha, acionada com motor próprio. O emprego de bomba Roots equipada com motor de tubo com folga é muito indicado quando se tem que evacuar objetos contendo gases ou vapores tóxicos ou radioativos.

Visto que há necessidade de empregar componentes protetores quando se usa motor de tubo com folga, existe a possibilidade de se conseguir a mesma estanqueidade citada acima usando um acoplamento eletromagnético. Neste caso, o secundário do acoplamento eletromagnético fica sobre o eixo do rotor da bomba, que é separado da atmosfera por uma espécie de câmara de tubo de folga. O acionamento da bomba de vácuo é realizado pelo primário, que se encontra montado no eixo do motor.



- 1 Flange de admissão
- 2 Lóbulo
- 3 Volume da câmara
- 4 Flange de expulsão
- 5 Carcaça

Figura 6.7:
Ilustração esquemática da seção transversal de uma bomba Roots [1.3].

6.3.2 Válvula de pressão diferencial

É preciso tomar medidas preventivas quando se emprega uma bomba Roots comum conectada em série, de maneira que a diferença de pressão entre a sua abertura de sucção e a sua abertura de expulsão não ultrapasse um determinado valor. O controle desta diferença de pressão é feito por um interruptor de pressão que desliga a bomba quando a pressão na abertura de sucção atinge um valor preestabelecido, ou por uma válvula de pressão diferencial ou de sobrepressão conectada em paralelo (by-pass) com o rotor da bomba, conforme mostrado na figura 6.8. A utilização de uma válvula de sobrepressão em paralelo com a bomba Roots tem demonstrado ser a solução mais segura e melhor para o problema do controle da diferença de pressão entre as suas aberturas de sucção e de expulsão.

A válvula de peso e mola é ajustada para a pressão máxima admissível para cada bomba Roots. Assim, é possível assegurar que a bomba de vácuo não é sobrecarregada em serviço, bem como garantir a sua operação em qualquer faixa de pressão. Isto significa, em termos práticos, que a bomba Roots pode ser conectada com uma bomba de vácuo prévio que trabalha contra a atmosfera. O aumento de pressão durante o processo de evacuação não causa qualquer tipo de transtorno quando se emprega esta combinação de bombas, visto que a bomba Roots será desligada a tempo pela válvula de sobrepressão.

6.4 Combinação de bombas

Combinações de bombas, como, por exemplo, de uma bomba Roots conectada em série com uma bomba selada a óleo, são sempre necessárias quando a capacidade de sucção ou a pressão final de uma bomba selada a óleo de um ou de dois estágios não é suficiente. Estas combinações de bomba são muito importantes, principalmente quando se tem uma faixa de pressão de trabalho que vai de 10 mbar a 10^{-3} mbar, visto que, devido ao fluxo de massa inerente ao processo de bombeamento, há necessidade de remover um enorme fluxo em volume ($p \cdot V = \text{constante}$).

Removendo-se as partículas de vapor condensáveis à temperatura de um meio frigorígeno (na maioria da vezes, água ou nitrogênio líquido) que porventura venha a ser empregado, é possível reduzir consideravelmente o fluxo em volume, devido à condensação, e, assim, empregar uma bomba de vácuo menor ou escolher determinada combinação de pequenas bombas de vácuo. A utilização de um condensador refrigerado a água, por exemplo, evita, de uma maneira simples e econômica, que a bomba Roots tenha que comprimir uma mistura de vapores a elevadas pressões. A redução dos custos resultante do uso deste sistema de evacuação, quando comparado com um sistema de bomba de jato de vapor ou de jato de gás, bem como a possibilidade de controlar da melhor maneira possível o processo de evacuação através do emprego adequado e correto de um certo tipo de bomba, tornam a combinação de bombas de vácuo uma técnica decisiva na obtenção de determinado vácuo. Em um processo de evacuação em que a remoção das partículas de vapor é realizada descontinuamente, por exemplo, remove-se quase que exclusivamente vapor durante a fase úmida, enquanto que durante dois terços do tempo da fase seca, o sistema de bombas de vácuo trabalha com uma pressão menor que a pressão de vapor de saturação. No final da fase seca, entretanto, as bombas removem somente as partículas de gás.

Uma bomba Roots conectada à frente de um condensador se comporta como um dique de gás, permitindo que o condensador seja ajustado convenientemente, de maneira que ele possa, então, remover a maior quantidade possível de vapor. Se a pressão cair para um valor menor que a pressão de vapor de saturação, então a bomba Roots comprimirá a mistura ar-vapor, de modo que o condensador ainda continuará trabalhando com eficiência satisfatória. No final da fase seca, trabalham,

então, somente a bomba Roots e a bomba selada a óleo, que removem, de uma maneira ótima, somente as partículas de gás. Com esta combinação de bombas pode-se, quando comparada com combinações de bombas de anel, atingir não só uma pressão final menor, e com isso remover melhor o vapor, como também se adequar às relações de pressão parcial, isto é, reduzir a pressão parcial do vapor na faixa de pressão final. Combinações de bombas de vácuo de anel reduzem a quantidade de gás, porém a pressão parcial de vapor, que depende da temperatura da bomba, permanece constante.

A combinação de bombas de vácuo constituída de uma bomba Roots com uma bomba de pré-vácuo selada a óleo, com e sem emprego de condensador, apresentada na figura 6.8, é adequada para fazer vácuo na faixa de 10^{-3} a 10^{-3} mbar em objeto com pouca quantidade de vapor. Esta faixa de vácuo pode se estender até 10^{-4} mbar, caso se empregue uma segunda bomba Roots ou uma bomba selada a óleo de dois estágios.

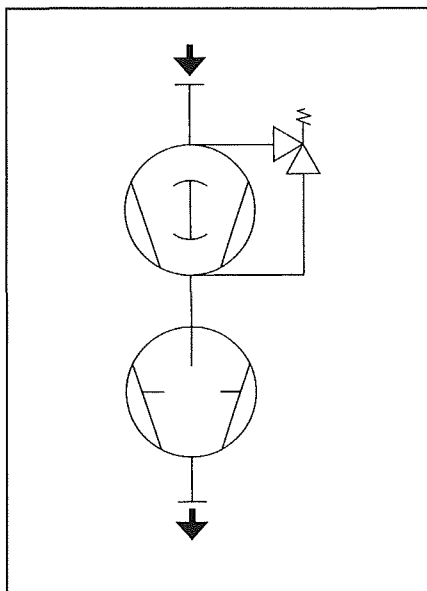


Figura 6.8:

Esquema de uma combinação de uma bomba Roots com uma pré-bomba [1.3].

Bombas de Vácuo II (Bombas de Alto Vácuo)

- 7.1 Introdução
- 7.2 Campo de utilização das bombas de alto vácuo
- 7.3 Finalidades da bomba de alto vácuo do detector de vazamento de hélio
- 7.4 Características gerais da bomba de alto vácuo
- 7.5 Bomba de difusão
 - 7.5.1 Princípio de funcionamento
 - 7.5.2 Estrutura
 - 7.5.3 Características
 - 7.5.4 Acessórios
 - 7.5.5 Agente propulsor
 - 7.5.6 Operação
 - 7.5.7 Manutenção
- 7.6 Bombas moleculares
 - 7.6.1 Princípio de funcionamento
 - 7.6.2 Estrutura
 - 7.6.2.1 Bomba espiromolecular
 - 7.6.2.2 Bomba turbomolecular
 - 7.6.3 Características
 - 7.6.4 Operação
 - 7.6.5 Manutenção
- 7.7 Outras bombas de alto vácuo
 - 7.7.1 Bomba criogênica
 - 7.7.2 Bomba de Getter
 - 7.7.3 Bomba de íon
- 7.8 Comparação de sistemas

7 Bombas de vácuo II (bombas de alto vácuo)

7.1 Introdução

Ao se detectar vazamento ou se fazer um ensaio de estanqueidade (por exemplo, empregando o processo de aumento de pressão), pode haver necessidade de se obter uma pressão menor que a pressão atmosférica. A detecção de vazamento e o ensaio de estanqueidade realizados com hélio como gás de ensaio, em particular, requerem que a pressão no espectrômetro de massa do detector de hélio seja igual ou menor que 10^{-4} mbar. Para se conseguir esta pressão, denominada alto vácuo, há necessidade de se empregar bombas de alto vácuo especiais. Neste capítulo, serão vistas as bombas de alto vácuo mais importantes empregadas na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade.

7.2 Campo de utilização das bombas de alto vácuo

O vácuo que pode ser obtido com os meios tecnológicos disponíveis vai desde a pressão atmosférica (10^3 mbar) até cerca de 10^{-12} mbar. A figura 7.1 apresenta os diferentes tipos de vácuo, suas faixas de pressão, o tipo de escoamento das partículas de gás ou vapor que neles reina, bem como o livre percurso médio das partículas de gás ou vapor ($\bar{l}$) e a densidade de partículas (n) para cada tipo de vácuo.

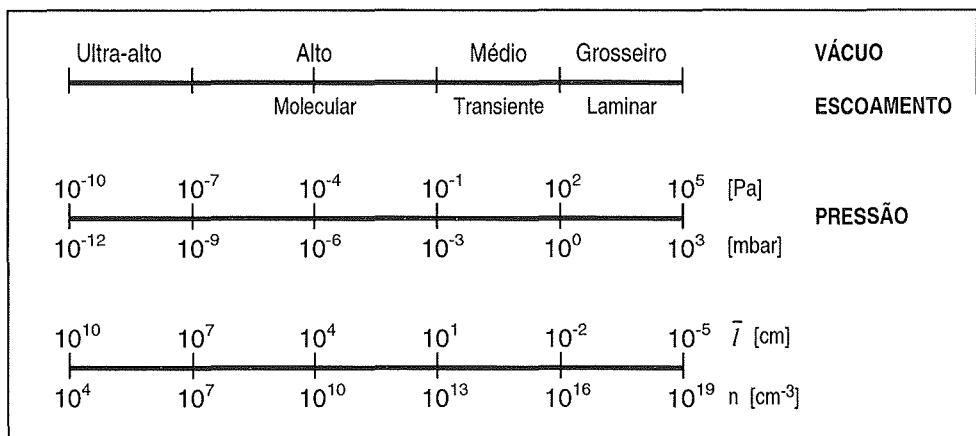


Figura 7.1: Tipos de escoamento de gás, faixa de pressão, livre percurso médio ($\bar{l}$) das partículas de gás e densidade de partículas (n) relativos aos diferentes tipos de vácuo.

Normalmente não é necessário ter uma pressão menor que 10^{-6} mbar quando se detecta vazamento e se faz ensaio de estanqueidade com hélio. A faixa de pressão do alto vácuo vai de 10^{-3} mbar a 10^{-7} mbar e constitui o campo típico de utilização

das bombas de alto vácuo. Nos últimos anos, foram desenvolvidas bombas híbridas que podem ser empregadas tanto em alto vácuo como em vácuo médio.

7.3 Finalidades da bomba de alto vácuo do detector de vazamento de hélio

A bomba de alto vácuo que normalmente se encontra embutida no detector de vazamento de hélio tem como função principal a obtenção, no espectrômetro de massa, de uma pressão de trabalho menor que 10^{-4} mbar. Esta pressão é necessária para o bom funcionamento do espectrômetro de massa, pois neste caso o número das partículas de gás ou vapor que se encontram em seu interior é pequeno o bastante, garantindo que os íons de hélio percorrerão uma trajetória livre após saírem da fonte de íons até chegarem ao coletor de íons. Um espectrômetro de massa para detecção de hélio típico tem cerca de 10 cm de comprimento, de modo que o livre percurso médio dos íons de hélio deve ser igual ou maior que 10 cm (figura 7.1).

Quando se detecta vazamento ou se faz ensaio de estanqueidade com hélio empregando o método do vácuo, pode-se utilizar a própria bomba de alto vácuo do detector de vazamento de hélio para evacuar o objeto de ensaio. Devido à baixa pressão dentro do objeto de ensaio, o livre percurso médio do hélio é grande, o que possibilita sua rápida difusão através do gás residual ainda existente no interior do objeto. Caso o objeto de ensaio seja grande, é possível evacuá-lo usando simultaneamente a bomba do detector de vazamento de hélio e uma bomba de alto vácuo auxiliar.

Além de ser empregada na redução da pressão do objeto de ensaio, a bomba de alto vácuo também é utilizada na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade como filtro de massa seletivo e como instrumento de redução do tempo de resposta do ensaio. Estas possibilidades de utilização se devem às características dos diferentes tipos de bombas de alto vácuo, especialmente das bombas moleculares descritas neste capítulo. Informações complementares sobre estas bombas podem ser encontradas nos capítulos 14 e 15.

7.4 Características gerais da bomba de alto vácuo

A capacidade de sucção e a relação de compressão da bomba de alto vácuo são duas propriedades quantificáveis importantes. A capacidade de sucção é definida como o volume de gás que passa através do flange de admissão da bomba de alto vácuo na unidade de tempo (equação 7.1).

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (\text{equação 7.1})$$

onde

- S é a capacidade de sucção da bomba de alto vácuo, em $[\ell \cdot s^{-1}]$;
- ΔV é o volume de gás que passa pelo flange de admissão da bomba de alto vácuo, em um dado intervalo de tempo, em $[\ell]$;
- Δt é o intervalo de tempo, em $[s]$.

A relação de compressão da bomba de alto vácuo é definida pela razão entre a pressão no seu flange de expulsão (vácuo prévio) e a pressão no seu flange de admissão (pressão do objeto que está sendo evacuado), equação 7.2, quando a bomba de vácuo atinge sua capacidade limite, ou seja, não consegue mais diminuir a pressão do objeto que está sendo evacuado (capacidade de sucção nula).

$$K_0 = \frac{p_{\text{exp}}}{p_{\text{adm}}} \quad (\text{equação 7.2})$$

onde

- K_0 é a relação de compressão da bomba de alto vácuo;
- p_{exp} é a pressão no flange de expulsão da bomba de alto vácuo;
- p_{adm} é a pressão no flange de admissão da bomba de alto vácuo.

Tanto a capacidade de sucção quanto a relação de compressão da bomba dependem, via de regra, do gás que está sendo removido e da pressão. Em alguns ensaios de detecção de vazamento e de estanqueidade realizados com hélio, a capacidade de sucção efetiva da bomba de vácuo e o volume do objeto de ensaio determinam o tempo de resposta (ou tempo de sinal), conforme mostra a equação 7.3.

$$\tau = \frac{V}{S_{\text{efe}}} \quad (\text{equação 7.3})$$

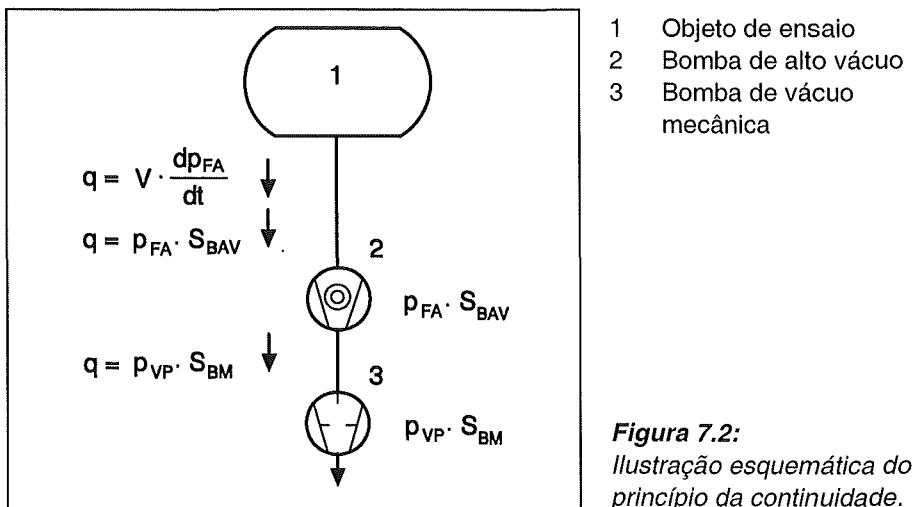
onde

- τ é o tempo de resposta, em $[s]$;
- V é o volume do objeto de ensaio, em $[\ell]$;
- S_{efe} é a capacidade de sucção efetiva da bomba, em $[\ell \cdot s^{-1}]$.

Ao se realizar ensaios de detecção de vazamento e de estanqueidade com o detector de vazamento de hélio, é possível, às vezes, se deparar com situações que exigem a tomada de medidas contraditórias, no que diz respeito à seleção da bomba de alto vácuo. Caso se deseje realizar um ensaio com uma sensibilidade elevada, então há necessidade de empregar uma bomba de alto vácuo de pequena capacidade de sucção; porém, ao mesmo tempo, freqüentemente é exigido um pequeno tempo de resposta, o que requer o emprego de uma bomba de alto vácuo de grande capacidade de sucção (equação 7.3). A melhor solução nestas situações,

geralmente, é realizar o ensaio com uma bomba de alto vácuo com a maior capacidade de sucção possível.

As bombas de vácuo mecânicas, neste livro também denominadas bombas de vácuo prévio, são empregadas na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade para retirar do objeto de ensaio cerca de 99,99 % do ar que se encontra em seu interior. As partículas de gás e de vapor restantes (0,01 %), bem como aquelas dessorbidas pela superfície interna do objeto de ensaio, são removidas por uma bomba de alto vácuo até se atingir a pressão desejada. A bomba de alto vácuo, no entanto, normalmente não consegue expelir para a atmosfera as partículas de gás e de vapor que retira do objeto de ensaio. Em vista disso, ela trabalha em série com uma bomba de expulsão, encarregada desta tarefa. Esta bomba de expulsão, que na realidade é uma bomba de vácuo mecânica, porém, tem que expulsar para a atmosfera todo o gás proveniente da bomba de alto vácuo, não permitindo que a pressão de vácuo prévio aumente, conforme determina o princípio de continuidade definido pela equação 7.4 e apresentado na figura 7.2.



$$q = V \cdot \frac{dp_{FA}}{dt} = p_{FA} \cdot S_{BAV} = p_{VP} \cdot S_{BM} \quad (\text{equação 7.4})$$

onde

- q é o fluxo de gás;
- V é o volume do objeto de ensaio que está sendo evacuado;
- dp_{FA} é a variação da pressão no objeto de ensaio que está sendo evacuado (variação de pressão no flange de admissão da bomba de alto vácuo);
- dt é o intervalo de tempo;
- p_{FA} é a pressão no flange de admissão da bomba de alto vácuo;

- S_{BAV} é a capacidade de sucção da bomba de alto vácuo;
- p_{VP} é a pressão do vácuo prévio ;
- S_{BM} é a capacidade de sucção da bomba mecânica.

7.5 Bomba de difusão

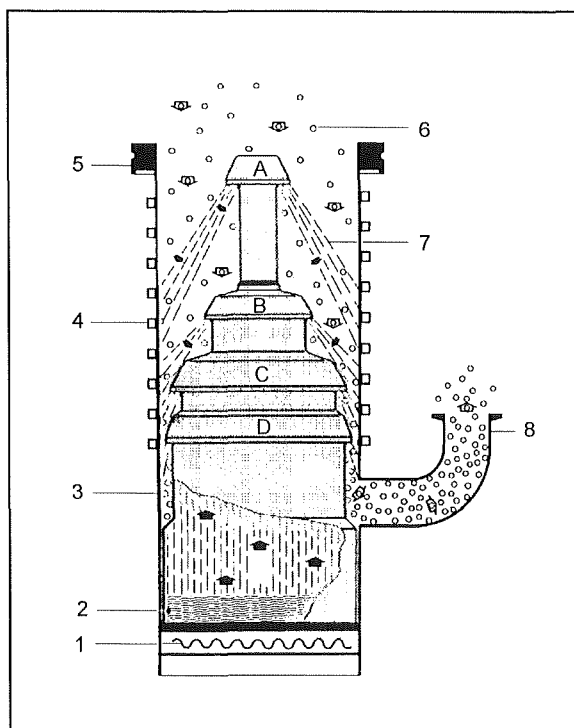
A bomba de difusão (BD) é a clássica bomba de alto vácuo que era empregada antigamente na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade com hélio. Atualmente, ela é esporadicamente utilizada, pois a maioria dos detectores de vazamento de hélio mais modernos são equipados com uma bomba turbomolecular.

7.5.1 Princípio de funcionamento

A BD contém um fluido propulsor que é vaporizado. A remoção das partículas de gás e de vapor que se encontram no interior de um objeto ocorre através da transmissão para elas, por meio de colisão, de parte da energia cinética das partículas de vapor do fluido propulsor.

7.5.2 Estrutura

A BD de óleo possui um conjunto de tubos (geralmente cilíndricos) verticais concêntricos, de diferentes diâmetros e parcialmente fechados na parte superior por meio de uma tampa, que serve para formar jatos de vapor de óleo e direcioná-los contra a superfície interna da sua carcaça (figura 7.3). A parte superior da BD de óleo é aberta e constitui o seu flange de admissão, ou seja, o flange para conexão com o objeto a ser evacuado; o seu fundo, por outro lado, é fechado e contém uma cuba de óleo, que é aquecido até a temperatura de ebulição por meio de uma resistência elétrica. Os 2/3 superiores do corpo da BD são envoltos por uma serpentina de refrigeração e o seu 1/3 inferior possui um duto para a saída das partículas de gás e de vapor removidas do objeto que está sendo evacuado. Na extremidade deste duto encontra-se o flange para conexão da BD com uma bomba mecânica, que se encarrega de expulsar as partículas removidas do objeto de ensaio para a atmosfera. O óleo da cuba que é vaporizado sobe através do conjunto de tubos concêntricos e o abandona, na forma de jato, com alta velocidade e em direções previamente estabelecidas. As partículas de gás e de vapor removidas do objeto de ensaio pela BD se difundem nos jatos de vapor de óleo e, em movimento de descida, são arremessadas contra a parede interna refrigerada da carcaça da bomba. O fluido propulsor se condensa ao entrar em contato com a parede refrigerada e escoa para a cuba contendo óleo em ebulição. As partículas de gás e de vapor provenientes do objeto de ensaio, porém, prosseguem em seu movimento de descida e são conduzidas através de um duto até o flange de expulsão da bomba de difusão, quando são removidas pela bomba mecânica.



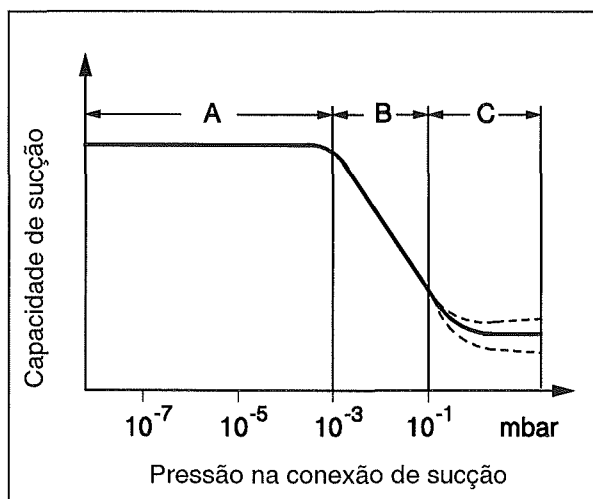
- 1 Resistência elétrica
- 2 Compartimento do óleo propulsor
- 3 Carcaça da bomba
- 4 Serpentina de refrigeração
- 5 Flange de admissão
- 6 Partícula de gás
- 7 Jato de vapor
- 8 Flange de vácuo prévio

A, B, C, D: Bicos injetores

Figura 7.3:
Desenho esquemático mostrando o funcionamento de uma bomba de difusão [1.3].

7.5.3 Características

A BD só pode ser empregada na evacuação de um objeto com vácuo variando entre 10^{-8} mbar e 10^{-3} mbar. Quando opera ininterruptamente, a pressão no seu flange de admissão não pode ser maior que 10^{-3} mbar; por outro lado, não é possível obter com esta bomba pressão menor que 10^{-6} mbar sem o emprego de acessórios. A figura 7.4 apresenta a variação da capacidade de sucção de uma BD em função da pressão reinante em seu flange de admissão. Conforme pode ser constatado nesta figura, para pressões menores que 10^{-3} mbar, a capacidade de sucção da bomba é constante. A faixa de pressão entre 10^{-3} mbar e 10^{-1} mbar é caracterizada por um fluxo de gás constante ($q = p \cdot S = \text{const.}$). A uma dada pressão (décimo de mbar), denominada resistência do vácuo prévio da BD, a curva apresenta uma inflexão, visto que a contra-pressão impede a formação do jato de vapor de óleo. Gases leves (como o hélio, por exemplo) são teoricamente bombeados por uma BD com uma capacidade de sucção maior que os gases pesados (como o ar, por exemplo). Contudo, isto naturalmente vai depender das características de construção da bomba em questão. Como regra geral, pode-se considerar que a capacidade de sucção da BD quando o gás é o hélio é cerca de 20 % maior que a capacidade de sucção da BD quando o gás é o ar.



A = Capacidade de sucção constante

B = Fluxo de gás constante

C = Capacidade de sucção efetiva correspondente da bomba mecânica

Figura 7.4:

Variação da capacidade de sucção de uma bomba de difusão em função da pressão em seu flange de admissão.

A relação de compressão da BD gira em torno de mais ou menos 10^7 para o ar e varia de 10^3 a 10^6 para o hélio. Esta relação depende muito da potência calorífica fornecida, podendo, dependendo de onde a bomba está sendo utilizada, variar bastante de uma bomba para outra.

Quando um objeto tem que permanecer muito tempo com baixa pressão, então o fluxo de gás removido pela bomba de alto vácuo tem importância secundária. Se o objeto, entretanto, tiver que ser enchido de ar e evacuado periodicamente, então o fluxo máximo de gás durante a evacuação passa a ser o principal critério de seleção da bomba de alto vácuo a ser utilizada. Uma BD de óleo moderna precisa de mais ou menos 1 kW de potência para um fluxo de gás de $1,6 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. As BD são fabricadas em diversos tamanhos e seus diâmetros variam entre cerca de 5 cm e 120 cm. Elas são empregadas em um vasto campo, que abrange tanto equipamentos de laboratório, onde são usadas bombas portáteis, até instalações industriais de fabricação com câmaras de vácuo de mais de 100 m^3 de volume, onde são empregadas as bombas de maior capacidade.

7.5.4 Acessórios

Se o óleo quente de uma BD entrar em contato com o ar atmosférico, então ele se oxidará e suas propriedades serão prejudicadas ou até mesmo destruídas. Com o objetivo de evitar que tal fato aconteça durante ou após a evacuação de um determinado objeto, muitas BD vêm equipadas com uma válvula de admissão especial (válvula de disco ou de borboleta), que possui o mesmo diâmetro do flange de admissão da bomba. Esta válvula grande, porém, influencia bastante a capacidade de sucção da BD, além de ser muito cara.

Além do movimento principal relativo ao seu fluxo de descida através da BD, as moléculas de vapor de óleo têm também um movimento térmico de importância secundária. Este movimento térmico faz com que algumas partículas caminhem em sentido contrário ao do movimento principal e penetrem no objeto que está sendo evacuado. Visto que este contra-fluxo de óleo é indesejável, algumas BD possuem anteparos refrigerados que bloqueiam a sua passagem em direção ao objeto que está sendo evacuado. Estas barreiras, denominadas chicanas, entretanto, normalmente reduzem em cerca de 50 % a capacidade de sucção da BD. As BD de óleo pequenas freqüentemente já vêm com chicanas integradas. Quando se realiza ensaios de detecção de vazamento e de estanqueidade, é comum utilizar uma BD sem chicanas, porém equipada com armadilha de nitrogênio líquido. Esta armadilha, além de impedir o contra-fluxo de óleo para o objeto de ensaio, constitui uma bomba de vapor de água bastante eficiente.

7.5.5 Agente propulsor

Os agentes propulsores empregados atualmente nas BD são quase que exclusivamente fluidos orgânicos de elevado peso molecular, como óleos minerais, óleos de silicone ou ésteres. Estes fluidos, cujos pesos moleculares variam entre 400 amu a 600 amu, se caracterizam por possuírem baixa pressão de vapor à temperatura ambiente (10^{-7} mbar a 10^{-10} mbar) e boas ou excelentes estabilidades térmica e química. A detecção de vazamento e o ensaio de estanqueidade devem ser feitos empregando somente agente propulsor de excelente qualidade, isto é, que tenha vida útil longa.

7.5.6 Operação

A BD geralmente opera em conjunto com uma bomba mecânica (bomba de palheta), destinada à obtenção do vácuo prévio. Empregada como bomba auxiliar, a bomba mecânica deve garantir que a pressão no flange de expulsão da BD seja maior que a resistência do vácuo prévio, ou seja, que a pressão do vácuo prévio seja menor que a pressão no flange de expulsão da BD. Menos de 1 % da capacidade de sucção da bomba de difusão basta para se ter o princípio da continuidade (figura 7.2). Caso se tenha que detectar vazamento ou realizar ensaio de estanqueidade em um objeto grande, então a capacidade de sucção da bomba mecânica necessária para fazer o vácuo prévio deve ser definida levando-se em consideração o volume do objeto de ensaio. A seqüência de operações para evacuar um objeto com o objetivo de detectar vazamento ou fazer ensaio de estanqueidade são:

- fazer vácuo prévio na bomba de difusão;
- fechar a válvula da bomba de difusão e ligar o seu sistema de aquecimento do óleo;
- fazer o vácuo prévio no objeto de ensaio utilizando um duto exclusivo para esta operação (by-pass);

- a pressão no objeto de ensaio chega a 10^{-2} mbar e a bomba de difusão atinge a temperatura de serviço;
- fechar o by-pass e, somente então, conectar a bomba mecânica com a bomba de difusão; a seguir, a válvula de conexão (válvula de disco) da bomba de difusão com o objeto de ensaio é aberta.

Antes de se permitir que o ar entre novamente no objeto de ensaio, deve-se fechar a válvula de admissão da bomba de difusão. Esta válvula de admissão só pode ser aberta quando a bomba de difusão tiver resfriado, sendo portanto conveniente, após o sistema de aquecimento do óleo ter sido desligado, deixar seu circuito de água (ou de ar) de refrigeração aberto por alguns minutos.

7.5.7 Manutenção

A manutenção de uma bomba de difusão limita-se ao controle ocasional do nível de óleo, sendo que um desvio de mais ou menos 30 % do nível normal na maioria das vezes não prejudica o seu bom funcionamento. Depois de um determinado tempo em serviço, ou se o óleo da bomba tiver entrado em contato ainda quente com o ar atmosférico, pode haver necessidade de trocar o óleo. Neste caso, a bomba deve ser desmontada, as incrustações e os resíduos de óleo devem ser completamente removidos e, a seguir, coloca-se óleo novo na bomba. Para que o óleo da bomba seja sempre adequadamente aquecido, é conveniente inspecionar a resistência elétrica da bomba e, caso ela não esteja mais em boas condições, deve-se substituí-la por uma nova.

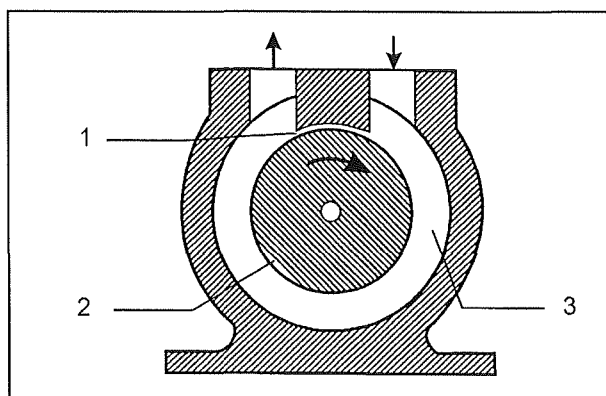
7.6 Bombas moleculares

As bombas moleculares e a bomba de difusão, além de terem princípios de funcionamento semelhantes, trabalham na mesma faixa de pressão. Enquanto que na bomba com agente propulsor a transmissão de impulso é de uma partícula de vapor de óleo para a partícula de gás ou vapor a ser removida, nas bombas moleculares esta transmissão é de uma superfície em movimento para a partícula a ser removida. Visto que no escoamento molecular o movimento das partículas é quase que exclusivamente de choque contra as paredes do recipiente que as contém, é justamente na faixa de pressão em que ocorre este tipo de escoamento que as bombas moleculares trabalham com eficiência. Este fato é que lhes conferiu o nome de bombas moleculares.

7.6.1 Princípio de funcionamento

O princípio geral de funcionamento da bomba molecular, denominado princípio de Gaede, é mostrado na figura 7.5. Dentro da carcaça cilíndrica da bomba molecular gira um rotor com alta velocidade. Entre este rotor e a parede interna da carcaça da bomba molecular existe uma fresta por onde ocorre a remoção das partículas de gás

ou vapor do objeto que está sendo evacuado. Esta fresta é dividida em uma região de sucção e outra de compressão, sendo as partículas transportadas da região de sucção (admissão) para a região de compressão (expulsão) por meio de sucessivos choques contra o rotor e a parede interna da carcaça da bomba molecular. A cada vez que as partículas se chocam contra o rotor, elas recebem um novo impulso, seguindo com maior velocidade em seu movimento na direção de bombeamento.



- 1 Selo de vedação
- 2 Rotor cilíndrico
- 3 Fresta de transporte

Figura 7.5:
Princípio geral de funcionamento da bomba molecular segundo Gaede [2.1].

Diversas soluções têm sido propostas com o objetivo de colocar em prática o princípio de Gaede. A bomba molecular desenvolvida que obteve maior aceitação foi a turbomolecular, tendo inclusive superado de longe a bomba de difusão. Além do princípio de Gaede supracitado, também se tem o princípio de funcionamento de bomba molecular de Holweck, empregado no desenvolvimento da bomba espiromolecular. É possível, também, encontrar no mercado bombas híbridas com múltiplos estágios, cada um operando segundo um determinado mecanismo de escoamento molecular.

7.6.2 Estrutura

As duas bombas moleculares mais encontradas no mercado, a turbomolecular e a espiromolecular, serão vistas mais detalhadamente a seguir. Algumas bombas moleculares híbridas, como a que utiliza palhetas, por exemplo, são classificadas, segundo a sua função, como sendo um destes dois tipos de bomba.

7.6.2.1 Bomba espiromolecular

A bomba espiromolecular (BEM) possui uma ranhura em espiral na parede interna de sua carcaça (estator), destinada ao transporte das partículas de gás ou de vapor que são removidas do objeto que está sendo evacuado. Além desta ranhura, que constitui um dos dois estágios de bombeamento que a BEM possui, a parede interna

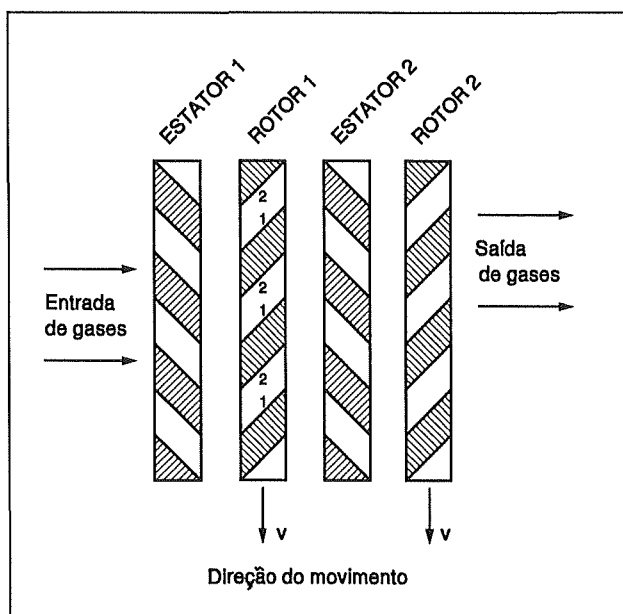
do estator, que forma com o rotor canais estreitos e de pequena profundidade, que também têm a função de transportar as partículas removidas do objeto que está sendo evacuado, constitui o segundo estágio de bombeamento, também denominado vedação dinâmica. No interior da BEM gira um rotor cilíndrico com cerca de 30.000 rpm. Na sua parte superior, junto ao flange de admissão da BEM, o rotor possui anéis com palhetas, que formam um estágio semelhante aos estágios de uma turbina e servem para impulsionar as partículas removidas do objeto que está sendo evacuado em direção à ranhura em espiral e aos canais do primeiro e segundo estágios de bombeamento, respectivamente. Este rotor é sustentado na BEM por meio de dois rolamentos de precisão e é acionado por um motor elétrico, controlado por um conversor de frequência eletrônico externo, que se encontra no lado da BEM que está com vácuo prévio (conexão de expulsão).

O mecanismo de bombeamento da BEM é evidenciado na figura 7.6. Nesta figura estão mostrados o canal de transporte, o estator, o rotor e duas partículas que abandonam a superfície seguindo uma direção fazendo 90° com a mesma e com a mesma velocidade térmica (v). A partícula que deixa a superfície do rotor tem um componente de velocidade adicional na direção da remoção das partículas, que é igual à velocidade do local do rotor contra o qual ela se chocou. É compreensível que a velocidade da partícula seja comparável à velocidade do rotor, para que haja uma ação de bombeamento eficiente.

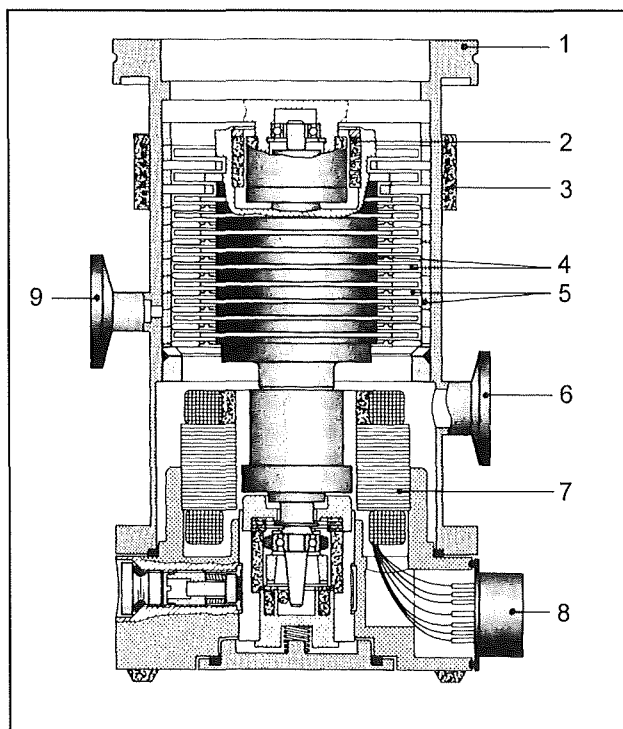
7.6.2.2 Bomba turbomolecular

A estrutura de uma bomba turbomolecular (BTM) é apresentada na figura 7.7. Um rotor com anéis de palhetas inclinadas em uma determinada direção, semelhante aos estágios de palhetas de uma turbina, gira com alta velocidade (entre 10.000 rpm e 100.000 rpm, dependendo do tamanho da bomba) dentro de um estator com anéis de palhetas inclinadas em direção contrária à inclinação das palhetas do rotor. Cada par de palhetas rotor-estator constitui um estágio de bombeamento. O rotor, que é sustentado por meio de rolamentos de alta precisão, é acionado por um motor elétrico que se encontra no lado da BTM que está com vácuo prévio. Este motor elétrico é controlado por um conversor de frequência eletrônico. A remoção do calor devido à compressão das partículas removidas do objeto que está sendo evacuado, ao atrito do rolamento e ao motor elétrico, é feita por um sistema de refrigeração a água, nas bombas grandes, ou a ar, no caso das bombas pequenas.

O mecanismo de funcionamento da BTM pode ser melhor compreendido observando-se a figura 7.6, que mostra a ação de bombeamento em dois estágios (pares rotor / estator). Como a bomba trabalha na faixa de escoamento molecular, somente devem ser considerados os choques das moléculas contra o rotor e o estator. As partículas provenientes do estator 1 que colidem com o rotor 1 adquirem a velocidade v do rotor 1. Em sua reflexão sobre a superfície 1, estas partículas têm sua velocidade térmica reduzida e na superfície 2, ela é aumentada. Com base na inclinação das superfícies 1 e 2, resulta um fluxo de partículas na direção desejada.

**Figura 7.6:**

Mecanismo de evacuação entre dois estágios (pares rotor / estator) de uma bomba turbomolecular.



- 1 Flange de ultra-alto vácuo
- 2 Rolamento magnético
- 3 Resistência elétrica
- 4 Rotor
- 5 Estator
- 6 Flange de vácuo prévio
- 7 Motor
- 8 Conexão com a rede elétrica
- 9 Conexão para quebra de vácuo

Figura 7.7:

Vista interna de uma bomba turbomolecular [2.2].

A BTM também pode ser considerada como um filtro, visto que ela deixa passar determinadas partículas em um dado sentido, conforme ilustrado na figura 7.8. Uma partícula que esteja sendo transportada na direção de bombeamento segundo a trajetória definida pela inclinação da pá de um determinado estágio do estator pode passar pelo rotor deste estágio e atingir o estágio seguinte do estator sem ter seu percurso afetado. Uma outra partícula com movimento contrário, que também tenha sua trajetória definida pelo ângulo de inclinação da pá de um determinado estágio do estator, por outro lado, se choca com o rotor em movimento. A eficiência da filtragem depende do peso molecular da partícula, sendo a possibilidade de utilizar a BTM como filtro muito explorada na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade realizados com o detector de vazamento de hélio (técnica do contra-fluxo).

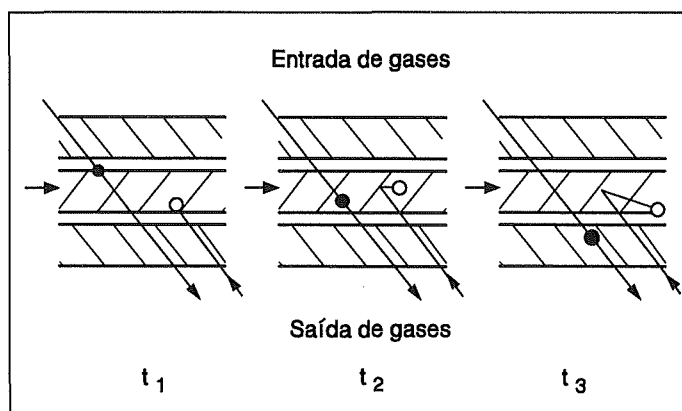


Figura 7.8:
Bomba turbomolecular
como filtro dependente
da direção.

7.6.3 Características

Segundo o princípio de funcionamento das bombas moleculares, a capacidade de sucção na faixa de alto vácuo é constante e aproximadamente igual para todos os gases. Observando-se a figura 7.9, que apresenta a variação da capacidade de sucção de ar de uma BTM (com capacidade de sucção nominal de $400 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) em função da pressão de admissão, pode-se constatar que a capacidade de sucção para uma pressão de admissão menor que 10^{-4} mbar é praticamente constante. A influência do tipo de gás sobre a capacidade de sucção da BTM pode ser alterada modificando-se o seu projeto, de maneira que é possível encontrar no mercado bombas com capacidade de sucção de hélio maior e menor que a de ar atmosférico.

Os diversos campos de utilização das bombas espiro e turbomolecular podem ser identificados com maior facilidade quando se analisa a variação da capacidade de sucção relativa em função da pressão de admissão. Na figura 7.10 está apresentada a variação da capacidade de sucção relativa em função da pressão de admissão de duas bombas de alto vácuo, as bombas espiro e turbomolecular, bem como de uma

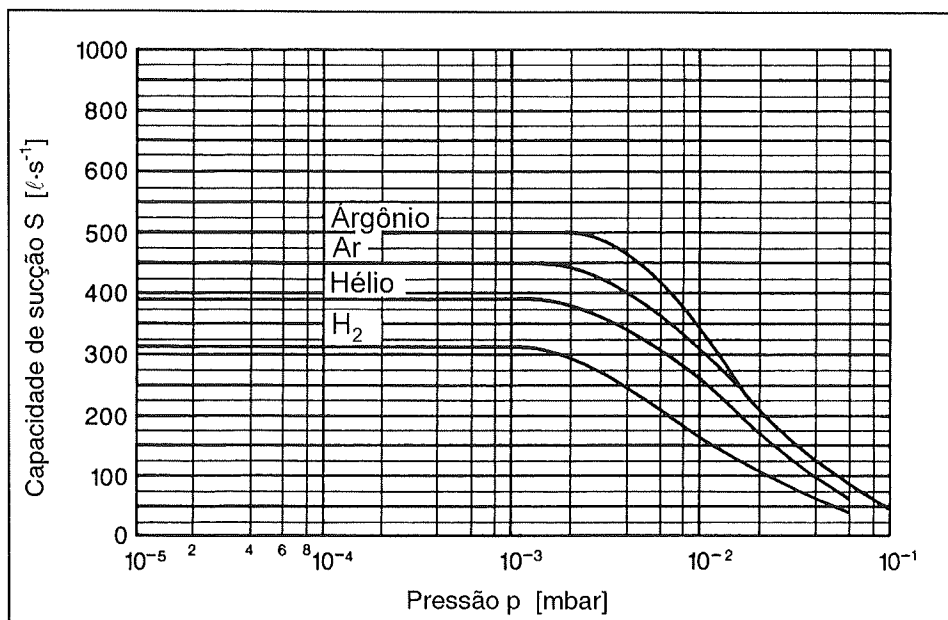


Figura 7.9: Capacidade de sucção de diferentes gases de uma bomba turbomolecular em função da pressão no flange de admissão [2.1].

bomba Roots, que é a bomba mecânica mais empregada para se fazer o vácuo prévio necessário para o funcionamento de uma bomba molecular, além de ser também muito utilizada como bomba auxiliar na evacuação de objeto grande ao se realizar ensaios de detecção de vazamento e de estanqueidade. A capacidade de sucção de uma bomba molecular depende de seu tamanho e pode variar de cerca de $10 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$ a até aproximadamente $10.000 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$. A bomba molecular que vem embutida no detector de hélio, por exemplo, tem, geralmente, uma capacidade de sucção que varia entre $10 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$ e $100 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$.

Em virtude do mecanismo de bombeamento que atua em uma bomba molecular, a relação de compressão varia exponencialmente com a raiz quadrada do peso molecular do gás que está sendo bombeado (equação 7.4). Isto significa, por um lado, que a bomba turbomolecular constitui uma barreira ideal para o vapor de óleo ($K_0 > 10^{10}$); por outro lado, gases leves (como o hélio ou o hidrogênio; $10^2 < K_0 < 10^3$) podem atravessar a BTM facilmente na direção contrária à direção de bombeamento (ensaios de detecção de vazamento e de estanqueidade realizados com a técnica do contra-fluxo).

$$K_0 \propto e^{\sqrt{M}} \quad (\text{equação 7.4})$$

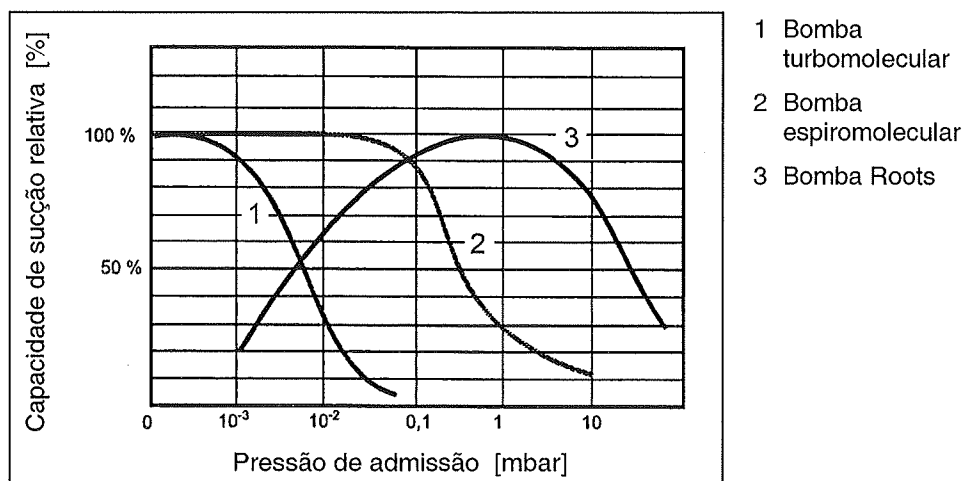


Figura 7.10: Variação da capacidade de sucção relativa em função da pressão de admissão de bombas de vácuo.

7.6.4 Operação

A operação da bomba molecular é extremamente simples. Ela é alimentada por um conversor eletrônico, que também controla as suas funções de sobrecarga e a sua aceleração máxima. Quando o tempo decorrente entre o início da evacuação para a obtenção do vácuo prévio até o momento em que a bomba atinge a pressão de sucção máxima for de alguns minutos, então a bomba de alto vácuo pode trabalhar conjuntamente com a bomba mecânica de vácuo prévio. Entretanto, quando o objeto de ensaio é grande, pode ser necessário evacuar primeiramente só com a bomba mecânica; somente após o objeto de ensaio ter atingido o vácuo prévio é que poder-se-ia ligar a bomba turbomolecular para reduzir ainda mais a sua pressão. Neste caso, porém, não seriam necessários um duto extra em paralelo (by-pass) de evacuação e válvulas caras, podendo o objeto de ensaio ser evacuado através da própria bomba turbomolecular.

Quando a bomba molecular trabalha em regime estacionário na faixa de alto vácuo, então basta que a capacidade de sucção da bomba mecânica para obtenção de vácuo prévio seja somente 1 % da capacidade de sucção da bomba molecular. Visando-se a redução do tempo de obtenção de vácuo prévio, entretanto, é comum empregar uma bomba mecânica grande na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade. A elevada resistência ao vácuo prévio da bomba espiromolecular permite que ela seja utilizada também com uma bomba de membrana (bomba de diafragma) sem óleo como bomba de realização de vácuo prévio.

Uma bomba molecular moderna que esteja trabalhando com seu número de rotações nominal pode entrar em contato brusco com o ar atmosférico sem que suas

palhetas sejam danificadas. Porém, é preciso evitar este contato brusco das palhetas com o ar atmosférico, de maneira que a vida útil desta bomba não seja reduzida. A entrada de ar deve ocorrer no flange de admissão, de modo que não entre na bomba molecular vapor de óleo proveniente do duto de evacuação prévia.

De acordo com o seu tamanho, a bomba molecular pode ser refrigerada a água ou a ar. Neste caso, é importante seguir rigorosamente as especificações do fabricante, visto que tanto uma refrigeração insuficiente como uma excessiva pode reduzir a vida útil da bomba.

7.6.5 Manutenção

As bombas moleculares são equipamentos de fácil manutenção, pois necessitam somente de lubrificação dos rolamentos, com graxa ou com óleo, conforme for o caso, após alguns milhares de horas de operação. Os rolamentos são peças que sofrem desgaste e possuem vida útil que oscila entre 10.000 h e 20.000 h. A troca dos rolamentos de determinadas bombas só pode ser feita pelo próprio fabricante, porém os rolamentos da maioria das bombas podem ser trocados pelo próprio usuário. Neste último caso, contudo, não se deve esquecer que as bombas moleculares mecânicas são equipamentos de precisão, exigindo que sua manutenção seja feita corretamente e em ambiente limpo.

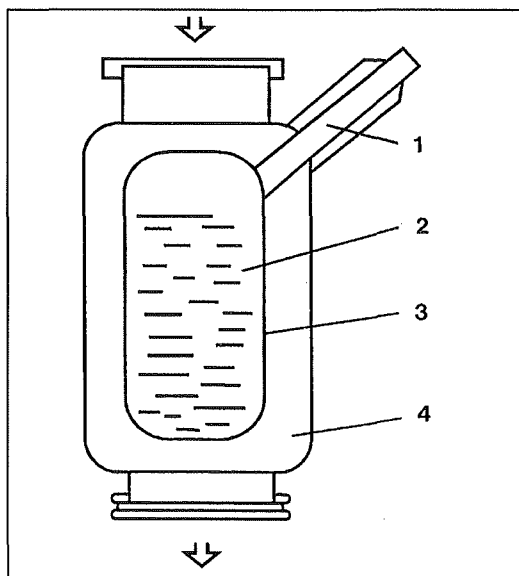
7.7 Outras bombas de alto vácuo

Atualmente, ao se detectar vazamento e fazer ensaio de estanqueidade com hélio, emprega-se quase que exclusivamente bombas de difusão ou moleculares mecânicas. Todavia, existem outras bombas de alto vácuo que, por serem projetadas para trabalhar com base em determinados princípios físicos, também são adequadas, em princípio, para a realização destes ensaios e, em certos casos, quando se tem problemas muito específicos, proporcionam até vantagens quando comparadas com os tipos de bombas de alto vácuo mencionados nos itens anteriores. A seguir, serão abordados brevemente alguns tipos de bombas de alto vácuo da família das bombas de superfície.

7.7.1 Bomba criogênica

A explicação mais simples de uma bomba criogênica (BC), também denominada armadilha ou bomba de condensação, está apresentada na figura 7.11. A BC é na realidade uma armadilha de condensação contendo, na maioria das vezes, nitrogênio líquido (LN_2 , temperatura de ebulição de -196°C). Sobre as paredes internas do recipiente que contém nitrogênio líquido, que se supõe estarem à temperatura de cerca de -196°C , condensa CO_2 , bem como vapores de água, de óleo e de solventes. Esta armadilha de condensação é muito usada na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade realizados em objeto com grande área de

superfície interna, por apresentar intensa degasagem, ou quando o detector de vazamento de hélio deve ser protegido eficientemente dos efeitos maléficos do vapor de água e de outras sujeiras que se encontrem dentro do objeto de ensaio. A capacidade de sucção da BC depende da área da superfície que foi resfriada à temperatura criogênica. Quando se usa um flange DN100, por exemplo, a capacidade de sucção da BC é de $1000 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, muito maior, portanto, que a capacidade de sucção da bomba turbomolecular ($100 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) com o mesmo flange.



- 1 Duto para introdução de LN_2
- 2 LN_2
- 3 Armadilha
- 4 Compartimento com vácuo

Figura 7.11:
Seção longitudinal de uma armadilha de condensação de nitrogênio.

7.7.2 Bomba de Getter

A bomba de Getter (BG) aprisiona em uma superfície ativa, por meio de ligações químicas, as partículas de gás ou vapor que estão sendo removidas de um determinado objeto. O material mais empregado na fabricação deste tipo de bomba é o titânio, pois ele reage com os principais gases encontrados no ar atmosférico (N_2 , O_2 , CO_2 e H_2), além do vapor de água, naturalmente. Os gases nobres (Ar, He, Ne, Kr e Xe), que são inertes e não reagem com o titânio, no entanto, não podem ser removidos pela BG. A estrutura de uma BG, apresentada na figura 7.12, é muito simples. Na BG o titânio é sublimado em uma fonte de titânio que se encontra à temperatura de cerca de 1500°C entre duas placas coletoras. Os átomos de Ti se depositam nas placas coletoras, formando nas mesmas um filme altamente ativo. As partículas ativas de gás ou vapor provenientes do objeto que está sendo evacuado entram em contato com este filme, reagem com o titânio e formam compostos sólidos estáveis. Desse modo, transformando partículas de gás ou de vapor em compostos sólidos, obtém-se uma ação de bombeamento altamente efetiva. Uma das grandes vantagens da BG é a possibilidade de obter vácuo sem

hidrocarbonetos, além do fato, obviamente, dela não vibrar durante o funcionamento, como é o caso das bombas mecânicas.

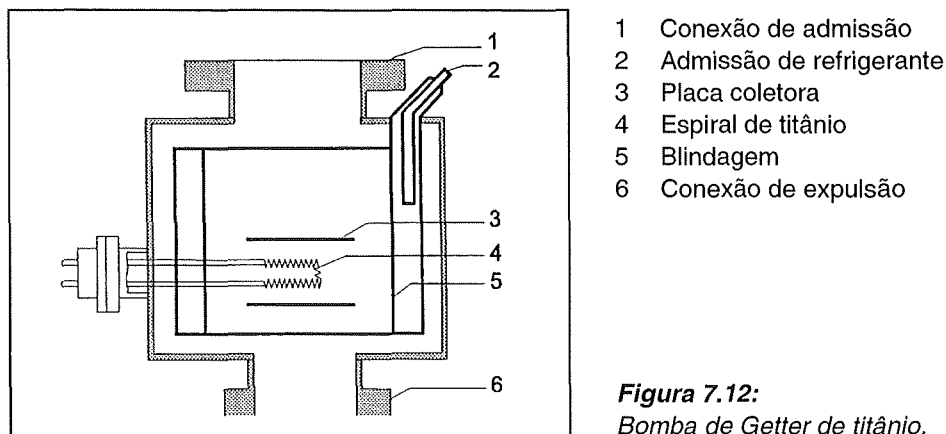


Figura 7.12:
Bomba de Getter de titânio.

7.7.3 Bomba de íon

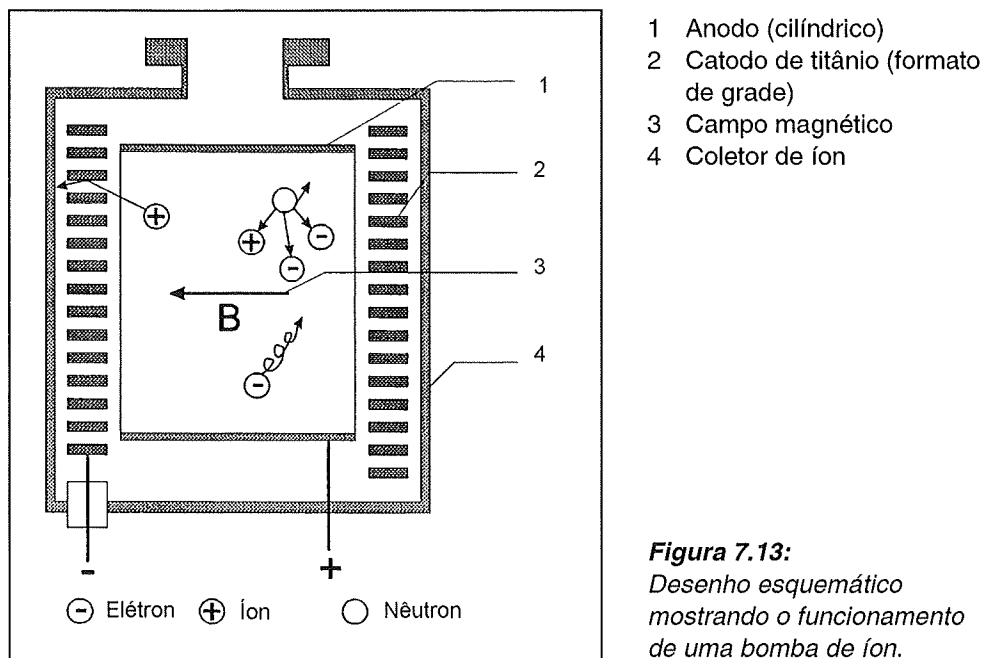
O princípio de funcionamento da bomba de íon (BI) consiste na geração de íons através de uma descarga elétrica no gás ou vapor existente em um sistema com vácuo. A figura 7.13 ilustra, esquematicamente, o funcionamento de uma bomba de íon. Em um sistema contendo vácuo é produzida uma descarga elétrica no gás, ou vapor, presente. Após esta descarga elétrica, os íons positivos de gás, ou vapor, produzidos são acelerados em direção ao catodo, penetram nele com grande energia, ficando portanto aprisionados e acarretando uma queda da pressão. Com base neste mecanismo também é possível remover os gases nobres de um objeto que não podem ser removidos por quimissorção em uma bomba de Getter.

7.8 Comparação de sistemas

Ao se comparar as diferentes bombas de alto vácuo a serem empregadas na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade com hélio, deve-se levar em conta as suas duas maneiras distintas de utilização:

- utilização da bomba de alto vácuo em detector vazamento de hélio;
- utilização da bomba de alto vácuo como bomba auxiliar adicional.

Os detectores de vazamento de hélio fabricados atualmente contêm, em sua grande maioria, uma bomba molecular, ao invés de virem equipados com bomba de alto vácuo de difusão, pelo fato de se poder detectar vazamento e fazer ensaio de estanqueidade sem necessidade de usar nitrogênio líquido. Quando o ensaio é conduzido segundo a técnica de contra-fluxo, as bombas moleculares protegem o

**Figura 7.13:**

Desenho esquemático mostrando o funcionamento de uma bomba de íon.

sensível espectrômetro de massa do detector de hélio da contaminação com partículas de óleo ou de outras substâncias melhor que a bomba de difusão. Esta última bomba também pode ser empregada na inspeção realizada com a técnica do contra-fluxo, porém há necessidade de se utilizar uma armadilha de condensação com nitrogênio. Outras vantagens das bombas moleculares frente à bomba de difusão são o menor tempo para entrar em funcionamento e a maior facilidade de operação. O preço de um detector de vazamento de hélio com bomba molecular é maior que o de um detector de vazamento semelhante com bomba de difusão, porém seu custo operacional é menor.

Muitas vezes há necessidade de usar bomba de alto vácuo adicional na detecção de vazamento ou no ensaio de estanqueidade. Nestes casos, a decisão da escolha de um determinado tipo de bomba de alto vácuo deve ser tomada com base nas particularidades do ensaio em questão, de maneira que se possa escolher, levando-se em consideração os aspectos econômicos, a bomba mais adequada.

Fundamentos do Ensaio de Estanqueidade

- 8.1 Introdução
- 8.2 Generalidades
- 8.3 Duto com vácuo
- 8.4 Tempo de resposta
- 8.5 Selo de vedação
- 8.6 Exemplos de especificação de estanqueidade
- 8.7 Vazamento padrão

8 Fundamentos do ensaio de estanqueidade

8.1 Introdução

O curso de formação de inspetores de detecção de vazamento e de ensaio de estanqueidade nível I aborda, tanto sob o ponto de vista teórico como prático, através de exemplos típicos, os fundamentos destas técnicas de inspeção que estão correlacionados com o tema do capítulo 9 deste livro. Estes exemplos serão abordados neste livro, porém de uma maneira mais profunda e, às vezes, bastante detalhada. Os tópicos a serem abordados serão os aspectos físicos relacionados com os dispositivos de ensaio, necessários para o melhor entendimento do que acontece durante a detecção de vazamento e o ensaio de estanqueidade, bem como para evitar perda de tempo e surpresas desagradáveis, relacionados com erros de procedimento.

8.2 Generalidades

A pressão em um dos lados da parede de um objeto que está sendo inspecionado com o método da bolha é maior que a pressão no outro lado de sua parede onde está sendo observado o resultado do ensaio. Desta maneira, o lado que está submetido a menor pressão é inspecionado cuidadosamente e o local do vazamento prontamente identificado.

Com relação à inspeção de um objeto com o método da variação de pressão, sabe-se que o volume do objeto de ensaio deve ser o menor possível, de modo que o tempo de ensaio também seja o menor possível, conforme mostra a equação 8.1.

$$q_L = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot V \quad (\text{equação 8.1})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento do objeto de ensaio;
- Δp é a variação de pressão medida durante a realização do ensaio;
- Δt é o tempo de ensaio;
- V é o volume do objeto de ensaio.

No caso da detecção de vazamento e do ensaio de estanqueidade empregando hélio como gás de ensaio, todavia, o procedimento de inspeção é nitidamente mais complexo que aqueles empregados no método da bolha. O objeto de ensaio pode ser muito grande e/ou possuir uma geometria muito complexa, como, por exemplo, um sistema de tubulação. O detector de vazamento supracitado empregado neste tipo de inspeção é um espectrômetro de massa de hélio, que, porém, só funciona perfeitamente quando se tem alto vácuo ($p < 10^{-4}$ mbar). Os átomos de hélio ionizados, que constituem partículas eletricamente carregadas, são separados dos outros tipos de partículas de gás em um campo magnético e não podem se chocar

com nenhuma partícula de gás durante seu deslocamento até o coletor de íons. Assim, eles são mantidos em sua trajetória preestabelecida. Na inspeção de um objeto com hélio como gás de ensaio deseja-se que o hélio que passa por uma determinada descontinuidade chegue ao detector de vazamento de hélio o mais rápido possível. Visando-se atingir este objetivo, utiliza-se normalmente conexões (tubos, mangueiras, etc.) curtas; ao mesmo tempo, porém, há necessidade de diminuir a pressão de 1000 mbar, isto é, da pressão atmosférica, até aproximadamente 10^{-4} mbar, o que corresponde a uma redução de cerca de sete ordens de grandeza.

Na detecção de vazamento com sonda aspiradora, o hélio que passa por uma determinada descontinuidade é aspirado com pouca força, pois a capacidade de sucção da sonda aspiradora normal é cerca de 10^{-3} mbar·ℓ·s⁻¹, isto é, aproximadamente 1 mm³ de gás por segundo a uma pressão atmosférica normal. O gás aspirado vai da ponta da sonda aspiradora normal, passando pela sua mangueira, até o espectrômetro de massa em regime de escoamento molecular. A sonda aspiradora rápida, por outro lado, tem uma capacidade de sucção de cerca de 1 cm³ de gás por segundo a pressão atmosférica normal, isto é, uma capacidade de sucção nitidamente maior que a da sonda aspiradora normal. O gás aspirado pela sonda rápida, entretanto, é conduzido de sua ponta até o espectrômetro de massa, com a ajuda de uma bomba auxiliar, em regime de escoamento laminar. Antes de chegar ao espectrômetro de massa, porém, o hélio passa por um diafragma, que permite que somente 1/1000 do gás aspirado atinja o espectrômetro, já que o transdutor do espectrômetro de massa não consegue funcionar com uma quantidade maior de gás. O tipo de escoamento do gás de ensaio da ponta da sonda aspiradora até o espectrômetro de massa tem uma importância muito grande na prática, pois no escoamento laminar a velocidade das partículas de gás é muito maior que aquela quando o escoamento ocorre em regime molecular. A sonda aspiradora normal só aspira aproximadamente 1 % do gás que atravessa a descontinuidade, porém todo o gás aspirado chega até o espectrômetro de massa. A sonda aspiradora rápida, por outro lado, aspira 100 % do gás que passa pela descontinuidade, porém só cerca de 1/1000 deste gás chega até o espectrômetro de massa, o que faz com que a

Tabela 8.1: Tempo de resposta quando se detecta vazamento com sonda aspiradora (cheirador) com mangueira de diferentes comprimentos.

Comprimento da mangueira [m]	Tempo de resposta [s]	
	Sonda normal	Sonda rápida
3	1	—
5	—	1
25	45	5
50	270	15

sensibilidade da sonda aspiradora rápida seja uma ordem de grandeza menor que a da sonda aspiradora normal. Com base nos dados apresentados na tabela 8.1, que fornece o tempo de resposta quando se detecta vazamento com sondas aspiradoras normal e rápida com mangueiras de diferentes comprimentos, é possível decidir que tipo de sonda usar e qual pode ser o comprimento da sua mangueira quando se inspeciona um determinado objeto.

8.3 Dutos com vácuo

Os fenômenos relacionados aos escoamentos molecular e laminar em uma descontinuidade fictícia e ideal, com geometria de tubo capilar de seção transversal reta circular, vistos no capítulo anterior também ocorrem em dutos (como mangueiras, tubos, etc.) que trabalham com vácuo (inclusive na mangueira de uma sonda aspiradora). A principal diferença que existe entre as descontinuidades e os dutos que trabalham com vácuo é que um objeto, de preferência, não deve ter descontinuidades, ou, quando forem inevitáveis, elas devem ser as menores possíveis, enquanto que os dutos devem permitir que o gás que passa por uma descontinuidade seja conduzido o mais rápido possível até o detector de vazamento, tendo, para isso, que ter diâmetro grande e adequado. Diâmetro adequado significa, neste caso, uniforme. Quando, por exemplo, a conexão de admissão de um detector de vazamento de hélio é um flange “DN 40 KF” (onde DN é o diâmetro nominal do flange e KF (Kleinflansche) é o tipo de flange), ou quando o flange através do qual o objeto de ensaio será conectado ao detector de vazamento de hélio também tem este diâmetro, então os dutos que ligam o detector de vazamento de hélio com o objeto de ensaio não precisam ter um diâmetro maior que 40 mm. Em outras palavras, segundo um ditado popular, o fluxo de gás é determinado pelo “gargalo” do flange, que constitui o local mais estreito de um duto. A eletrônica permite fazer uma analogia com a tecnologia do vácuo, visto que quando várias resistências elétricas estão ligadas em série, ao se impor uma diferença de potencial (que corresponde a uma diferença de pressão na tecnologia do vácuo), o fluxo de corrente elétrica (que corresponde ao fluxo de gás na tecnologia do vácuo) será limitado pela maior resistência elétrica. O inverso de uma resistência elétrica é a sua condutância, conforme mostra a equação 8.2.

$$C = \frac{1}{R} \quad (\text{equação 8.2})$$

onde

- C é a condutância;
- R é a resistência.

Caso a ligação seja em série ou em paralelo, tem-se as equações 8.3 e 8.4, respectivamente.

$$\sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (\text{equação 8.3})$$

$$\sum_{i=1}^n C_i = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (\text{equação 8.4})$$

onde

- $\sum_{i=1}^n R_i$ é a resistência total, ou seja, o somatório de todas as resistências;
- $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ são as diversas resistências;
- $\sum_{i=1}^n C_i$ é a condutância total, ou seja, o somatório de todas as condutâncias;
- $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ são as diversas condutâncias.

As equações 8.3 e 8.4 também são válidas para o escoamento de gás através de um duto que trabalha com vácuo.

A diferença de pressão necessária para que haja um fluxo de gás é obtida através do emprego de bomba de vácuo ou de equipamento que tenha uma bomba de vácuo embutida, como, por exemplo, um detector de vazamento de hélio. As características da bomba de vácuo que são importantes neste caso são a sua capacidade de sucção (S) e a sua potência de sucção (q_{pv}). Uma bomba de vácuo de palheta "D36", por exemplo, tem uma capacidade de sucção constante de 36 m³/h, ou seja, 10 ℓ/s, quando a pressão na conexão de sucção varia entre 1013 mbar e 0,1 mbar. Um detector de vazamento de hélio, cuja pressão máxima admissível no espectrômetro de massa seja 2·10⁻⁴ mbar, tem uma capacidade de sucção de ar de 7,5 ℓ/s e de hélio de 20 ℓ/s (2,7 vezes maior devido ao escoamento molecular). A potência de sucção de ar,

$$q_s = p \cdot S = 2 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \cdot 7,5 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{ℓ} \cdot \text{s}^{-1},$$

limita a entrada de gás, como, por exemplo, no caso da sonda aspiradora, conforme já mencionado anteriormente.

A capacidade de sucção no flange de admissão de um equipamento que está fazendo vácuo poderá ser reduzida significativamente caso se conecte dutos, válvulas, diafragmas, etc., neste flange. A capacidade de sucção efetiva real, neste caso, é determinada pela equação 8.5.

$$\frac{1}{S_{efe}} = \frac{1}{S_o} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \frac{1}{S_o} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (\text{equação 8.5})$$

onde

- S_{efe} é a capacidade de sucção efetiva do equipamento que está fazendo vácuo;
- S_O é a capacidade de sucção no flange de sucção do equipamento que está fazendo vácuo;
- $C_1, C_2, \dots, C_n$ são as condutâncias dos diversos elementos conectados ao equipamento que está fazendo vácuo;
- $\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$ é a condutância total, ou seja, o somatório de todas as condutâncias.

As equações 8.6 e 8.7, denominadas equações de Knudsen, permitem correlacionar a taxa de vazamento de ar e de hélio a 20°C, respectivamente, através de uma descontinuidade fictícia e ideal com geometria de um tubo capilar com seção reta transversal circular, com as dimensões desta descontinuidade e com a diferença de pressão entre as suas duas extremidades. A equação 8.8 mostra a correlação entre a condutância e a diferença de pressão reinante.

$$q_{L,ar,20^{\circ}C} = \left(136 \cdot \frac{d^4}{\ell} \cdot \bar{p} + 12,1 \cdot \frac{d^3}{\ell} \right) \cdot \Delta p \quad (\text{equação 8.6})$$

$$q_{L,He,20^{\circ}C} = \left(126 \cdot \frac{d^4}{\ell} \cdot \bar{p} + 32,6 \cdot \frac{d^3}{\ell} \right) \cdot \Delta p \quad (\text{equação 8.7})$$

$$q_L = C \cdot \Delta p \quad (\text{equação 8.8})$$

onde

- $q_{L,ar,20^{\circ}C}$ é a taxa de vazamento de ar a 20°C através da descontinuidade;
- d é o diâmetro da descontinuidade;
- $\bar{p}$ é a média aritmética dos valores da pressão nas duas extremidades da descontinuidade;
- ℓ é o comprimento da descontinuidade;
- Δp é a diferença de pressão entre as duas extremidades da descontinuidade;
- $q_{L,He,20^{\circ}C}$ é a taxa de vazamento de hélio a 20°C através da descontinuidade;
- q_L é a taxa de vazamento;
- C é a condutância do duto.

Comparando-se as equações 8.6 ... 8.8, constata-se facilmente que se consegue obter uma condutância elevada escolhendo-se um duto de grande diâmetro (d) e, em segundo lugar, cujo comprimento (ℓ) seja pequeno.

A condutância de um diafragma é proporcional ao quadrado de seu diâmetro. As capacidades de sucção de ar e hélio de um detector de vazamento citadas acima

correspondem à condutância de um diafragma de 9 mm de diâmetro. Se um diafragma com este diâmetro fosse colocado na conexão de sucção do espectrômetro de massa, então a capacidade de sucção seria a metade daquela caso não se estivesse utilizando o diafragma. Este tipo de diafragma, na realidade, é usado às vezes em detectores de vazamento de hélio com o objetivo de alterar a sua capacidade de sucção e, com isso, aumentar a sensibilidade do espectrômetro de massa em relação ao hélio.

8.4 Tempo de resposta

Para o melhor entendimento do tempo de resposta, é interessante primeiramente supor um dispositivo completo de ensaio de estanqueidade, constituído de um objeto de ensaio, um detector de vazamento de hélio e de um duto para vácuo. Quando o hélio penetra no objeto de ensaio com vácuo, primeiramente ele se distribuirá em seu interior, para, então, ser aspirado, um pouco mais ou menos rápido, pelo detector de vazamento de hélio. Se fosse possível soltar um jato demorado de hélio em um flange do objeto de ensaio e depois esperar, então o detector de vazamento de hélio iria aspirar todo o hélio que tivesse penetrado no objeto de ensaio. Entretanto, o inspetor não pode gastar tanto tempo na inspeção do objeto de ensaio.

A equação 8.9 mostra como varia a pressão do hélio em função do tempo e, desta maneira, o valor mostrado no painel do detector de vazamento de hélio.

$$p(t) = \frac{q_L}{S_{efe}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{efe} \cdot t}{V}} \right) \quad (\text{equação 8.9})$$

onde

- $p(t)$ é a variação da pressão do hélio em função do tempo;
- q_L é a taxa de vazamento;
- S_{efe} é a capacidade de sucção efetiva;
- t é o tempo;
- V é o volume do objeto de ensaio.

Da equação 8.9 pode-se obter a relação expressa pela equação 8.10.

$$p(t) \approx \frac{q_L}{V} \cdot t \quad (\text{equação 8.10})$$

Após o tempo

$$\tau = \frac{V}{S_{efe}}, \quad (\text{equação 8.11})$$

$$p(t) = 0,632 \cdot \frac{q_L}{S_{efe}}, \quad (\text{equação 8.12})$$

isto é, um valor correspondente a 63 % do valor de equilíbrio a ser mostrado no indicador do equipamento terá sido atingido. A constante τ (equação 8.11), entretanto, deve ser pequena. Ela depende do volume do objeto de ensaio (V), que, porém, não pode ser alterado. Se o objeto de ensaio for muito grande, então vai demorar muito tempo para o detector de vazamento de hélio dar algum sinal indicando a chegada de hélio ao seu espectrômetro de massa. Uma possibilidade de reduzir este tempo é aumentar bastante a capacidade de sucção efetiva, isto é, empregar um duto de vácuo de grande diâmetro. Este assunto será tratado com maior profundidade no capítulo que aborda a detecção de vazamento com hélio.

Como ilustração de aplicação das equações 8.9 ... 8.12 na inspeção de objetos, equipamentos e instalações, bem como da utilidade do conhecimento das mesmas, pode-se citar o ensaio de estanqueidade e a localização de vazamentos em uma instalação de pesquisa com um “capilar” de meio quilômetro de comprimento. Esta instalação de pesquisa internacional possui uma bobina resfriável e supercondutora de 500 m de comprimento, constituída de 34 tubos capilares paralelos com seção reta transversal retangular (3,1 mm x 0,9 mm), cuja máxima taxa de vazamento de hélio admissível nas condições normais de temperatura e de pressão é 10^{-6} mbar·ℓ·s⁻¹. O procedimento de ensaio desta bobina, elaborado por especialistas do Centro de Pesquisa de Karlsruhe (Alemanha) e da firma Siemens, envolveu grande genialidade e simplicidade. Segundo este procedimento, foi produzido dentro da bobina, através da realização de uma diferença de pressão em seu interior (a pressão na entrada da bobina era aproximadamente 250 mbar e na sua saída cerca de 150 mbar), um escoamento laminar de nitrogênio. A extremidade da bobina por onde saía o gás foi conectada a um detector de vazamento de hélio, porém na conexão foi colocada uma membrana semipermeável, através da qual o hélio passava com muito mais facilidade que o nitrogênio. Na entrada da bobina, conectou-se um vazamento padrão de hélio, cuja válvula de conexão com a bobina ficou aberta por quinze minutos. Cerca de cento e vinte minutos após a válvula do vazamento padrão de hélio ter sido fechada, o detector de vazamento de hélio começou emitir sinal acusando a chegada de hélio, sinal este que durou cerca de vinte minutos, indicando que o hélio injetado foi transportado, em uma frente praticamente fechada, pelo nitrogênio, em escoamento laminar, até a saída da bobina. A detecção de vazamento foi realizada envolvendo-se um segmento da bobina com uma folha de polietileno e, a seguir, soltando-se um jato de hélio dentro deste envoltório. Conhecendo-se o tempo que o hélio necessitava para se deslocar do segmento onde se soltou o jato de hélio até alcançar o detector de vazamento, foi possível identificar e reparar os segmentos da bobina por onde ocorriam vazamentos.

8.5 Selo de vedação

Os selos de vedação já se encontram em determinados objetos de ensaio ou, como acontece na maioria das vezes, são empregados na conexão do objeto de ensaio com o detector de vazamento de hélio. A maneira mais segura de unir dois componentes é soldá-los, visto que, assim, não há passagem de hélio através da junta. Se a taxa de vazamento de hélio nas condições normais de temperatura e pressão de uma junta soldada for mencionada, então trata-se do limite de detecção do método de ensaio empregado, que, dentre outras coisas, também depende da maneira como a medida da taxa de vazamento está sendo conduzida, pois ela pode ser feita tanto em laboratório como no campo. Outra maneira de unir dois componentes, porém bem mais prática e simples que a soldagem, é utilizar um material moldável na superfície dos materiais a serem unidos. Após este material ser modelado sobre a junta, ao se ligar o detector de vazamento de hélio, o ar atmosférico passa a agir como força de vedação na junta.

Selos de vedação metálicos são caros, porém geralmente não permitem a passagem de hélio. A vedação é conseguida através da deformação plástica de arames de índio ou de chumbo, bem como de anéis de seção reta transversal circular de índio ou de alumínio ou de anéis de seção reta transversal retangular de cobre, quando comprimidos pelas partes de aço que constituem os dois elementos da junta a ser unida. Os parâmetros de vedação mais importantes quando se emprega selos metálicos são a força de compressão e a temperatura admissível. A temperatura de fusão do índio é 156°C, a do chumbo é 327°C, a do alumínio é 659°C e a do cobre é 1083°C. Para remover resíduos, como os de água, principalmente, deve-se, por exemplo, no caso de selo de vedação de alumínio, aquecer o selo a uma temperatura no máximo de 300°C.

Selos de vedação anelares de materiais elásticos, como, por exemplo, de Helicoflex[®], são encontrados em alguns detectores de vazamento de hélio. Na maioria das vezes, estes selos de vedação são constituídos de três elementos: uma espiral metálica interna, que confere elasticidade ao selo, uma chapa metálica externa deformável plasticamente, que atua como selo de vedação propriamente dito, e, entre a espiral e a chapa metálica, uma chapa fina de aço inoxidável, que impede que a espiral penetre na chapa fina de aço inoxidável.

Na maioria das vezes emprega-se na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade selo de vedação anelar de elastômero. Entretanto, deve-se observar, neste caso, qual é a sensibilidade de ensaio exigida e qual é a permeação tolerável do gás de ensaio através do selo de vedação. Selo de vedação ou mangueira de silicone, por exemplo, podem atrapalhar significativamente a inspeção de um determinado objeto, visto que o silicone permite a passagem de uma quantidade relativamente elevada de gás. Selo de vedação anelar de elastômero, quando empregado em uma junta, por exemplo, geralmente tem o seu diâmetro reduzido por compressão, na direção de aplicação da força de compressão, em cerca de 10 % a 25 %, e expandido, na direção transversal à da aplicação da força de compressão.

Um vazamento real é detectado muito rapidamente (o tempo de resposta é definido pela relação entre o volume do objeto de ensaio e a capacidade de sucção efetiva da bomba de vácuo) quando se inspeciona um objeto empregando hélio como gás de ensaio. Um risco na superfície do selo de vedação, porém, pode ocasionar este vazamento real. Neste caso, pode-se empregar novamente a equação de Knudsen na modelagem do vazamento, onde o menor comprimento da descontinuidade capilar é a espessura do selo de vedação. O comprimento da descontinuidade capilar pode ser calculado aproximadamente empregando-se a equação 8.13.

$$\ell = 2,2 \cdot d \cdot (K + 0,02) \quad (\text{equação 8.13})$$

onde

- ℓ é o comprimento da descontinuidade;
- d é o diâmetro do selo de vedação;
- K é o fator de compressão do selo de vedação.

Ao se empregar um selo de vedação anelar de 5 mm de diâmetro (d) em um flange, por exemplo, então o comprimento (ℓ) do capilar que se formará na junta, para um fator de compressão (K) de 25 %, será aproximadamente 3 mm. Este modelo de cálculo também é válido para o cabelo de uma pessoa, cujo diâmetro varia entre 40 μm e 100 μm (em vista disso, a trinca capilar, como o próprio nome diz, cujo diâmetro é aproximadamente igual ao diâmetro do cabelo de uma pessoa, sob o ponto de vista da detecção de vazamento e do ensaio de estanqueidade, constitui um defeito grosseiro), que por acaso se encontre entre o selo de vedação anelar e o flange. O cabelo é envolvido pelo selo de vedação elástico, porém ele forma dois canais capilares laterais entre o selo de vedação e o flange.

Um capilar de 3 mm de comprimento e 10 μm de diâmetro ocasiona uma taxa de vazamento de cerca de $3 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ nas condições normais de temperatura e pressão. Caso o diâmetro do capilar seja 20 μm ou 30 μm , as taxas de vazamento serão de $3 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ e $2 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente, ou seja, taxas de vazamento relativamente grandes, que só podem ser medidas com detector de vazamento de hélio quando se emprega determinadas técnicas especiais.

Selo de vedação de TEFLON[®], como, por exemplo, selo anelar plano ou na forma de fita, é anelástico, tende a se deformar plasticamente e permite passar uma quantidade relativamente elevada de hélio. Além disso, a passagem de gás através de uma fita de TEFLON[®] fina é pequena, visto que a sua seção transversal, através da qual ocorre a difusão, é pequena, e o seu comprimento, ou seja, o caminho percorrido pelas partículas de gás durante a difusão, é longo. A pulverização de uma junta com TEFLON[®] melhora a vedação dos selos anelares cilíndricos metálicos, tornando-a semelhante à vedação dos selos anelares planos, visto que o TEFLON[®] promove a penetração de uma microestrutura cristalina na outra.

Selo de grafita pura expandida e elástica, cuja densidade varia entre $0,3 \text{ g/cm}^3$ e 1 g/cm^3 , pode ser comprimido com, por exemplo, uma pressão de 200 N/mm^2 e, assim, reduzir a passagem de gases, que depende bastante da temperatura, em várias ordens de grandeza.

Selos de vedação do tipo IT, fabricados com uma mistura de borracha com asbesto, impedem com eficiência a passagem de líquido, contudo permitem a passagem de gás. Na matriz de elastômero deste tipo de selo estão incrustadas fibras de asbesto, ao longo das quais formam-se canais abertos. A fibra de asbesto é conhecida por sua ação cancerígena, uma vez que suas dimensões (aproximadamente $1 \mu\text{m}$ de diâmetro e cerca de alguns milímetros de comprimento) são semelhantes às dos alvéolos pulmonares. Assim como o temível dióxido de plutônio, que é extremamente perigoso, principalmente quando o tamanho de suas partículas é da ordem de microns (os limites de inalação permitidos pelo regulamento de proteção radiológica se referem especialmente a este tamanho de partícula, visto que a aspiração de partículas maiores é reduzida e as partículas inaladas quase não ficam retidas no corpo humano; partículas menores, por outro lado, são expiradas rapidamente), as partículas com alguns microns de diâmetro ficam retidas nos alvéolos pulmonares, que podem ser definidos como capilares e que também têm alguns microns de diâmetro.

A influência da pressão na taxa de permeação de um gás através de um selo de vedação do tipo IT pode ser muito bem analisada empregando-se o modelo de vários capilares paralelos. Quando a pressão aumenta, aumenta também o percentual de partículas que escoam em regime laminar, isto é, a taxa de permeação no início é proporcional à diferença de pressão ($p_2 - p_1$) em ambos os lados do selo de vedação, e se torna, com o aumento da pressão p_2 , cada vez mais proporcional à diferença do quadrado da pressão ($p_2^2 - p_1^2$).

Os selos de vedação alternativos, isto é, que não contêm asbesto, são fabricados com fibras de poliamida ou grafita, cujo diâmetro é bem maior que alguns microns e, por isso, não ficam aprisionadas nos pulmões.

8.6 Exemplos de especificação de estanqueidade

As taxas de vazamento admissíveis máximas relativas a componentes ou instalações de usinas nucleares, como, por exemplo, à vareta de elemento combustível, que é encapsulada em um recipiente soldado contendo hélio, ao vaso de contenção do reator, que possui dutos que contêm cabos, e ao tonel para armazenamento de lixo atômico, que é vedado com selo elástico de metal, são extremamente baixas, devendo muitas vezes ser menores que a taxa de vazamento de hélio de $10^{-7} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ nas condições normais de temperatura e pressão.

As pessoas se deparam com frequência com objetos de todos os tipos, como, por exemplo, uma torneira, uma mangueira, um pneu de bicicleta. Para classificar estes

objetos quanto a sua estanqueidade, há necessidade de se observar diversos fatores, conforme mostrado na tabela 8.2, que apresenta, de uma maneira simples e clara, as especificações que constam na norma DIN 3230 [3.3].

Tabela 8.2: Classificação da taxa de vazamento e tempo de ensaio de torneiras de diversos diâmetros, segundo as especificações da norma DIN 3230 parte 3 [3.3].

Diâmetro nominal [mm]		Taxa de vazamento			Tempo de ensaio [min]
		1 (estanque)	2 (úmido)	3 (gotejando)	
De	Até	Gota por minuto (1 gota = 100 mm ³)			
	40	0	1	5	0,25
40	100	0	3	10	
100	150	0	2	15	1
150	200	0	2	20	
200	250	0	3	25	
250	300	0	3	30	
300	350	0	4	35	
350	400	0	4	40	
400	500	0	5	50	2
500	600	0	6	60	
600	700	0	7	70	
700	800	0	8	80	
800	900	0	9	90	
900	1000	0	10	100	
1000	1100	1	11	110	
1100	1200	1	12	120	

Tabela 8.3: Taxas de vazamento admissíveis máximas especificadas pela indústria automotiva.

Estanque a	Limite superior da taxa de vazamento [mbar·ℓ·s ⁻¹]
Gasolina (inclusive vapor)	10 ⁻⁴ ... 10 ⁻⁶
Óleo	10 ⁻³ ... 10 ⁻⁴
Água	1

A detecção de vazamento e o ensaio de estanqueidade realizados com os métodos da bolha e de variação de pressão na indústria automobilística estão sendo

paulatinamente substituídos por inspeção automatizada empregando hélio como gás rastreador. A tabela 8.3 apresenta informações importantes relativas a este tipo de inspeção.

8.7 Vazamento padrão

Neste item são apresentados os tipos de vazamento padrão mais importantes para a detecção de vazamento e o ensaio de estanqueidade. Este instrumento serve, principalmente, para determinar a sensibilidade de diferentes métodos de inspeção, através de comparação com os valores lidos nos mostradores dos equipamentos.

Na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade empregando hélio como gás de ensaio utiliza-se, na maioria das vezes, vazamento padrão com um reservatório de vidro à base de silicato de boro contendo hélio. Este reservatório apresenta, por exemplo, a 20°C e à pressão normal, uma taxa de permeação de hélio de $3,1 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, ou seja, deixa escapar 1 cm^3 de hélio por ano (aproximadamente 31.560.000 segundos). Esta perda de hélio por permeação é considerada relativamente pequena. Assim como em todos os processos em que se tem permeação, deve-se levar em consideração a enorme influência que a temperatura exerce sobre a taxa de permeação. No caso deste tipo de vazamento padrão, esta influência corresponde a $\pm 3,5 \% / \text{K}$. Se houver variação da temperatura, então a taxa de permeação de equilíbrio é atingida rapidamente, visto que a solubilidade do hélio no vidro, e conseqüentemente o gradiente de concentração do hélio, muda muito pouco quando a temperatura varia.

Também pode ser adquirido no mercado vazamento padrão sinterizado, fabricado com pó de aço inoxidável, que apresenta taxa de vazamento variando entre $1 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ e $5 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. Neste tipo de vazamento padrão, o fluxo de gás é molecular, isto é, mantendo-se a temperatura e a pressão constantes, o fluxo de hélio é 2,7 vezes maior que o fluxo de ar.

Na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade empregando halogênio como gás de ensaio utiliza-se um pequeno recipiente de aço inoxidável, dentro do qual se encontra uma membrana permeável a vapores. Este recipiente, denominado vazamento padrão de halogênio, contém um líquido halogenado, cuja pressão de vapor e coeficiente de permeação através da membrana dependem da temperatura. A taxa de permeação típica do gás de ensaio R12 a 22°C é 0,3 g/ano, ou seja, $2 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. O teste em um vazamento padrão de halogênio é conduzido empregando-se uma balança de precisão.

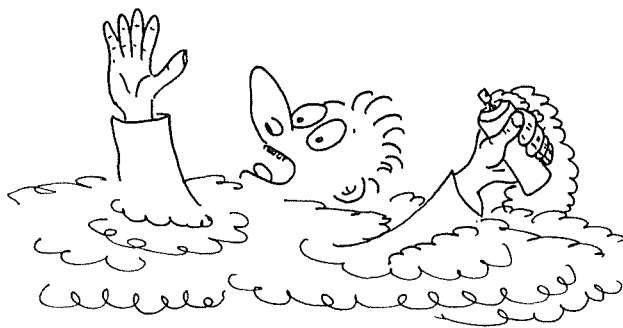
O vazamento padrão capilar, freqüentemente empregado na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade, é confeccionado com vidro da mesma maneira como é feito um termômetro: uma pequena parte do vidro é aquecida e esticada. Se o vazamento padrão deve ter uma taxa de vazamento da ordem de $10^{-7} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, então o diâmetro de seu tubo capilar tem que ser de apenas alguns

µm. Aberturas tão pequenas como essa devem ser protegidas da poeira e da umidade, de maneira a evitar que sejam facilmente obstruídas. A equação de Knudsen permite determinar a influência relativamente pequena da temperatura neste tipo de vazamento padrão. O escoamento de gás em um vazamento padrão de tubo capilar com taxa de vazamento variando entre $10^{-6} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ e $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ ocorre em regime quase que totalmente laminar. Se este vazamento padrão for conectado a uma garrafa de gás com 10 bar de pressão, a variação da taxa de vazamento decorrente da variação de pressão de 1 bar para 10 bar ainda não será definida pelo fator de proporcionalidade 99 ($10^2 - 1^2 = 99$), e sim por um fator igual a no máximo 50 (cinquenta). Com este tipo de vazamento padrão pode-se operar relativamente bem um detector de vazamento de hélio durante a detecção de vazamentos grandes ou pequenos, assim como medir elevadas ou baixas taxas de vazamento, pelo fato do fator de proporcionalidade não ser 99 e, sim, no máximo 50.

Um outro tipo importante de vazamento padrão é a válvula reguladora com agulha, que, por possuir um vernier de ajuste fino, pode ser ajustada continuamente. Empregando-se uma válvula reguladora de ajuste fino especial com uma escala de 50 divisões, pode-se, girando seu vernier cerca de quinze voltas completas, ajustar continuamente e com excelente reprodutibilidade taxas de vazamento de ar variando entre $10^{-6} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ a $10^3 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. Este tipo de válvula reguladora especial permite criar no interior de sua agulha, ao longo de seu eixo longitudinal, uma fresta regulável com geometria de uma cunha.

Método da Bolha

- 9.1 Introdução
- 9.2 Ensaio com o método da bolha
 - 9.2.1 Método da bolha por imersão
 - 9.2.2 Método da bolha por imersão modificado
 - 9.2.3 Método da bolha com solução formadora de espuma
 - 9.2.4 Método da bolha com câmara de vácuo
- 9.3 Procedimento de ensaio
- 9.4 Aplicação
- 9.5 Limite de detecção
- 9.6 Equipamentos e instrumentos
- 9.7 Calibração
- 9.8 Regulamentos e normas



[L]

9 Método da bolha

9.1 Introdução

A detecção de vazamento e, eventualmente, o ensaio de estanqueidade realizados com o método da bolha consistem, basicamente, em tornar visível o desprendimento de bolhas em uma descontinuidade do objeto de ensaio, de maneira que o local do vazamento possa ser identificado e a taxa de vazamento determinada. A diferença de pressão empregada no ensaio com o método da bolha é feita de tal maneira que a pressão no interior do objeto de ensaio seja maior que a pressão externa. A superfície externa do objeto de ensaio é molhada, seja por imersão em um banho líquido ou através de borrifagem; e caso exista uma descontinuidade através da qual escape uma quantidade significativa de gás ou vapor, então haverá a formação de bolhas, que, dependendo do tamanho que apresentam e da frequência com que se formam, permitem determinar o tamanho da descontinuidade.

9.2 Ensaio com o método da bolha

Existem diversas maneiras de fazer ensaio de estanqueidade ou detectar vazamento com o método da bolha. A pressurização do objeto de ensaio pode ser realizada tanto com gás (ar ou nitrogênio) como com líquido que apresente baixa temperatura de ebulição. Nos itens a seguir serão apresentadas as diferentes técnicas de ensaio existentes, bem como descritos os princípios de cada uma delas.

9.2.1 Método da bolha por imersão

O método da bolha por imersão consiste em insuflar gás (ar ou nitrogênio) em um objeto de ensaio e observar, imediatamente após o mesmo ter sido imerso em um recipiente contendo água, a formação e o desprendimento de bolhas. A sensibilidade deste método de ensaio pode ser aumentada se as paredes do

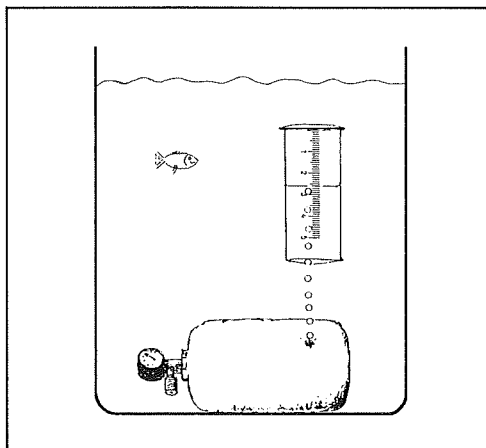


Figura 9.1:
Determinação da taxa de vazamento pelo método da bolha por imersão.

recipiente que contém água forem transparentes e se for feito vácuo acima da superfície do nível da água. As bolhas de gás que se desprendem do objeto de ensaio aumentam de tamanho, devido à baixa pressão reinante dentro do recipiente que contém água, o que permite que sejam detectadas com maior facilidade.

Em vez de se empregar água, o ensaio pode ser conduzido utilizando-se outro tipo de líquido, de preferência um que possua baixa densidade, como, por exemplo, álcool. Caso se empregue água, entretanto, é interessante desgaseificá-la (evacuar) antes de se realizar o ensaio. O emprego de substâncias que diminuam a tensão superficial, como algumas gotas de detergente na água, também constitui uma medida importante que permite aumentar a sensibilidade do ensaio.

É possível medir a taxa de vazamento de uma maneira muito simples: através da imersão de uma proveta graduada pouco acima do local onde ocorre o vazamento, pode-se capturar todas as bolhas que escapam da descontinuidade. O gás que se acumula no interior da proveta desloca para baixo o líquido que se encontra dentro dela. O deslocamento do líquido pode ser lido na graduação da proveta e, com base no tempo de observação e na quantidade de gás recolhido, calcula-se a taxa de vazamento, conforme mostra a equação 9.1. Como se pode observar nesta equação, a taxa de vazamento não depende da pressão reinante no interior do objeto de ensaio e, sim, da pressão ambiente (pressão fora do objeto de ensaio).

$$q_L = \frac{p_{amb} \cdot \Delta V}{\Delta t} \quad (\text{equação 9.1})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento, em $[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}]$;
- p_{amb} é a pressão ambiente, em $[\text{mbar}]$;
- ΔV é a quantidade de gás capturado na proveta, em $[\ell]$;
- Δt é o tempo de ensaio, em $[\text{s}]$.

9.2.2 Método da bolha por imersão modificado

O método da bolha por imersão modificado consiste na imersão do objeto de ensaio em um recipiente fechado, que contém um líquido inerte A à temperatura ambiente e de baixa temperatura de ebulição, como, por exemplo, o fluoreto de carbono FC878, cuja temperatura de ebulição é 57°C , e que se encontra pressurizado com uma pressão maior que a atmosférica (5 bar a 10 bar). Se houver alguma descontinuidade no objeto de ensaio, o líquido passa por ela e atinge o seu interior. A seguir, o objeto de ensaio é imerso em um líquido inerte B a 130°C , porém de elevada temperatura de ebulição, como, por exemplo, o fluoreto de carbono FC43, cuja temperatura de ebulição é 163°C . O líquido A que se encontra no interior do objeto de ensaio entra em ebulição e escapa pela descontinuidade na forma de vapor, formando bolhas no líquido B, que são observadas pelo examinador.

A elevada pressão de vapor e a grande quantidade de vapor (cerca de 100 vezes o volume do líquido A que lhe deu origem) que se forma rapidamente tornam o método bolha por imersão modificado ideal para a inspeção de objetos muito pequenos, como, por exemplo, circuitos integrados. É absolutamente necessária a secagem, de preferência em vácuo, do objeto de ensaio antes dele ser imerso no líquido A, visto que existe o perigo da descontinuidade existente no objeto ser obstruída por resíduos de umidade que porventura estejam presentes no seu interior, o que impede a entrada do líquido A.

A pressão empregada sobre o líquido A durante a fase inicial do ensaio deve ser de 5 bar a 10 bar, visto que o tempo de exposição (16 h, ou até mesmo um tempo mais longo ainda) necessário para o líquido A penetrar no objeto de ensaio depende do volume do espaço interno do mesmo.

A experiência tem demonstrado que fluoretos de carbono não reagem com os componentes dos semicondutores, bem como que o resíduo destes gases presente no interior de um circuito integrado não prejudica as suas propriedades elétricas. Estes fatos permitem considerar estes gases como sendo inertes.

9.2.3 Método da bolha com solução formadora de espuma

A inspeção com o método da bolha com solução formadora de espuma é realizada de maneira semelhante àquela descrita no item 9.2.1. Segundo este método, a pressão no interior do objeto de ensaio também é maior que a pressão externa, porém o local suspeito de apresentar vazamento é molhado com uma solução formadora de espuma de pequena tensão superficial. No local onde se encontra uma descontinuidade através da qual escapa gás ocorre a formação de espuma (figura 9.2), cuja quantidade depende, dentre outras coisas, do tamanho da descontinuidade.

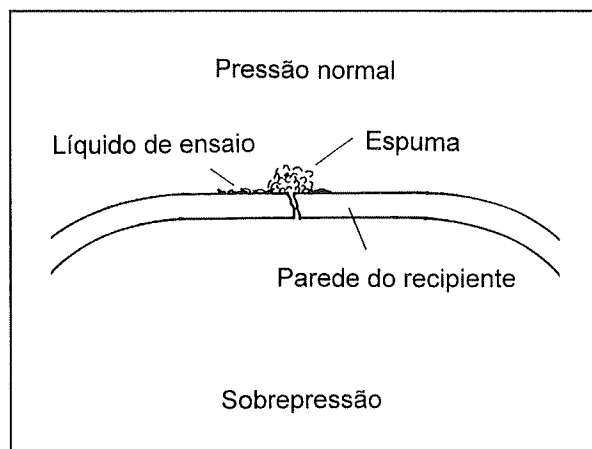


Figura 9.2:
*Método da bolha com
solução formadora de
espuma.*

A determinação exata da taxa de vazamento com o método da bolha com solução formadora de espuma é muito difícil. A avaliação aproximada da taxa de vazamento, entretanto, pode ser realizada sem dificuldade, visto que quanto maior for a quantidade de espuma que se forma em torno da descontinuidade maior será a taxa de vazamento.

A solução formadora de bolha mais simples que pode ser empregada é aquela constituída de uma mistura de água com sabonete ou detergente líquido, na proporção de 10:1. Porém, é possível encontrar no mercado soluções formadoras de bolha especiais (Erkantor[®], Nekal[®], etc.), vendidas em latas de aerossol, especificamente desenvolvidas para a realização de inspeção não destrutiva com o método da bolha.

9.2.4 Método da bolha com câmara de vácuo

O método da bolha com câmara de vácuo constitui, na realidade, uma variante do método da bolha com solução formadora de espuma supramencionado. Quando se emprega a câmara de vácuo, cuja tampa é feita de um material transparente, em vez do objeto de ensaio ser submetido a uma pressão maior que a atmosférica, o volume definido pela câmara de vácuo sobre um determinado trecho do objeto de ensaio é evacuado, com o auxílio de uma pequena bomba, até que a pressão neste volume atinja um valor situado entre 200 mbar e 500 mbar. A pressão não deve ser menor que 200 mbar, visto que a solução formadora de bolha começa a desgaseificar, formando bolhas e dando a impressão da existência de um vazamento que na realidade não existe. Antes de se posicionar a câmara de vácuo sobre um determinado trecho do objeto de ensaio, porém, o local a ser ensaiado é molhado com uma solução formadora de espuma. No local onde existe uma descontinuidade, forma-se, sobre o filme de solução formadora de espuma, uma espécie de cogumelo de espuma, cujo tamanho depende da taxa de vazamento. A figura 9.3 ilustra a inspeção em juntas soldadas de topo e de filete realizada com o método da bolha com câmara de vácuo. A vantagem da utilização desta técnica na inspeção de tanques ou vasos de pressão é que o objeto de ensaio não precisa ser pressurizado e, também, que basta ele permitir o acesso ao local de ensaio por um lado somente.

O método da bolha com câmara de vácuo é bastante empregado na detecção de vazamento em fundo de tanque de armazenamento. As soldas de filete podem ser ensaiadas com facilidade, bastando para isso escolher uma dentre as diversas câmaras de vácuo existentes no mercado e especialmente desenvolvidas para esta finalidade. Outros tipos de juntas soldadas, mesmo que sejam em estruturas ou objetos de geometria complexa, também não constituem problema, desde que o reforço das soldas não seja excessivo, visto que é possível fabricar facilmente câmaras de vácuo específicas para cada caso.

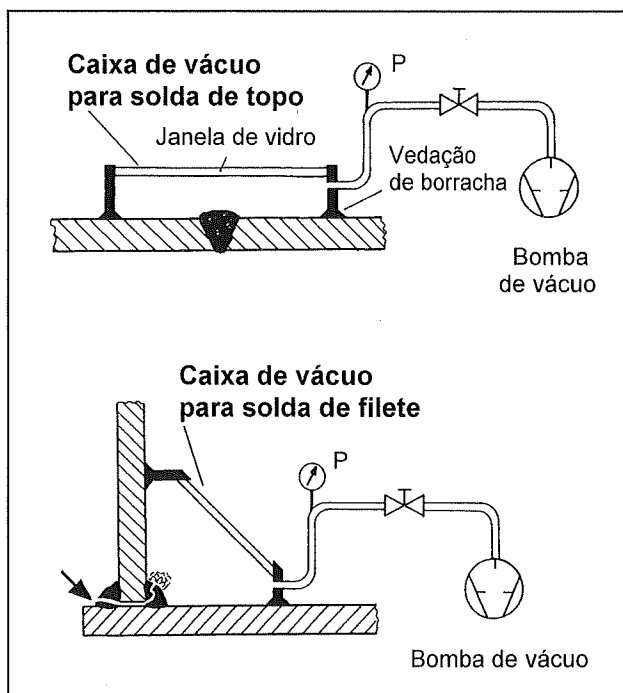


Figura 9.3:
Método da bolha com
câmara de vácuo.

9.3 Procedimento de ensaio

Em nenhum dos diferentes métodos da bolha descritos neste capítulo o objeto de ensaio pode ser inspecionado sem que ele seja molhado parcial ou completamente. Por motivo de higiene, ou para evitar problemas correlacionados com corrosão, há necessidade de limpar e secar corretamente o objeto de ensaio.

Antes de pressurizar o objeto de ensaio, é preciso ler atentamente as normas técnicas, como a TRB 532 [5.2], a TRG 280 [5.4], a DIN 3230 [3.3], entre outras, ou as diretrizes HP 20 e HP 30 [5.5], de maneira a saber qual é a pressão máxima admissível à qual o objeto de ensaio pode ser submetido durante a realização do ensaio de estanqueidade ou da detecção de vazamento com o método da bolha.

Um objeto novo que ainda não tenha sido submetido a ensaio hidrostático e que deva ser inspecionado com o método da bolha, por motivo relacionado à segurança, e dependendo do tipo de objeto que se trate, só pode ser inspecionado com uma pressão de ensaio de no máximo 0,5 bar. A substituição do teste hidrostático por um teste de pressurização com gás, que também serviria concomitantemente para a realização da detecção de vazamento com o método da bolha, deve, primeiramente ser aprovada pela autoridade competente.

Se o objeto de ensaio, como, por exemplo, uma tubulação ou um vaso de pressão, já entrou em serviço, então a pressão de ensaio máxima permitida é a pressão de

trabalho máxima admissível. Esta pressão normalmente se encontra gravada no próprio objeto de ensaio ou em uma plaqueta afixada no mesmo.

Vazamento grande ($q_L > 10^{-1} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$) não pode ser localizado empregando elevada pressão de ensaio, visto que o gás que escapa através de uma descontinuidade expulsa a solução formadora de espuma com violência para longe do local onde se encontra o vazamento antes que a espuma se forme. Esta observação também é válida para o caso da inspeção utilizando câmara de vácuo, conforme descrito no item 9.2.4.

Um objeto que foi submetido a ensaio hidrostático antes da inspeção com o método da bolha pode ter suas descontinuidades obstruídas com líquido. Este líquido quase nunca pode ser removido pressurizando o objeto com gás; quando isto for possível, contudo, há necessidade de se esperar um longo tempo para se conseguir a desobstrução completa da descontinuidade. A obstrução da descontinuidade com líquido impede a passagem de gás e não permite a localização de um vazamento real. É possível remover eficientemente a água de pequenas descontinuidades aquecendo o objeto a ser ensaiado. A experiência demonstra, entretanto, que esta remoção será tanto melhor quanto maior for o esforço despendido na operação de aquecimento.

Um objeto novo só pode ser inspecionado com o método da bolha antes da realização do ensaio hidrostático se a pressão de ensaio for muito baixa. Em alguns casos especiais, tem-se, então, que repetir a inspeção com o método da bolha, empregando uma sobrepressão admissível maior, após a realização do teste hidrostático.

A superfície do objeto a ser inspecionada deve estar o mais limpa possível, não podendo em hipótese alguma conter restos de graxa ou óleo. Esta exigência é válida tanto para o ensaio com solução formadora de espuma como para o ensaio da bolha, quando o objeto de ensaio tem que ser imerso em um recipiente contendo água. No caso da realização deste último ensaio, é muito importante também que o objeto de ensaio não tenha superfície ou acessório que forme uma cavidade que aprisione gás. Ao ser imersa na água, esta superfície ou este acessório passa a desprender bolhas, dando a impressão da existência de um vazamento real.

9.4 Aplicação

O ensaio da bolha é empregado tanto na produção em série como na fabricação de um único objeto. Além disso, ele é utilizado intensamente também na manutenção e no controle de equipamento ou instalação de fabricação. Na área de caldeiraria, o ensaio da bolha é empregado especialmente na inspeção de junta soldada e de tubulação. Como exemplos de aplicação deste método de ensaio pode-se citar a inspeção de:

- carcaça e selo de vedação de bomba;
- tubo com e sem costura;
- flange de tubulação;
- junta tubular de topo soldada;
- espelho de trocador de calor;
- junta soldada em vaso de pressão.

O ensaio da bolha com imersão do objeto em um recipiente contendo líquido é empregado quase que exclusivamente na inspeção de objeto pequeno, geralmente fabricado em série, como, por exemplo, na inspeção de junta soldada de extintor de incêndio, de cilindro de armazenamento ou de transporte de gás sob pressão, de carcaça de compressor de equipamento ou de instalação de refrigeração, etc. Entretanto, também se pode ensaiar vaso de pressão de grande volume (de até 3 m de diâmetro e 15 m de comprimento) com este método.

A inspeção com o método da bolha com solução formadora de espuma apresenta algumas dificuldades quando o objeto de ensaio tem rosca ou sistema de selagem formando uma espécie de labirinto, como, por exemplo, selo com lingüeta ou com ranhura, visto que a solução formadora de espuma não pode ser passada diretamente sobre o local a ser ensaiado. Neste caso, pode ser que haja formação de espuma em um local longe daquele em que realmente ocorre o vazamento.

9.5 Limite de detecção

O limite de detecção do método da bolha varia de $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ a $10^{-4} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, visto que ele depende do procedimento de ensaio estipulado, bem como da técnica (com solução formadora de bolha, câmara de vácuo, etc.) empregada e dos recursos utilizados.

9.6 Equipamentos e instrumentos

A grande vantagem do método da bolha é a sua simplicidade. Equipamentos caros e dispositivos e instrumentos auxiliares não são necessários, podendo a inspeção de um objeto ser realizada com um equipamento relativamente simples. Dependendo da técnica a ser utilizada, deve-se empregar determinados dispositivos e instrumentos de ensaio. A realização de uma inspeção com o método da bolha deve ser conduzida tendo-se à disposição os seguintes equipamentos e instrumentos auxiliares: estufa ou forno de secagem, ar (ou nitrogênio) comprimido, manômetro, cronômetro, lupa, recipiente (de preferência com paredes e tampa transparentes, bem como com iluminação artificial), bomba de vácuo, câmara de vácuo, líquido com pequena tensão superficial, diferentes líquidos detectores (soluções formadoras de espuma, conforme descrito no item 9.2.3), resistência elétrica para aquecimento do líquido no qual o objeto de ensaio será imerso, termômetro e vaso de pressão. Além destes equipamentos e instrumentos auxiliares, pode ser necessário providenciar outros, de maneira que a inspeção possa ser conduzida de modo correto e seguro.

9.7 Calibração

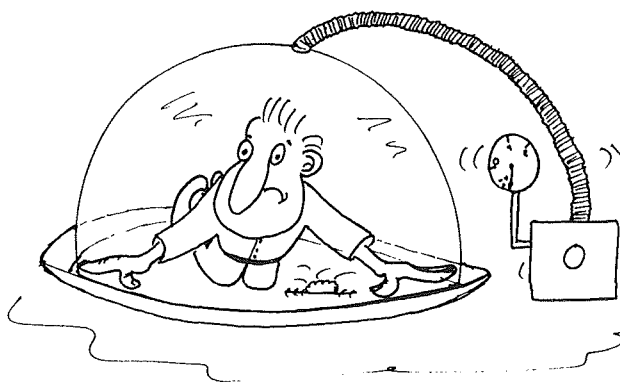
Como o resultado da inspeção em um objeto com o método da bolha se limita a uma afirmação do tipo sim/não, normalmente não há necessidade, quando se utiliza este método de ensaio, de medir a taxa de vazamento. Caso seja necessário medir a taxa de vazamento, então deve-se levar em consideração o tipo de gás, a temperatura e a pressão da água (altura da coluna de água) sobre o local onde ocorre o vazamento. Um vazamento grande em um objeto que se encontre imediatamente abaixo do nível de água desprenderá bolhas diferentes daquelas que ele desprenderia caso ele se encontrasse muito abaixo do nível de água. Se o vazamento estiver muito distante da superfície da água, então as bolhas que se formam são muito pequenas quando comparadas com aquelas que se formariam caso ele estivesse próximo da superfície.

Pode-se confeccionar facilmente um vazamento padrão com um tubo de cobre ou de aço inoxidável de pequeno diâmetro. Uma das extremidades deste tubo é fechada com solda, e a outra é fechada progressivamente, por meio de dobramento, com um alicate. Mergulhando-se este tubo fechado a diferentes profundidades em um recipiente contendo água, é possível, utilizando-se uma proveta graduada, medir com precisão a taxa de vazamento. De qualquer maneira, tem-se sempre que citar a diferença de pressão empregada quando se menciona a taxa de vazamento medida com o método da bolha.

9.8 Regulamentos e normas

O resultado do ensaio realizado, bem como o certificado de ensaio especificado na norma DIN EN 10204 [4.6], deve ser documentado na folha de relatório, cujo modelo é apresentado no anexo deste livro. Este relatório, que contém espaço para o registro de todas as informações importantes do ensaio, deve ter, naturalmente, todos os seus campos preenchidos corretamente.

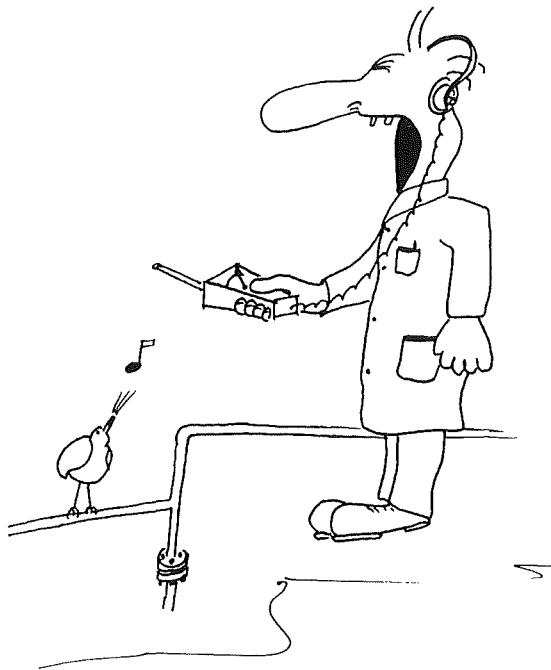
A norma DIN 3230 parte 3 [3.3] descreve como deve ser conduzida a detecção de vazamento e realizado o ensaio de estanqueidade em instalação e equipamento industrial. Além desta norma, existem outras, também igualmente importantes, como a API 598 (American Petrol Industry) e a MSS SP61 (USA). Informações complementares sobre a inspeção com o método da bolha podem ser obtidas no folheto DECHEMA ZfP1 [5.7].



Método da bolha com câmara de vácuo [L]

Localização de Vazamento com Ultra-som

- 10.1 Modo de funcionamento
- 10.2 Principais componentes de um equipamento portátil de ultra-som
- 10.3 Procedimento na localização de vazamento com ultra-som
- 10.4 Possíveis fontes de interferência na detecção de vazamento
- 10.5 Combinação de ultra-som com solução formadora de bolha



[L]

10 Localização de vazamento com ultra-som

10.1 Modo de funcionamento

A energia sonora gerada quando um fluido passa por um vazamento pode ser utilizada na sua detecção. Esta energia sonora é produzida pela transição de escoamento laminar para turbulento quando o fluido atravessa um vazamento, tanto em sistemas sob vácuo quanto sob pressão (figura 10.1). A vibração das moléculas dos fluidos na faixa de frequência do ultra-som é a fonte dos sinais para a localização do vazamento.

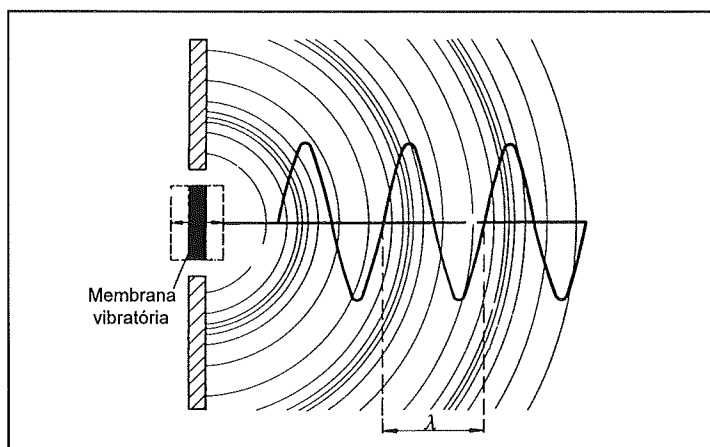


Figura 10.1:
Propagação do
som em um
vazamento.

A figura 10.2 ilustra a localização de vazamento com ultra-som.

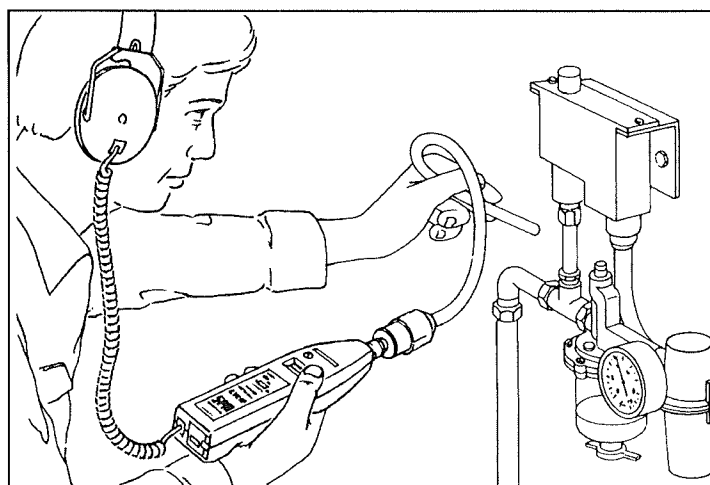
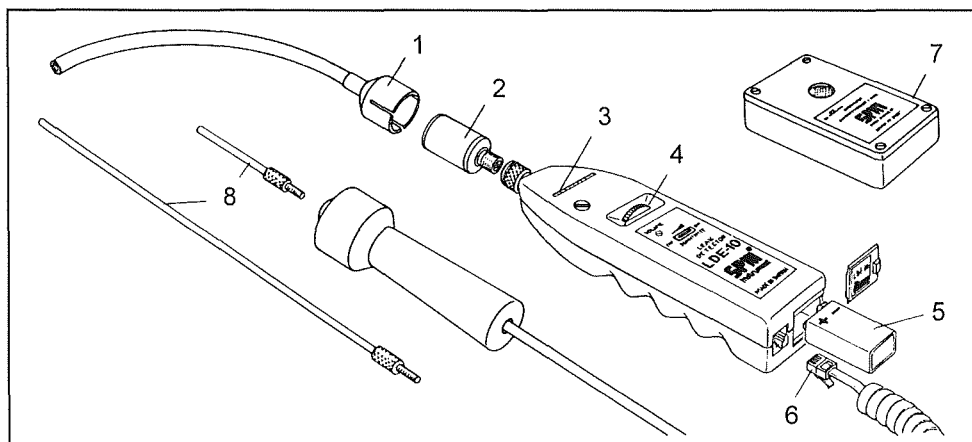


Figura 10.2:
Localização de
vazamento com
ultra-som.

Na inspeção mostrada na figura 10.2, o som gerado por um vazamento é detectado por um microfone, sendo então o sinal filtrado eletronicamente de modo a remover todos os sinais de baixa frequência. Após filtrado e amplificado, o sinal remanescente é convertido na faixa audível com o auxílio de um oscilador. Através destes sinais audíveis, após serem conduzidos a um alto-falante ou a um decibelímetro (dB), é realizada a análise dos ultra-sons provenientes do vazamento. A grande maioria dos detectores de vazamentos por ultra-som opera numa faixa de frequência ao redor dos 40 kHz. Isto porque os sons de alta frequência tendem a se propagar na forma de um feixe direcional, enquanto que os sons de baixa frequência se propagam esfericamente. Desta forma, a detecção e localização dos locais que emitem sons a altas frequências é muito mais fácil do que a localização daqueles que emitem sons a baixa frequências. Os sons gerados por escoamento turbulento incluem a faixa de 30 a 50 kHz.

10.2 Principais componentes de um equipamento portátil de ultra-som



1 Bico flexível	7 Emissor de ultra-som (de cerca de 200 mW, para ensaio de objetos não submetidos a pressão e para controle de funções)
2 Microfone	
3 LED	
4 Interruptor e seletor de sensibilidade	
5 Bateria	8 Sondas especiais
6 Conexão com o fone auricular	

Figura 10.3: Principais componentes de um equipamento portátil de ultra-som.

10.3 Procedimento na localização de vazamento com ultra-som

Se em uma descontinuidade através da qual está ocorrendo um vazamento houver um gradiente mínimo de pressão que produza uma determinada turbulência no fluido que está vazando (técnica passiva), é possível, então, localizar esta descontinuidade empregando o ultra-som. Mesmo quando não se tem este gradiente mínimo de pressão, pode-se, em certas situações, localizar a descontinuidade com o auxílio de uma fonte de ultra-som artificial (técnica ativa). Neste caso, o fluido que passa pela descontinuidade conduz o som proveniente da fonte artificial, colocada no interior do objeto de ensaio, para o detector de ultra-som, que se encontra fora do objeto de ensaio, ou vice-versa.

Um vazamento pode ser localizado com ultra-som de duas maneiras: empregando ou uma sonda normal, que captura a onda ultra-sônica no ar, ou uma sonda de contato. Se a inspeção for realizada com a sonda normal, então é possível localizar um vazamento a uma distância maior que até 10 metros. No caso da localização de vazamento com a sonda de contato, porém, há necessidade de encostá-la na superfície do objeto que está sendo inspecionado, de maneira que a sonda possa conduzir as vibrações acústicas do objeto de ensaio ao detector de ultra-som. A figura 10.4 ilustra a condução das vibrações sonoras provenientes da superfície do objeto de ensaio para o detector de ultra-som.

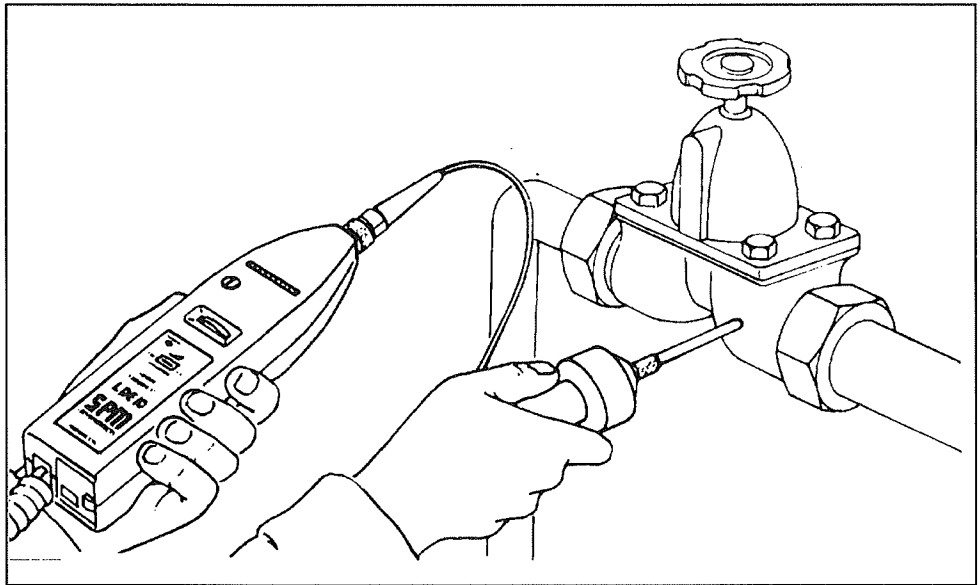


Figura 10.4: Localização de vazamento em uma válvula com uma sonda especial.

A grande vantagem do emprego do método da detecção de vazamento pelos ultra-sons é que não existe limitação com relação ao tipo de fluido, ou seja, ele é aplicável na detecção de fugas de líquidos, gases ou vapores, eliminando a necessidade do uso de substâncias indicadoras, como nos outros métodos. A sensibilidade do instrumento de detecção de vazamentos depende de vários fatores associados, ou seja, da sensibilidade do detector de vazamento, da viscosidade e da velocidade do fluido, do gradiente de pressão e da geometria do vazamento. A versatilidade deste método permite a inspeção de extensas estruturas, tais como dutos suspensos em refinarias a partir de uma varredura do solo.

10.4 Possíveis fontes de interferência na detecção de vazamento

Também instalações de oleodutos recém construídas podem ser inspecionadas com este método após pressurização, sendo que a inspeção é realizada antes de se enterrar a estrutura. No entanto, ecos provenientes de outras fontes sonoras, bem como ruídos sonoros no local de inspeção, podem dificultar ou mesmo tornar impossível uma inspeção com este método. Deste modo, a habilidade do operador em discriminar as ondas ultra-sônicas provenientes de vazamentos das ondas refletidas é fundamental nesta técnica de inspeção. As seguintes fontes de ruídos podem ser extremamente prejudiciais à inspeção:

- motores elétricos em funcionamento;
- zumbido de transformadores;
- barulho de válvula elétrica;
- compressores;
- instrumentos de regulação (*bocal, chapa de choque*);
- telefones;
- dutos de vapor e de ar comprimido;
- andar em chão de plástico;
- atrito de tecidos (*por exemplo, roupa engomada*);
- descarga eletrostática em roupas de material sintético ...

... e muitas outras fontes, que se detecta somente durante a realização do ensaio !!!

10.5 Combinação de ultra-som com solução formadora de bolha

A combinação do método dos ultra-sons com o método da bolha é bastante interessante. Neste caso os componentes sob pressão são aspergidos com uma solução formadora de bolhas. Caso a formação de bolhas seja muito lenta, o detector de ultra-sons captará o ruído das poucas bolhas que estouram na superfície do componente sob teste. Caso o fluxo que escapa seja tão violento que não haja tempo para formação de bolhas, o som emitido por este fluxo será captado pelo detector de ultra-sons.

A determinação quantitativa da taxa de vazamento não é possível com um dispositivo de detecção de vazamentos, mesmo dentro dos limites de sensibilidade. A menor taxa de vazamento que pode ser detectada com o método do ultra-som se situa entre $10^{-2} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ e $10^{-3} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$.

Método da Variação da Pressão

- 11.1 Introdução
- 11.2 Ensaio com Líquido
- 11.3 Ensaio com gás
 - 11.3.1 Parâmetros de ensaio com gás
 - 11.3.1.1 Volume
 - 11.3.1.2 Pressão
 - 11.3.1.3 Temperatura
 - 11.3.1.4 Tempo de ensaio
 - 11.3.1.5 Umidade
 - 11.3.1.6 Pressão absoluta
 - 11.3.2 Limite de detecção de ensaio com gás
 - 11.3.2.1 Influência do volume do objeto de ensaio
 - 11.3.2.2 Influência do método de ensaio
 - 11.3.2.3 Influência do gás de ensaio
- 11.4 Exemplos de aplicação
 - 11.4.1 Ensaio em tubulação
 - 11.4.2 Ensaio em vaso de pressão de concreto protendido
 - 11.4.3 Ensaio em produção em série
 - 11.4.4 Calibração de vazamento padrão

11 Método da variação da pressão

11.1 Introdução

Grande parte dos ensaios de estanqueidade é realizada empregando o método da variação da pressão. Como este método de ensaio muitas vezes exige somente o uso de poucos equipamentos e instrumentos, bem como pelo fato de não necessitar do emprego de gás rastreador caro e prejudicial ao meio ambiente, ele parece ser, à primeira vista, relativamente simples de ser realizado. Existem, entretanto, alguns detalhes interessantes e muito importantes que devem ser observados durante a realização destes ensaios. Os exemplos apresentados a seguir servem para ilustrar a facilidade de execução do ensaio de estanqueidade empregando o método da variação da pressão, bem como mostrar fatos importantes a serem observados.

Exemplo 1

Durante a realização de teste hidrostático, que na realidade nada mais é que um ensaio de resistência mecânica, procura-se observar uma eventual queda da pressão quando não se pode constatar vazamento de água (como ocorre no caso de um vaso de pressão com parede dupla, por exemplo), com o objetivo de se certificar de que está ocorrendo perda de material.

Exemplo 2

Um motorista mede a pressão do pneu de seu carro e avalia, com base no valor lido no manômetro, a estanqueidade do mesmo.

Os ensaios da variação de pressão podem ser classificados, de acordo com o projeto e o modo de operação do objeto de ensaio, em

- ensaio com líquido;
- ensaio com gás.

Os ensaios com gases, dependendo do método empregado, podem ser classificados em

- ensaio com gás com o método do aumento da pressão;
- ensaio com gás com o método da diminuição da pressão;
- ensaio com gás com o método da pressão absoluta.

A escolha de um determinado método de ensaio é feita com base em diversos fatores, como

- o acesso ao objeto de ensaio;
- o tamanho do objeto de ensaio;
- o modo de operação (se com pressão maior ou menor que a pressão ambiente) do objeto de ensaio;

- a complexidade e o estado de limpeza do objeto de ensaio;
- a sensibilidade exigida para o método de ensaio.

O ensaio de estanqueidade com o método da variação da pressão permite medir a taxa de vazamento integral do objeto de ensaio, porém é pouco adequado para a localização do vazamento. A condição básica que deve ser satisfeita para que se possa realizar este ensaio, é que o objeto de ensaio seja um sistema fechado. Neste caso, o objeto de ensaio é submetido a uma pressão diferente da pressão ambiente, sendo, então, medida e registrada a variação da pressão no sistema fechado após um determinado intervalo de tempo. A taxa de vazamento integral é obtida a partir da diferença de pressão medida, do intervalo de tempo e do volume do sistema fechado, conforme mostra a equação 11.1.

$$q_L = \frac{|\Delta p|}{\Delta t} \cdot V \quad (\text{equação 11.1})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento integral, em $[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}]$;
- Δp é a variação de pressão, em $[\text{mbar}]$;
- V é o volume do objeto de ensaio, em $[\ell]$;
- Δt é o tempo de ensaio, em $[\text{s}]$.

O ensaio de estanqueidade com o método da variação da pressão mais simples consiste em medir a pressão no objeto de ensaio em dois momentos bem distintos.

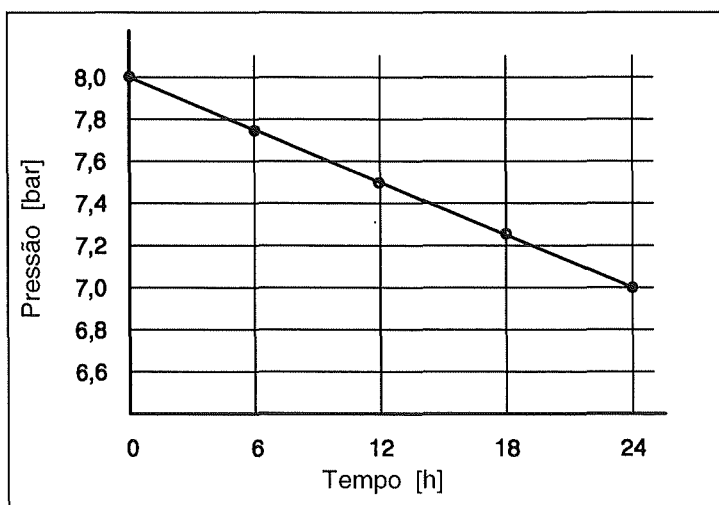


Figura 11.1: Variação da pressão ao longo do tempo em um objeto de ensaio de 1 m^3 de volume durante um ensaio de estanqueidade com o método da diminuição da pressão.

Enquanto que o emprego de um manômetro de pressão diferencial facilita bastante a medição da pressão, a medição da temperatura é extremamente problemática, visto que a sua precisão geralmente não é suficiente quando se tem que medir taxa de vazamento muito pequena.

A figura 11.1 apresenta a variação da pressão ao longo do tempo de um objeto de ensaio inspecionado com o método da queda da pressão. De acordo com esta figura, a taxa de vazamento para um objeto de ensaio de 1 m³ de volume é

$$q_L = \frac{|\Delta p|}{\Delta t} \cdot V = \frac{500 \text{ mbar} \cdot 1000 \ell}{12 \cdot 3600 \text{ s}} = 11,6 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}.$$

A equação de estado de um gás ideal (equação 11.2) permite constatar que, para uma dada temperatura de ensaio constante, a quantidade de gás que escapa ou que entra em um objeto de ensaio, que é igual ao produto da variação da pressão pelo volume do objeto de ensaio (equação 11.3), é proporcional à massa de gás que escapa ou que entra, respectivamente, uma vez que a constante universal dos gases (R), como o próprio nome diz, e o peso molecular do gás (M) são constantes.

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (\text{equação 11.2})$$

onde

- p é a pressão;
- V é o volume do objeto de ensaio;
- M é o peso molecular do gás que escapa ou que entra no objeto de ensaio;
- m é a massa de gás que escapa ou que entra no objeto de ensaio;
- R é a constante universal dos gases;
- T é a temperatura absoluta.

$$Q = \Delta p \cdot V \quad (\text{equação 11.3})$$

onde

- Q é a quantidade de gás que escapa ou entra no objeto de ensaio;
- Δp é a variação (diminuição ou aumento) de pressão do objeto de ensaio;
- V é o volume do objeto de ensaio.

A taxa de vazamento pode ser expressa em porcentagem por unidade de tempo. No ensaio apresentado na figura 11.1, tem-se, com relação à pressão inicial,

$$q_L = \frac{1 \text{ bar}}{10 \text{ bar} \cdot 24 \text{ h}} \cdot 100 \% = 0,41 \% \cdot \text{h}^{-1}.$$

No caso de vazamento de líquido, a taxa de vazamento é freqüentemente expressa em g·s⁻¹ ou ℓ·h⁻¹.

11.2 Ensaio com líquido

O ensaio hidrostático, que é um ensaio de resistência mecânica, também pode ser considerado como sendo um ensaio de estanqueidade realizado com o método da queda da pressão. A compressibilidade do líquido de ensaio (na maioria das vezes água) acarreta um aumento de pressão durante o seu bombeamento para dentro do objeto de ensaio. A compressibilidade dos líquidos, porém, é bem menor que a dos gases, de maneira que a introdução de pequena quantidade de líquido no objeto de ensaio já faz com que a pressão aumente bastante. Por outro lado, uma pequena perda de líquido do objeto de ensaio resulta em uma grande queda de sua pressão. Durante a realização do teste hidrostático em recipientes, na maioria das vezes verifica-se somente se a pressão do objeto de ensaio permanece constante ou não.

Se a taxa de vazamento deve ser determinada em $\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, $\ell \cdot \text{h}^{-1}$ ou $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$, então tem-se que medir a variação de temperatura, visto que tanto a água como os metais se expandem com o aumento da temperatura (a água somente acima de $+4^\circ\text{C}$). O coeficiente de expansão da água é significativamente maior que o do aço, isto é, para uma determinada variação da temperatura, a variação do volume de água é dez vezes maior que a variação de volume de um recipiente que não está pressurizado. Desta maneira, o aumento de temperatura eleva significativamente a pressão no objeto de ensaio durante o ensaio de estanqueidade com o método da variação da pressão.

11.3 Ensaio com gás

11.3.1 Parâmetros de ensaio com gás

A equação 11.1, utilizada no cálculo da taxa de vazamento em um ensaio de estanqueidade com o método da variação da pressão, permite constatar que a taxa de vazamento depende

- do volume (V);
- da pressão (p);
- e do tempo (t).

Além destes três fatores,

- a temperatura (T);
- a umidade do gás de ensaio (ϕ);
- e a pressão absoluta (p_{abs});

também influenciam a taxa de vazamento medida.

11.3.1.1 Volume

O erro de determinação da taxa de vazamento é diretamente proporcional ao erro de determinação do volume do objeto de ensaio: um erro de 10 % na determinação do volume do objeto de ensaio, por exemplo, acarreta um erro igualmente de 10 % na determinação da taxa de vazamento. Geralmente, pode-se tolerar pequenos erros na determinação do volume do objeto de ensaio. Entretanto, quando há necessidade de medi-lo com precisão, não se pode desprezar a deformação elástica do objeto de ensaio quando ele é pressurizado ou evacuado. O volume do objeto de ensaio pode ser encontrado no seu projeto, e geralmente também pode ser calculado com relativa precisão. Se, todavia, não for possível calcular o volume do objeto de ensaio, então, caso ele seja pequeno, ele pode ser enchido com líquido. Neste caso, a quantidade de líquido necessária para enchê-lo corresponderá, obviamente, ao volume do objeto de ensaio. Visto que o líquido pode obstruir uma determinada descontinuidade que porventura se encontre presente, é recomendável primeiro fazer o ensaio de estanqueidade e depois encher o objeto de ensaio com líquido para calcular o seu volume.

Outra possibilidade de medir o volume do objeto de ensaio consiste em conectar um cilindro de volume conhecido, contendo um gás sob uma determinada pressão também conhecida, com o objeto de ensaio, cuja pressão interna corresponde à pressão atmosférica. Ao se abrir a válvula da mangueira que liga este cilindro com o objeto de ensaio, o gás escoar para dentro do objeto de ensaio. A seguir, mede-se a pressão de equilíbrio atingida neste sistema e, utilizando-se a equação 11.4, determina-se o volume do objeto de ensaio. Neste caso, porém, é importante observar a mudança de temperatura que ocorre devido à expansão (ou à compressão, caso a pressão no interior do objeto de ensaio fosse maior que a do cilindro de gás) do gás e, conseqüentemente, à variação de pressão correspondente. No caso de ensaio em componente ou peça de pequeno volume, pode ser necessário medir o volume dos instrumentos e acessórios (mangueiras, válvulas, manômetros, etc.) utilizados para medir o volume do objeto de ensaio.

$$p \cdot V = K \quad \text{(equação 11.4)}$$

onde

- p é a pressão;
- V é o volume;
- K é uma constante.

11.3.1.2 Pressão

A pressão deve ser medida no início e no final do ensaio com a maior precisão possível, de maneira que a diferença de pressão possa ser determinada com exatidão. Um pequeno erro de medição pode, neste método de ensaio de estanqueidade, resultar em um grande erro na determinação da taxa de vazamento. O exemplo 3, apresentado a seguir, ilustra, de maneira clara e simples, a influência do erro de medição da pressão no erro na determinação da taxa de vazamento.

Exemplo 3

Um vaso de pressão é ensaiado com 5 bar de pressão e apresenta uma queda de pressão de 50 mbar por dia, queda esta que corresponde a uma perda diária de massa de 1 %. Um erro de medição da pressão de somente ± 50 mbar (± 1 % da pressão de ensaio) pode resultar em uma taxa de vazamento diária de 0 % ou de 2 %, o que significa que o erro relativo de medição da taxa de vazamento é ± 100 %.

O erro de medição da pressão no ensaio de estanqueidade do exemplo 3 apresentado acima é considerado como sendo pequeno, visto que ele se refere à quantidade total de gás contida no vaso de pressão. Entretanto, como a determinação da taxa de vazamento por meio de diferença de pressão é realizada com base na queda de pressão devida à perda de gás, o erro absoluto da medição da pressão é naturalmente visivelmente maior. No exemplo 3, a quantidade de gás que escapa por dia corresponde a somente 1 % da quantidade total de gás, sendo, por isso, a queda de pressão equivalente a somente 1 % da pressão inicial.

É fácil constatar que para medir com precisão a pressão é necessário utilizar um manômetro que além de possuir uma elevada precisão, também tenha uma resolução adequada, como, por exemplo, um manômetro digital. Somente desta maneira é possível constatar com segurança a ocorrência de pequenas variações de pressão (mbar).

Como os manômetros que medem pressões elevadas (como aquelas da ordem de diversos bar, por exemplo) com um erro de medição na faixa de mbar (erro de medição menor que 0,1 %) são muito caros, é comum utilizar, com o objetivo de reduzir o custo de ensaio relativo à instrumentação, manômetro de pressão diferencial. Abrindo-se e fechando-se corretamente válvulas do sistema de ensaio, é possível obter, no início do ensaio de estanqueidade, um volume de comparação no interior do manômetro, cuja pressão é igual à pressão reinante no objeto de ensaio. A pressão neste volume de comparação permanece constante durante todo o intervalo de tempo em que o ensaio de estanqueidade é conduzido. Mede-se, então, ao final do ensaio, a diferença de pressão que existirá entre o objeto de ensaio e o volume de comparação. Esta técnica apresenta uma grande vantagem, que consiste no emprego de um manômetro que meça a pressão em uma faixa de poucos mbar, faixa esta que abrange toda a faixa de variação de pressão que o objeto de ensaio experimenta durante o ensaio de estanqueidade e que já era esperada pelo inspetor. A relação entre a variação de pressão que se deseja medir e a faixa de pressão do mostrador do manômetro é nitidamente melhorada com esta técnica.

No caso das medições de aumento da pressão, deve-se utilizar somente manômetros de condutibilidade térmica. O valor de pressão medido com estes instrumentos depende da condutividade térmica dos gases, sendo influenciado, portanto, pelo tipo de gás de ensaio empregado. Em vista disso, deve-se, após a conclusão do ensaio de estanqueidade, corrigir a curva "pressão x tempo".

11.3.1.3 Temperatura

Quase todos os materiais se expandem quando a temperatura aumenta. Como o coeficiente de expansão dos gases e dos líquidos é bem maior que o dos metais no estado sólido que os armazena, um aumento da temperatura acarreta sempre um aumento da pressão. Se houver uma queda de pressão decorrente da existência de uma vazamento, ela poderá, devido a um pequeno aumento da temperatura, ser recuperada, o que dará ao inspetor a impressão da inexistência de vazamento no objeto de ensaio.

Caso o seu volume seja mantido constante, a pressão de um gás aumenta 1/300 quando a temperatura aumenta 1°C, relação esta que pode ser obtida da equação 11.5.

$$\frac{p \cdot V}{T} = K \quad (\text{equação 11.5})$$

onde

- p é a pressão;
- V é o volume;
- T é a temperatura absoluta;
- K é uma constante.

O exemplo 4, apresentado abaixo, mostra a influência da temperatura sobre a pressão de um gás dentro de um recipiente fechado.

Exemplo 4

Ao se realizar ensaio de estanqueidade em um objeto com o método da diminuição da pressão empregando uma pressão de ensaio de 10 bar, a temperatura do gás aumenta de 20°C para 21°C. Que variação de pressão (Δp) este aumento de temperatura acarreta?

Empregando-se a equação 11.5 na determinação da nova pressão, obtém-se a equação 11.6.

$$\frac{p_1 \cdot V}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V}{T_2} = K \quad (\text{equação 11.6})$$

onde

- p_1 é a pressão do gás no início do ensaio, ou seja, à temperatura T_1 , em [bar];
- V é o volume do objeto de ensaio, em [ℓ];
- T_1 é a temperatura do gás no início do ensaio, em [K];
- K é uma constante;

- p_2 é a pressão do gás quando a sua temperatura aumenta de T_1 para T_2 , em [bar];
- T_2 é a temperatura do gás no final do ensaio, em [K].

Como o volume do objeto de ensaio pode ser considerado constante, tem-se, então, a equação 11.7.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \Rightarrow \quad p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1} \quad (\text{equação 11.7})$$

$$p_2 = \frac{10 \text{ bar} \cdot 294 \text{ K}}{293 \text{ K}} = 10,034 \text{ bar}$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 = 10,034 \text{ bar} - 10 \text{ bar} = 0,034 \text{ bar} = 34 \text{ mbar}$$

Em vista do exposto no exemplo 4, a temperatura de ensaio deve ser medida em todo ensaio de estanqueidade com o método de variação da pressão que é realizado durante um longo período de tempo. Se a taxa de vazamento deve ser medida com elevada precisão e o objeto de ensaio é grande, como, por exemplo, no caso de um grande vaso de pressão, então há necessidade de medir a temperatura em vários pontos do objeto de ensaio. Enquanto a pressão em um sistema constituído de um objeto esférico fechado e no qual não existe nenhum fluxo de matéria é sempre igual em todos os pontos de seu interior, podendo por isso ser medida com um único manômetro, um aquecimento localizado neste objeto induz o aparecimento de um gradiente de temperatura em seu interior, o que exige a realização de diversas medições, de maneira que a influência da temperatura possa ser determinada com exatidão.

No caso do ensaio de estanqueidade com o método da variação da pressão realizado em um objeto grande durante vários dias, é muito importante começar e terminar o ensaio no início do dia, visto que neste horário não se tem incidência de raios solares sobre o objeto de ensaio, podendo o gradiente de temperatura em seu interior ser desprezado.

11.3.1.4 Tempo de ensaio

O tempo de ensaio é o intervalo de tempo durante o qual se realiza as medições de variação de pressão. Para uma determinada taxa de vazamento previamente estipulada, a variação de pressão é proporcional ao tempo de ensaio. O tempo propriamente dito pode, quando comparado com as outras grandezas envolvidas no ensaio de estanqueidade com o método da variação da pressão, como a pressão, o volume e a temperatura, ser medido com precisão bastante boa. As imprecisões na medição da temperatura e da pressão, entretanto, fazem com que o tempo de ensaio escolhido tenha que ser longo o suficiente para que a taxa de vazamento estipulada possa ser medida com segurança. Esta influência da precisão da

medição da temperatura e da pressão no tempo de ensaio está ilustrada no exemplo 5 apresentado a seguir.

Exemplo 5

A taxa de vazamento máxima admissível em um recipiente com $0,1 \text{ m}^3$ de volume e 10 bar de pressão é $10^{-2} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. Os erros de medição da pressão e da temperatura, a 20°C (293 K), são $\pm 10 \text{ mbar}$ e $\pm 1^\circ\text{C}$, respectivamente. Qual deve ser o tempo de ensaio a ser escolhido?

Primeiramente, deve-se converter os erros máximos de medição da pressão e da temperatura em variação de pressão, de maneira que se possa, a seguir, determinar, levando em consideração esta suposta variação de pressão, o tempo de ensaio mínimo que permite medir a taxa de vazamento preestabelecida. O tempo de ensaio deve ser, na realidade, bem maior que o tempo de ensaio mínimo.

A variação da pressão decorrente de uma variação de temperatura que não pode ser detectada é calculada, empregando-se a equação 11.7, conforme mostrado abaixo.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \Rightarrow \quad p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1}$$

$$p_2 = \frac{10 \text{ bar} \cdot (293 + 1) \text{ K}}{(293 - 1) \text{ K}} = 10,0685 \text{ bar}$$

Com isso, o erro na determinação da pressão é

$$\Delta p_T = 0,0685 \text{ bar.}$$

O erro de medição da pressão com o manômetro é

$$\Delta p_p = 20 \text{ mbar.}$$

Desta maneira, o erro total de medição da pressão é

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_T + \Delta p_p = 68,5 \text{ mbar} + 20 \text{ mbar} = 88,5 \text{ mbar.}$$

Utilizando a equação 11.1, que é nada mais nada menos do que a definição de taxa de vazamento, é possível determinar o tempo de ensaio mínimo (equação 11.8) que, levando em consideração o erro total de medição da pressão acima calculado, não permite detectar claramente uma queda de pressão.

$$q_L = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot V$$

$$\Delta t_{\min} = \frac{\Delta p}{q_{L,\text{adm}}} \cdot V \quad (\text{equação 11.8})$$

onde

- $\Delta t_{\min}$ é o tempo de ensaio mínimo;
- $q_{L,\text{adm}}$ é a taxa de vazamento máxima admissível.

$$\Delta t_{\min} = \frac{88,5 \text{ mbar} \cdot 10^2 \ell}{10^{-2} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}} = 885 \cdot 10^3 \text{ s} = 245,8 \text{ h}$$

Neste exemplo 5 apresentado acima, um tempo de ensaio de 10 dias ainda não permite detectar a taxa de vazamento máxima admissível.

11.3.1.5 Umidade

Para se medir a taxa de vazamento com precisão, deve-se levar em consideração a umidade nos cálculos a serem realizados. Como se sabe, todos os materiais possuem uma determinada pressão de vapor a uma dada temperatura. Se durante o processo de evacuação de um recipiente contendo um determinado líquido, por exemplo, a pressão de vapor deste líquido é atingida, então ele se transformará em vapor. A pressão de vapor da água a 20°C é 23,4 mbar. Se um recipiente deve ser ensaiado com o método do aumento da pressão, e durante a sua evacuação a pressão de vapor da água é atingida, então o resíduo de umidade que eventualmente possa se encontrar dentro deste objeto começa a evaporar. Esta água, que agora se encontra no estado gasoso, ocupa um volume significativamente maior que aquele que ela ocupava quando se encontrava no estado líquido (1 g de água no estado líquido ocupa um volume de 1 ml e no estado de vapor, a 20°C, um volume de 58 ℓ), acarretando, conseqüentemente, um aumento de pressão. Este aumento de pressão, por sua vez, engana o inspetor que está conduzindo o ensaio de estanqueidade no objeto, pois dá a impressão da existência de um vazamento (vazamento virtual).

Na pressurização de um objeto de ensaio com ar comprimido normal durante o ensaio de estanqueidade com o método da redução da pressão, a umidade também deve ser levada em consideração. O ideal é utilizar ar puro e seco, em vez de ar normal com umidade, visto que a umidade relativa no ar normal aumenta quando a temperatura diminui. Quando o valor da umidade relativa do ar atinge 100 %, o vapor de água começa a se condensar, passando a água, então, a ocupar um volume bem menor. A condensação do vapor de água, em vista disso, faz com que ocorra uma redução muito grande da pressão dentro do objeto de ensaio. O exemplo 6, apresentado a seguir, mostra como a presença de umidade em um objeto de ensaio deve ser considerada durante a realização do ensaio de estanqueidade com o método da variação da pressão.

Exemplo 6

É feito um ensaio de estanqueidade com o método da diminuição da pressão em um recipiente fechado de 30.000 m³ de volume. No início do ensaio, a temperatura é de 23°C, a umidade relativa do ar é de 75 % e a pressão 1,154 bar. Ao final do ensaio, a temperatura é de 25°C, a umidade relativa do ar é de 50 % e a pressão 1,136 bar. Qual é a diminuição da pressão devida a um possível vazamento?

É possível encontrar na literatura técnica as curvas de variação da pressão de vapor das diferentes substâncias líquidas e sólidas em função da temperatura. Assim, obtém-se a pressão de vapor da água a 23°C e a 25°C, que são 28,083 mbar e 31,668 mbar, respectivamente. Como se conhece, neste exemplo 6, a umidade relativa do ar às temperaturas de 23°C e a 25°C, pode-se calcular a pressão que a umidade exerce a estas duas temperaturas. Os cálculos feitos a seguir mostram como se chega a estes valores.

$$23^{\circ}\text{C}: 28,083 \text{ mbar} \cdot 0,75 = 21,062 \text{ mbar}$$

$$25^{\circ}\text{C}: 31,668 \text{ mbar} \cdot 0,50 = 15,834 \text{ mbar}$$

Como a pressão parcial da umidade do ar tem que ser levada em consideração no cálculo da taxa de vazamento, deve-se diminuir dos valores de pressão medidos no início e no final do ensaio de estanqueidade os valores das pressões parciais da umidade do ar. Desta maneira, tem-se os valores de pressão corrigidos, conforme mostram os cálculos abaixo.

$$1,154 \text{ bar} - 0,021 \text{ bar} = 1,133 \text{ bar}$$

$$1,136 \text{ bar} - 0,016 \text{ bar} = 1,120 \text{ bar}$$

A queda de pressão que ocorre dentro de um intervalo de tempo de ensaio será, então, a diferença de pressão dos valores de pressão corrigidos.

$$\Delta p = 1,133 \text{ bar} - 1,120 \text{ bar} = 0,013 \text{ bar}$$

11.3.1.6 Pressão absoluta

Sempre que se emprega um manômetro de pressão absoluta (por exemplo, no caso da utilização método da pressão absoluta na determinação da taxa de vazamento de um grande recipiente ou na medição da diferença de pressão entre o recipiente e a pressão atmosférica), há necessidade de se medir também a variação da pressão atmosférica com um barômetro.

11.3.2 Limite de detecção de ensaio com gás

O limite de detecção, ou seja, a menor taxa de vazamento detectável, no ensaio de estanqueidade empregando o método da variação da pressão depende da precisão com que os parâmetros de ensaio são medidos. Um fator fundamental para a

precisão de medição da taxa de vazamento, e, com isso, para a definição da menor taxa de vazamento detectável, é que o erro de medição não seja em relação à quantidade de gás que um objeto contém, e, sim, em relação à variação da quantidade de gás.

Se a relação

$$\frac{\text{Variação da quantidade de gás}}{\text{Quantidade total de gás}}$$

aumenta, então a menor taxa de vazamento detectável diminui, ou seja, a sensibilidade do ensaio de estanqueidade melhora.

11.3.2.1 Influência do volume do objeto de ensaio

A influência do volume do objeto de ensaio na precisão de medição da taxa de vazamento será mostrada nos exemplos 7 e 8 apresentados a seguir.

Exemplo 7

A pressão (absoluta) do pneu de um carro de passeio de 30 ℓ de volume, a 20°C, é 3 bar. Após uma semana, a pressão medida neste pneu é 2,5 bar. Se for suposto que não existe erro de medição da pressão e da temperatura, a taxa de vazamento real deste pneu é

$$q_L = \frac{500 \text{ mbar} \cdot 30 \text{ ℓ}}{7 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} = 2,48 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$$

Se, entretanto, o erro de medição da pressão for $\pm 0,1$ bar e o da temperatura for de $\pm 2^\circ\text{C}$, então haverá um erro na determinação da taxa de vazamento.

A variação de pressão devida ao erro de medição da temperatura (20°C, ou seja, 293 K) no início do ensaio de vazamento é:

$$p_1 = \frac{3 \text{ bar} \cdot 295 \text{ K}}{293 \text{ K}} = 3,020 \text{ bar}$$

$$\Delta p_{T1} = 20 \text{ mbar}$$

Ao final do ensaio, a conversão do erro de medição da temperatura em variação de pressão é:

$$p_2 = \frac{2,5 \text{ bar} \cdot 291 \text{ K}}{293 \text{ K}} = 2,483 \text{ bar}$$

$$\Delta p_{T2} = 17 \text{ mbar}$$

Somando-se as variações de pressão devidas aos erros de medição de temperatura no início (Δp_{T1}) e final (Δp_{T2}) de ensaio com o erro de medição da pressão (Δp_p), tem-se o erro de medição total (Δp_{tot}), conforme mostrado abaixo.

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{T1} + \Delta p_{T2} + \Delta p_p = 20 \text{ mbar} + 17 \text{ mbar} + 200 \text{ mbar} = 237 \text{ mbar}$$

O erro de medição total é, então, utilizando-se a equação 11.1, empregado no cálculo do erro de determinação da taxa de vazamento.

$$q_L = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot V$$

$$q_{L,erro} = \frac{\Delta p_{tot}}{\Delta t} \cdot V$$

onde

- Δp_{tot} é o erro de medição total expresso em variação de pressão;
- $q_{L,erro}$ é o erro de determinação da taxa de vazamento.

$$q_{L,erro} = \frac{237 \text{ mbar} \cdot 30 \ell}{7 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} = 1,18 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Com base no exemplo 7 apresentado acima, pode-se concluir que, no caso de vazamento pequeno, mesmo empregando-se instrumento de medição simples, é possível medir a taxa de vazamento com uma precisão relativamente boa, visto que o erro de medição desta taxa de vazamento foi de somente 48 %.

O ensaio de estanqueidade em objeto de grande volume, quando comparado com aquele realizado em objeto de ensaio pequeno, no que se refere aos instrumentos de medição empregados, é bem mais difícil, conforme se pode constatar no exemplo 8. Neste caso, os instrumentos de medição da pressão e da temperatura são bem mais sofisticados e caros.

Exemplo 8

Os erros de medição da pressão e da temperatura durante a realização de ensaio de estanqueidade em um vaso de pressão de grande volume (10 m^3) são $\pm 1 \text{ mbar}$ e $\pm 0,1^\circ\text{C}$, respectivamente. No início do ensaio de estanqueidade, a pressão e a temperatura no interior do vaso de pressão eram, respectivamente, 9 bar (sobrepresão, que correspondem a uma pressão absoluta de 10 bar) e 20°C (293 K). Após dois dias, a pressão no interior do objeto de ensaio caiu 5 mbar. Se for suposto que não houve erro de medição da pressão e da temperatura, a taxa de vazamento real é

$$q_L = \frac{5 \text{ mbar}}{2 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} \cdot 10^4 \ell = 0,289 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Entretanto, como existiu um erro de medição da temperatura, ele deve ser convertido, conforme mostrado a seguir, empregando-se a equação 11.7 (que é válida somente para valores de pressão absoluta), em variação de pressão.

$$p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1}$$

$$p_2 = \frac{10 \text{ bar} \cdot 293,1 \text{ K}}{292,9 \text{ K}} = 10,00683 \text{ bar}$$

$$\Delta p_T = 6,83 \text{ mbar}$$

onde

- p_1 é a pressão absoluta no vaso de pressão no início do ensaio, supondo não haver erro na sua medição, em [bar];
- T_1 é a temperatura de ensaio, medida com o termômetro com erro de leitura de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, porém escolhendo o valor $-0,1^\circ\text{C}$, de maneira a maximizar a pressão p_2 e, conseqüentemente, determinar a maior variação de pressão causada pelo erro de leitura da temperatura de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, em [K];
- T_2 é a temperatura de ensaio, medida com o termômetro com erro de leitura de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, porém escolhendo o valor $+0,1^\circ\text{C}$, de maneira a maximizar a pressão p_2 e, conseqüentemente, determinar a maior variação de pressão causada pelo erro de leitura da temperatura de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, em [K];
- p_2 é a nova pressão que se tem no vaso de pressão quando a temperatura medida varia de T_1 (292,9 K) para T_2 (293,1 K);
- Δp_T é a maior variação de pressão que o erro de medição de temperatura ($\pm 0,1^\circ\text{C}$) pode causar.

No cálculo de conversão do erro de medição de temperatura em variação de pressão efetuado acima não foram levadas em consideração as variações de pressão no início e no final da medição, visto que o desvio corresponde a somente 0,05 %, podendo ser desprezado no cálculo da menor taxa de vazamento detectável.

Considerando-se, além do erro de medição da temperatura (Δp_T), o erro de medição da pressão (Δp_p) de 2 mbar, obtém-se o erro de medição total (Δp_{tot}), conforme mostrado abaixo.

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_T + \Delta p_p = 6,83 \text{ mbar} + 2 \text{ mbar} = 8,83 \text{ mbar}$$

Este erro de medição total acarreta um erro na determinação da taxa de vazamento de

$$q_{L,erro} = \frac{\Delta p_{tot}}{\Delta t} \cdot V$$

$$q_{L,erro} = \frac{8,83 \text{ mbar}}{2 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} \cdot 10^4 \ell = 0,511 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Constata-se, com base nos cálculos efetuados acima, que o erro na determinação da taxa de vazamento é de cerca de 177 %. Esta constatação mostra mais uma vez o problema fundamental no ensaio de estanqueidade com o método da diminuição da pressão: no caso de objeto de pequeno volume, pode-se determinar a taxa de vazamento com uma precisão relativamente boa, mesmo que o vazamento seja pequeno; no caso de objetos de grande volume, porém, mesmo que sejam empregados instrumentos de medição de elevada precisão e que o vazamento seja grande, a determinação da taxa de vazamento é, comparativamente àquela de um objeto de ensaio pequeno, bastante imprecisa. O principal problema do ensaio de estanqueidade com o método da diminuição da pressão em objeto grande pode ser identificado com facilidade no exemplo 8: a quantidade de gás que escapa, quando comparada com a quantidade total de gás que o objeto contém, é muito pequena. No exemplo 8 a perda relativa é somente 0,13 %, enquanto que no exemplo 7 ela corresponde a 16,7 %.

11.3.2.2 Influência do método de ensaio

A influência do método empregado no ensaio de estanqueidade no erro de determinação da taxa de vazamento será abordada mais uma vez, utilizando-se o mesmo objeto de ensaio apresentado no exemplo 5, porém fazendo-se uso do método do aumento da pressão, conforme ilustra o exemplo 9.

Exemplo 9

É feito um ensaio de estanqueidade com o método do aumento da pressão em um recipiente com $0,1 \text{ m}^3$ de volume e 30 mbar de pressão. Os erros de medição da pressão e da temperatura, a 20°C (293 K), são $\pm 0,1 \text{ mbar}$ e $\pm 1^\circ\text{C}$, respectivamente. Qual é a menor taxa de vazamento detectável se a pressão aumenta para 300 mbar em 6 h de ensaio?

Primeiramente, deve-se determinar qual é a maior variação de pressão que o erro de medição da temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$) pode causar. Para isto, supõe-se que se mediu, no início do ensaio, a menor temperatura possível, conforme mostrado nos cálculos abaixo.

$$p_1 = \frac{30 \text{ mbar} \cdot 292 \text{ K}}{293 \text{ K}} = 29,898 \text{ mbar}$$

$$\Delta p_{T1} = 0,102 \text{ mbar}$$

A seguir, supõe-se que se mediu, ao final do ensaio, a maior temperatura possível, conforme mostrado nos cálculos abaixo.

$$p_2 = \frac{300 \text{ mbar} \cdot 294 \text{ K}}{293 \text{ K}} = 301,024 \text{ mbar}$$

$$\Delta p_{T2} = 1,024 \text{ mbar}$$

Além das variações de pressão decorrentes do erro de medição da temperatura calculadas acima, tem-se, também, o erro de medição da própria pressão, decorrente da imprecisão do manômetro empregado no ensaio de estanqueidade, conforme mostrado abaixo.

$$\Delta p_p = 0,2 \text{ mbar}$$

O erro de medição total (Δp_{tot}) é, então, determinado somando-se as variações de pressão decorrentes do erro de medição da temperatura com o erro de medição da pressão, conforme mostrado abaixo.

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_{T1} + \Delta p_{T2} + \Delta p_p$$

$$\Delta p_{\text{tot}} = 0,102 \text{ mbar} + 1,024 \text{ mbar} + 0,2 \text{ mbar} = 1,326 \text{ mbar}$$

A menor taxa de vazamento detectável é determinada com base no erro de medição total calculado acima, conforme mostrado abaixo.

$$q_L = \frac{1,326 \text{ mbar} \cdot 100 \text{ } \ell}{6 \cdot 3600 \text{ s}} = 6,14 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

No exemplo 5 foi mostrado o ensaio de estanqueidade no mesmo recipiente abordado no exemplo 9, porém empregando-se o método da diminuição da pressão. No método da diminuição da pressão não é possível, mesmo após 10 dias de ensaio, medir com precisão uma taxa de vazamento de $10^{-2} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, ou seja, este método de ensaio não é adequado no que diz respeito à precisão desejada. O método do aumento da pressão, porém, permite que a inspeção no objeto de ensaio seja realizada com a precisão almejada, visto que o erro de medição está relacionado não só com a pressão final e inicial, como também com a variação de pressão.

Com o objetivo de aprofundar os conhecimentos na área de ensaio de estanqueidade, será feito, no exemplo 10, o cálculo do erro na determinação da taxa de vazamento do mesmo objeto do exemplo 8, porém empregando-se o método do aumento da pressão.

Exemplo 10

Os erros de medição da pressão e da temperatura durante a realização de ensaio de estanqueidade em um vaso de pressão de grande volume (10 m^3) são $\pm 0,05 \text{ mbar}$ e $\pm 0,1^\circ\text{C}$, respectivamente. No início do ensaio de estanqueidade, a pressão e a temperatura no interior do vaso de pressão eram, respectivamente, $0,1 \text{ mbar}$ (vácuo) e 20°C (293 K). Após dois dias, a pressão no interior do objeto de ensaio subiu para $0,6 \text{ mbar}$ e a temperatura era ainda de 20°C (293 K). Se for suposto que não houve erro de medição da pressão e da temperatura, a taxa de vazamento real é

$$q_L = \frac{0,5 \text{ mbar}}{2 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} \cdot 10^4 \ell = 2,89 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Entretanto, como existiu um erro de medição da temperatura, ele deve ser convertido, conforme mostrado a seguir, empregando-se a equação 11.7, em variação de pressão. Nesta conversão, considera-se que a temperatura medida no início do ensaio é a mais baixa possível, e que a medida no final do ensaio é a mais alta possível, visto que este procedimento é o que acarreta o maior erro de medição.

$$p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1}$$

$$p_1 = \frac{0,1 \text{ mbar} \cdot 292,9 \text{ K}}{293 \text{ K}} = 0,0999 \text{ mbar}$$

$$\Delta p_{T1} = 0,0001 \text{ mbar}$$

$$p_2 = \frac{0,6 \text{ mbar} \cdot 293,1 \text{ K}}{293 \text{ K}} = 0,6002 \text{ mbar}$$

$$\Delta p_{T2} = 0,0002 \text{ mbar}$$

Ao se somar os valores de variação de pressão obtidos da conversão dos erros de medição de temperatura no início e no final do ensaio de estanqueidade em variação de pressão com o erro de medição de pressão ($0,1 \text{ mbar}$), tem-se o erro total de medição, conforme mostrado abaixo.

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_{T1} + \Delta p_{T2} + \Delta p_p = 0,0001 \text{ mbar} + 0,0002 \text{ mbar} + 0,1 \text{ mbar}$$

$$\Delta p_{\text{tot}} = 0,1003 \text{ mbar}$$

Este erro total de medição corresponde a um erro de medição do taxa de vazamento de

$$q_{L,\text{erro}} = \frac{0,1003 \text{ mbar} \cdot 10^4 \ell}{2 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} = 5,81 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Apesar dos gastos relativos à medição da temperatura serem bem maiores, o erro de medição da taxa de vazamento é de somente 20 %, visto que a quantidade de gás aumentou seis vezes durante a realização do ensaio de estanqueidade empregando o método do aumento da pressão, enquanto que com o método da diminuição da pressão ela diminuiu somente 0,05 %. O método do aumento da pressão, entretanto, apresenta uma série de desvantagens, como

- o fato de muitos recipientes ou tubulações não terem sido projetados para suportar vácuo;
- o fato de muitos selos de vedação só vedarem quando se tem sobrepressão no interior do objeto de ensaio;
- o fato do tempo para se obter vácuo menor que 1 mbar em objetos de ensaio de grande volume ser muito grande. Pode-se diminuir bastante este tempo, porém tem-se que empregar equipamentos e instrumentos de evacuação muito caros e complexos;
- o fato de haver necessidade de remover do objeto de ensaio tanto o ar como os vapores condensáveis. Quando se emprega o método do aumento de pressão, a pressão de início de ensaio na maioria das vezes é menor que a pressão de vapor destas substâncias condensáveis. Estas substâncias, por isso, evaporam durante a evacuação do objeto de ensaio. Caso a bomba de vácuo não consiga diminuir a pressão no interior do objeto de ensaio para um valor menor que 1 mbar, então pode ser que dentro deste objeto de ensaio haja resto de líquido. Este resto de líquido continua a evaporar, dando a impressão da existência de um vazamento (vazamento virtual).

A medição de pressões baixas é realizada com instrumentos que operam segundo o princípio da condutibilidade térmica. Como a condutividade térmica depende do tipo de gás, a pressão medida também dependerá do tipo de gás. Além disso, é importante mencionar que o valor de pressão indicado pelo manômetro não varia linearmente com a pressão.

11.3.2.3 Influência do gás de ensaio

Alguns especialistas às vezes dizem que o emprego de hélio como gás rastreador melhora a detecção de vazamento e o ensaio de estanqueidade, alegando que pequenos átomos, como o hélio, por exemplo, podem passar com mais facilidade através de uma descontinuidade que as moléculas de gás grandes, como as de oxigênio ou de nitrogênio. No que diz respeito ao ensaio de estanqueidade realizado com o método da diminuição da pressão, contudo, geralmente não é isto que ocorre. Isto se deve ao fato das diferenças de pressão normalmente empregadas neste tipo de ensaio e das taxas de vazamento esperadas fazerem com que o escoamento de gás através de uma determinada descontinuidade ocorra em regime lamelar ou

turbulento. Nestes casos, a taxa de vazamento depende, dentre outros fatores, da viscosidade do gás de ensaio em questão.

Ao se inserir os valores da viscosidade a 25°C e 1 bar do oxigênio, do nitrogênio, do hélio e do freon R12, apresentadas abaixo, na equação 11.9, que é empregada na determinação da taxa de vazamento quando se tem escoamento laminar, ou turbulento, em uma descontinuidade capilar ideal, isto é, com seção reta transversal circular e comprimento (ℓ) maior que seu diâmetro, constata-se que as taxas de vazamento de ar e de hélio são aproximadamente iguais; no caso do R12, porém, a taxa de vazamento é um pouco maior.

- $\eta_{O_2} = 20,62 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$
- $\eta_{N_2} = 17,74 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$
- $\eta_{He} = 19,68 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$
- $\eta_{R12} = 12,70 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$

$$q_L = \frac{\pi \cdot r^4}{16 \cdot \eta \cdot \ell} \cdot (p_1^2 - p_2^2) \quad (\text{equação 11.9})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento para escoamento laminar;
- r é o raio da descontinuidade capilar ideal;
- η é a viscosidade do gás;
- ℓ é o comprimento da descontinuidade capilar ideal.

11.4 Exemplos de aplicação

11.4.1 Ensaio em tubulação

O ensaio de estanqueidade em tubulação empregando água é realizado, por exemplo na Alemanha, de acordo com as normas VdTÜV 1051 e 1060 [5.11]. Neste ensaio, isola-se um trecho da tubulação de alguns quilômetros de comprimento, que, a seguir, é pressurizado com água. O tempo de ensaio, isto é, o tempo após o qual se faz uma medição da pressão para determinar a variação da pressão, deve ser, no mínimo, de 24 h. Na medição da pressão e da temperatura, utiliza-se manômetros e termômetros de precisão de alguns mbar e 0,02°C, respectivamente.

Medindo-se o tempo de ensaio, a pressão e a temperatura, bem como conhecendo-se

- a compressibilidade e o coeficiente de expansão da água;
- o coeficiente de expansão e o módulo de elasticidade do material da tubulação;
- o volume da tubulação;
- e a queda de pressão;

pode-se determinar o volume de água que se perde. Dividindo-se este volume pelo tempo de ensaio, obtém-se a taxa de vazamento em $\ell \cdot h^{-1}$.

A taxa de vazamento detectável é determinada pela precisão com que o ensaio é realizado. Esta taxa de vazamento depende não só do volume do trecho da tubulação que está sendo ensaiado, como também da precisão do método de ensaio, e pode variar entre $4 \ell \cdot h^{-1}$ e $0,3 \ell \cdot h^{-1}$. No caso de tubulação soldada com um único passe, as condições de ensaio devem ser estabelecidas de tal maneira que se possa medir uma taxa de vazamento de $0,05 \ell \cdot h^{-1}$.

11.4.2 Ensaio em vaso de pressão de concreto protendido

Um vaso de pressão de concreto protendido (cilindro vertical com 28 m de altura e 25 m de diâmetro), revestido internamente com uma camisa de aço estanque aos gases de 20 mm a 30 mm de espessura, é tensionado vertical e horizontalmente, de maneira a ser enchido com gás de refrigeração. Este vaso é ensaiado segundo o KTA 3405 [3.6] (onde KTA significa "Kerntechnischer Ausschuß", isto é, Comitê de Tecnologia Nuclear), empregando-se uma pressão de ensaio de 39,2 bar, com o objetivo de ter a sua estanqueidade avaliada. Neste ensaio, a queda de pressão foi medida, levando-se em consideração a temperatura e a umidade, visando-se determinar a taxa de vazamento integral do vaso.

A norma KTA 3405 é idêntica à norma DIN 25436 [3.6], e aborda detalhadamente todos os parâmetros de ensaio de estanqueidade realizado empregando o método da diminuição da pressão.

As especificações referentes às precisões dos instrumentos de medição utilizados no ensaio de estanqueidade descrito acima são bastante severas: $\pm 1/100^\circ\text{C}$ para o medidor de temperatura e ± 1 mbar para o manômetro. Os valores da pressão, da temperatura e da umidade, medidas de dez em dez minutos, foram armazenados em um sistema de aquisição de dados controlado por computador e analisados no próprio local de realização do ensaio.

A massa de gás contida no objeto de ensaio foi calculada levando-se em consideração a umidade, cuja quantidade foi subtraída pelo aplicativo desenvolvido, e as oscilações de temperatura. A taxa de vazamento determinada foi de 0,01 % por dia e era uma ordem de grandeza menor que a máxima taxa de vazamento admissível.

11.4.3 Ensaio em produção em série

A inspeção de um grande número de objetos geralmente é realizada empregando o método da variação da pressão. Este método possui uma grande vantagem em relação aos métodos que utilizam gás rastreador, que consiste no fato de não haver contaminação do ambiente onde a inspeção é conduzida, não prejudicando, portanto, a realização do próximo ensaio. Como a inspeção em série é feita

geralmente em objeto de pequeno volume (menor que 1 ℓ), pode-se conseguir elevada sensibilidade de ensaio, mesmo quando o tempo de ensaio é muito pequeno. O resultado do ensaio é sempre a taxa de vazamento integral do objeto. Sistema de freio para automóvel, válvula, lata de alimento ou bebida, garrafa, por exemplo, são ensaiados conforme este procedimento.

11.4.4 Calibração de vazamento padrão

A determinação da taxa de vazamento de um vazamento padrão com elevada precisão também pode ser realizada empregando o método do aumento da pressão. Para isto, necessita-se de um pequeno volume de ensaio, cujo valor deve ser medido com precisão. Na determinação deste volume de ensaio, deve-se também levar em consideração os volumes referentes às conexões, aos dutos, aos transdutores, etc. A bomba de vácuo empregada deve permitir evacuar o volume de ensaio até uma pressão menor que 10^{-2} mbar. Desprezando-se a taxa de vazamento do sistema de medição, pode-se determinar com precisão a taxa de vazamento do vazamento padrão. Os valores de taxa de vazamento que são medidos com este método de ensaio podem ser até mesmo menores que 10^{-6} mbar·ℓ·s⁻¹, conforme ilustra o exemplo 11.

Exemplo 11

O volume de um sistema de ensaio montado para determinar, com o método do aumento da pressão, a taxa de vazamento integral de um vazamento padrão é de 0,1 ℓ. Este sistema é evacuado até a pressão em seu interior atingir o valor de 10^{-3} mbar. Após 8h de ensaio, a pressão no interior deste sistema é 10^{-2} mbar. Desprezando-se a taxa de vazamento dos dutos, dos transdutores, das conexões, etc., qual é a taxa de vazamento do vazamento padrão?

$$q_L = \frac{(10^{-2} - 10^{-3}) \text{ mbar} \cdot 0,1 \text{ ℓ}}{8 \cdot 3600 \text{ s}} = 3,13 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$$

Com base nas informações expostas acima, constata-se que também se pode calibrar o vazamento padrão que será usado em um ensaio empregando hélio como gás rastreador e fazendo vácuo. Se a pressão no interior do volume de ensaio puder ser reduzida, através do emprego de bomba de vácuo de difusão ou turbomolecular, em cerca de uma ordem de grandeza, então o tempo de ensaio também poderá ser reduzido. Assim, consegue-se excluir um possível erro de medição decorrente das oscilações de temperatura que porventura ocorram. Caso o tempo de ensaio seja de alguns minutos, então a precisão da determinação da taxa de vazamento dependerá somente do erro de leitura do manômetro usado na medição da pressão. No caso do exemplo 11, o erro de medição da pressão de 10^{-3} mbar, que corresponde a 10 % da pressão final, acarreta um erro de determinação da taxa de vazamento integral de no máximo 20 %.

Método do Gás de Ensaio – Sobrepressão

- 12.1 Introdução
- 12.2 Pressurização e despressurização
 - 12.2.1 Condições fundamentais
 - 12.2.2 Ensaio preliminar
- 12.3 Pressurização do objeto de ensaio
 - 12.3.1 Delimitação do volume de ensaio
 - 12.3.2 Controle da pressão
- 12.4 Calibração do detector de vazamento
- 12.5 Gás de ensaio e concentração
 - 12.5.1 Inspeção com gás de ensaio puro
 - 12.5.2 Inspeção com mistura gasosa
- 12.6 Métodos de detecção
- 12.7 Tipos de detectores de vazamento
- 12.8 Avaliação da taxa de vazamento
- 12.9 Comparação dos gases de ensaio
 - 12.9.1 Propriedades físicas do gás de ensaio
 - 12.9.1.1 Viscosidade
 - 12.9.1.2 Coeficiente de difusão
 - 12.9.1.3 Condutividade térmica
 - 12.9.2 Concentração de gás de ensaio detectável no ar atmosférico a 1bar
 - 12.9.3 Localização de vazamento com sobrepressão e hélio ou fluido halogenado como gás de ensaio
- 12.10 Método do envoltório
 - 12.10.1 Parâmetros de ensaio
 - 12.10.1.1 Volume entre o envoltório e o objeto de ensaio
 - 12.10.1.2 Ruído de fundo e variação de concentração de gás de ensaio detectável
 - 12.10.2 Avaliação dos resultados de medição
 - 12.10.2.1 Cálculo da variação de concentração de gás de ensaio
 - 12.10.2.2 Tempo mínimo de ensaio

12 Método do gás de ensaio – sobrepressão

12.1 Introdução

Antes de se iniciar a inspeção de um objeto de ensaio, deve-se

- verificar quais são as exigências relativas ao método de ensaio, bem como qual é a menor taxa de vazamento que deve ser detectada;
- certificar se todos os materiais de que ele é feito são compatíveis com o gás de ensaio, isto é, se eles não são agredidos pelo gás de ensaio;
- tomar todas as medidas de segurança exigidas, inclusive aquelas relativas à liberação do gás de ensaio na atmosfera;
- observar qual é o estado das suas superfícies (interna e externa) e conhecer a sua temperatura.

Para isso, é necessário consultar as normas, especificações e instruções de ensaio, cuja elaboração foi feita, na maioria das vezes, com base em experiência adquirida ao longo de vários anos.

12.2 Pressurização e despressurização

Dependendo do método de ensaio a ser empregado (vácuo ou sobrepressão, método da sonda aspiradora ou determinação da taxa de vazamento integral), do gás de ensaio e da sua compatibilidade com os diferentes materiais que se encontram dentro do objeto de ensaio, bem como das dimensões e da geometria do objeto de ensaio, é necessário adotar diferentes medidas preventivas e empregar métodos de pressurização do objeto de ensaio bem distintos.

12.2.1 Condições fundamentais

Antes de se pressurizar o objeto de ensaio, pode ser necessário fazer furações de segurança ou de ensaio. Além disso, deve-se verificar se há necessidade de remover o ar que se encontra em seu interior, ou se ele deve ser lavado e secado. Nestes casos, deve-se seguir rigorosamente o que se encontra prescrito nas "Technische Regeln für Gefahrstoffe – TRGS" [5.9] (Normas Técnicas para Substâncias Perigosas).

A maneira como a despressurização de um objeto de ensaio será feita tem que estar muito bem definida antes mesmo da sua pressurização. Esta despressurização deverá ser realizada de maneira segura e de acordo com a prescrição de prevenção de acidentes da "Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA-Luft" [5.10] (Instrução Técnica para Manutenção da Limpeza do Ar). Caso o gás de ensaio seja o hélio, então não existe restrições quanto a sua liberação na atmosfera durante a despressurização do objeto de ensaio após a sua inspeção. Entretanto, se o gás de ensaio contiver CFC (cloro-flúor-carbono), ou seja, se ele for halogenado, como

ocorre no caso do freon, por exemplo, o procedimento de esvaziamento do objeto de ensaio é diferente. Apesar da TA-Luft não dizer qual a quantidade máxima deste gás que pode ser liberada na atmosfera após a localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade, não se deve liberá-lo na atmosfera, devido ao dano que pode causar à camada de ozônio, sendo necessário removê-lo do objeto de ensaio com o maior cuidado possível.

A inspeção de vasos e recipientes para armazenamento, por exemplo, deve ser conduzida de acordo com as especificações TRB 532 e TRB 280 [5.2], bem como as normas HP 20 e HP 30 [5.5]. Se a inspeção com gás de ensaio é realizada em uma área onde existe perigo de explosão, então, além de se observar as restrições mencionadas acima, deve-se seguir as normas de segurança com o máximo rigor possível, principalmente no que diz respeito aos equipamentos elétricos (medidores de pressão, bombas, etc.).

12.2.2 Ensaio preliminar

Com o objetivo de localizar e reparar grandes vazamentos antes do início da inspeção do objeto de ensaio, visto que eles poderiam contaminar o ambiente com gás de ensaio de uma maneira tal que a inspeção não pudesse mais ser realizada com confiança, é conveniente, em determinadas situações, fazer um ensaio preliminar com um método menos sensível, como, por exemplo, com o método da variação da pressão, utilizando ar, ou com o método do ultra-som. Os métodos de ensaio úmidos, como a pressurização do objeto de ensaio com água, não são adequados como ensaio preliminar para localização de grandes vazamentos, visto que existe o perigo de obstrução de pequenos vazamentos ($q_L < 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$), o que exigiria, posteriormente à realização do ensaio preliminar, enorme esforço para secar o objeto de ensaio. O mesmo é válido para o ensaio hidrostático realizado antes da localização de vazamento e do ensaio de estanqueidade com gás rastreador. Nestes casos, muitas vezes a secagem do objeto de ensaio é extremamente difícil, sendo normalmente necessárias muitas horas de trabalho.

12.3 Pressurização do objeto de ensaio

12.3.1 Delimitação do volume de ensaio

É óbvio que antes de pressurizar o objeto de ensaio com gás de ensaio, todas as suas aberturas têm que ser fechadas adequadamente. No caso de tubulação, por exemplo, pode-se usar seus próprios registros; no caso de recipientes, vasos ou outros equipamentos, contudo, usa-se tampas, válvulas, etc., que, porém, devem ser adequadas para a pressão de ensaio exigida. Caso o objeto de ensaio seja um trecho de uma instalação, não se pode permitir que o gás de ensaio atinja outros locais desta instalação, que não aquele que esteja sendo esvaziado.

12.3.2 Controle da pressão

Um fator importante a ser observado na pressurização do objeto de ensaio é a sua pressão máxima admissível, especialmente quando se trata de um recipiente com parede dupla. Ao se controlar a pressão, não se deve esquecer que um aumento da temperatura acarreta sempre um aumento da pressão. Como o estado de um gás líquido muda quando ele é utilizado na pressurização de um objeto de ensaio, existe, naturalmente, nestes casos, o perigo da pressão ultrapassar o valor máximo permitido.

A homogeneidade de uma mistura gasosa empregada na localização de vazamento e no ensaio de estanqueidade é muito importante no que diz respeito à sensibilidade do ensaio. A maneira como é feita esta mistura gasosa, isto é, se os gases são injetados simultânea ou separadamente no objeto de ensaio, bem como o tempo de homogeneização necessário para que a mistura gasosa atinja o estado ideal, são dois parâmetros que influenciam bastante a sensibilidade do ensaio.

12.4 Calibração do detector de vazamento

Segundo as informações fornecidas pelos fabricantes de detector de vazamento, a calibração deste equipamento normalmente é feita com vazamento padrão com ou sem reservatório de gás.

No caso de um vazamento padrão sem reservatório de gás, o gás (como o hélio, o R12, etc.) utilizado se encontra dentro de um balão, cujo bico é conectado ao vazamento padrão. A taxa de vazamento se refere às condições normais de temperatura e pressão, ou seja, à temperatura ambiente e para uma diferença de pressão de 1 bar. A taxa de vazamento, neste caso, é fornecida pelo fabricante do vazamento padrão, sendo determinada através do escoamento de ar, proveniente do ar atmosférico, através do vazamento padrão, para dentro de um recipiente com vácuo. O aumento de pressão dentro do recipiente com vácuo é registrado ao longo do tempo, sendo a inclinação desta curva "pressão versus tempo" usada na determinação da taxa de vazamento.

O vazamento padrão com reservatório é constituído de um tubo capilar unido a um reservatório contendo gás. A taxa de vazamento real de um vazamento padrão pode variar dentro de uma determinada faixa. De qualquer maneira, a sua taxa de vazamento nominal (q_{TL}), indicada no seu corpo, se refere àquela que se tem quando a temperatura é a ambiente e a diferença de pressão é de 1 bar (condições normais de temperatura e pressão). A taxa de vazamento real do vazamento padrão, entretanto, pode ser determinada com precisão empregando-se o método do envoltório, ou medindo-se a sua taxa de vazamento com um detector de vazamento e comparando o valor obtido com aquele que se obtém quando se mede a taxa de vazamento de um vazamento padrão calibrado com este mesmo detector de vazamento. Se o gás contido no reservatório do vazamento padrão for o hélio, o

vazamento padrão é conectado diretamente ao detector de vazamento de hélio, sendo o valor indicado no mostrador do equipamento lido constantemente. É muito difícil verificar se um vazamento padrão de hélio está em perfeitas condições, visto que ele libera somente uma pequena quantidade (≈ 1 mg/ano) de gás, de maneira que a pesagem do recipiente com gás em um período de algumas semanas não permitiria medir uma perda de peso significativa, que pudesse ser empregada no cálculo da taxa de vazamento. Para verificar se um vazamento padrão de hélio está funcionando perfeitamente, pode-se empregar a mesma técnica citada anteriormente, ou seja, levantar a curva "pressão versus tempo", determinar a sua inclinação e usá-la no cálculo da taxa de vazamento do vazamento padrão.

No caso do R12, porém, a pesagem do vazamento padrão com uma balança de 0,1 mg de precisão já permite determinar a taxa de vazamento.

Antes de se calibrar um detector de vazamento, deve-se verificar se o meio ambiente não está contaminado com gás de ensaio. Esta contaminação poderia ter acontecido antes da calibração, durante, por exemplo, uma localização de vazamento ou um ensaio de estanqueidade.

12.5 Gás de ensaio e concentração

12.5.1 Inspeção com gás de ensaio puro

Se a sensibilidade exigida de um ensaio for elevada, então o objeto de ensaio tem que ser evacuado antes de ser enchido com gás de ensaio, de maneira a se assegurar que ele conterá somente gás de ensaio. Este procedimento é recomendado também para inspeção de objeto de ensaio de geometria complexa, como, por exemplo, em tubulações de reatores.

Outra possibilidade de se obter 100 % de gás de ensaio dentro de um objeto de ensaio com geometria complexa é deixar o gás escapar por uma abertura situada no lado oposto do local onde o gás de ensaio está sendo insuflado, até se constatar, nesta abertura, com o detector de gás de ensaio, que o gás que está saindo apresenta elevada concentração de gás de ensaio. Os sistemas de detecção dos detectores de vazamento, entretanto, não são adequados para este tipo de detecção, devendo ser usados, nestes casos, detectores de oxigênio. A desvantagem deste procedimento de pressurização do objeto de ensaio com gás de ensaio 100 % puro consiste na contaminação do ambiente de trabalho com gás de ensaio, ou seja, no aumento do nível de ruído de fundo.

Recomenda-se, no caso de inspeção em sistemas de geometria complexa, medir a concentração de gás de ensaio em diferentes locais do objeto de ensaio. Somente desta maneira é que se pode verificar se a concentração de gás de ensaio é a mesma em todos os pontos do objeto.

12.5.2 Inspeção com mistura gasosa

Os objetos grandes são, por motivos econômicos e técnicos, geralmente inspecionados utilizando-se mistura gasosa (por exemplo, gás de ensaio com ar atmosférico ou nitrogênio). Como a difusão do gás de ensaio no gás auxiliar à pressão atmosférica demora bem mais do que normalmente se imagina, é muito difícil conseguir uma mistura gasosa homogênea. Por isso, quando se deseja inspecionar um objeto com mistura gasosa, os gases auxiliar e de ensaio devem ser introduzidos simultaneamente no objeto de ensaio, observando-se, naturalmente, a proporção de cada um deles, de modo a se obter uma mistura gasosa com a concentração de gás de ensaio desejada e homogênea. No entanto, ao se decidir por inspecionar um objeto com mistura gasosa, deve-se levar em consideração que a sensibilidade desta técnica de inspeção diminui com a redução da concentração de gás de ensaio, sendo este fato muito importante, principalmente quando a máxima taxa de vazamento admissível é bem pequena.

Outra maneira de se reduzir bastante o custo das inspeções é recuperar o gás de ensaio. Em vista disso, as instalações de recuperação de gás de ensaio têm adquirido, nos últimos anos, uma importância crescente, principalmente na inspeção de componentes fabricados em série.

12.6 Métodos de detecção

A detecção do gás de ensaio pode ser feita de diferentes maneiras. Uma delas, denominada método integral, consiste na utilização de um envoltório, impermeável à passagem de gás de ensaio, em torno do objeto contendo gás de ensaio. Se houver passagem de gás através de algum lugar do objeto de ensaio, então a concentração de gás de ensaio sob o envoltório aumentará no transcorrer do tempo, sendo acusada no mostrador do detector de vazamento. Esta técnica pode ser empregada em dispositivo de controle de uma instalação ou no método de acumulação de gás de ensaio. No caso do método local, o fluxo de gás de ensaio é conduzido até o detector de vazamento através de uma sonda aspiradora. Para localizar o vazamento, a sonda aspiradora deve passar próximo à superfície do objeto de ensaio. O comprimento da mangueira que vai da sonda aspiradora até o detector de vazamento influencia o tempo que o detector de vazamento necessita para acusar em seu mostrador a chegada do gás de ensaio. Quando a mangueira tem 6 m de comprimento, por exemplo, o tempo para o gás de ensaio ser detectado é de aproximadamente 10 s. Alguns sistemas, como no caso dos detectores de vazamento de halogênio, por exemplo, o detector de vazamento se encontra localizado na própria sonda aspiradora.

12.7 Tipos de detectores de vazamento

A detecção de um determinado gás pode ser feita de diferentes maneiras, como, por exemplo,

- explorando a sua condutividade térmica (detector de condutibilidade térmica);
- medindo a corrente de seus íons produzida no detector (detector de halogênio);
- usando a sua radioatividade (contador Geiger-Müller);
- utilizando a sua massa (espectrômetro de massa).

O critério utilizado na escolha entre um ou outro tipo de detector de vazamento a ser utilizado é baseado na sensibilidade, na faixa de medição e na sua linearidade (dinâmica), no comportamento em função do tempo (tempos de ativação e desativação), na facilidade de manuseio, no custo e na confiabilidade do resultado, que, por sua vez, é determinada pela temperatura, pela umidade e precisão de medição quando se tem outros gases.

A figura 12.1 ilustra como é possível localizar vazamento e avaliar a estanqueidade, em região suspeita de um revestimento interno e independente de uma instalação que opera pressurizada, utilizando um dispositivo de ensaio simples e eficiente. Este dispositivo, por permitir o emprego de gás de ensaio com elevada pressão, possibilita a realização de um ensaio de elevada sensibilidade.

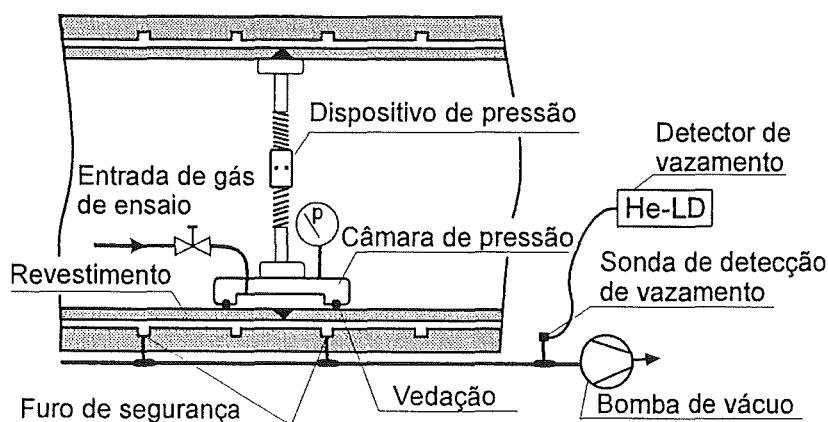


Figura 12.1: Dispositivo de ensaio em instalação com revestimento interno independente.

12.8 Avaliação da taxa de vazamento

Algumas vezes é necessário avaliar a taxa de vazamento quando se faz uma inspeção local (método da sonda aspiradora), de maneira que se possa saber se todos os locais por onde ocorrem grandes vazamentos foram ou não encontrados. Esta avaliação é feita comparando-se o valor lido no mostrador do equipamento durante a realização do ensaio (A_L) com o valor lido neste mesmo mostrador quando se usa um vazamento padrão (A_{TL}) com taxa de vazamento conhecida, conforme mostra a equação 12.1.

$$q_L \approx \frac{A_L - A_U}{A_{TL} - A_U} \cdot \frac{q_{TL}}{c_{He}} \quad (\text{equação 12.1})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento (avaliada) quando se realiza o ensaio com sonda aspiradora;
- A_L é o valor lido no mostrador do detector de vazamento quando se utiliza sonda aspiradora;
- A_{TL} é o valor lido no mostrador do detector de vazamento quando se utiliza o vazamento padrão;
- A_U é o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio relativo ao ruído de fundo;
- q_{TL} é a taxa de vazamento do vazamento padrão;
- c_{He} é a concentração de hélio dentro do objeto de ensaio.

A taxa de vazamento indicada no vazamento padrão, entretanto, é válida para as condições normais de temperatura e pressão de ensaio. Como as condições de ensaio com sonda aspiradora são diferentes das condições em que a taxa de vazamento do vazamento padrão foi medida, a taxa de vazamento do objeto de ensaio deve ser medida com o método integral.

O método de ensaio integral consiste na medição da variação de concentração de gás de ensaio, ao longo do tempo, embaixo de um envoltório. Após a calibração do sistema de medição, pode-se calcular a taxa de vazamento empregando-se a equação 12.2.

$$q_L = \frac{\Delta c_{GE} \cdot p_{amb} \cdot V_{env}}{\Delta t \cdot c_{GE}} \quad (\text{equação 12.2})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento medida quando se realiza o ensaio com envoltório;
- Δc_{GE} é a variação da concentração de gás de ensaio;
- p_{amb} é a pressão ambiente;
- V_{env} é o volume do envoltório;
- Δt é o tempo de ensaio;
- c_{GE} é a concentração de gás de ensaio.

12.9 Comparação dos gases de ensaio

12.9.1 Propriedades físicas do gás de ensaio

As propriedades físicas do gás de ensaio que são importantes para a localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade são a viscosidade, o coeficiente de difusão e a condutividade térmica.

12.9.1.1 Viscosidade

A viscosidade de um fluido, seja ele líquido ou gasoso, se deve à fricção de uma partícula contra outra. Se a temperatura aumenta, então a viscosidade do fluido gasoso aumenta, porém a do fluido líquido diminui. No caso do escoamento laminar de um fluido, a resistência ao escoamento é diretamente proporcional à sua

Tabela 12.1: *Propriedades físicas dos gases**

Gás	Propriedade física**					
	Peso molecular	Densidade [g·ℓ ⁻¹]	Temperatura de ebulição [K]	Viscosidade [10 ⁻⁶ kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]	Coeficiente de difusão [m ² ·dia ⁻¹]	Condutividade térmica [10 ⁻³ ·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
He	4	0,18	<u>4,2</u>	19,6	6,0	148
R12	121	5,4	243	13,2	0,71	9,9
R22	86,5	3,9	232	13,8	0,83	11,3
SF ₆	<u>146</u>	<u>6,5</u>	209***	15,3	—	—
NH ₃	17	0,76	240	9,8	1,47	22
Ar atmosférico	28,8	1,29	82	18,2	—	25,6
O ₂	32	1,43	90	<u>20,2</u>	1,52	26,1
N ₂	28	1,25	77	17,5	1,52	25,5
H ₂	<u>2</u>	<u>0,09</u>	20,4	<u>8,8</u>	5,8	<u>183</u>
Cl ₂	71	3,2	239	13,2	—	—
HCl	36,5	1,63	188	14,2	—	—
CO ₂	44	1,97	195***	14,6	1,2	15,8
SO ₂	64	2,8	<u>263</u>	12,3	0,94	<u>8,7</u>

* Os valores máximo e mínimo estão sublinhados.

** Densidade a 273 K e 1 bar, em [g·ℓ⁻¹];

Temperatura de ebulição a 1 bar, em [K];

Viscosidade a 273 K e 1 bar, em [10⁻⁶ kg·m⁻¹·s⁻¹];

Coeficiente de difusão a 273 K e 1 bar, em [m²·dia⁻¹];

Condutividade térmica a 273 K e 1 bar, em [10⁻³·m⁻¹·K⁻¹].

*** A esta temperatura, a pressão de vapor da fase no estado sólido é igual a 1 bar.

viscosidade, ou seja, o fluxo de fluido é maior se a viscosidade for menor. Observando-se a tabela 12.1, constata-se que o escoamento de hidrogênio é cerca de 2,3 vezes maior que o do oxigênio. No caso do escoamento molecular, entretanto, a viscosidade não exerce nenhuma influência sobre o escoamento de gás.

12.9.1.2 Coeficiente de difusão

Difusão é, por definição, a mistura que ocorre por força própria de uma substância na outra. A difusão aumenta com a temperatura, sendo o coeficiente de difusão um parâmetro utilizado para a velocidade de difusão. Ao se observar a tabela 12.1, verifica-se que o hélio, que possui coeficiente de difusão $6,0 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$ no ar atmosférico a 273 K e 1 bar de pressão, se movimenta cerca de 8,5 vezes mais rápido que o R12, cujo coeficiente de difusão, no mesmo ambiente e à mesma temperatura e pressão, é $0,71 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$.

12.9.1.3 Condutividade térmica

A coluna 7 da tabela 12.1 mostra que dos diferentes gases apresentados, dois deles apresentam uma condutividade térmica bem diferente da condutividade térmica do ar atmosférico: o hidrogênio e o hélio. Esta elevada diferença de condutividade térmica constitui a condição fundamental para se ter uma sensibilidade de medição elevada quando se inspeciona um objeto de ensaio no ar atmosférico empregando o método da condutibilidade térmica. A sensibilidade de localização de vazamento com gás de ensaio que possua uma condutividade térmica semelhante à do ar atmosférico é bem pequena.

12.9.2 Concentração de gás de ensaio detectável no ar atmosférico a 1 bar

No caso de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade com sonda aspiradora empregando hélio como gás de ensaio, o teor de hélio no ar atmosférico a 1 bar é que determina o limite de detecção. Neste caso, ainda é possível detectar uma variação de concentração de hélio de 1 ppm.

A concentração mínima necessária para que se possa detectar os fluidos frigorigênicos R12 e R22 no ar atmosférico (pressão de 1 bar) usando sonda aspiradora gira em torno de 0,1 ppm.

Segundo os dados dos fabricantes de detectores de vazamento de SF_6 , a menor concentração detectável deste gás no ar atmosférico a 1 bar é de aproximadamente 0,01 ppm. Esta técnica de ensaio, entretanto, é raramente utilizada.

12.9.3 Localização de vazamento com sobrepressão e hélio ou fluido halogenado como gás de ensaio

A detecção de um vazamento depende de uma série de fatores como:

- da concentração de gás de ensaio, sendo que neste caso a sua escolha é feita com base na máxima taxa de vazamento admissível;
- do ruído de fundo, sendo que neste caso é recomendável fazer um ensaio preliminar, de maneira a verificar se existe uma contaminação do ambiente com gás de ensaio, bem como para localizar e reparar grandes vazamentos;
- da capacidade de sucção da sonda aspiradora (geralmente fornecida pelo fabricante), da velocidade com que ela é movimentada (a velocidade ideal é determinada com o auxílio de um vazamento padrão – ensaio dinâmico) e da distância entre a sua ponta e a superfície do objeto que está sendo inspecionado.

12.10 Método do envoltório

A localização de um vazamento deve ser feita rastreando-se lenta e cuidadosamente as regiões suspeitas do objeto de ensaio com a sonda aspiradora. Esta técnica, todavia, pode estender muito o tempo de ensaio. A avaliação da taxa de vazamento total, neste caso, só pode ser feita com grande limitação. Em vista disso, os ensaios com gás rastreador normalmente realizados são do tipo integral. Segundo este método, utiliza-se um envoltório em torno do objeto de ensaio, ou sobre somente uma região do mesmo, antes de se insuflar gás de ensaio dentro do objeto de ensaio.

A ponta da sonda aspiradora é introduzida dentro de envoltório após transcorrido um determinado intervalo de tempo, sendo então a taxa de vazamento total calculada a partir da variação da concentração de gás de ensaio sob o envoltório.

12.10.1 Parâmetros de ensaio

A sensibilidade da inspeção de um objeto com o método do envoltório é determinada por diferentes fatores, como o volume do envoltório, o ruído de fundo e a variação de gás de ensaio detectável, conforme descrito detalhadamente nos itens a seguir.

12.10.1.1 Volume entre o envoltório e o objeto de ensaio

Ao se iniciar uma inspeção com o método do envoltório, o volume do espaço compreendido entre a superfície do objeto de ensaio e o envoltório geralmente contém somente ar atmosférico. Com o passar do tempo, todavia, caso haja no objeto de ensaio uma descontinuidade através da qual ocorra um vazamento, este volume passa a conter, então, uma mistura de ar atmosférico com gás de ensaio. A relação entre a quantidade de gás de ensaio que vazou e o volume de ar atmosférico existente entre o objeto de ensaio e o envoltório e no começo da

inspeção, ou seja, a concentração de gás de ensaio, é empregada na determinação da taxa de vazamento.

A concentração de gás de ensaio sob o envoltório deve atingir um determinado valor de maneira que o gás de ensaio possa ser detectado, sendo, por isso, muito importante que o volume entre o envoltório e o objeto de ensaio (ou seja, a distância entre o envoltório e a superfície do objeto de ensaio) seja o menor possível. Ao se ensaiar um objeto com o método do envoltório, deve-se estar alerta para o fato de que o gás de ensaio que escapou por uma descontinuidade pode ainda não ter se distribuído uniformemente no volume entre o envoltório e o objeto de ensaio, visto que em um volume com seção transversal muito pequena, a distribuição uniforme de gás de ensaio é praticamente impossível. Por isso, pode acontecer que em um determinado local a concentração de gás de ensaio seja elevada, porém que não seja possível determinar a taxa de vazamento. Para se obter sucesso na inspeção, tem-se que introduzir a ponta da sonda aspiradora sob o envoltório em diferentes lugares e medir a concentração de gás de ensaio, de maneira a atingir o local onde a concentração de gás de ensaio se encontra.

O método do envoltório é especialmente adequado quando um resultado do tipo sim/não já é suficiente. Ele é muito utilizado principalmente na inspeção de um pequeno trecho de um objeto, no qual se supõe existir vazamento, que deva ser ensaiado com a maior sensibilidade possível. Neste caso, este pequeno trecho do objeto de ensaio, que pode ser um cordão de solda de alguns centímetros de comprimento, por exemplo, é recoberto com um envoltório e inspecionado.

O método do envoltório é bastante adequado para a avaliação da taxa de vazamento integral de um objeto ou de uma região sua. De qualquer maneira, é muito importante que a concentração de gás de ensaio no volume entre o envoltório e o objeto de ensaio seja homogênea. Esta homogeneidade pode ser conseguida introduzindo-se um pequeno ventilador sob o envoltório, que se encarregaria de movimentar o ar que se encontra neste local. Neste caso, porém, o volume entre o envoltório e o objeto de ensaio não pode ser muito pequeno, como ocorre quando se usa uma película de plástico colada sobre a superfície do objeto de ensaio. É óbvio que, quando se usa ventilador sob o envoltório, há uma certa perda de sensibilidade deste método de ensaio. O volume entre o envoltório e o objeto de ensaio deve ser determinado com precisão, pois ele é usado, juntamente com o tempo de ensaio e a concentração de gás de ensaio sob o envoltório, no cálculo da taxa de vazamento. Se o objeto de ensaio tiver uma geometria complicada, a determinação deste volume pode ser bastante difícil, sendo que muitas vezes o volume entre o envoltório e o objeto de ensaio só pode ser estimado. Neste caso, naturalmente, o resultado do ensaio envolverá uma dada margem de erro. A ordem de grandeza da taxa de vazamento, porém, na maioria das vezes, é determinada corretamente com o método do envoltório.

12.10.1.2 Ruído de fundo e variação de concentração de gás de ensaio detectável

O ruído de fundo (que é a concentração de gás de ensaio presente no meio ambiente ao se iniciar uma inspeção) sob o envoltório é muito importante quando se procura pequenos vazamentos ou se mede concentrações reduzidas de gás de ensaio. Se não houver uma concentração de hélio elevada, decorrente de vazamento de hélio através de descontinuidade existente no objeto de ensaio, bem como devido à realização anterior de outras inspeções com este gás, então o ruído de fundo no ensaio de localização de vazamento de hélio é de 5 ppm. No caso dos gases halogenados, entretanto, pelo fato do ar atmosférico não conter estes gases, não deve haver ruído de fundo. Isto, naturalmente, se alguém não tiver trabalhado com algum solvente halogenado (por exemplo, com tetracloreto de carbono), R12, R22 ou algum outro fluido contendo halogênio.

Se houver ruído de fundo, então a variação de concentração de gás de ensaio, causada pelo vazamento de gás do objeto de ensaio, só poderá ser detectada quando ela for no mínimo da mesma ordem de grandeza do ruído de fundo. No caso do gás de ensaio ser o hélio, isto significa que o aumento da concentração de hélio deve ser de vários ppm; se for um gás halogenado, porém, devido ao ruído de fundo deste gás no ar atmosférico ser normalmente muito reduzido, pode-se medir uma variação de gás de ensaio da ordem de um décimo de ppm.

Pode-se melhorar a sensibilidade de um equipamento de detecção de vazamento que possua ajuste do valor zero. Ao se ligar o equipamento, o valor indicado em seu mostrador corresponde ao ruído de fundo. Apertando-se o botão de ajuste do valor zero, entretanto, este valor é apagado do mostrador, onde, então, aparece o valor zero. Desta maneira, ignora-se o ruído de fundo ao se fazer uma inspeção e melhora-se a sensibilidade do equipamento, visto que somente a variação da concentração de gás de ensaio em relação ao ruído de fundo é que passa a ser medida. Este recurso, todavia, só pode ser utilizado se o ruído de fundo presente nas imediações onde é realizada a inspeção for constante, bem como se o dispositivo de medição eletrônico de ajuste do valor zero for estável, isto é, se não houver deslocamento do valor zero. O ajuste do valor zero no nível de ruído de fundo só é vantajoso ou tecnicamente viável, no caso dos equipamentos normalmente encontrados no mercado, se a inspeção for realizada com hélio. Por isso, é melhor reduzir o ruído de fundo insuflando-se nitrogênio ou argônio sob o envoltório. Este artifício permite melhorar a sensibilidade do ensaio, sem que seja necessário utilizar o ajuste, bastante problemático, do valor zero ao nível do ruído de fundo. Tanto no caso do ensaio com hélio como naquele realizado com halogênio, a ponta da sonda aspiradora pode ser limpada com nitrogênio ou argônio antes de ser introduzida sob o envoltório, de maneira a assegurar que ela, ou o sistema de medição, não conterà nenhum resto de ar, proveniente do meio ambiente, que poderia ser conduzido para o transdutor do sistema de medição.

Como o ruído de fundo no ensaio realizado com detector de vazamento de hélio é de 5 ppm, o valor indicado no mostrador do equipamento pode ser utilizado como ponto de referência. O problema, neste caso, é que a concentração de gás de ensaio no local da inspeção pode ser maior que 5 ppm, visto que o hélio pode escapar da garrafa antes do ensaio ser iniciado. Além disso, também pode ser que ainda haja algum resto de hélio no equipamento, se ele tiver sido utilizado anteriormente na realização de outro ensaio, de maneira que o mostrador do detector de vazamento de hélio indicaria um valor bem mais elevado que aquele correspondente ao do ruído de fundo. Em vista destes dois problemas, as condições preestabelecidas para o início da inspeção para o cálculo da concentração de hélio, que são a existência de uma dada concentração de hélio e o valor correspondente indicado no mostrador do detector de vazamento de hélio, já envolvem um dado erro, que, por sua vez, será incorporado na taxa de vazamento. Se o que se deseja em uma inspeção com hélio é mais do que avaliar a ordem de grandeza da taxa de vazamento, então é preciso calibrar o detector de vazamento com um gás de ensaio com uma concentração de hélio bem conhecida. A concentração deste gás de ensaio deve ser bem maior que o ruído de fundo natural (5 ppm), bem como se encontrar dentro de uma faixa (por exemplo, em torno de 50 ppm) que corresponda a um vazamento sob envoltório que ainda seja admissível (equação 12.2).

Se o ensaio é realizado com halogênio como gás rastreador, então deve-se preparar uma mistura gasosa com uma concentração de gás de ensaio sempre bem definida. Também é absolutamente necessário conhecer com exatidão a concentração deste gás de ensaio na mistura gasosa quando se faz uma avaliação grosseira da taxa de vazamento através de uma descontinuidade. Somente no caso em que o resultado do ensaio puder ser expresso em termos de sim/não é que não é necessário conhecer com precisão a concentração do gás de ensaio. A mistura gasosa pode ser preparada misturando-se R12/R22 com nitrogênio ou ar atmosférico. Ela também pode ser obtida misturando-se nitrogênio ou ar atmosférico com o gás que escapa durante algumas semanas (quatro ou cinco, por exemplo) de um vazamento padrão. Neste caso, o vazamento padrão é pesado com uma balança de precisão antes de se iniciar a mistura e após ela ter sido concluída. Assim, é possível obter uma mistura gasosa com uma concentração de gás de ensaio bem definida.

O detector de vazamento de hélio possui uma curva característica relativamente constante dentro de uma grande faixa de concentração de gás de ensaio. Por isso, não é preciso ter à disposição diferentes misturas gasosas para fazer a calibragem do equipamento. No caso do detector de halogênio, todavia, contrariamente do que acontece com o detector de hélio, é preciso ter à disposição misturas gasosas com diferentes concentrações de gás de ensaio para se fazer a calibração do equipamento. Em determinados casos, como, por exemplo, quando se constata que dentro uma determinada faixa de concentração de gás de ensaio de interesse o valor indicado no mostrador do equipamento não é proporcional à concentração de gás medida, é preciso levantar uma curva de calibração.

12.10.2 Avaliação dos resultados de medição

12.10.2.1 Cálculo da variação de concentração de gás de ensaio

Após a calibração do sistema de medição, introduz-se sob o envoltório a sonda aspiradora no início e no final do ensaio, e anota-se os valores indicados no instrumento (A_1 no início e A_2 ao final do ensaio). Após se inserir a sonda sob o envoltório, deve-se esperar que o sinal indicado no mostrador do instrumento de medição se estabilize, isto é, fique constante. Se o valor indicado no mostrador do instrumento subir rapidamente quando a sonda aspiradora é introduzida sob o envoltório, e depois cair para zero ou para o valor que o mostrador estava indicando antes da sonda ser introduzida (ruído de fundo do gás de ensaio), então é porque a sonda aspiradora foi introduzida em um pequeno local que continha uma elevada concentração (nuvem) de gás de ensaio. Desta maneira, não é possível calcular a concentração de gás de ensaio.

A calibração do sistema de medição permite obter a sensibilidade do ensaio, definida pela equação 12.3.

$$S_{\text{ens}} = \frac{\Delta C_{\text{GE}}}{\Delta A} \quad (\text{equação 12.3})$$

sendo

$$\Delta A = A_{\text{cal } 2} - A_{\text{cal } 1} \quad (\text{equação 12.4})$$

onde

- S_{ens} é a sensibilidade do ensaio, em [ppm/unidade de escala];
- ΔC_{GE} é a variação da concentração de gás de ensaio;
- ΔA é a variação do valor indicado no mostrador do detector de vazamento;
- $A_{\text{cal } 1}$ é o primeiro valor indicado no mostrador do detector de vazamento na calibração;
- $A_{\text{cal } 2}$ é o segundo valor indicado no mostrador do detector de vazamento na calibração.

A concentração de gás de ensaio no início e no final da inspeção é dada pelas equações 12.5 e 12.6, respectivamente.

$$C_{\text{GE1}} = S_{\text{ens}} \cdot A_1 \quad (\text{equação 12.5})$$

$$C_{\text{GE2}} = S_{\text{ens}} \cdot A_2 \quad (\text{equação 12.6})$$

onde

- C_{GE1} é a concentração de gás de ensaio no início do ensaio;
- A_1 é o valor indicado no mostrador do detector de vazamento no início do ensaio;

- c_{GE2} é a concentração de gás de ensaio no final do ensaio.
- A_2 é o valor indicado no mostrador do detector de vazamento no final do ensaio.

Das equações 12.5 e 12.6, é possível obter a variação da concentração de gás de ensaio embaixo do envoltório durante a realização da inspeção, conforme mostrado na equação 12.7. E conhecendo-se a variação da concentração de gás de ensaio, pode-se, empregando a equação 12.2, calcular a taxa de vazamento, conforme mostrado no exemplo 2.

$$\Delta c_{GE} = c_{GE2} - c_{GE1} \quad (\text{equação 12.7})$$

Exemplo

O valor indicado no mostrador do detector de vazamento no início de um ensaio de estanqueidade com o método do envoltório e empregando hélio como gás rastreador foi $1,5 \cdot 10^{-8}$ (A_1). Após quatro horas de ensaio, o valor indicado no mostrador foi $3 \cdot 10^{-7}$ (A_2). O valor indicado no mostrador do detector de hélio ao se empregar uma mistura gasosa com 50 ppm de concentração de gás de ensaio foi $1,5 \cdot 10^{-7}$ (A_{ens}). O envoltório tinha um volume de 100 ℓ e a concentração de gás de ensaio era de 100 %. Qual é a taxa de vazamento do objeto de ensaio?

$$c_{GE1} = \frac{A_1}{A_{ens}} \cdot c_{GE} = \frac{1,5 \cdot 10^{-8}}{1,5 \cdot 10^{-7}} \cdot 50 \text{ ppm} = 5 \text{ ppm}$$

$$c_{GE2} = \frac{A_2}{A_{ens}} \cdot c_{GE} = \frac{3 \cdot 10^{-7}}{1,5 \cdot 10^{-7}} \cdot 50 \text{ ppm} = 100 \text{ ppm}$$

$$q_L = \frac{\Delta c_{GE} \cdot p_{amb} \cdot V_{env}}{\Delta t \cdot c_{GE}} \quad (\text{veja equação 12.2})$$

$$q_L = \frac{1000 \text{ mbar} \cdot 100 \text{ ℓ} \cdot (100 - 5) \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 3600} \approx 7 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \text{ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$$

12.10.2.2 Tempo mínimo de ensaio

O tempo mínimo necessário para a realização da inspeção depende do volume entre o envoltório e o objeto de ensaio, da menor variação de concentração de gás de ensaio que pode ser medida, da concentração de gás de ensaio, bem como da maior taxa de vazamento admissível. Este tempo mínimo de ensaio pode ser calculado colocando-se em evidência o Δt na equação 12.2, porém utilizando-se a maior taxa de vazamento admissível no lugar da taxa de vazamento a ser calculada (q_L), conforme mostra a equação 12.8.

$$q_L = \frac{\Delta c_{GE} \cdot p_{amb} \cdot V_{env}}{\Delta t \cdot c_{GE}} \quad (\text{veja equação 12.2})$$

$$\Delta t_{\min} = \frac{\Delta c_{GE} \cdot p_{amb} \cdot V_{env}}{q_{L,adm} \cdot c_{GE}} \quad (\text{equação 12.8})$$

onde

- $\Delta t_{\min}$ é o tempo mínimo de ensaio;
- Δc_{GE} é a variação da concentração de gás de ensaio;
- p_{amb} é a pressão ambiente;
- V_{env} é o volume do envoltório;
- $q_{L,adm}$ é a maior taxa de vazamento admissível;
- c_{GE} é a concentração de gás de ensaio.



[L]

Detecção de Vazamento de Fluido Frigorígeno

- 13.1 A utilização industrial de fluidos frigorígenos
- 13.2 Detector de vazamento de fluido frigorígeno
 - 13.2.1 Generalidades
 - 13.2.2 Tipos de detector de vazamento de fluido frigorígeno
 - 13.2.2.1 Detector de vazamento de halogênio convencional
 - 13.2.2.2 Detector de vazamento de halogênio com transdutor de diodo
 - 13.2.3.3 Detector de vazamento de halogênio com espectrômetro de massa
- 13.3 Procedimento de localização de vazamento
- 13.4 Gases de ensaio utilizados na detecção de vazamento de fluido frigorígeno
 - 13.4.1 Características do R22
 - 13.4.2 Cuidados na utilização do R12
 - 13.4.3 Outros gases de ensaio



[1.1]

13 Detecção de vazamento de fluido frigorígeno

13.1 A utilização industrial de fluido frigorígeno

Há algum tempo era muito comum utilizar R12, também denominado freon, como gás de ensaio na detecção de vazamento de halogênio. Este procedimento de ensaio mostrou ser, sob muitos aspectos, o melhor de todos os métodos de detecção de vazamento de halogênio, pois o R12 é um FCC (Flúor-Cloro-Carbono) completamente halogenado e, por isso, totalmente incombustível. Além disso, por ser um gás muito pouco reativo, o R12 tem sido amplamente utilizado nos diversos segmentos da tecnologia. A pequena reatividade deste gás, considerada por muito tempo uma vantagem do R12 em relação aos outros fluidos frigorígenos, mostrou ser, segundo estudos realizados recentemente, uma grande desvantagem. Por ser um gás muito estável, o R12 atinge a camada de ozônio da estratosfera sem que sua molécula seja quebrada. Ao atingir a camada de ozônio, o freon, na presença de outras substâncias, decompõe o ozônio.

Após os cientistas constatarem o efeito maléfico dos diferentes fluidos frigorígenos halogenados sobre a camada de ozônio, a realização do ensaio de detecção de vazamento de halogênio diminuiu drasticamente.

Segundo as diretrizes da Comunidade Européia, e de acordo com a proibição alemã de 06/05/1991, não foram mais permitidas, a partir de 01/01/1995, a construção de instalações e a fabricação de equipamentos de refrigeração que fizessem uso de fluidos frigorígenos com FCC, como o R12 ou o R502. No que diz respeito às instalações e aos equipamentos antigos que já se encontravam em serviço, foi concedido um prazo para que o agente frigorígeno antigo fosse substituído por um outro menos agressivo à camada de ozônio, como, por exemplo, o R22 ou o R134a. Este prazo expirou em 30/06/1998, sendo que até mesmo as instalações ou os equipamentos de refrigeração que funcionavam em perfeitas condições tiveram que ter seus fluidos frigorígenos substituídos. Um aparelho de refrigeração que funcione ligado na tomada e que possua um circuito fechado de fluido frigorígeno, como, por exemplo, uma geladeira ou um ar condicionado, não se enquadra nesta proibição, desde que contenha menos que 1 kg de frigorígeno. Se satisfizer estas exigências, este aparelho pode ser usado por tempo indeterminado.

O problema atual da indústria de refrigeração consiste no desenvolvimento de fluidos frigorígenos alternativos que permitam substituir de maneira satisfatória os antigos. Os órgãos competentes só autorizam a utilização de um fluido frigorígeno novo se ele puder ser amplamente utilizado nos diferentes segmentos da indústria, bem como se sua toxicidade tiver sido exaustivamente estudada. Este estudo, entretanto, pode ser bastante demorado.

Em todos os países do mundo existem numerosas instalações de refrigeração e de ar condicionado velhas operando com fluidos frigorígenos com FCC. A taxa de vazamento destas instalações deve ser medida e reduzida, com o objetivo de

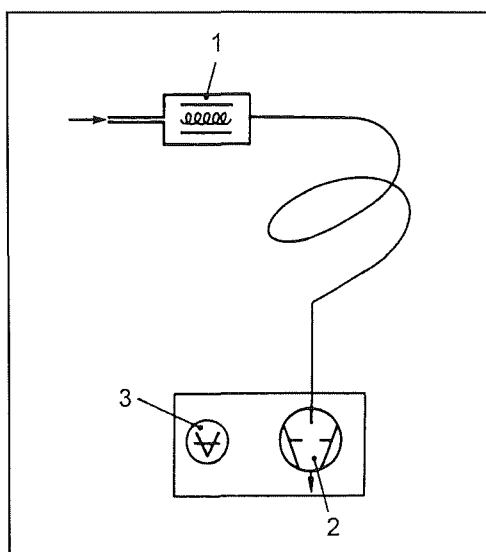
adequá-la às recentes, e mais severas, condições especificadas pela legislação de cada país, de maneira que o antigo detector de vazamento de halogênio voltou a ganhar importância nos últimos anos. Além disso, a crescente conscientização ecológica e as leis rigorosas que recentemente entraram em vigor revolucionaram atualmente o setor de refrigeração e de ar condicionado. Novos fluidos refrigerantes foram lançados no mercado, fazendo com que os fabricantes de detector de vazamento de halogênio reagissem prontamente e desenvolvessem modernos equipamentos para a detecção destes produtos.

13.2 Detector de vazamento de fluido refrigerante

13.2.1 Generalidades

Todo detector de vazamento de fluido refrigerante é projetado para operar com sonda aspiradora (figura 13.1). Os equipamentos modernos incorporam a tecnologia de semicondutores e de circuitos integrados, tendo sido desenvolvidos especialmente para fins industriais, garantindo a mais elevada segurança, mesmo sob condições extremas de serviço e em funcionamento contínuo. As principais características do detector de vazamento de fluido refrigerante são:

- os indicadores óptico e acústico no equipamento propriamente dito;
- o sinal óptico adicional na sonda aspiradora;
- a facilidade de operação;
- a leveza e a robustez da sonda aspiradora;
- a substituição fácil do transdutor;
- os tempos de resposta e de recuperação extremamente pequenos;
- o controle simples do fluxo de gás de ensaio.



- 1 Sensor de halogênio
- 2 Bomba de vácuo
- 3 Medidor de vácuo

Figura 13.1:
Princípio de funcionamento do detector de vazamento de halogênio.

Quase todos os detectores de vazamento de halogênio operam suprimindo automaticamente o ruído de fundo, de maneira que é possível localizar com sucesso vazamento de fluido frigorígeno em atmosfera contaminada. O ajuste do valor zero no nível do ruído de fundo permite uma adaptação à atmosfera reinante constante e contínua, sendo indicada no equipamento somente a variação da concentração do gás frigorígeno. A supressão automática do ruído de fundo faz com que o valor no mostrador do equipamento caia para zero rapidamente após alguns segundos, mesmo que o inspetor retenha a ponta da sonda aspiradora em um local de elevada concentração de fluido frigorígeno, conforme acontece no momento em que a sonda aspiradora passa sobre um grande vazamento, quando ela começa a receber uma grande quantidade de gás de ensaio.

Na maioria dos equipamentos a sensibilidade do ensaio pode ser ajustada em diferentes níveis utilizando-se botões localizados na própria sonda aspiradora. A redução da sensibilidade de um nível para outro imediatamente inferior corresponde a uma variação de uma ordem de grandeza (10:1). Através da comutação da sensibilidade na sonda aspiradora, a localização de um vazamento se torna sensivelmente mais fácil.

13.2.2 Tipos de detector de vazamento de fluido frigorígeno

Os detectores de vazamento de fluidos frigorígenos podem ser classificados em três grupos: os convencionais, que atualmente ainda são utilizados na detecção de vazamento; os equipamentos mais recentes, que possuem pequenos diodos que reagem aos diferentes frigorígenos; e os equipados com um espectrômetro de massa como transdutor, que foram lançados há algum tempo no mercado.

13.2.2.1 Detector de vazamento de halogênio convencional

No detector de vazamento convencional o transdutor, que se assemelha, no que diz respeito à sua construção, a um tubo de elétrons, constitui o componente mais importante (figuras 13.2 e 13.3). A corrente de íons que se forma entre o anodo e o catodo, que é constante a uma dada temperatura, aumenta rapidamente quando uma pequeníssima quantidade de gás halogenado penetra neste sistema de elétrons. Este sistema de elétrons, desenvolvido com base no "princípio da emissão iônica", funciona tanto à pressão atmosférica (10^3 mbar) como em vácuo (até a 10^{-6} mbar ou menos). A tensão de serviço, também denominada tensão anódica, gira em torno de 250 V. Baseado neste princípio de construção, existe uma outra variante do equipamento, que é o detector de vazamento de halogênio de condutibilidade de íons. Neste tipo de equipamento, a tensão de alimentação (tensão anódica) necessária para que ocorra o efeito da condutibilidade de íons, assim como ocorre no caso dos semicondutores, é de apenas alguns volts. O princípio da condutibilidade de íons, porém, pode ser empregado somente à pressão atmosférica. A grande vantagem deste tipo de transdutor é o seu tamanho extremamente pequeno.

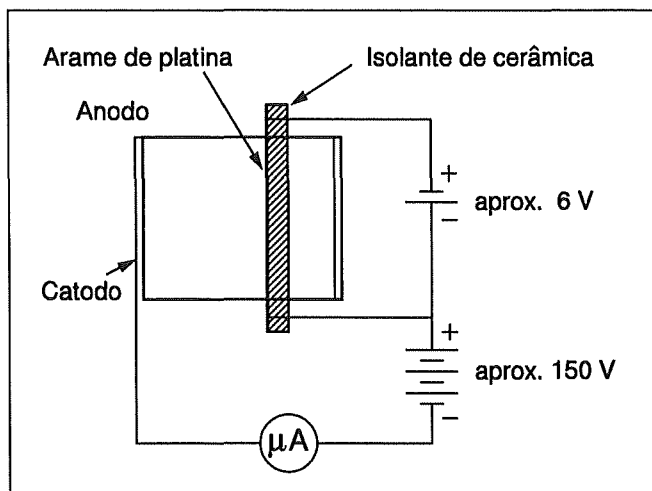
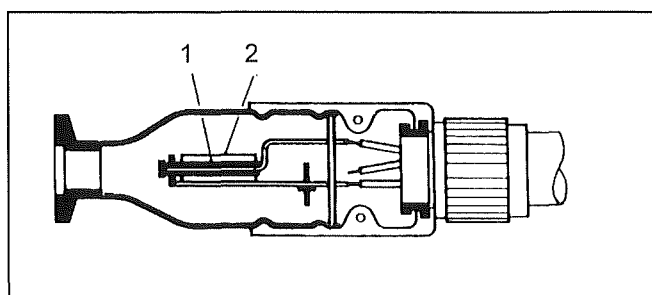


Figura 13.2:
Sensor de halogênio.



- 1 Emissor
- 2 Coletor

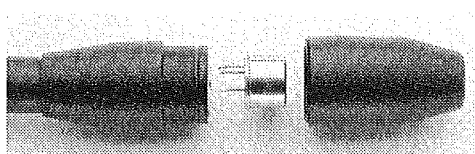
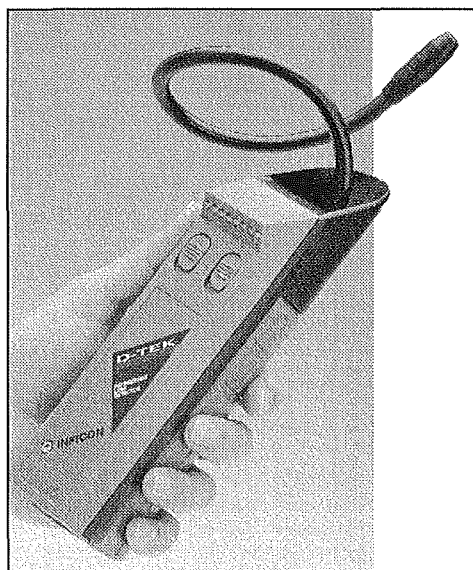
Figura 13.3:
Sensor do detector de vazamento de halogênio.

Dependendo do tipo de equipamento, o transdutor pode ser montado na própria sonda aspiradora ou se encontrar embutido no equipamento, junto à extremidade da mangueira da sonda aspiradora (figura 13.4). Neste caso, uma pequena bomba de vácuo, que não requer manutenção, ou um ventilador conduz o fluxo de gás da ponta da sonda aspiradora, através de uma mangueira, até o transdutor. O principal campo de utilização do detector de vazamento de halogênio convencional é a identificação dos diferentes fluidos frigorígenos, como o frigen[®] (R11), o freon[®] (R12), o kaltron[®] (R22), etc.

13.2.2.2 Detector de vazamento de halogênio com transdutor de diodo

Os detectores de vazamento de halogênio fabricados atualmente possuem um transdutor minúsculo. Este transdutor é constituído de um diodo eletroquímico, com somente alguns milímetros de comprimento, dotado de um substrato cerâmico. No interior deste substrato encontra-se uma resistência elétrica, cuja função é aquecê-lo a elevada temperatura. Quando um gás halogenado entra em contato com a superfície aquecida do substrato, os átomos de F, Cl ou Br são separados das

moléculas da qual fazem parte e, então, ionizados. Este processo gera uma corrente elétrica no substrato cerâmico em direção ao eletrodo coletor, que se encontra no centro do transdutor, corrente esta que é proporcional à taxa de vazamento. O equipamento deste tipo é extremamente fácil de ser manuseado, sendo seu tamanho determinado basicamente pela bateria ou pelo sistema de alimentação de energia com que opera. Segundo informações dos fabricantes, a menor taxa de vazamento de R12 e R134a que pode ser medida gira em torno de $7 \text{ g}\cdot\text{a}^{-1}$.



Sensor de detector de vazamento de halogênio

Fig. 13.4:

Detector de vazamento de halogênio, modelo D-Tek da Leybold-Inificon [2.1].

13.2.2.3 Detector de vazamento de halogênio com espectrômetro de massa

O detector de vazamento de halogênio com espectrômetro de massa como transdutor é bem maior que aquele que opera com transdutor de diodo. Este equipamento é semelhante, no que diz respeito à sua construção, ao detector de vazamento de hélio portátil, é controlado por um microprocessador e pesa cerca de 35 kg.

O espectrômetro de massa quadrupolo embutido no detector de vazamento de halogênio é capaz de identificar diferentes fluidos refrigerantes, como, por exemplo, o R12, o R22, o R134a, o R404a, o R502a e o R600a. O tempo de resposta de cerca de 1 s, mesmo quando se emprega uma sonda aspiradora com mangueira de 3 m a 4 m de comprimento, é bastante pequeno. A menor taxa de vazamento de R134a que pode ser medida é, segundo os fabricantes, cerca de $0,1 \text{ g/a}$. Existe no mercado um detector de vazamento de halogênio que, ao se utilizar um botão de comutação, passa a operar como detector de vazamento de hélio.

13.3 Procedimento de localização de vazamento

O curso de detecção de vazamento e ensaio de estanqueidade (Leak Testing [6.1]) nível 1 (LT-1) aborda extensivamente o preparativo e o procedimento para a localização de vazamento com fluido refrigerante. No curso nível 2 (LT-2), por isso, são vistos somente alguns temas importantes relativos à segurança no uso dos diferentes refrigerantes existentes.

13.4 Gases de ensaio utilizados na detecção de vazamento de fluido refrigerante

13.4.1 Características do R22

No que diz respeito à camada de ozônio, o R22, que é um FCC parcialmente halogenado, é sensivelmente melhor que o R12, visto que somente uma pequena parcela de R22 atinge a estratosfera. O R22 apresenta, em relação à decomposição do ozônio, um efeito prejudicial que corresponde a somente 5 % daquele referente ao R12. Apesar disso, por motivos ecológicos, a quantidade de R22 que escapa para a atmosfera deve ser sempre a menor possível, sendo necessário observar os limites estipulados pela legislação. A recuperação de R22 após a detecção de vazamento é, porém, bastante problemática, pois o R22 com ar atmosférico, sob pressão, pode formar uma mistura explosiva. A detecção de vazamento com R22 é, no que diz respeito à sensibilidade do detector de vazamento de halogênio, praticamente idêntica àquela realizada com R12. Entretanto, deve-se tomar cuidado com a elevada pressão de vapor do R22 (10 bar a 25°C) e, conforme já mencionado, com a possibilidade deste gás formar uma mistura explosiva com o ar atmosférico sob pressão.

13.4.2 Cuidados na utilização do R22

A segurança envolvida nos trabalhos realizados com o R22 é muito importante e deve sempre levar em consideração os diversos fatores mencionados a seguir.

O R22 forma uma mistura explosiva com o ar atmosférico quando a pressão absoluta desta mistura é maior que 1,3 bar. Portanto, para se eliminar o risco de explosão, durante uma operação de soldagem, por exemplo, é necessário remover a maior quantidade possível de R22 do interior do objeto de ensaio. Não é suficiente, em vista disso, após a conclusão de uma inspeção, simplesmente abrir o objeto de ensaio e permitir que o gás de ensaio, que se encontra pressurizado em seu interior, escape para a atmosfera. Para remover eficientemente o R22, é preciso evacuar várias vezes o objeto de ensaio ou, então, remover o gás de ensaio com um fluxo intenso de ar atmosférico. Antes de evacuar o objeto de ensaio, porém, tem-se que se certificar se o mesmo pode ser evacuado.

Um objeto que esteja sujeito à ocorrência de descarga eletrostática, como, por exemplo, aquele de vidro, de borracha, de paredes esmaltadas ou que seja revestido internamente com uma camada de plástico, só pode ser inspecionado com uma pressão absoluta menor que 1,3 bar, caso o ar atmosférico que se encontra em seu interior não possa ser removido antes do ensaio.

Antes de se utilizar um recipiente que foi enchido e inspecionado com gás de ensaio, deve-se sempre analisar o ar que se encontra em seu interior, de maneira a determinar o teor de oxigênio que ele contém. As especificações relativas à segurança do trabalho, neste caso, devem ser rigorosamente observadas.

Conforme já foi mencionado anteriormente, o R22 possui uma reatividade menor que a do R12, decompondo-se em cerca de 95 % na camada inferior da atmosfera. Pelo mesmo motivo, ele também pode reagir quimicamente com facilidade com a água já a partir de aproximadamente 50°C. Os produtos desta reação, que se encontram, então, solubilizados na água, podem, desde que as condições de serviço sejam propícias, ocasionar corrosão por pite e corrosão sob tensão em aços inoxidáveis austeníticos.

13.4.3 Outros gases de ensaio

A inspeção de alumínio, magnésio ou suas ligas com gás halogenado só pode ser realizada quando se tem certeza de que o objeto de ensaio está absolutamente seco e que todo e qualquer vestígio de gás de ensaio será completamente removido após a conclusão da inspeção, visto que o gás halogenado pode se decompor cataliticamente na presença destes metais.

A tabela 13.1 apresenta alguns dos numerosos gases halogenados que possivelmente poderiam ser empregados como gás de ensaio. Observando-se atentamente esta tabela, constata-se que todos os gases que contêm cloro ou bromo são facilmente detectáveis, e que o flúor não contribui para melhorar a detectabilidade do gás. O teor de hidrogênio, porém, influencia indiretamente esta característica do gás de ensaio, visto que ele favorece a fragmentação da molécula de gás, facilitando, assim, a sua detecção.

Como o flúor não influencia a detectabilidade do gás, infelizmente não é possível utilizar o R14, o R23 ou o R116, que são inofensivos à camada de ozônio, na detecção de vazamento de halogênio. Por outro lado, o bromo agride mais a camada de ozônio que o cloro, de modo que o R13B1 também não pode ser empregado na detecção de vazamento de halogênio. Existem outros gases halogenados à base de $\text{C}\ell$, entretanto, que são facilmente detectáveis, como o cloreto de metila ($\text{C H C}\ell$), por exemplo. Estes gases, todavia, são extremamente venenosos, não podendo, por isso, sequer ser cogitados para o uso como gás de ensaio.

Tabela 13.1: Detectabilidade relativa (D), tomando o R12 como referência ($D_{R12} = 1$), e fórmula química de diferentes tipos de gases halogenados.

Tipo	Fórmula química	Detectabilidade relativa (D)
R11	CCl_3F	3,8
R12	CCl_2F_2	1
R13	CClF_3	0,37
R13B1	CBrF_3	0,47
R14	CF_4	muito baixa
R21	CHCl_2F	2,6
R22	CHClF_2	0,94
R23	CHF_3	muito baixa
R113	$\text{CCl}_2\text{F} - \text{CClF}_2$	1,88
R114	$\text{CCl}_2\text{F}_2 - \text{CClF}_2$	0,94
R115	$\text{CClF}_2 - \text{CF}_3$	0,52
R116	$\text{CF}_3 - \text{CF}_3$	muito baixa
R134a	$\text{CH}_2\text{F} - \text{CF}_3$	—
R404a	$\text{CHF}_2\text{CF}_3 / \text{CH}_2\text{F} - \text{CF}_3 / \text{CH}_3\text{CF}_3$	—
R500	$\text{CCl}_2\text{F}_2 / \text{CH}_3 - \text{CHF}_2$	0,75
R502	$\text{CHClF}_2 / \text{CClF}_2 - \text{CF}_3$	0,71
R503	$\text{CHF}_3 / \text{CCl}$	0,22

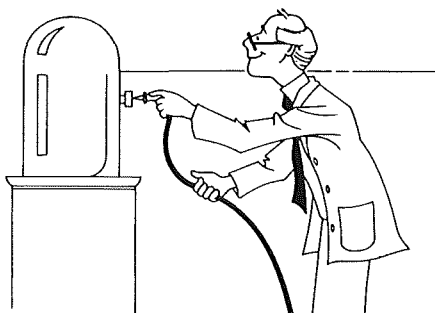
Em diversos segmentos da indústria, principalmente no da indústria química, porém, existem numerosos equipamentos ou instalações, como tanques de armazenamento ou tubulações, que contêm fluidos halogenados venenosos à base de bromo ou cloro. O escapamento de gases nestes equipamentos ou instalações pode ser localizado utilizando-se um detector de vazamento de halogênio. Devido à elevada sensibilidade desta técnica de ensaio, é possível localizar pequenos vazamentos, de maneira que o escapamento de uma quantidade inadmissível de gás pode ser constatado com bastante facilidade e antecedência. Ao se empregar um transdutor adequado na detecção de vazamento de halogênio, consegue-se detectar, dentre outras, as seguintes substâncias:

- ácido bromídrico;
- ácido clorídrico;
- cianogênio de cloro;
- clorobenzeno;
- clorofenol;
- clorofórmio;
- cloronitrobenzeno;

- cloreto de metila;
- cloreto de metileno;
- cloreto de vinila;
- fosgênio;
- gás cloro;
- percloroetileno;
- tetracloreto de carbono;
- tricloretileno;
- vapor de bromo.

Detectores de Vazamento de Hélio

- 14.1 Generalidades
- 14.2 Ensaio com gás rastreador
- 14.3 Detector de vazamento de hélio com espectrômetro de massa
 - 14.3.1 Princípio de funcionamento do espectrômetro de massa de campo setorial
 - 14.3.2 Detectores de vazamento de hélio
- 14.4 Tipos de fluxo nos detectores de vazamento de hélio
 - 14.4.1 Detector de vazamento de hélio de fluxo principal
 - 14.4.2 Detector de vazamento de hélio de fluxo parcial
 - 14.4.3 Detector de vazamento de hélio de contra-fluxo
 - 14.4.4 Detector de vazamento de hélio com sonda aspiradora
- 14.5 Parâmetros de ensaio
 - 14.5.1 Tempo de evacuação
 - 14.5.2 Tempo de resposta
 - 14.5.2.1 Tempo de resposta com o método do fluxo principal
 - 14.5.2.2 Tempo de resposta com o método do fluxo parcial
 - 14.5.2.3 Tempo de resposta com bomba de vácuo auxiliar em série
- 14.6 Instrumentos e acessórios de ensaio
 - 14.6.1 Vazamento padrão
 - 14.6.2 Armadilha de condensação
 - 14.6.3 Pistola de gás
 - 14.6.4 Registrador gráfico x-t
 - 14.6.5 Envoltório
 - 14.6.6 Massa para calafetagem



[1.1]

14 Detectores de vazamento de hélio

14.1 Generalidades

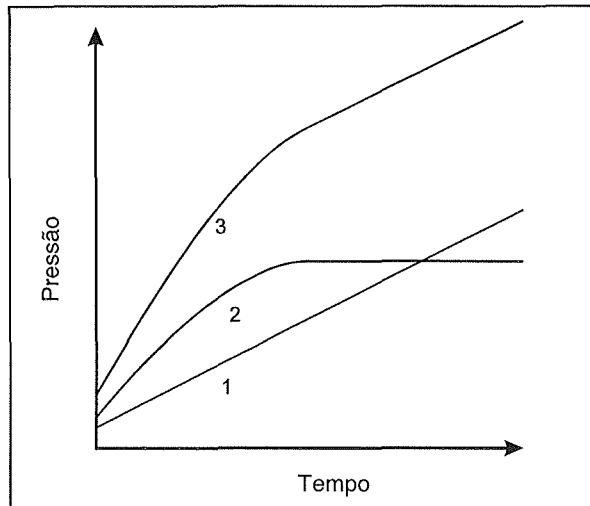
Quando não se consegue atingir o vácuo almejado em um dado objeto, geralmente se supõe que este objeto está com um vazamento. A sua taxa de vazamento pode ser facilmente calculada utilizando a equação 14.1, sendo, porém, neste caso, necessário conhecer a capacidade de sucção da bomba de vácuo.

$$q_L = p \cdot S \quad (\text{equação 14.1})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento;
- p é a pressão no objeto de ensaio;
- S é a capacidade de sucção da bomba de vácuo.

A causa do vazamento no objeto citado acima pode ser identificada registrando-se a variação da sua pressão ao longo do tempo com um registrador gráfico x-t. A figura 14.1 mostra os três tipos possíveis de aumento de pressão no objeto quando a válvula que o conecta à bomba de vácuo é fechada. Nesta figura, a reta 1 representa a variação de pressão causada por descontinuidades, a curva 2 a variação de pressão causada pela degasagem da superfície interna do objeto, e a curva 3, que constitui a soma das curvas 1 e 2, a variação de pressão causada por descontinuidades e pela degasagem juntas.



- 1 Descontinuidades no objeto
- 2 Degasagem
- 3 Descontinuidades e degasagem

Figura 14.1:

Aumento de pressão em um objeto com vácuo após o fechamento da válvula que o conecta à bomba de vácuo.

Em um objeto com vácuo, todavia, podem haver outros fluxos de matéria, além daqueles relativos à presença de descontinuidades ou à degasagem, conforme ilustrado na figura 14.2.

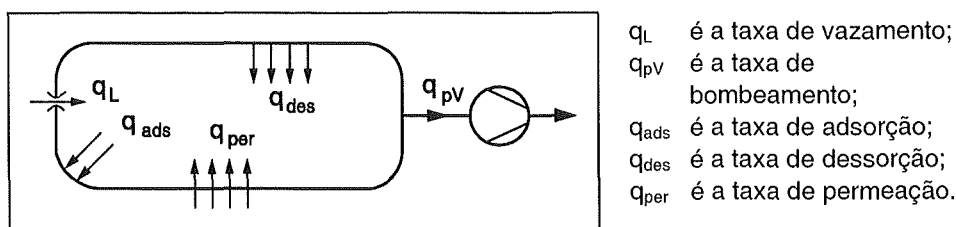


Figura 14.2: Fluxos de matéria que podem ocorrer em um objeto de ensaio.

Os diferentes fluxos de gás e/ou vapor em um objeto de ensaio de volume constante modificam a quantidade de gás e/ou vapor Q que ele contém. A variação da quantidade de gás e/ou vapor pode ser medida com base na variação da pressão em função do tempo, quando se conhece o volume do objeto de ensaio, conforme mostra a equação 14.2.

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot V = -p \cdot S + q_L + q_{des} + q_{per} - q_{ads} \quad (\text{equação 14.2})$$

onde

- Δp é a variação de pressão no objeto de ensaio;
- Δt é o tempo de ensaio;
- V é o volume do objeto de ensaio;
- p é a pressão no flange de admissão da bomba de vácuo;
- S é a capacidade de sucção da bomba de vácuo;
- q_L é a taxa de vazamento medida;
- q_{ads} é a taxa de adsorção;
- q_{des} é a taxa de dessorção;
- q_{per} é a taxa de permeação.

Se a inspeção de um objeto for realizada empregando um gás rastreador que não seja dessorvido ou adsorvido durante o ensaio, e caso não haja permeação, também, então o cálculo da variação da quantidade de gás e/ou vapor Q , que é feito com base na variação da pressão em função do tempo, é mais fácil, conforme mostra a equação 14.3.

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot V = -p \cdot S + q_L \quad (\text{equação 14.3})$$

Caso o sistema esteja em equilíbrio estacionário, isto é, se $\Delta p/\Delta t = 0$, então a taxa de vazamento é igual ao produto da pressão parcial do gás de ensaio (p) pela capacidade de sucção da bomba de vácuo (S), conforme definido pela equação 14.1.

Este princípio de medida é utilizado pelos detectores de vazamento normalmente encontrados no mercado. Nestes equipamentos, a calibração do sistema de medida, que é bastante simples, é realizada com um vazamento padrão adequado.

Uma outra maneira de medir a taxa de vazamento de um objeto de ensaio consiste no desligamento da bomba de vácuo e na medida da variação da sua pressão, conforme mostra a equação 14.4.

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot V = q_L \quad (\text{equação 14.4})$$

Esta técnica pode ser empregada em uma inspeção feita com o detector de vazamento de hélio ASM 110 TCL, da Alcatel [2.4], quando o modo de operação "close loop" é atingido. A sensibilidade deste procedimento de ensaio é bastante elevada, porém ele apresenta uma grande desvantagem, que é o fato de haver necessidade de conhecer o volume do objeto de ensaio. Na figura 14.3 é apresentado uma inspeção feita com um detector de vazamento de hélio.

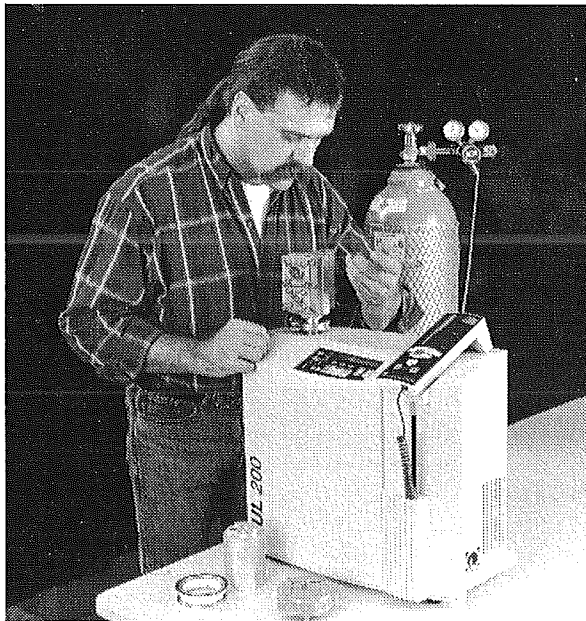


Figura 14.3:
Localização de vazamento
com gás de ensaio (detector
de vazamento de hélio da
firma Leybold, modelo
UL 200 [2.1]).

14.2 Ensaio com gás rastreador

Os detectores de vazamento modernos empregados na localização de vazamento e no ensaio de estanqueidade operam utilizando gás de ensaio, também denominado gás rastreador. Desta maneira, é possível, por exemplo, com o auxílio de detectores de gás de ensaio de elevada sensibilidade, bem como com o emprego do gás

rastreador em um sistema de vácuo, ou somente sobre uma região do mesmo, onde se supõe haver uma descontinuidade, constatar a existência da descontinuidade ou localizá-la.

Quando o local por onde ocorre um vazamento é identificado, obtém-se uma pressão parcial de gás de ensaio, que é definida pela equação 14.5.

$$p_{GE} = \frac{q_L}{S_{GE}} \quad (\text{equação 14.5})$$

onde

- p_{GE} é a pressão parcial do gás de ensaio;
- q_L é a taxa de vazamento;
- S_{GE} é vazão do gás de ensaio através da descontinuidade.

Visto que geralmente se emprega uma quantidade relativamente elevada de gás de ensaio quando se inspeciona um objeto complexo e grande, até se ser certa de que todos os locais de vazamento foram encontrados, o gás de ensaio deve ser ecológico. Este não é o caso do CFC (cloro-flúor-carbono), que é um gás que destrói a camada de ozônio. A localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade com hélio, por outro lado, no que diz respeito à proteção do meio ambiente, não apresenta problema algum, visto que o hélio é um gás inerte. Além disso, pelo fato da sensibilidade dos detectores de vazamento de hélio modernos ser muito elevada, a quantidade deste gás de ensaio empregada durante uma inspeção é relativamente pequena.

O hélio, devido às suas propriedades, é o gás rastreador mais empregado na localização de vazamento e no ensaio de estanqueidade. Ele é um gás

- inerte, isto é, não reage, por exemplo, com os materiais do objeto de ensaio;
- não combustível;
- atóxico;
- que possui uma elevada permeabilidade nos diferentes materiais;
- relativamente barato;
- que é encontrado no ar atmosférico em um teor muito baixo (aproximadamente $5 \cdot 10^{-6}$), o que significa que o ruído de fundo durante um ensaio é relativamente pequeno.

14.3 Detector de vazamento de hélio com espectrômetro de massa

Neste capítulo serão abordados principalmente os diferentes tipos de detectores de vazamento de hélio encontrados no mercado. A localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade realizados com estes detectores de vazamento de hélio, entretanto, serão tratados somente no capítulo 15.

O principal componente do detector de vazamento de hélio é o espectrômetro de massa (figura 14.4). Este componente, na realidade, constitui o sensor do hélio que atravessa por uma descontinuidade e penetra no sistema de ensaio.

O espectrômetro de massa é um instrumento que analisa qualitativa e quantitativamente a composição química de uma mistura gasosa com baixa pressão. Ele é composto de uma fonte de íons, que gera íons de gás através do choque entre as partículas, de um sistema de separação de íons de diferentes relações massa/carga (m/e) e de um coletor de íons.

A maioria dos detectores de vazamento de hélio encontrados no mercado possui um espectrômetro de massa de campo setorial. O espectrômetro de massa do tipo quadrupolo é empregado quase que exclusivamente na análise de gás residual (veja também o capítulo 5).

14.3.1 Princípio de funcionamento do espectrômetro de massa de campo setorial

O princípio de funcionamento do espectrômetro de massa de campo setorial utilizado no detector de vazamento de hélio encontra-se apresentado esquematicamente na figura 14.4. No espectrômetro de massa de campo setorial os

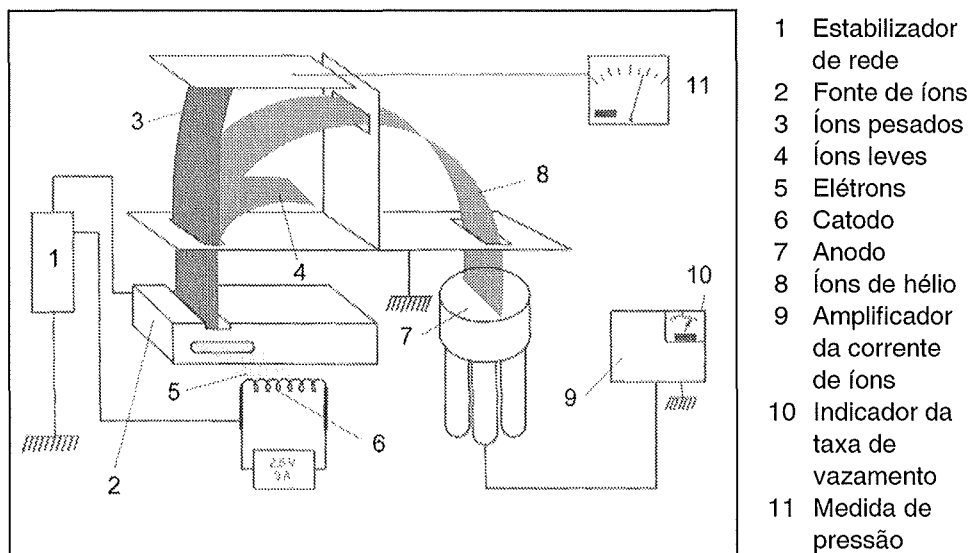


Figura 14.4: Esquema do princípio de funcionamento do espectrômetro de massa de campo setorial [2.4].

átomos e as moléculas de gás são ionizados através do choque com elétrons na fonte de íons e acelerados no filtro de massa. Estes íons acelerados de diferentes massas e cargas, devido à ação de um campo magnético constante (perpendicular ao plano do desenho da figura 14.4), movimentam-se ao longo de trajetórias circulares e bem distintas. Estas trajetórias são definidas pelas massas e cargas dos íons, sendo que os íons leves descrevem trajetórias de pequenos raios, e os mais pesados trajetórias de grandes raios. Selecionando-se a tensão de aceleração de acordo com a localização da abertura de uma lente seletora, permite-se que somente íons com a massa desejada consigam atingir o detector de íons. Os íons mais pesados, por outro lado, são capturados por um eletrodo especial e servem para medir a pressão total.

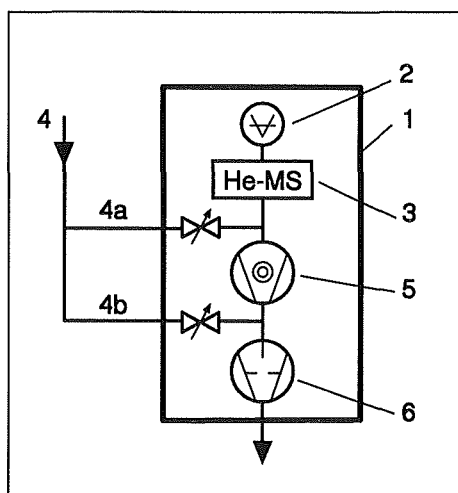
A resolução do espectrômetro de massa de campo setorial para íons de pequena massa é sensivelmente melhor que a de um espectrômetro de massa quadrupolo. Em vista disso, o espectrômetro de massa de campo setorial é considerado como sendo ideal para a localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade utilizando hélio como gás rastreador. A pressão parcial mínima que pode ser medida com os detectores de vazamento de hélio normalmente encontrados no mercado gira em torno de 10^{-11} mbar. A pressão (menor que $2 \cdot 10^{-4}$ mbar) necessária para que o espectrômetro de massa possa entrar em funcionamento é obtida com um sistema de bombas de vácuo. Os detectores de vazamento de hélio modernos vêm equipados com uma bomba de alto vácuo turbomolecular, que apresenta vantagens significativas quando comparada com a bomba de alto vácuo de difusão, que é encontrada nos detectores de vazamento de hélio mais antigos.

14.3.2 Detectores de vazamento de hélio

A figura 14.5 apresenta esquematicamente os componentes básicos de um detector de vazamento de hélio. Os componentes básicos deste equipamento, denominado LD (Leak Detector, que em inglês significa detector de vazamento), são o espectrômetro de massa (3), a bomba de alto vácuo (5) e a bomba de vácuo prévio (6).

O detector de vazamento pode ser classificado com sendo de fluxo principal ou de contra-fluxo, dependendo do local por onde o hélio entra no equipamento (figura 14.5). No caso do detector de vazamento de hélio de fluxo principal, o hélio é introduzido no lado de alto vácuo da bomba de alto vácuo (4a); no detector de vazamento de contra-fluxo, porém, o hélio é introduzido no lado da bomba de alto vácuo que se encontra com vácuo prévio (4b).

Os detectores de vazamento de hélio que operam segundo o método do fluxo principal, especialmente aqueles mais antigos que têm uma bomba de alto vácuo de difusão, possuem uma armadilha de nitrogênio líquido imediatamente antes da entrada do espectrômetro de massa. Esta armadilha de nitrogênio líquido, que serve



- 1 Caixa do detector de vazamento de hélio
- 2 Mostrador de pressão (vácuo)
- 3 Espectrômetro de massa
- 4 Entrada de gás segundo os métodos do fluxo principal (4a) e do contra-fluxo (4b)
- 5 Bomba turbomolecular
- 6 Bomba mecânica de vácuo prévio

Figura 14.5:

Componentes básicos de um detector de vazamento de hélio e esquema dos métodos de fluxo principal e de contra-fluxo.

para proteger o espectrômetro de massa das impurezas oriundas do objeto de ensaio, como do vapor de água, por exemplo, é nada mais nada menos que um condensador de gases ou vapores, e atua como uma bomba de elevada capacidade de sucção. Assim, além do hélio, somente os gases permanentes é que penetram no espectrômetro de massa do detector de vazamento. A desvantagem desta armadilha de condensação é a necessidade de se ter sempre à disposição nitrogênio líquido para localizar vazamento ou fazer um ensaio de estanqueidade.

Pode-se conseguir um efeito semelhante ao do método de fluxo principal quando se emprega o método do contra-fluxo, ou seja, quando a entrada de gases no detector de vazamento ocorre no lado de vácuo prévio da bomba turbomolecular. Ao se empregar este método, a pressão no espectrômetro de massa do detector de vazamento será sempre menor que 10^{-4} mbar se o vácuo prévio for menor que 0,5 mbar. Assim, é possível iniciar a inspeção mesmo quando a pressão no objeto de ensaio é elevada.

Parece ser uma contradição o fato do gás de ensaio poder atingir o espectrômetro de massa movendo-se contra o fluxo de partículas que estão sendo removidas pela bomba turbomolecular. A relação de compressão desta bomba para gases leves, como o hélio, é sensivelmente menor que aquela para os gases ou vapores pesados, como o ar atmosférico e o vapor de água, conforme mostrado na figura 14.6. Uma bomba turbomolecular em funcionamento, por isso, permite a passagem de hélio no sentido contrário ao sentido de bombeamento.

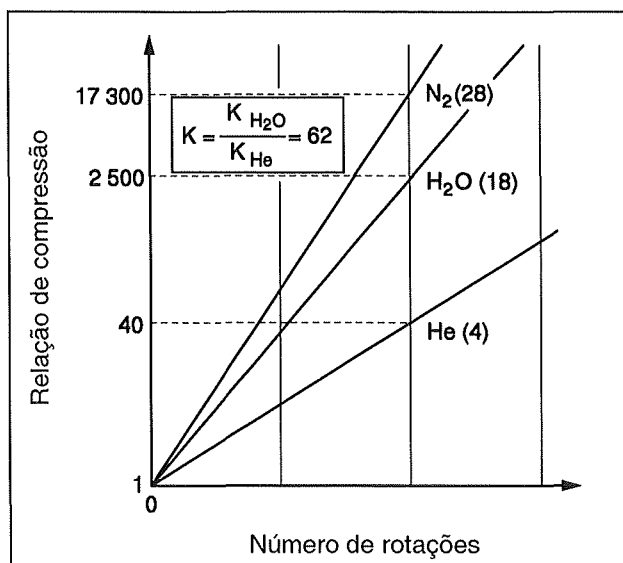


Figura 14.6:
Relação de compressão de uma bomba turbomolecular para os diferentes gases.

Os espectrômetros de massa de campo setorial e quadrupolo funcionam perfeitamente bem somente quando se tem alto vácuo, visto que só neste caso é que o livre percurso médio das partículas é grande o suficiente para que os íons atravessem o filtro de massa e alcancem o detector sem se chocarem com outros íons ou moléculas ao longo de suas trajetórias, podendo, assim, ser detectados com facilidade. Se a pressão for maior, então observa-se uma perda de sinal significativa. Nos detectores de vazamento de hélio antigos este efeito é mais acentuado ainda, visto que a pressão parcial no detector de vazamento de hélio varia em função da pressão total no espectrômetro de massa. Os equipamentos modernos, por serem controlados por microprocessador, compensam este efeito. Além disso, quando a pressão é maior, a contaminação aumenta, principalmente na fonte de íons, que precisa estar bem limpa para que seu funcionamento seja perfeito. Se a pressão for muito elevada, então o filamento da fonte de íons queima com grande facilidade.

14.4 Tipos de fluxo nos detectores de vazamento de hélio

14.4.1 Detector de vazamento de hélio de fluxo principal

O detector de vazamento de hélio de fluxo principal, também conhecido como detector de vazamento de hélio clássico, possui um espectrômetro de massa (MS), que é evacuado até a pressão de trabalho (10^{-4} mbar) e mantido a esta pressão por meio de um sistema de bombas de vácuo. Este sistema de bombas de vácuo é composto, atualmente, de uma bomba turbomolecular de alto vácuo (antigamente usava-se uma bomba de alto vácuo de difusão) conectada com uma bomba mecânica de palheta rotativa selada a óleo. Após o objeto de ensaio ter sido evacuado até uma pressão suficientemente baixa, ele pode ser conectado com o

sistema de alto vácuo do detector de vazamento de hélio, de maneira que o hélio que penetra neste sistema atinge o espectrômetro de massa. O valor indicado no mostrador do equipamento é proporcional à pressão parcial de hélio no espectrômetro de massa, que, por sua vez, é definido pela taxa de vazamento de hélio e pela capacidade de sucção da bomba de alto vácuo no seu flange de admissão, conforme mostrado pelas equações 14.6 e 14.7.

$$q_{\text{most}} = K \cdot p_{\text{He}} \quad (\text{equação 14.6})$$

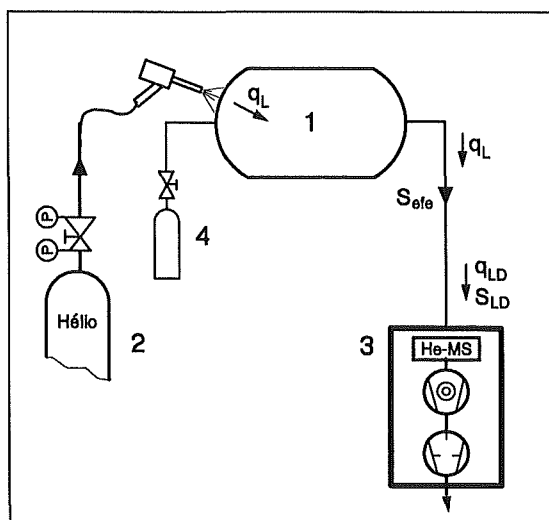
$$p_{\text{He}} = \frac{q_L}{S_{\text{He}}} \quad (\text{equação 14.7})$$

onde

- q_{most} é o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio;
- K é uma constante;
- p_{He} é a pressão parcial do hélio no espectrômetro de massa;
- q_L é a taxa de vazamento;
- S_{He} é a capacidade de sucção de hélio no flange de admissão da bomba de alto vácuo.

Para aumentar a sensibilidade de ensaio, a capacidade de sucção de hélio da bomba de alto vácuo deve ser reduzida para valores que girem em torno de 1 a $30 \ell \cdot s^{-1}$. Visto que 10^{-11} mbar é a menor pressão parcial de hélio que o espectrômetro de massa pode medir, consegue-se, em princípio, em laboratório, medir taxas de vazamento que sejam menores que até 10^{-12} mbar $\cdot \ell \cdot s^{-1}$. Na prática, contudo, devido ao ruído de fundo causado por selos de vedação de elastômero, por exemplo, que normalmente são empregados em conexões ou locais de instalação de válvulas, este valor é inevitavelmente maior. Porém, ao se ajustar o valor zero do mostrador do instrumento ao valor de ruído de fundo, bem como ao se reduzir com uma válvula reguladora a capacidade de sucção de hélio no flange de admissão da bomba de alto vácuo para $1 \ell \cdot s^{-1}$, é possível medir com o detector de vazamento de hélio uma taxa de vazamento de até 10^{-12} mbar $\cdot \ell \cdot s^{-1}$.

A principal dificuldade na localização de vazamento e no ensaio de estanqueidade com hélio consiste em evacuar rapidamente o objeto de ensaio até uma pressão menor que 10^{-4} mbar, que é a pressão de trabalho do espectrômetro de massa. A dessorção de vapor de água constitui um dos grandes fatores que dificultam bastante a evacuação do objeto de ensaio. Em vista disso, há muito tempo se utiliza armadilha de nitrogênio líquido neste tipo de inspeção, visto que ela remove todos os vapores condensáveis, como o vapor de água, por exemplo, porém deixa passar os átomos de hélio. Assim, é possível evacuar um objeto de ensaio de grande volume, como, por exemplo, de alguns litros, em poucos segundos ou minutos. A figura 14.7 apresenta, esquematicamente, o princípio de funcionamento do detector de vazamento de hélio de fluxo principal.



- 1 Objeto de ensaio
- 2 Garrafa de hélio
- 3 Detector de vazamento de hélio
- 4 Vazamento padrão

Figura 14.7:
Detector de vazamento de hélio de fluxo principal.

14.4.2 Detector de vazamento de hélio de fluxo parcial

Os detectores de vazamento de hélio normalmente encontrados no mercado são portáteis e, por precisarem ser leves, vêm equipados com somente uma pequena bomba de vácuo prévio. Em vista disso, o emprego destes detectores de vazamento fica restrito somente à inspeção de pequenos objetos. Caso se deseje localizar vazamento ou fazer um ensaio de estanqueidade em um objeto de grande volume, como em um recipiente ou vaso de pressão grande, por exemplo, então é necessário utilizar bombas de vácuo auxiliares de grande capacidade de sucção. Uma bomba de vácuo auxiliar de elevada capacidade de sucção permite reduzir bastante o tempo de evacuação de um objeto de ensaio de grande volume. Neste caso, a inspeção com o detector de vazamento de hélio é realizada com o método de fluxo parcial (figura 14.8). Ao se fazer uso de uma válvula reguladora, que, como exemplo comparativo, atua de uma maneira semelhante à de um shunt em um sistema elétrico, permite-se que somente uma parcela do fluxo do gás removido pela bomba de vácuo auxiliar penetre no sistema de vácuo do detector de vazamento de hélio. Na inspeção com o método do fluxo parcial, porém, é absolutamente necessário calibrar o detector de vazamento de hélio com um vazamento padrão conectado no objeto de ensaio, visto que a relação de fluxo no método do fluxo parcial, isto é, a relação entre o fluxo de partículas que são removidas pela bomba auxiliar e o fluxo de partículas que penetram no detector de vazamento, normalmente não é conhecida com precisão suficiente.

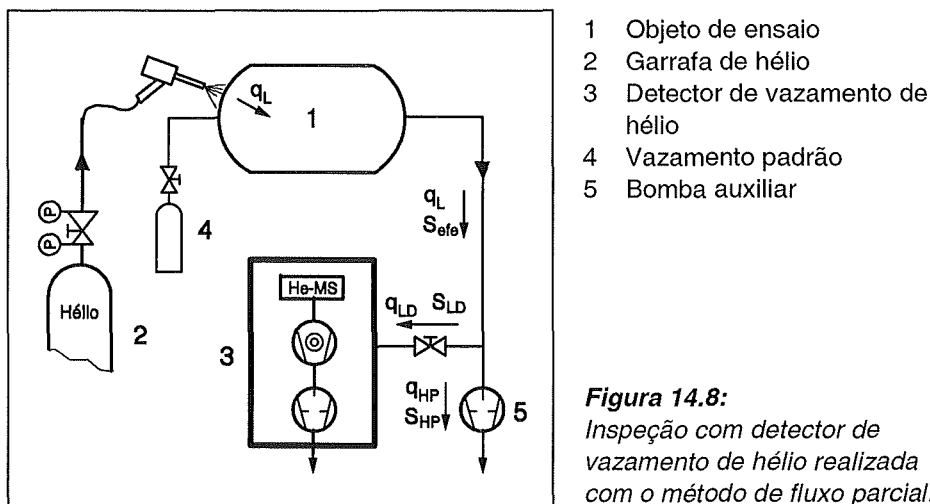


Figura 14.8:
Inspeção com detector de vazamento de hélio realizada com o método de fluxo parcial.

14.4.3 Detector de vazamento de hélio de contra-fluxo

O manuseio e a disponibilidade de nitrogênio líquido no campo na maioria das vezes são bastante problemáticos. Em vista disso, o detector de vazamento de hélio clássico foi e é empregado quase que exclusivamente em laboratório ou em oficinas especiais. O contínuo aperfeiçoamento das bombas turbomoleculares e o seu emprego em detectores de vazamento de hélio, por outro lado, permitiram o desenvolvimento do detector de vazamento que opera segundo o método do contra-fluxo e que não necessita de armadilha de nitrogênio líquido.

O detector de vazamento de hélio de contra-fluxo possui, em princípio, os mesmos sistemas de bombas de vácuo e de detecção que o detector de vazamento de hélio de fluxo principal tem. A diferença básica entre estes dois equipamentos, no entanto, é que no detector de vazamento de contra-fluxo a conexão com o objeto de ensaio é feita no flange de vácuo prévio (flange de expulsão) da bomba de alto vácuo (figura 14.9), ao invés de ser feita no flange de admissão da bomba de alto vácuo, como ocorre no caso do detector de vazamento de fluxo principal. Desta maneira, é possível iniciar a inspeção com o objeto de ensaio a uma pressão bem mais elevada (maior que 10^{-1} mbar, dependendo do tipo de vácuo prévio que a bomba de alto vácuo pode suportar) que aquela necessária para se realizar a inspeção com o método do fluxo principal (10^{-4} mbar). A função da armadilha de nitrogênio líquido, que é a de remover vapores condensáveis, principalmente o vapor de água, que é extremamente prejudicial, passa a ser exercida pelo fator de compressão seletiva da bomba de alto vácuo (bomba turbomolecular). O fator de compressão do hélio em uma bomba turbomolecular é tão pequeno, que o hélio que se encontra no vácuo prévio, ou seja, no flange de expulsão da bomba turbomolecular, pode atravessar a bomba turbomolecular, movimentando-se em sentido contrário ao do sentido de bombeamento, e atingir o espectrômetro de massa, onde é detectado (figura 14.6).

A menor taxa de vazamento que pode ser medida com o detector de vazamento de hélio de contra-fluxo, ou seja, a sua sensibilidade, é praticamente igual àquela do detector de vazamento de hélio de fluxo principal. Por outro lado, o tempo de resposta na localização de vazamento em objeto de grande volume é bem maior, visto que o objeto de ensaio é evacuado somente por uma bomba de prevácuo de pequena capacidade de sucção.

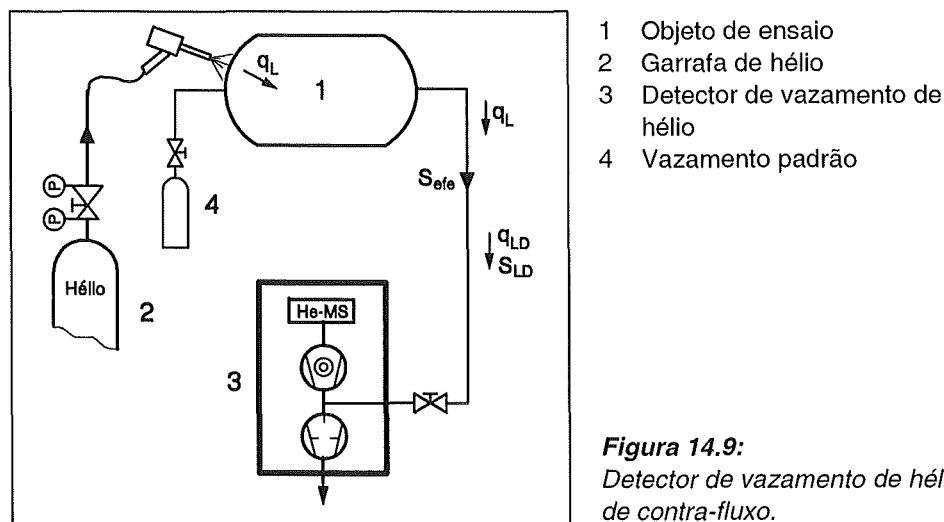


Figura 14.9:
Detector de vazamento de hélio de contra-fluxo.

A taxa de vazamento correspondente ao valor lido no mostrador do equipamento pode ser calculada empregando-se as equações 14.6 e 14.8.

$$p_{He} = \frac{q_L}{K_0 \cdot S_V} \quad (\text{equação 14.8})$$

onde

- p_{He} é a pressão parcial do hélio no espectrômetro de massa;
- q_L é a taxa de vazamento de hélio;
- K_0 é a relação de compressão da bomba de alto vácuo;
- S_V é a capacidade de sucção da bomba de prevácuo.

Quando o produto $K_0 \cdot S_V$ (equação 14.8) for igual à capacidade de sucção de hélio (S_{He}) da bomba de alto vácuo de um detector de vazamento de hélio de fluxo principal (equação 14.7), então os dois detectores de vazamento de hélio (de contra-fluxo e de fluxo principal) terão a mesma sensibilidade.

O detector de vazamento de hélio de contra-fluxo é especialmente indicado para a localização de vazamento em instalação ou equipamento que já possua um sistema

de bombas de vácuo, de maneira que o tempo de resposta não é mais determinado pelo detector de vazamento de hélio. Existem no mercado diversos modelos de detector de vazamento de hélio de contra-fluxo portátil, pesando cerca de 30 kg e que operam sem armadilha de nitrogênio, o que permite que eles sejam utilizados em diferentes locais de ensaio sem nenhum problema. Estes equipamentos, ao contrário do que ocorre com aqueles que vêm equipados com uma bomba de alto vácuo de difusão, podem ser usados logo após terem sido ligados, pois funcionam com bomba de alto vácuo turbomolecular.

14.4.4 Detector de vazamento de hélio com sonda aspiradora

O detector de vazamento de hélio é, por definição, um equipamento que evacua um objeto de ensaio com um determinado grau de automação, e que mede, por possuir um sistema de espectrometria de massa especial, um fluxo de hélio no vácuo. Visto que existem muitos objetos de ensaio que não podem ser evacuados, como ocorre freqüentemente nos ensaios industriais, ou pelo fato de muitas vezes ser mais vantajoso realizar uma inspeção pressurizando o objeto de ensaio, foram desenvolvidos dispositivos para os detectores de vazamento de hélio, denominados sistemas de aspiração. Estes sistemas de aspiração são dispositivos especiais que aspiram gás com uma capacidade de sucção bem definida, e que levam o ar atmosférico até o detector de vazamento, onde ele é analisado.

Durante anos só havia um tipo de detector de vazamento de hélio (de fluxo principal) no mercado. Há cerca de dez anos, porém, surgiu no mercado um novo tipo de detector de vazamento de hélio. Neste novo tipo de equipamento, o gás é introduzido de maneira diferente daquela como era feito no detector de vazamento de hélio de fluxo principal, sendo, por este motivo, este detector de vazamento de hélio mais recente denominado de contra-fluxo. Este novo método, ou princípio de funcionamento, permitiu que fossem construídos detectores de vazamento de hélio portáteis, e que não necessitam de armadilha de nitrogênio líquido, o que acelerou bastante a utilização industrial destes equipamentos.

O preço de um detector de vazamento de hélio vai de US\$ 12.000, no caso de um equipamento simples e portátil, até US\$ 30.000, no caso de um equipamento estacionário com itens opcionais caros.

14.5 Parâmetros de ensaio

Além da sensibilidade (limite de detecção) do método de ensaio a ser utilizado, existem dois parâmetros muito importantes quando se faz uma inspeção com vácuo e hélio como gás rastreador: o tempo de evacuação do objeto de ensaio até a pressão desejada (pressão de ensaio) e o tempo de resposta. Estes dois parâmetros são determinados pelo volume do objeto e pela capacidade de sucção efetiva das bombas de vácuo.

14.5.1 Tempo de evacuação

O detector de vazamento de hélio portátil, por precisar ser leve, tem embutida nele somente uma pequena bomba de vácuo prévio de baixa capacidade de sucção. Por este motivo, a inspeção de um objeto grande sempre exige o emprego de uma ou mais bombas de vácuo auxiliares externas, de maneira que ele possa ser evacuado rapidamente e que já se possa usar o detector de vazamento de hélio pouco tempo após ele ter sido ligado. A pressão de ensaio quando se emprega um detector de vazamento de hélio moderno gira em torno de 0,5 mbar. Nesta faixa de pressão, a capacidade de sucção da bomba de vácuo prévio pode ser considerada como sendo constante, de modo que o tempo de evacuação pode ser determinado com o auxílio da equação 14.9, caso o objeto de ensaio esteja limpo.

$$t_{\text{eva}} = \frac{V}{S_{\text{efe}}} \cdot \ln \frac{p_{\text{amb}}}{p} = 2,3 \cdot \frac{V}{S_{\text{efe}}} \cdot \log \frac{p_{\text{amb}}}{p} \quad (\text{equação 14.9})$$

onde

- t_{eva} é o tempo de evacuação do objeto de ensaio, em [s];
- V é o volume do objeto de ensaio, em [ℓ];
- S_{efe} é a capacidade de sucção efetiva da bomba de vácuo, em [$\ell \cdot \text{s}^{-1}$];
- p_{amb} é a pressão ambiente, em [mbar];
- p é a pressão de ensaio, em [mbar].

Se o objeto de ensaio estiver sujo, então o tempo necessário para a sua evacuação até a pressão de ensaio poderá ser muito maior do que aquele calculado com a equação 14.9. Neste caso, é muito importante usar uma armadilha de nitrogênio líquido, que possui uma capacidade de sucção de vapores e gases condensáveis muito elevada. A pressão de ensaio necessária, entretanto, é determinada principalmente pelo detector de vazamento de hélio empregado.

O comprimento da mangueira que liga o detector de vazamento de hélio com objeto de ensaio deve ser o menor possível, e seu diâmetro deve ser condizente com o do flange de admissão da bomba de vácuo, de maneira a evitar que ocorra um estrangulamento, semelhante àquele causado pelo gargalo de uma garrafa. Na prática, devido à falta de conhecimento por parte do inspetor, muitas vezes estas duas condições não são observadas.

O fato do tempo de evacuação durante a realização de um ensaio ser muito maior que aquele calculado com a equação 14.9 constitui uma forte indicação de que ou o objeto de ensaio não foi limpo corretamente antes da inspeção ou que ele tem uma descontinuidade através da qual ocorre um grande vazamento.

Caso o objeto de ensaio esteja sendo evacuado há muito tempo, e a pressão em seu interior ainda seja maior que a pressão de ensaio, então pode-se reduzir a quantidade de gás que entra no detector de vazamento de hélio com uma válvula

reguladora, de maneira a se atingir as condições de trabalho do espectrômetro de massa.

Se o objeto de ensaio tiver um vazamento grande ($q_L \geq 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$), então o ruído de fundo no detector de vazamento de hélio será elevado. Neste caso, é possível utilizar a concentração natural de hélio no ar atmosférico, de maneira a localizar este vazamento e repará-lo, quando é dado, então, prosseguimento à localização de outros vazamentos.

A taxa de vazamento de um objeto de ensaio pode ser avaliada grosseiramente utilizando-se a equação 14.10, porém o local onde está sendo realizado o ensaio não pode estar contaminado com hélio.

$$q_L = S_{\text{ens}} \cdot \frac{A_L}{c_{\text{He}}} \quad (\text{equação 14.10})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento do objeto de ensaio avaliada grosseiramente;
- S_{ens} é a sensibilidade do detector de vazamento de hélio;
- A_L é o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio;
- c_{He} é a concentração natural de hélio no ar atmosférico (5 ppm, ou seja, $5 \cdot 10^{-6}$).

Para se ter certeza de que o vazamento detectado em uma inspeção ocorre através de uma descontinuidade do objeto de ensaio, a válvula da mangueira que conecta este objeto ao detector de vazamento de hélio é fechada. Se o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio cair acentuadamente, então é porque a descontinuidade se encontra no objeto de ensaio; se isso não ocorrer, então é porque ela se encontra na mangueira.

Pode-se vedar provisoriamente uma descontinuidade encontrada em uma inspeção com massa para calafetagem. Neste caso, se a válvula da mangueira que conecta o objeto de ensaio com o detector de vazamento de hélio estiver aberta, o ruído de fundo cai assim que a descontinuidade é vedada.

O método de ensaio integral simples supracitado, no qual a atmosfera ambiente atua como se fosse um grande envoltório, não pode ser empregado indiscriminadamente. Este método é, com certeza, excelente como ensaio prévio. Todavia, se a maior taxa de vazamento admissível de um dado objeto for muito pequena, então a pequena concentração de hélio na atmosfera (5 ppm) não será mais suficiente para medir a taxa de vazamento integral deste objeto.

14.5.2 Tempo de resposta

Além do tempo de evacuação, o tempo de resposta é outro parâmetro muito importante nos métodos de ensaio que empregam vácuo. Este parâmetro, definido pelo sistema de ensaio montado, é determinado com o auxílio de um vazamento padrão adequado. Ele, entretanto, também pode ser calculado teoricamente, caso o volume do objeto de ensaio e a capacidade de sucção efetiva no flange do objeto de ensaio por onde está sendo feito o vácuo sejam conhecidos, conforme mostra a equação 14.11.

$$\tau_{63\%} = \frac{V}{S_{efe}} \quad (\text{equação 14.11})$$

onde

- $\tau_{63\%}$ é a constante de tempo;
- V é o volume do objeto de ensaio;
- S_{efe} é a capacidade de sucção efetiva no flange do objeto de ensaio por onde está sendo feito vácuo.

Visto que na prática na maioria das vezes a capacidade de sucção efetiva no flange do objeto de ensaio por onde está sendo feito vácuo não é conhecida, a constante de tempo tem que ser, então, determinada experimentalmente com o auxílio de um vazamento padrão. Nesta determinação experimental, depois da válvula situada entre o vazamento padrão e o objeto de ensaio ser aberta, a taxa de vazamento de hélio do vazamento padrão passa a ser indicada no mostrador do detector de vazamento de hélio. Após transcorrido um determinado tempo, o mostrador deste equipamento indicará um valor máximo e constante. A constante de tempo de resposta é definida como sendo o tempo necessário para o mostrador indicar um valor que corresponde a 63 % deste valor máximo constante.

O tempo de resposta utilizado na localização de vazamento é, por convenção, igual a três vezes a constante de tempo (equação 14.12). Após transcorrido este tempo, o mostrador do detector de vazamento de hélio indicará um valor que corresponderá a 95 % da taxa de vazamento. A importância do tempo de resposta, bem como do seu conhecimento antes da realização de uma inspeção, pode ser facilmente compreendida, visto que ele serve para avaliar a ordem de grandeza da taxa de vazamento medida e, com isso, analisar a estanqueidade do objeto de ensaio.

$$t_A = 3 \cdot \tau_{63\%} \quad (\text{equação 14.12})$$

onde

- t_A é o tempo de resposta;
- $\tau_{63\%}$ é a constante de tempo.

Quando se usa qualquer um dos métodos de ensaio integral, também se tem que esperar um intervalo de tempo igual ao tempo de resposta, mesmo quando ele for muito elevado, como ocorre no caso de inspeção de objeto de grande volume. Isto, porém, não constitui nenhum problema operacional. Na localização de vazamento, todavia, um tempo de resposta longo é sempre indesejável. Nos próximos itens serão discutidas as diversas possibilidades existentes de redução do tempo de resposta para um valor praticável e aceitável. Com este objetivo, foram desenvolvidas bombas de vácuo com elevada capacidade de sucção na faixa de pressão em que os objetos são ensaiados, o que viabilizou a localização de vazamento com hélio em objeto grande.

14.5.2.1 Tempo de resposta com o método do fluxo principal

Quando o objeto de ensaio é pequeno, emprega-se, então, quase que exclusivamente o método do fluxo principal. Neste caso, todo o gás de ensaio que passa por uma descontinuidade do objeto é conduzido para o detector de vazamento de hélio. O exemplo 1, apresentado a seguir, mostra o cálculo do tempo de resposta de uma inspeção em um objeto de pequeno volume feita com este método de ensaio.

Exemplo 1

Deve-se localizar vazamentos em um objeto com 20 ℓ de volume empregando um detector de vazamento de hélio com uma capacidade de sucção de 5 ℓ·s⁻¹. Se o comprimento da mangueira que conecta o detector de vazamento de hélio com o objeto de ensaio for o menor possível, qual será o tempo de resposta do ensaio?

Solução

Tem-se:

- a capacidade de sucção do detector de vazamento de hélio, $S_{LD} = 5 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$;
- o volume do objeto de ensaio, $V = 20 \text{ ℓ}$.

O tempo de resposta é igual as três vezes a constante de tempo de resposta, conforme mostra a equação 14.12. Utilizando-se a equação 14.11, e como o comprimento da mangueira que liga o detector de vazamento de hélio com o objeto de ensaio é o menor possível, o que significa que se pode considerar a capacidade de sucção efetiva no flange do objeto de ensaio por onde ele é evacuado como sendo igual à capacidade de sucção do detector de vazamento de hélio ($S_{efe} \approx S_{LD}$), calcula-se, então, o tempo de resposta.

$$t_A = 3 \cdot \tau_{63\%} = 3 \cdot \frac{V}{S_{efe}} \approx 3 \cdot \frac{V}{S_{LD}}$$

$$t_A \approx 3 \cdot \frac{20 \ell}{5 \ell \cdot s^{-1}} \approx 12 \text{ s}$$

Se o objeto de ensaio tivesse um volume de 1000 ℓ , então o tempo de resposta seria aproximadamente 600 s. Este tempo de resposta muito grande não constitui nenhum problema no caso de ensaio integral, bastando para isso esperar 10 min para medir a taxa de vazamento integral. Na localização de vazamento com jateamento de hélio sobre as regiões suspeitas de terem um vazamento, todavia, este tempo de resposta inviabilizaria completamente a inspeção. Se o método empregado fosse o do contra-fluxo, onde a capacidade de sucção do detector de vazamento de hélio é bem menor que a do método do fluxo principal, a relação entre os tempos de resposta para inspeção em objeto de ensaio pequeno e grande seria semelhante àquela que se tem quando se usa o método do fluxo principal.

Uma maneira de reduzir significativamente o tempo de resposta é empregar o método do fluxo parcial, medida esta que é utilizada constantemente na prática.

14.5.2.2 Tempo de resposta com o método do fluxo parcial

Quando se localiza vazamento em um objeto de grande volume ou que tem uma descontinuidade muito grande, então emprega-se o método do fluxo parcial. No ensaio com este método, que se encontra apresentado na figura 14.8, usa-se uma bomba de vácuo auxiliar em paralelo com o detector de vazamento de hélio. O fluxo de gás de ensaio que passa por uma descontinuidade do objeto se divide em dois no local de bifurcação do duto que o liga ao detector de vazamento de hélio e à bomba de vácuo auxiliar, segundo a relação definida pela capacidade de sucção da bomba de vácuo auxiliar e a capacidade de sucção do detector de vazamento de hélio. Para que o tempo de resposta seja pequeno, é preciso utilizar uma bomba de vácuo auxiliar com elevada capacidade de sucção. O coeficiente de proporcionalidade do método do fluxo parcial, isto é, a relação entre o fluxo de gás de ensaio que atravessa a descontinuidade do objeto e o fluxo de gás de ensaio que vai para o detector de vazamento de hélio, pode ser determinado empregando a equação 14.13.

$$\gamma = \frac{q_{L,tot}}{q_{LD}} = \frac{S_{HP} + S_{LD}}{S_{LD}} \quad (\text{equação 14.13})$$

onde

- γ é o coeficiente de proporcionalidade do método do fluxo parcial;
- $q_{L,tot}$ é o fluxo total de gás de ensaio que atravessa a descontinuidade do objeto;
- q_{LD} é o fluxo de gás de ensaio que vai para o detector de vazamento de hélio;
- S_{HP} é a capacidade de sucção de hélio da bomba de vácuo auxiliar;
- S_{LD} é a capacidade de sucção efetiva do detector de vazamento de hélio.

Entretanto, quando se faz um ensaio, não se conhece a capacidade de sucção efetiva de hélio nem do detector de vazamento de hélio nem da bomba de vácuo auxiliar, de maneira que é preciso calibrar o sistema de ensaio com o auxílio de um vazamento padrão. Esta calibragem é realizada empregando a equação 14.14.

$$\gamma = \frac{q_{TL}}{A_{TL}} \quad (\text{equação 14.14})$$

onde

- γ é o coeficiente de proporcionalidade do método do fluxo parcial;
- q_{TL} é a taxa de vazamento do vazamento padrão;
- A_{TL} é o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio quando se mede a taxa de vazamento do vazamento padrão.

Conhecendo-se o coeficiente de proporcionalidade do método do fluxo parcial, pode-se, então, empregando a equação 14.15, determinar a taxa de vazamento do objeto de ensaio.

$$q_L = \gamma \cdot A_L \quad (\text{equação 14.15})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento do objeto de ensaio;
- γ é o coeficiente de proporcionalidade do método do fluxo parcial;
- A_L é o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio quando se mede a taxa de vazamento do objeto de ensaio.

O método de ensaio do fluxo parcial é muito utilizado quando se deseja reduzir o tempo de resposta. Ele também é bastante empregado quando se quer inspecionar um objeto, mas não se consegue evacuá-lo até a pressão de trabalho do detector de vazamento de hélio (10^{-4} mbar). Este pode ser o caso, por exemplo, da inspeção de um objeto com grandes vazamentos, ou que só estará em condições de ser ensaiado após longo tempo de evacuação, devido à intensa degasagem ou dessorção de sua superfície interna. Como existe uma quantidade máxima de gás que pode entrar no detector de vazamento de hélio, recomenda-se reduzir a capacidade de sucção deste equipamento com uma válvula reguladora, de maneira que ele possa entrar em operação mesmo quando a pressão no interior do objeto de ensaio for bem maior que 10^{-4} mbar, que é a maior pressão que o espectrômetro de massa do detector de vazamento de hélio suporta. O exemplo 2 mostra, comparativamente, as principais diferenças existentes entre os métodos de ensaio do fluxo parcial e do fluxo principal.

Exemplo 2

Um objeto com 200 ℓ de volume deve ser inspecionado com um detector de vazamento de hélio com capacidade de sucção de 5 ℓ·s⁻¹. A menor taxa de vazamento que pode ser medida com este detector de vazamento de hélio é 10⁻⁹ mbar·ℓ·s⁻¹. Se o comprimento da mangueira que conecta o detector de vazamento de hélio com o objeto de ensaio for o menor possível, o que significa que se pode considerar a capacidade de sucção efetiva no flange do objeto de ensaio por onde ele é evacuado como sendo igual à capacidade de sucção do detector de vazamento de hélio ($S_{\text{efe}} \approx S_{\text{LD}}$), qual é o tempo de resposta quando se emprega o método de ensaio do fluxo principal? Qual é o tempo de resposta quando se emprega o método do fluxo parcial caso a capacidade de sucção do detector de vazamento de hélio seja reduzida para 0,2 ℓ·s⁻¹, o coeficiente de proporcionalidade (γ) seja 100 e se utilize uma bomba de vácuo auxiliar com capacidade de sucção de 20 ℓ·s⁻¹?

Solução

No caso do método do fluxo principal, o objeto de ensaio tem que ser evacuado até uma pressão de 10⁻⁴ mbar. O tempo de resposta, neste caso, é calculado empregando a equação 14.12. Tem-se:

- a capacidade de sucção do detector de vazamento de hélio, $S_{\text{LD}} = 5 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$;
- o volume do objeto de ensaio, $V = 200 \text{ ℓ}$;
- a menor taxa de vazamento que pode ser medida com o detector de vazamento de hélio, $q_{\text{L,min}} = 10^{-9} \text{ mbar} \cdot \text{ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$t_A = 3 \cdot \tau_{63\%} = 3 \cdot \frac{V}{S_{\text{efe}}} \approx 3 \cdot \frac{V}{S_{\text{LD}}}$$

$$t_A \approx 3 \cdot \frac{200 \text{ ℓ}}{5 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}} \approx 120 \text{ s}$$

No caso do método do fluxo parcial, o tempo de evacuação e o tempo de resposta são reduzidos. O coeficiente de proporcionalidade do método do fluxo parcial é 100, o que significa que a inspeção já pode ser iniciada quando a pressão no objeto de ensaio atingir 10⁻² mbar. O tempo de resposta, neste caso, também é calculado empregando a equação 14.12. Tem-se:

- a capacidade de sucção do detector de vazamento de hélio, $S_{\text{LD}} = 0,2 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$;
- a capacidade de sucção da bomba de vácuo auxiliar, $S_{\text{HP}} = 20 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$t_A = 3 \cdot \tau_{63\%} = 3 \cdot \frac{V}{S_{\text{efe}}} \approx 3 \cdot \frac{V}{S_{\text{HP}}}$$

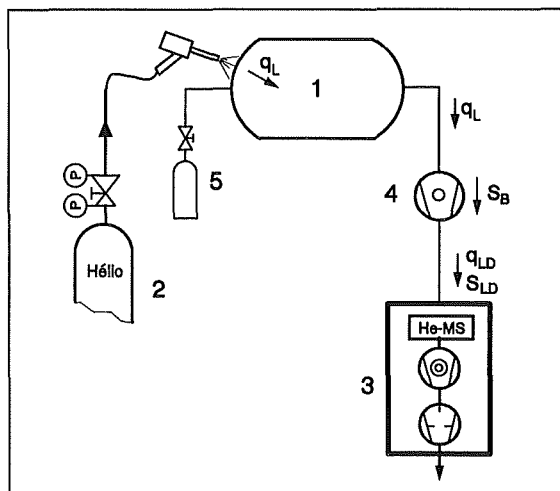
$$t_A \approx 3 \cdot \frac{200 \ell}{20 \ell \cdot s^{-1}} \approx 30 \text{ s}$$

O método do fluxo parcial reduz o tempo de evacuação e o tempo de resposta, porém, como foi mostrado neste exemplo, a menor taxa de vazamento que pode ser medida é maior ($q_{L,min} = 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot s^{-1}$).

Conforme pode ser constatado, a sensibilidade do método do fluxo parcial é menor que aquela do método do fluxo principal. O coeficiente de proporcionalidade do método do fluxo parcial, porém, deve ser escolhido de tal maneira que se possa medir a maior taxa de vazamento admissível.

14.5.2.3 Tempo de resposta com bomba de vácuo auxiliar em série

A técnica de inspeção utilizando uma bomba de vácuo com elevada capacidade de sucção em série com o detector de vazamento de hélio, conhecida como princípio de Booster (figura 14.10), constitui uma outra maneira de reduzir o tempo de resposta. Esta técnica é muito vantajosa, principalmente na inspeção de objeto grande, visto que o ensaio com vácuo, realizado de acordo com a figura 14.7, possui um tempo de resposta muito elevado. Como nesta técnica o detector de vazamento de hélio mede o fluxo total de gás de ensaio, a sensibilidade do ensaio não é reduzida.



- 1 Objeto de ensaio
- 2 Garrafa de hélio
- 3 Detector de vazamento de hélio
- 4 Bomba de vácuo em série (bomba de Booster)
- 5 Vazamento padrão

Figura 14.10:

Utilização de uma bomba de vácuo em série com o detector de vazamento de hélio (princípio de Booster).

O desenvolvimento de bombas turbomoleculares que operam com vácuo da ordem de 10 mbar no flange de admissão, e com capacidades de sucção variando entre $30 \ell \cdot s^{-1}$ e $1000 \ell \cdot s^{-1}$, permitirá que esta técnica de ensaio venha a ser empregada cada vez mais na prática. Estas bombas turbomoleculares novas são denominadas

bombas espiromoleculares, bombas moleculares de arraste e bombas de Holweck (que operam segundo o princípio de Holweck). Se estas bombas turbomoleculares de amplo campo de aplicação forem utilizadas em faixas de pressão elevada, então a capacidade de sucção da bomba de vácuo prévio deve ser compatível com a elevada capacidade de sucção da bomba turbomolecular. Se a capacidade de sucção da bomba de pre-vácuo não for compatível com a da bomba turbomolecular, isto é, se ela for menor, então a elevada quantidade de gás bombeada pela bomba turbomolecular não poderá ser bombeada pela bomba de vácuo prévio, de maneira que não há mais vantagem em utilizar este tipo de bomba de vácuo em série com o detector de vazamento de hélio.

O exemplo 3 ilustra, com base no tempo de resposta do sistema de ensaio, a vantagem do emprego de uma bomba de vácuo auxiliar durante a inspeção de um objeto grande.

Exemplo 3

Qual é o tempo de resposta de um sistema de ensaio montado para a inspeção de um objeto com 1000 ℓ de volume quando se emprega um detector de vazamento de hélio de 1 ℓ·s⁻¹ de capacidade de sucção? Qual seria o tempo de resposta se a evacuação do objeto de ensaio fosse feita com uma bomba de vácuo auxiliar com capacidade de sucção de 50 ℓ·s⁻¹? Suponha, nestes dois casos, que o comprimento da mangueira que conecta o detector de vazamento de hélio e a bomba de vácuo auxiliar com o objeto de ensaio é o menor possível.

Solução

Tem-se:

- a capacidade de sucção do detector de vazamento de hélio, $S_{LD} = 1 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$;
- a capacidade de sucção da bomba de vácuo auxiliar, $S_{HP} = 50 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}$;
- o volume do objeto de ensaio, $V = 1000 \text{ ℓ}$.

O tempo de resposta é igual as três vezes a constante de tempo, conforme mostra a equação 14.12. Utilizando-se a equação 14.11, e como o comprimento da mangueira que liga o detector de vazamento de hélio com o objeto de ensaio é o menor possível, o que significa que se pode considerar a capacidade de sucção efetiva no flange do objeto de ensaio por onde ele é evacuado como sendo igual à capacidade de sucção do detector de vazamento de hélio ($S_{efe} \approx S_{LD}$), calcula-se, então, o tempo de resposta.

$$t_A = 3 \cdot \tau_{63\%} = 3 \cdot \frac{V}{S_{efe}} \approx 3 \cdot \frac{V}{S_{LD}}$$

$$t_A \approx 3 \cdot \frac{1000 \text{ ℓ}}{1 \text{ ℓ} \cdot \text{s}^{-1}} \approx 3000 \text{ s} = 50 \text{ min}$$

Quando se usa bomba de vácuo auxiliar, e considerando que a sua capacidade de sucção efetiva é igual à sua capacidade de sucção nominal, visto que o comprimento da mangueira que a conecta ao objeto de ensaio é o menor possível, tem-se:

$$t_A = 3 \cdot \tau_{63\%} \approx 3 \cdot \frac{V}{S_{HP}}$$

$$t_A \approx 3 \cdot \frac{1000 \ell}{50 \ell \cdot s^{-1}} \approx 60 \text{ s} = 1 \text{ min}$$

14.6 Instrumentos e acessórios de ensaio

Além do detector de vazamento de hélio, para localizar um vazamento e fazer um ensaio de estanqueidade com hélio são necessários alguns instrumentos e acessórios importantes, conforme será visto nos itens a seguir.

14.6.1 Vazamento padrão

O vazamento padrão é um instrumento auxiliar muito importante, visto que ele serve para calibrar o detector de vazamento e determinar o tempo de resposta na localização de vazamento. O vazamento padrão também é popularmente conhecido como vazamento de ensaio ou vazamento de calibração, porém a norma DIN EN 1330-8 [4.2] determina que se use a expressão vazamento de inspeção para designá-lo. Os vazamentos padrões normalmente possuem um reservatório de vidro contendo hélio, que libera, através de sua parede fina, uma quantidade constante de gás na unidade de tempo. Como a permeação, que é o fenômeno no qual se baseia o princípio de funcionamento do vazamento padrão, depende da temperatura, o coeficiente de temperatura do vazamento padrão deve, por norma, vir especificado em seu corpo.

O vazamento padrão normalmente possui uma válvula tipo abre-fecha, que, porém, somente impede que o gás contido nele escape para fora de seu corpo. O gás contido no recipiente que o armazena, todavia, continua escapando por permeação através de sua fina parede de vidro. Este escape contínuo por permeação faz com que o gás se acumule dentro do vazamento padrão quando sua válvula estiver fechada. Quando esta válvula é aberta, após ter sido mantida por um determinado tempo fechada, o vazamento padrão libera bruscamente uma quantidade elevada de gás de ensaio (também conhecida como "gole de hélio"). Esta liberação de gás acumulado traz efeitos indesejáveis consigo, visto que a contaminação do sistema de medida diminui muito lentamente, e que o tempo de resposta pode ser medido com erro. Com o objetivo de evitar estes efeitos indesejáveis, utiliza-se um "vazamento padrão bombeado", que possui uma válvula de três direções de acionamento rápido, de maneira que o gás de ensaio acumulado pode ser bombeado rapidamente por uma pequena bomba de vácuo mecânica de palheta

rotativa (por exemplo, com uma capacidade de sucção de $4 \text{ m}^3/\text{h}$). A figura 14.11 mostra a variação da relação entre a taxa de vazamento medida pelo detector de vazamento de hélio após a abertura da válvula do vazamento padrão (q_L) e a taxa de vazamento do vazamento padrão (q_{TL}) em função do tempo (t), quando se emprega vazamento padrão normal e bombeado.

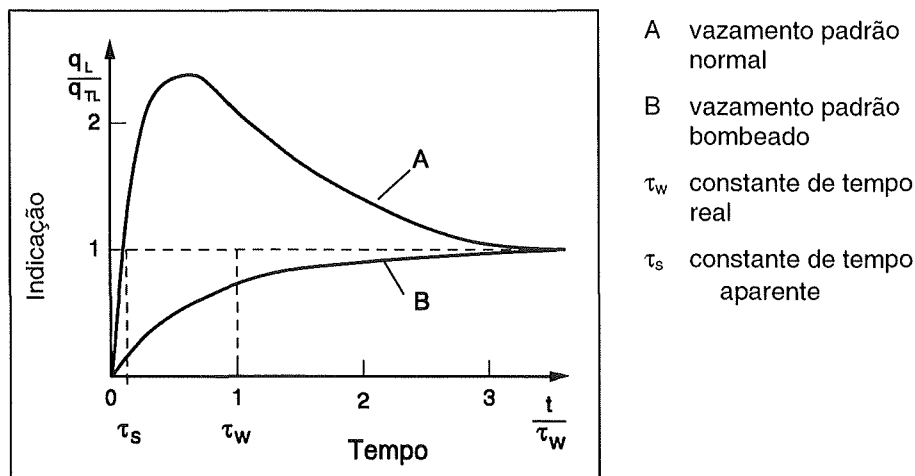


Figura 14.11:

Variação da relação entre a taxa de vazamento medida pelo detector de vazamento de hélio após a abertura da válvula do vazamento padrão (q_L) e a taxa de vazamento do vazamento padrão (q_{TL}) em função do tempo (t) para um vazamento padrão normal (A) e um bombeado (B).

Quando não se tem à disposição um vazamento padrão bombeado para determinar o tempo de resposta, então utiliza-se a variação da relação entre a taxa de vazamento medida pelo detector de vazamento de hélio após a abertura da válvula do vazamento padrão, e a taxa de vazamento do vazamento padrão ao longo do tempo para determinar a constante de tempo.

14.6.2 Armadilha de condensação

O emprego de uma armadilha de condensação externa na inspeção de um objeto com grande área de superfície interna, ou que degase bastante, pode diminuir sensivelmente o tempo de inspeção. A armadilha de condensação normalmente contém nitrogênio líquido (LN_2). Devido à temperatura extremamente baixa do refrigerante utilizado, os gases e vapores que possuem baixa pressão parcial, contidos no fluxo de gás removido do objeto de ensaio, se condensam na parede da armadilha de condensação. A armadilha de condensação é nada mais nada menos que um recipiente de aço inoxidável especial e com bom isolamento térmico, de maneira que o refrigerante que ela contém chega a durar vários dias.

14.6.3 Pistola de gás

Quando se localiza vazamento em objeto de ensaio com vácuo, o gás de ensaio deve ser jateado no local exato onde se encontra uma descontinuidade, de maneira que ela possa ser localizada com o detector de vazamento de hélio. Para isso, utiliza-se uma pistola de gás, que libera um jato fino de gás de ensaio quando se aperta seu gatilho. A experiência mostra, entretanto, que na prática freqüentemente se emprega excesso de gás de ensaio, o que faz com que o ruído de fundo se eleve bastante. Com o objetivo de evitar com que isto ocorra, é comum utilizar uma pistola de gás com um bico de saída muito fino, por exemplo, com uma cânula em sua ponta, bem como uma válvula reguladora na garrafa de hélio.

14.6.4 Registrador gráfico x-t

É muito importante utilizar um registrador gráfico multicanal durante uma inspeção, de maneira que os dados registrados possam ser anexados ao relatório de ensaio. Com esse equipamento, é possível documentar muito bem o processo de evacuação (queda de pressão), a taxa de vazamento do vazamento padrão, o tempo de resposta, o ruído de fundo e a taxa de vazamento.

14.6.5 Envolvório

É recomendável fazer a inspeção de uma parte ou de uma região isolada de um objeto de ensaio, como, por exemplo, de um flange ou de uma junta soldada que foi reparada, recobrando o local a ser inspecionado com um envoltório (folha de polietileno PE ou saco de plástico) e insuflando gás de ensaio debaixo dele. Assim, pode-se garantir que haverá gás de ensaio por um tempo relativamente longo e em uma concentração suficiente em volta do local onde se supõe haver um vazamento. O envoltório pode ser fixado sobre o local a ser inspecionado por meio de fita adesiva comum. Se o local a ser recoberto pelo envoltório for muito grande, recomenda-se evacuar o espaço entre o envoltório e o objeto de ensaio com uma bomba de vácuo pequena antes de enchê-lo com gás de ensaio. Desta maneira, após se insuflar hélio sob o envoltório, pode-se garantir que a concentração de gás de ensaio debaixo dele é grande.

14.6.6 Massa para calafetagem

A conexão de um objeto de ensaio pequeno com o detector de vazamento de hélio, o fechamento de uma pequena abertura no objeto de ensaio, bem como a vedação de uma descontinuidade pequena localizada durante uma inspeção, podem ser feitas com massa para calafetagem (por exemplo, Bostik® ou Prestik®), que é facilmente encontrada no mercado e se destina ao reparo de carroceira de veículos. A massa para calafetagem é impermeável ao hélio, pois o coeficiente de permeação deste gás rastreador nela é pequeno, e a sua remoção, após ela ter sido usada em um objeto de ensaio, é bastante fácil, visto que ela não deixa resíduos na superfície e não obstrui a descontinuidade que porventura tenha sido vedada com ela.

Ensaio com Detector de Vazamento de Hélio

- 15.1 Introdução
- 15.2 Métodos de ensaio com hélio
- 15.3 Localização de vazamento com hélio
 - 15.3.1 Sonda aspiradora padrão
 - 15.3.2 Sonda aspiradora rápida
 - 15.3.3 Sensibilidade do detector de vazamento de hélio com sonda aspiradora
 - 15.3.3.1 Concentração de hélio no ar atmosférico
 - 15.3.3.2 Concentração de hélio no vazamento
 - 15.3.3.3 Velocidade de ensaio
 - 15.3.4 Localização de vazamento
 - 15.3.4.1 Preparativos para a localização de vazamento
 - 15.3.4.2 Inspeção na sonda aspiradora
 - 15.3.4.3 Localização de vazamento com hélio
 - 15.3.4.4 Determinação da taxa de vazamento com a sonda aspiradora
 - 15.3.4.5 Relatório de ensaio
 - 15.3.4.6 Equipamentos, instrumentos e acessórios
- 15.4 Ensaio com vácuo
 - 15.4.1 Localização de vazamento
 - 15.4.2 Determinação da taxa de vazamento
 - 15.4.3 Faixa de aplicação
- 15.5 Ensaio integral com sonda aspiradora
 - 15.5.1 Método do envoltório
 - 15.5.2 Leitura do valor de medida no mostrador do detector de vazamento de hélio
 - 15.5.3 Calibração do sistema de ensaio
 - 15.5.4 Realização de ensaio
 - 15.5.4.1 Preparativos para o ensaio
 - 15.5.4.2 Determinação da taxa de vazamento
 - 15.5.5 Erro de medida
 - 15.5.6 Relatório de ensaio
- 15.6 Ensaio bombing
 - 15.6.1 Procedimento de ensaio
 - 15.6.2 Equipamentos, instrumentos e acessórios
 - 15.6.3 Determinação da taxa de vazamento

15 Ensaio com detector de vazamento de hélio

15.1 Introdução

O princípio da localização de vazamento e do ensaio de estanqueidade empregando hélio como gás rastreador encontra-se apresentado esquematicamente na figura 15.1. O sistema de ensaio como um todo é denominado método de ensaio de estanqueidade. Este método envolve, além do detector de vazamento de hélio, o objeto de ensaio, o sistema de bombas de vácuo, os instrumentos auxiliares necessários e o procedimento de ensaio. O resultado de uma inspeção, como a menor taxa de vazamento que pode ser medida com um sistema de ensaio, por exemplo, depende muito do método de ensaio empregado. Neste capítulo serão apresentados e discutidos detalhadamente os diferentes métodos de ensaio com hélio. No que diz respeito ao detector de vazamento de hélio, bem como aos instrumentos e acessórios de inspeção (capítulo 14), serão abordadas somente as suas propriedades que são importantes para o bom entendimento dos diversos métodos de ensaio.

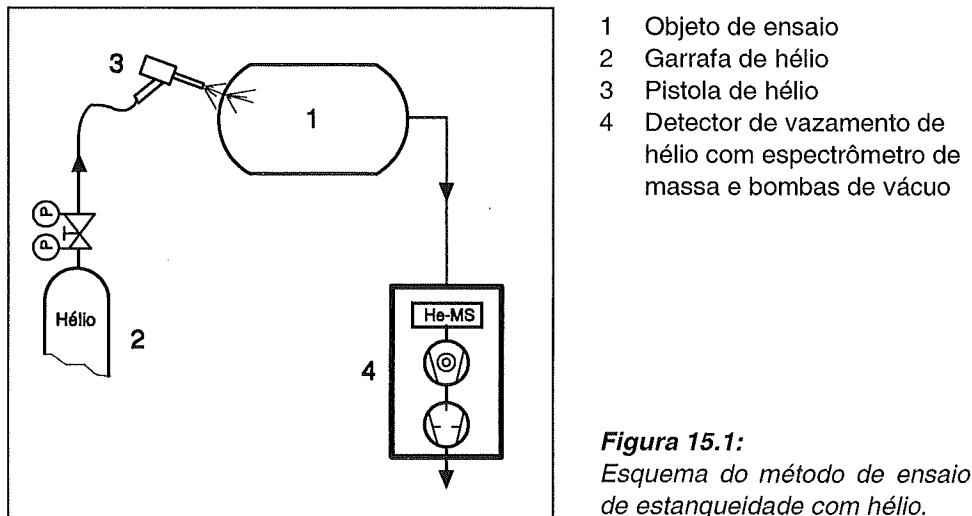


Figura 15.1:
Esquema do método de ensaio de estanqueidade com hélio.

15.2 Métodos de ensaio com hélio

Os métodos de ensaio com hélio são divididos em dois grupos básicos:

- métodos com sobrepressão (sonda aspiradora);
- métodos com vácuo.

Os métodos de ensaio com sobrepressão (objeto de ensaio com pressão maior que a atmosférica) ou com vácuo também são classificados como sendo integral ou local. A figura 15.2 apresenta, esquematicamente, os diferentes métodos de ensaio de estanqueidade com hélio que serão abordados neste capítulo.

Quando se tem que inspecionar um objeto que não pode ser evacuado, então o ensaio é feito com o objeto com uma pressão maior que a atmosférica. Para a realização deste tipo de ensaio, existem no mercado equipamentos de aspiração especiais, denominados sondas aspiradoras, que foram projetados para serem conectados ao detector de vazamento de hélio. A sonda aspiradora captura o gás presente em um determinado local e o conduz até o espectrômetro de massa do detector de vazamento de hélio, onde o seu teor de gás de ensaio é analisado. O ensaio integral envolvendo sobrepressão, que na realidade nada mais é do que um ensaio de estanqueidade, é denominado método de ensaio do envoltório com sonda aspiradora; e o ensaio local envolvendo sobrepressão, que na verdade constitui a localização de vazamento propriamente dita, é conhecido como método de ensaio da sonda aspiradora.

Nos métodos de ensaio com vácuo, o objeto de ensaio é evacuado e sua superfície externa é colocada em contato com hélio. O hélio que penetrar no objeto de ensaio através de uma descontinuidade existente será, então, identificado pelo detector de vazamento de hélio. Neste caso, entretanto, o objeto de ensaio tem que ser resistente ao vácuo, isto é, ele deve ser capaz de suportar a pressão exercida pelo ar atmosférico. Existem três métodos de ensaio com vácuo nos quais se mede a taxa de vazamento integral (métodos integrais):

- o objeto de ensaio é evacuado e conectado com o detector de vazamento de hélio;
- o objeto de ensaio se encontra no interior de uma câmara de vácuo, conectada com o detector de vazamento de hélio, e é pressurizado com gás de ensaio;
- e ensaio bombing.

O ensaio bombing foi especialmente desenvolvido para a medir a taxa de vazamento de objeto hermeticamente fechado. Antes da medida da taxa de vazamento, o objeto de ensaio é introduzido em uma câmara, que, a seguir, é pressurizada (5 bar a 30 bar) com gás de ensaio. Se o objeto de ensaio tiver uma descontinuidade, então o gás de ensaio passará por ela e atingirá o seu interior. Após isso, o objeto de ensaio é colocado em uma câmara de vácuo, que se encontra conectada com um detector de vazamento de hélio. O gás de ensaio que se encontra no interior do objeto de ensaio, então, escapará pela descontinuidade, e irá para o detector de vazamento de hélio. Esta variante do método de ensaio integral com vácuo (ensaio bombing) será abordada com mais detalhe no item 15.6.

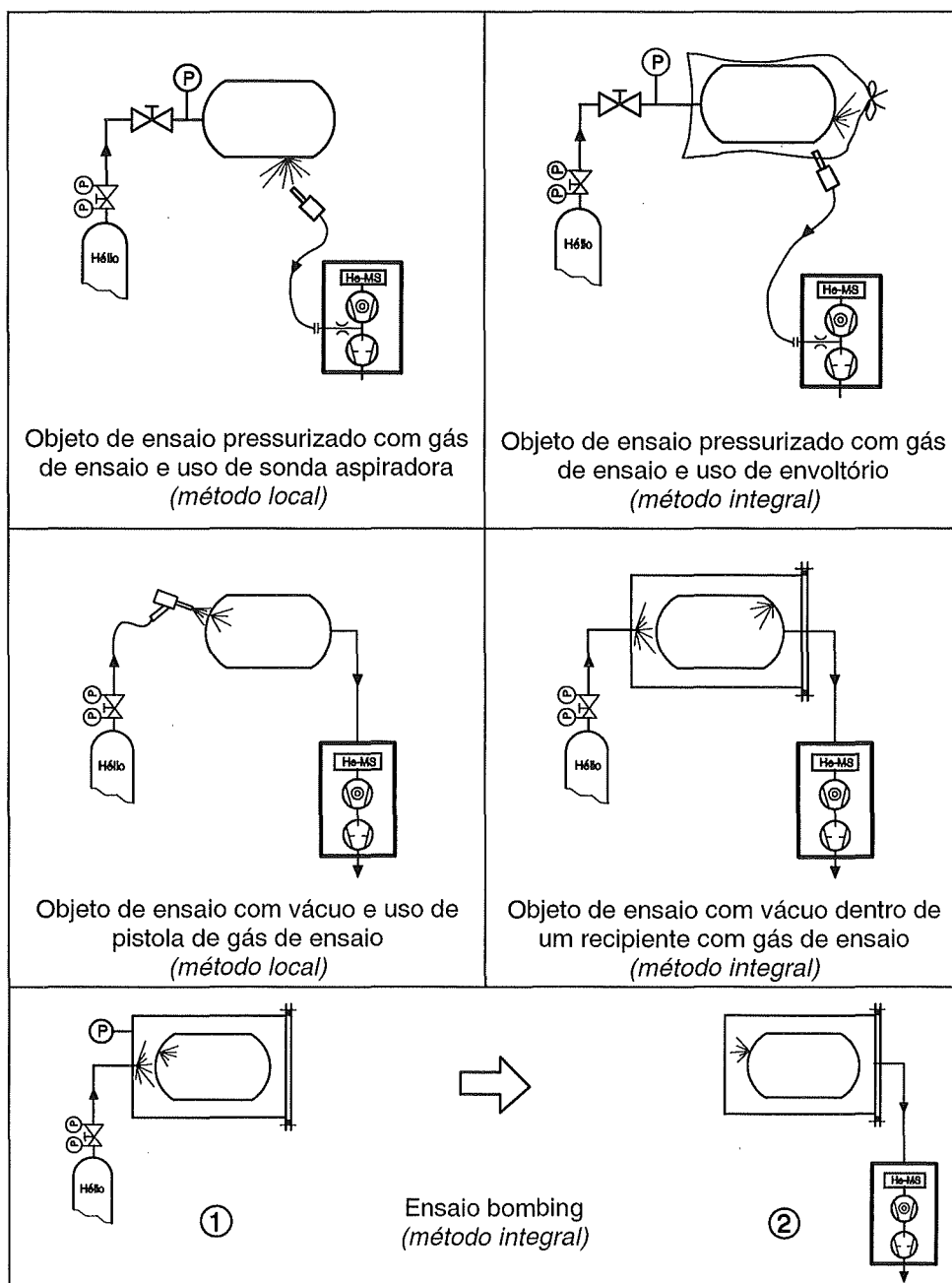


Figura 15.2: Esquema dos diferentes métodos de ensaio de estanqueidade com hélio.

A condição fundamental para o sucesso de uma inspeção com qualquer um dos métodos de ensaio citados acima é que o objeto de ensaio esteja muito bem limpo e seco. Não é permitida nem mesmo a presença de um pequeno resíduo de água no seu interior, visto que isto já pode ser suficiente para obstruir uma descontinuidade que por acaso esteja presente. Além disso, deve-se remover, antes da realização de uma inspeção, restos de tinta ou de ferrugem da superfície do objeto de ensaio, pois eles podem esconder descontinuidades ou induzir a erros de interpretação de resultados de ensaio. Quanto menor for a máxima taxa de vazamento admissível, mais importante é o estado de limpeza do objeto de ensaio.

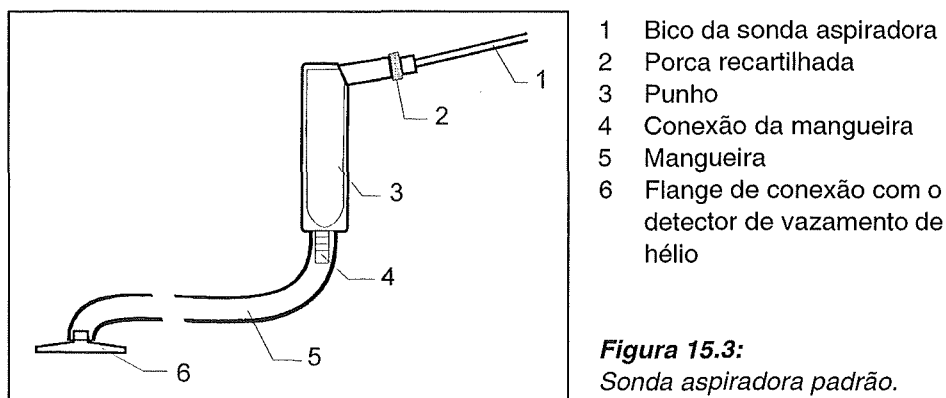
A escolha do tipo de detector de vazamento de hélio (se de fluxo principal ou de contra-fluxo) a ser empregado em uma inspeção com um dos métodos de ensaio supramencionados é, em princípio, uma questão de importância secundária. As características destes detectores de vazamento de hélio foram descritas no capítulo 14.

15.3 Localização de vazamento com hélio

Após os diferentes métodos de ensaio com hélio terem sido vistos, é muito importante conhecer os aspectos práticos da localização de vazamento com o método da sonda aspiradora. Neste caso, o objeto de ensaio é pressurizado com gás de ensaio, conforme mostra a figura 15.2 (em cima, à esquerda).

15.3.1 Sonda aspiradora padrão

A sonda aspiradora de hélio mais simples (figura 15.3) é nada mais nada menos do que uma mangueira de 2 m a 3 m de comprimento, que tem uma de suas extremidades conectada a uma entrada especial do detector de vazamento de hélio. Na outra extremidade da mangueira existe um pequeno estrangulador (uma espécie de válvula reguladora), cuja função é permitir a passagem de uma pequena quantidade de gás. Assim, este estrangulador atua como se ele fosse uma descontinuidade por onde ocorre um pequeno vazamento. Este estrangulador, que geralmente é um capilar (sonda aspiradora capilar), mas que também pode ser um metal sinterizado com inúmeros poros minúsculos (sonda aspiradora de difusão), tem dimensões tão bem preestabelecidas, que a maior pressão de operação admissível no espectrômetro de massa ($p_{\text{máx}} \leq 2 \cdot 10^{-4}$ mbar) nunca é ultrapassada. Com esta sonda aspiradora, que também é conhecida como sonda aspiradora padrão, o gás em volta de um local do objeto de ensaio suspeito de ter uma descontinuidade por onde ocorre um vazamento é capturado. Após ser aspirado pela ponta da sonda, o gás, que contém hélio, passa pela mangueira da sonda aspiradora e atinge a conexão com o detector de vazamento de hélio, de onde é conduzido até o espectrômetro de massa para ser analisado.



O tempo de resposta, isto é, o intervalo de tempo entre o momento em que o gás de ensaio penetra no bico da sonda aspiradora e aquele em que ele alcança o espectrômetro de massa do detector de vazamento de hélio, é cerca de um segundo. Este tempo, entretanto, depende muito do comprimento da mangueira da sonda aspiradora.

O fato de uma pequena quantidade de gás de ensaio que escapa por uma descontinuidade ter que passar pelo estrangulador e pela mangueira da sonda aspiradora (que também pode ser considerada como sendo uma pequena descontinuidade) até chegar ao espectrômetro de massa do detector de vazamento de hélio é tido, sob o ponto de vista técnico, como sendo um desvio necessário. Este desvio, entretanto, acarreta uma perda da elevada sensibilidade do detector de vazamento de hélio. Em vista disso, a menor taxa de vazamento de hélio que pode ser medida com o detector de vazamento de hélio quando se emprega o método da sonda aspiradora gira em torno de 10^{-5} a 10^{-6} mbar·ℓ·s⁻¹.

O sistema de aspiração de gás de ensaio descrito acima apresenta, porém, algumas desvantagens. Ao se variar o comprimento da mangueira da sonda aspiradora, que geralmente é grossa e, por isso mesmo, tem pouca flexibilidade, a pressão no espectrômetro de massa do detector de vazamento de hélio também varia, visto que o pequeno estrangulador na ponta da sonda aspiradora não pode ser modificado de maneira a se ajustar ao novo valor da condutância da mangueira. Se a quantidade de gás aspirado não puder ser mais ajustada às condições de perfeito funcionamento do detector de vazamento de hélio, ou seja, de seu espectrômetro de massa, então a sensibilidade do equipamento é alterada. Além disso, pode ser que a maior pressão de operação admissível no espectrômetro de massa seja ultrapassada, o que faz com que o equipamento desligue automaticamente. Além disso, também existe o perigo do estrangulador no bico da sonda aspiradora ser obstruído rapidamente por partículas sólidas presentes no gás aspirado.

15.3.2 Sonda aspiradora rápida

O tempo de resposta da sonda aspiradora rápida é menor que o da sonda aspiradora padrão. Quando se trabalha com sonda aspiradora rápida, o sistema de bombas de vácuo empregado na evacuação do objeto de ensaio tem uma pequena bomba de vácuo de membrana extra, o que não é o caso do sistema de bombas de vácuo utilizado quando se realiza uma inspeção com sonda aspiradora padrão. Este fato, bem como o reduzidíssimo diâmetro da mangueira da sonda aspiradora rápida, quando comparado com aquele da mangueira da sonda aspiradora padrão, fazem com que o tempo de resposta da sonda rápida seja menor. Como a relação entre o volume da mangueira e a capacidade de sucção da bomba de vácuo é muito pequena, a velocidade do fluxo de gás dentro da mangueira da sonda aspiradora rápida é extremamente elevada. Antes do gás aspirado atingir a bomba de vácuo de membrana, ele passa por um estrangulador especial, que se encontra diretamente ligado com o conector do detector de vazamento de hélio. Neste estrangulador, uma parte do gás é capturada e conduzida até o espectrômetro de massa do detector de vazamento de hélio. Além de ser mais fácil de ser manuseada, visto que sua mangueira tem um diâmetro bem menor, a sonda aspiradora rápida possui, em comparação com a sonda aspiradora padrão, um tempo de resposta e um tempo descontaminação bem menor. O tempo de descontaminação é o tempo que a sonda aspiradora necessita para eliminar todo o hélio que tenha sido capturado por ela quando ela passa por uma descontinuidade e, assim, voltar à sua condição normal de operação.

15.3.3 Sensibilidade do detector de vazamento de hélio com sonda aspiradora

A sensibilidade do detector de vazamento de hélio com sonda aspiradora é determinada:

- pelo teor de hélio no ar atmosférico;
- pelo teor de hélio nas imediações do vazamento;
- pela velocidade de ensaio, ou seja, pela velocidade com que é o bico da sonda aspiradora é deslocado sobre o local do vazamento.

15.3.3.1 Concentração de hélio no ar atmosférico

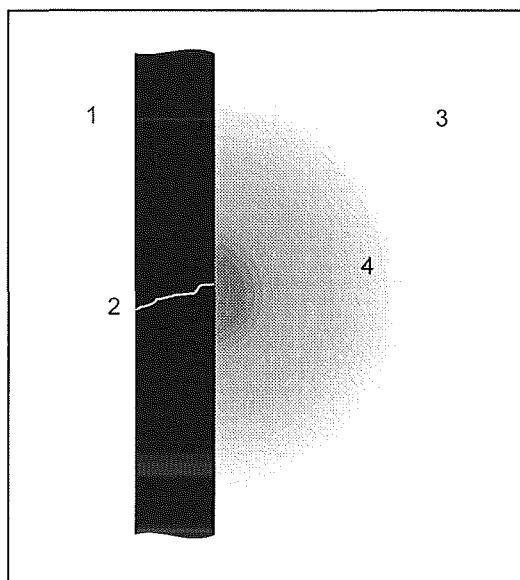
A concentração de hélio em volta de um objeto que vai ser inspecionado é, devido à concentração natural de hélio no ar atmosférico, sempre constante e igual a 0,0005 % ou 5 ppm (partes por milhão). Visto que este é o valor que sempre se lê no mostrador do detector de vazamento de hélio, não é possível medir uma concentração de hélio menor que esta quando ocorre vazamento por uma descontinuidade.

Se diversos objetos de ensaio com vários vazamentos grandes foram inspecionados em um recinto e, por isso mesmo, deixaram escapar muito hélio no local de inspeção, ou se objetos de ensaio foram enchidos com hélio e esvaziados sem que

fossem tomadas as devidas precauções para que o hélio utilizado não contaminasse o ambiente, então o elevado teor de hélio no local de inspeção diminuirá bastante a sensibilidade de um novo ensaio que venha a ser feito. Por isso, antes de começar um ensaio com hélio, é preciso se certificar de que no recinto onde se vai trabalhar não foi feito ensaio com hélio antes. Se foi feito, então deve-se abrir bem as janelas e as portas, de maneira que o ar no local de ensaio possa ser removido. Nos casos mais críticos, a renovação do ar no ambiente pode durar até algumas horas para ocorrer, visto que simplesmente abrir uma janela e uma porta do local de ensaio pode geralmente não ser suficiente. A presença de uma elevada concentração de hélio no ambiente de trabalho pode ser constatada diretamente com o detector de vazamento de hélio. Neste caso, o equipamento não deve ficar muito tempo no ambiente contaminado com hélio, visto que não se consegue remover rapidamente o hélio do interior do detector de vazamento de hélio.

15.3.3.2 Concentração de hélio no vazamento

Se o ar em volta de uma descontinuidade por onde ocorre um vazamento estiver parado, então o hélio que escapa do objeto de ensaio com sobrepressão irá se distribuir uniformemente ao redor dela, conforme mostra a figura 15.4, formando uma nuvem com um gradiente de concentração de hélio. Ao se passar a sonda aspiradora rente ao local do vazamento, ela irá capturar uma quantidade de hélio muito maior do que aquela que capturaria caso ela passasse a uns 5 mm ou 10 mm de distância dele. Assim, pelo fato da sonda aspiradora ter capturado uma grande quantidade de hélio, o valor indicado no mostrador do detector de vazamento de hélio será maior.

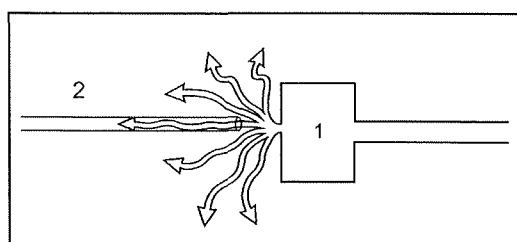


- 1 Lado interno do objeto de ensaio pressurizado com hélio
- 2 Descontinuidade na parede do objeto de ensaio
- 3 Lado da inspeção
- 4 Nuvem de hélio

Figura 15.4:
Gradiente de concentração de hélio em torno de uma descontinuidade.

15.3.3.3 Velocidade de ensaio

Se o inspetor parar a sonda aspiradora por um longo tempo sobre uma descontinuidade, então a sonda irá capturar todo o hélio que escapa através dela, e o conduzirá até o detector de vazamento de hélio, que indicará, então, o valor máximo em seu mostrador. Se, entretanto, a ponta da sonda passar com uma determinada velocidade sobre esta descontinuidade, então ela irá capturar uma quantidade menor de hélio (figura 15.5). Quanto maior for a velocidade com que a sonda aspiradora for movimentada sobre a superfície do objeto de ensaio, menor será a quantidade de hélio que ela irá capturar. O vento no local de ensaio também age da mesma maneira que a velocidade da sonda aspiradora age sobre a quantidade de hélio capturada. Se estiver ventando, a taxa de vazamento indicada pelo detector de vazamento de hélio será menor que aquela indicada quando não há vento no local de ensaio.



- 1 Objeto de ensaio pressurizado com hélio (sobrepressão)
- 2 Sonda aspiradora de hélio

Figura 15.5:

Captura de gás de ensaio pelo bico da sonda aspiradora de hélio [1.1].

15.3.4 Localização de vazamento

15.3.4.1 Preparativos para a localização de vazamento

Antes de se começar um ensaio, o objeto de ensaio deve estar em perfeitas condições de ser inspecionado, ou seja, ele tem que estar limpo, seco e sem resto de óleo. Deve-se remover revestimento, resto de tinta ou ferrugem que por acaso estejam na superfície a ser inspecionada. O enchimento do objeto de ensaio com gás rastreador é realizado utilizando hélio comercial. Se a maior taxa de vazamento admissível não for muito pequena, então pode-se usar uma mistura gasosa para pressurizar o objeto de ensaio. Para isso, porém, o objeto de ensaio deve, primeiramente, ser evacuado. A homogeneidade da mistura gasosa é obtida adicionando-se primeiro hélio e depois o outro gás da mistura gasosa (na maioria das vezes, ar atmosférico), de modo que este último crie uma agitação dentro do objeto de ensaio e, assim, promova a homogeneização da mistura gasosa. O resultado da medida feita com o detector de vazamento de hélio deve levar em consideração a concentração de hélio na mistura gasosa. A sensibilidade do ensaio varia linearmente com a concentração de gás de ensaio na mistura gasosa. Tem-se, por exemplo,

- para 100 % de hélio, uma sensibilidade de 100 %;
- para 10 % de hélio na mistura gasosa, a sensibilidade será de 10 %,

e assim por diante.

Como a diferença de pressão é praticamente a única força motriz para o transporte de gás através de uma descontinuidade, a pressão no interior do objeto de ensaio tem que ser maior que a pressão fora dele. O caso ideal de pressurização é aquele em que a pressão de ensaio é a pressão de trabalho do objeto a ser inspecionado. Por motivos de ordem técnica, geralmente não é possível empregar uma pressão de ensaio maior que a pressão de trabalho do objeto a ser inspecionado. Na prática, normalmente se usa, ao se localizar vazamento ou fazer um ensaio de estanqueidade, uma diferença de pressão de 1 bar.

Ao se iniciar uma inspeção, isto é, antes de pressurizar ou evacuar o objeto de ensaio, é preciso se certificar se o mesmo foi projetado para trabalhar com vácuo ou com sobrepressão, bem como se ele suporta a pressão de ensaio escolhida. Além disso, deve-se observar as normas de segurança relativas ao manuseio e à utilização de garrafas de gás pressurizado (protetor contra impacto da válvula, utilização de redutor de pressão e de válvula de segurança contra pressão elevada adequados, etc.).

Na prática, muitas vezes o objeto de ensaio é submetido a um teste hidrostático, que na realidade é um ensaio de resistência mecânica, antes da localização de vazamento ou do ensaio de estanqueidade. Este procedimento freqüentemente constitui uma fonte de diversos problemas de inspeção. No que diz respeito a vasos de pressão, por exemplo, o fabricante deve fazer um teste hidrostático segundo o regulamento de vasos de pressão [5.1]. Neste caso, existe o perigo de pequenas descontinuidades ($q_L \leq 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$) serem obstruídas durante o teste hidrostático, o que impede que elas sejam detectadas ou localizadas posteriormente. A localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade, neste caso, só poderão ser feitos após o objeto de ensaio ter sido secado adequadamente, isto é, ter sido inteiramente aquecido a uma temperatura igual ou maior que 150°C, e ter permanecido a esta temperatura por um longo tempo antes de ser inspecionado. Se isso não for feito, não se pode excluir a possibilidade de que uma descontinuidade possa estar obstruída durante a localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade. Sob determinadas circunstâncias, esta descontinuidade pode permanecer obstruída temporariamente e, após o objeto ter sido colocado em serviço e ter trabalhado por longo tempo, ela pode se desobstruir de um momento para o outro. A prática tem demonstrado que a possibilidade de isso acontecer raramente é levada em consideração.

15.3.4.2 Inspeção na sonda aspiradora

Para usar um detector de vazamento de hélio com sonda aspiradora, é absolutamente necessário utilizar um vazamento padrão calibrado, de maneira que se possa verificar se a sonda aspiradora está funcionando perfeitamente, bem como para controlar a sua sensibilidade. Se o vazamento padrão tiver um reservatório contendo gás de ensaio, então a calibração da sonda aspiradora só será feita corretamente se todo o hélio que escapa por seu orifício de saída for capturado por

ela. Este procedimento de calibração deve ser repetido seguidamente diversas vezes quando se utiliza sonda aspiradora, visto que o hélio pode eventualmente se acumular em torno do vazamento padrão, de maneira que a taxa de vazamento do vazamento padrão só é indicada corretamente pelo detector de vazamento de hélio após a sonda aspiradora ter sido aproximada e afastada várias vezes de seu orifício de saída.

Quando o detector de vazamento de hélio e a sonda aspiradora estão sendo usados corretamente, a pressão de trabalho no espectrômetro de massa é aproximadamente 10^{-5} mbar. Se a pressão no espectrômetro de massa for bem menor que 10^{-5} mbar, então tem-se um forte indício de que a sonda aspiradora está obstruída. Se o espectrômetro de massa for desligado, e o mostrador do detector de vazamento de hélio for zerado (ajustado para o valor zero), então, após ligar o espectrômetro de massa, o mostrador do detector de vazamento de hélio deverá indicar uma taxa de vazamento de 10^{-8} mbar·ℓ·s⁻¹. A concentração natural de hélio no ar atmosférico é que determina este valor que será indicado no mostrador do equipamento. Este valor, todavia, não é válido para todos os tipos de equipamentos, sendo necessário, por isso, ler no manual de instrução do detector de vazamento de hélio qual o valor que o mostrador indicaria neste caso.

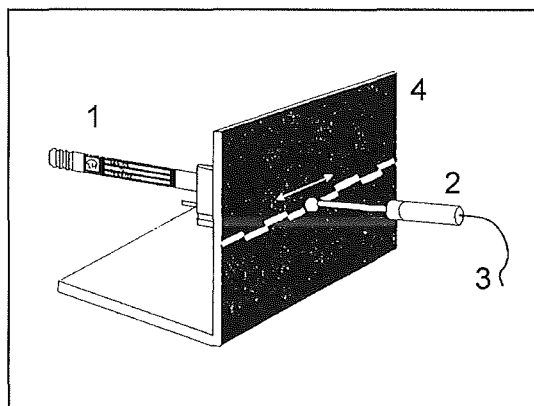
Uma outra maneira de verificar se a sonda aspiradora está funcionando bem, envolve o uso de nitrogênio líquido. Neste caso, coloca-se nitrogênio líquido em um recipiente e aproxima-se o bico da sonda aspiradora da superfície do nitrogênio líquido (espelho de nitrogênio). Se o valor indicado no mostrador do detector de vazamento de hélio diminuir, então tem-se uma prova evidente de que não se tem hélio no nitrogênio líquido que acabou de passar para o estado gasoso.

15.3.4.3 Localização de vazamento com hélio

A menor taxa de vazamento que pode ser medida com uma sonda aspiradora em movimento pode ser determinada com o ensaio de controle dinâmico da sensibilidade. Para isso, primeiramente se escolhe uma determinada velocidade de deslocamento da sonda aspiradora e uma dada distância entre o bico da sonda aspiradora e o orifício de saída de hélio do vazamento padrão. A seguir, sem variar a velocidade e a distância escolhidas, passa-se a sonda aspiradora pelo orifício do vazamento padrão e anota-se a taxa de vazamento de hélio indicada no mostrador do detector de vazamento de hélio. Este procedimento é repetido diversas vezes. Quando o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio for igual à taxa de vazamento de hélio do vazamento padrão, tem-se, então, a velocidade de deslocamento da sonda aspiradora e a distância entre a sonda aspiradora e a superfície do objeto de ensaio que devem ser empregadas em um ensaio, de maneira a ser ter a maior precisão possível na medida da taxa de vazamento. Esta velocidade e distância devem, então, ser escritas no procedimento de ensaio. É possível encontrar no mercado chapas de ensaio para a fixação do vazamento padrão durante a realização do ensaio de controle dinâmico da sensibilidade

(figura 15.6). Conforme pode ser observado nesta figura, na frente da chapa de fixação existe uma escala, cuja função é permitir que a velocidade de deslocamento da sonda aspiradora seja controlada pelo inspetor com a maior precisão possível.

Após a realização do ensaio de controle dinâmico da sensibilidade, seleciona-se, levando-se em consideração a velocidade de deslocamento da sonda aspiradora e a distância entre a sonda aspiradora e a superfície do objeto de ensaio ideais, a faixa de taxa de vazamento mais sensível do detector de vazamento de hélio. A seguir, procede-se, utilizando a sonda aspiradora, a localização de vazamento ou o ensaio de estanqueidade nas regiões suspeitas de terem um vazamento, como nos cordões de solda, nos selos de vedação, etc. Como o gás de ensaio escapa continuamente através de uma descontinuidade, forma-se, em torno dela, uma nuvem de gás de ensaio (figuras 15.4 e 15.7). Assim que traços deste gás de ensaio atingem a sonda aspiradora, o detector de vazamento de hélio começa a emitir um sinal óptico ou acústico (ou ambos). Quando o bico da sonda aspiradora se aproxima mais da descontinuidade, então o sinal se torna mais intenso, atingindo seu valor máximo quando o bico da sonda aspiradora estiver exatamente sobre a descontinuidade.



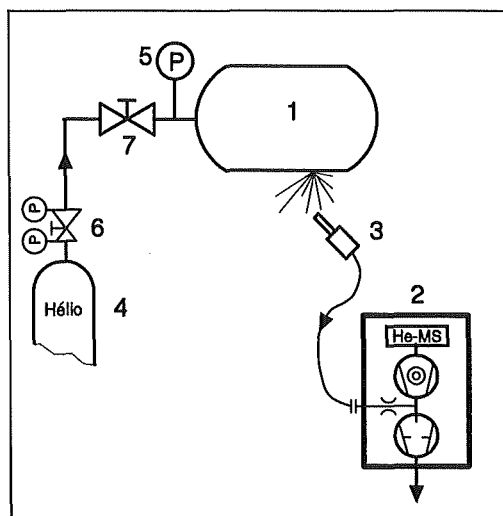
- 1 Vazamento padrão
- 2 Sonda aspiradora de hélio
- 3 Mangueira de conexão com o detector de vazamento de hélio
- 4 Chapa de fixação com escala

Figura 15.6:

Ensaio de controle dinâmico da sensibilidade realizado com uma chapa de fixação do vazamento padrão.

Durante a localização de vazamento com sonda aspiradora rápida, quando o bico da sonda se aproxima de uma descontinuidade muito pequena, ele aspira toda a nuvem de hélio que se encontra em torno dela, podendo induzir a um erro de inspeção. Neste momento, o detector de vazamento de hélio acusa em seu mostrador um sinal máximo muito elevado, que porém decresce continuamente ao longo do tempo, até atingir um valor que corresponde à taxa de vazamento real.

A utilização de uma mangueira longa na conexão da sonda aspiradora com o detector de vazamento de hélio pode atrasar o sinal que o detector de vazamento de hélio emite quando ele detecta um vazamento. Este fato deve ser levado em consideração quando este vazamento tem que ser localizado.



- 1 Objeto de ensaio pressurizado com hélio (sobrepressão)
- 2 Detector de vazamento de hélio
- 3 Sonda aspiradora de hélio
- 4 Garrafa de hélio
- 5 Manômetro
- 6 Válvula redutora de pressão
- 7 Válvula de segurança

Figura 15.7:

Localização de vazamento com hélio segundo o método da sonda aspiradora.

15.3.4.4 Determinação da taxa de vazamento com a sonda aspiradora

Para avaliar o tamanho de uma descontinuidade, deve-se, antes de realizar a inspeção, utilizar um vazamento padrão e comparar a taxa de vazamento de hélio indicada no mostrador do detector de vazamento de hélio ($q_{L,He}$) com aquela que é realmente a taxa de vazamento do vazamento padrão calibrado (q_{TL}). A relação entre $q_{L,He}$ e q_{TL} , que é a perda de sensibilidade que se tem quando se utiliza sonda aspiradora de hélio, permite avaliar a ordem de grandeza da taxa de vazamento de uma descontinuidade encontrada em uma inspeção. Neste caso, porém, as condições de determinação da relação $q_{L,He}/q_{TL}$ devem ser as mesmas que aquelas que são utilizadas quando se localiza vazamentos.

15.3.4.5 Relatório de ensaio

Para poder comparar os resultados de diferentes ensaios, é sempre necessário mencionar no relatório de ensaio qual foi a diferença de pressão entre os lados interno e externo do objeto de ensaio durante a inspeção. Mais ainda, deve-se, também, colocar no relatório de ensaio todos os valores (ou faixa de valores) selecionados no detector de vazamento de hélio e lidos em seu mostrador, a concentração hélio empregada, bem como o tipo de vazamento padrão utilizado e a data da sua última calibração.

15.3.4.6 Equipamentos, instrumentos e acessórios

O ensaio feito com sonda aspiradora de hélio exige o emprego dos seguintes equipamentos, instrumentos e acessórios:

- orifício para evacuação e enchimento do objeto de ensaio com gás de ensaio;
- mangueiras para evacuação e enchimento do objeto de ensaio com gás de ensaio;
- válvula(s) de fechamento e válvula(s) de três direções;
- bombas de vácuo;
- medidor de vácuo (1 a 1000 mbar) e medidor de pressão maior que a atmosférica;
- hélio comercial (fornecido em garrafa de aço);
- protetor antichoque para a válvula da garrafa de hélio;
- ar comprimido ou nitrogênio para o preparo de mistura de gás de ensaio;
- válvula(s) redutora(s) de pressão;
- detector de vazamento de hélio para ensaio com sonda aspiradora (com cabo de força e cabo de extensão);
- sonda aspiradora de hélio;
- vazamento padrão para a calibração do detector de vazamento de hélio;
- vazamento padrão para o ensaio de controle dinâmico da sensibilidade realizado com a sonda aspiradora;
- envoltório de polivinilcloro (PVC) ou de polietileno (PE);
- fita adesiva para prender peças e o envoltório;
- formulários para serem preenchidos e anexados ao relatório de ensaio.

15.4 Ensaio com vácuo

A localização de vazamento e o ensaio de estanqueidade com hélio são feitos na maioria das vezes com o método do vácuo. Para isso, além do objeto de ensaio precisar estar completamente fechado no momento do ensaio, ele precisa ser capaz de suportar a pressão externa (normalmente 1 bar).

Primeiramente, deve-se montar, empregando um dos métodos mostrados na figura 15.2 (centro), um sistema de ensaio adequado ao objeto a ser inspecionado. Neste sistema, a mangueira flexível (de aço inoxidável, de preferência) que liga o objeto de ensaio ao detector de vazamento de hélio e os selos de vedação (O-ring de elastômero) devem estar em perfeitas condições. A mangueira que une o detector de vazamento de hélio com o objeto de ensaio deve ser a mais curta possível, e seu diâmetro não pode ser menor que o diâmetro do flange de entrada do detector de vazamento de hélio. Antes de começar a evacuar o objeto de ensaio, é interessante calcular, utilizando o volume do objeto de ensaio e a capacidade de sucção das bombas de vácuo empregadas, o tempo que será necessário para atingir a pressão de ensaio. Se a diminuição da pressão no interior do objeto de

ensaio em função do tempo, verificada na curva desenhada pelo registrador gráfico x-t, for muito diferente daquela que é esperada, ou seja, se o tempo de evacuação real for muito maior que o calculado, então tem-se um forte indício de que o objeto de ensaio está com um vazamento muito grande.

Quando a pressão no objeto de ensaio for menor que a maior pressão de trabalho admissível do espectrômetro de massa, então este instrumento já pode ser ligado para fazer o ensaio. Antes disso, porém, recomenda-se que se meça com um vazamento padrão o tempo de resposta do sistema de ensaio montado. A determinação do tempo de resposta é muito importante, especialmente no caso de objeto de ensaio de grande volume, bem como no caso de um objeto de ensaio que, devido à sua geometria complexa, ou por ter diversos componentes ou estruturas fixos em sua superfície, não permite o cálculo das constantes de tempo. Se a maior taxa de vazamento admissível do objeto de ensaio for muito pequena, então o tempo de resposta deve ser medido de maneira semelhante àquela da inspeção, de modo a evitar que se tenha um ruído de fundo de hélio que demore para ser eliminado.

15.4.1 Localização de vazamento

A localização de vazamento é feita soltando um jato fino de gás de ensaio sobre os locais suspeitos, como flanges, juntas soldadas, etc. Durante esta inspeção, não pode haver corrente de ar no ambiente de ensaio, causada, por exemplo, por portas e janelas abertas. O jateamento do local a ser inspecionado com gás de ensaio deve ser feito no sentido contrário ao do vento, quando se faz uma inspeção a céu aberto e existe forte movimentação do ar atmosférico. O ajuste da faixa de medida do detector de vazamento de hélio é feito de acordo com a maior taxa de vazamento admissível.

15.4.2 Determinação da taxa de vazamento

Ao se localizar uma descontinuidade, e se a sua taxa de vazamento tiver que ser medida, então coloca-se sobre ela um envoltório de plástico, que é fixado na superfície do objeto de ensaio com fita adesiva. A seguir, injeta-se gás de ensaio dentro do envoltório e espera-se um determinado tempo, até que o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio fique constante. Desta maneira, determina-se a taxa de vazamento da descontinuidade localizada. Se o método de ensaio for o de fluxo parcial, então é preciso utilizar o fator de calibração no cálculo da taxa de vazamento. Se o objeto de ensaio for totalmente envolvido com uma folha de plástico com gás de ensaio embaixo dela, então tem-se a taxa de vazamento integral, que corresponde à soma das taxas de vazamento de todas as descontinuidades que ele tiver.

15.4.3 Faixa de aplicação

As taxas de vazamento de hélio que podem ser medidas com os métodos do vácuo descritos acima abrangem uma faixa de valores de pouco mais de sete ordens de grandeza (10^{-10} mbar·ℓ·s⁻¹ a 10^{-3} mbar·ℓ·s⁻¹). A maioria das taxas de vazamento que são medidas na prática com estes métodos, entretanto, se situa entre 10^{-8} mbar·ℓ·s⁻¹ e 10^{-5} mbar·ℓ·s⁻¹. Taxas de vazamento menores que 10^{-10} mbar·ℓ·s⁻¹ são medidas com o método da acumulação, que não será abordado aqui; as maiores que 10^{-3} mbar·ℓ·s⁻¹, por outro lado, podem ser determinadas com relativa facilidade, medindo-se a pressão total (método de aumento da pressão).

Geralmente se tem problema de oscilação de ruído de fundo quando se mede taxa de vazamento muito pequena ($\leq 10^{-8}$ mbar·ℓ·s⁻¹), especialmente quando o objeto de ensaio é muito grande. Esta oscilação poder ser causada por degasagem superficial, evaporação de líquido, condensação de vapor ou permeação. Por isso, a limpeza do objeto de ensaio é um fator muito importante para que a inspeção possa ser realizada com sucesso. No que diz respeito à permeação, que deve ser a menor possível, deve-se utilizar somente selo (O-ring) de elastômero de boa qualidade. Com o objetivo de manter o ruído de fundo no ambiente de trabalho em níveis bem reduzidos, é muito importante não soltar um jato de hélio muito forte. Se a maior taxa de vazamento admissível for muito pequena, então deve-se empregar anel de metal como selo de vedação nos flanges do objeto de ensaio.

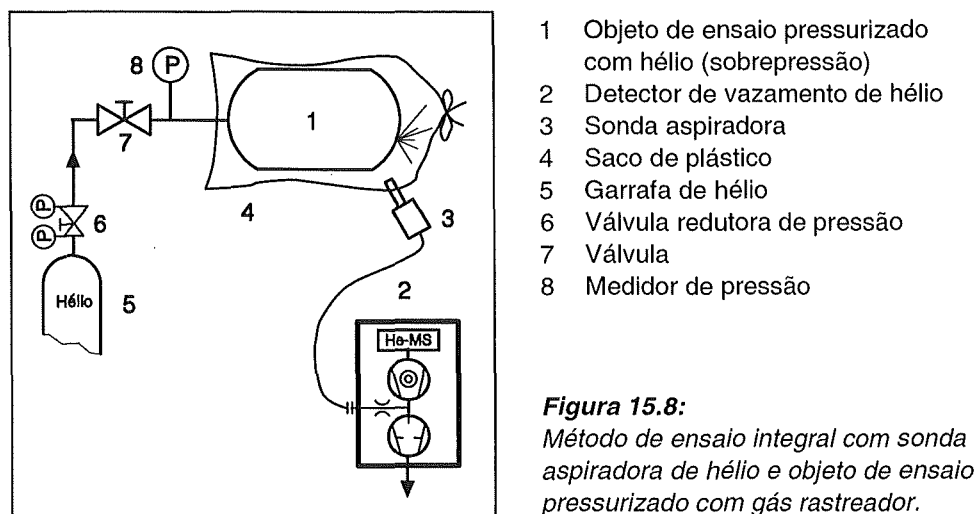
Se o objeto de ensaio for inspecionado com um método que envolva a realização de vácuo, então, obviamente, ele precisará ter resistência mecânica suficiente para poder suportar a pressão externa que atuará sobre sua parede. Caso o objeto de ensaio seja um recipiente de vidro, então é preciso tomar muito cuidado com o perigo de implosão e, conseqüentemente, com os cacos de vidro que ela gera, visto que eles podem causar graves ferimentos nas pessoas. Para evitar que isto ocorra, deve-se utilizar uma grade ou malha de proteção de aço em volta do objeto de ensaio.

15.5 Ensaio integral com sonda aspiradora

15.5.1 Método do envoltório

O método do envoltório, também conhecido como método da acumulação, é um ensaio de estanqueidade no qual, dependendo da extensão da inspeção, um objeto de ensaio pressurizado com hélio é parcial ou completamente encoberto com um envoltório de plástico fechado (figura 15.8). Se o objeto de ensaio tiver um ou mais vazamentos, então a concentração de hélio no espaço entre o envoltório e o objeto de ensaio (volume livre do envoltório) vai aumentando gradualmente. A variação da concentração de gás de ensaio sob o envoltório ao longo do tempo pode ser determinada com o detector de vazamento de hélio, bastando para isso introduzir a ponta da sonda aspiradora de hélio sob o envoltório. A sonda aspiradora funcionará, então, como um instrumento de medida da pressão parcial ou da concentração do

gás de ensaio. O local do vazamento, contudo, não pode ser determinado com este método de ensaio integral.



15.5.2 Leitura do valor de medida no mostrador do detector de vazamento de hélio

Os detectores de vazamento de hélio, devido à sua concepção, normalmente são equipamentos destinados à determinação da taxa de vazamento empregando o método do vácuo. Em muitos detectores de vazamento de hélio a taxa de vazamento de um objeto de ensaio pode ser lida diretamente em $\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ em um mostrador digital. O valor lido no mostrador do equipamento corresponde à taxa de vazamento real se o detector de vazamento foi calibrado antes da inspeção. Se o ensaio é realizado segundo o método do envoltório com sonda aspiradora, então o mostrador do detector de vazamento de hélio não fornece a taxa de vazamento e, sim, após ter sido calibrado corretamente, a concentração de hélio sob o envoltório.

Os equipamentos antigos têm mostrador analógico, em vez de digital, que possui um comutador de faixa de medida de diversas ordens de grandeza. Se for atribuído um fator multiplicador a cada trecho desta faixa de medida, então a taxa de vazamento do objeto de ensaio pode ser determinada em partes de escala. Neste caso, o trecho da faixa de medida mais sensível sempre terá o fator multiplicador 1. O trecho seguinte receberá o fator multiplicador 10, o seguinte 100, e assim por diante. A calibração e a determinação da sensibilidade do detector de vazamento de hélio, neste caso, também são feitas em partes de escala.

15.5.3 Calibração do sistema de ensaio

Durante o ensaio com o método da acumulação, a concentração de hélio sob o envoltório varia ao longo do tempo. Para medir esta variação de concentração, é preciso calibrar o detector de vazamento de hélio antes de começar o ensaio. Essa calibração pode ser feita utilizando o teor natural de hélio no ar atmosférico (≈ 5 ppm). Ao se medir o teor natural de hélio no ar atmosférico com o detector de vazamento de hélio, o valor lido no mostrador do equipamento é A_B . Se a conexão da sonda aspiradora de hélio com o detector de vazamento de hélio for fechada, então o seu mostrador irá indicar o valor do ruído de fundo (A_u). Estes dois valores lidos no mostrador do detector de vazamento de hélio são, então, utilizando a equação 15.1, empregados na determinação da sensibilidade do sistema de ensaio.

$$S_{\text{ens}} = \frac{C_{\text{He}}}{A_B - A_u} \quad (\text{equação 15.1})$$

onde

- S_{ens} é a sensibilidade do sistema de ensaio;
- C_{He} é a concentração natural de hélio no ar atmosférico (≈ 5 ppm);
- A_B é o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio quando se tem a concentração natural de hélio no ar atmosférico (≈ 5 ppm);
- A_u é o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio relativo ao ruído de fundo.

A concentração natural de hélio no ar atmosférico pode ser empregada na calibração do sistema de ensaio somente quando se tem certeza de que o local de ensaio não está contaminado com hélio. Se um objeto de ensaio contendo hélio foi esvaziado em um recinto, ou se ele foi enchido com hélio ou inspecionado com pistola de hélio neste recinto, então não se pode utilizar a concentração natural de hélio no ar atmosférico presente no ambiente de ensaio para calibrar o detector de vazamento de hélio que será usado na inspeção de um outro objeto. Neste caso, então, para fazer a calibragem, deve-se usar uma sonda aspiradora com uma mangueira longa e colocar o bico dela para fora da janela do recinto onde o ensaio será realizado. Desta maneira, o ar que a sonda irá aspirar não estará contaminado e sua concentração de hélio será de 5 ppm.

Se houver dúvida quanto à concentração de hélio no local onde será feita uma inspeção, então o detector de vazamento de hélio pode ser calibrado com uma mistura gasosa com concentração de hélio bem conhecida e especialmente preparada para esta finalidade. Com esse objetivo, utiliza-se de um recipiente fechado e com um volume grande (10 ℓ, por exemplo) e conhecido. Primeiramente, faz-se a medida zero com a sonda aspirando o ar presente no local de ensaio. Após isso, prepara-se uma pequena injeção com hélio puro em seu interior. Para isso, é preciso introduzir hélio na injeção e retirá-lo várias vezes, de maneira a se certificar que haverá 100 % de hélio na injeção. A seguir, fecha-se, com uma fita adesiva, a

abertura do recipiente onde será feita a mistura gasosa, e espeta-se a agulha da injeção nesta fita. Após injetar 1 cm^3 de gás, espera-se de cinco a dez minutos, de maneira que o hélio se distribua uniformemente dentro do recipiente. A concentração de hélio dentro do recipiente após se injetar 1 cm^3 de hélio é calculada utilizando a equação 15.2. Neste cálculo, porém, a quantidade de hélio presente no local de ensaio (ruído de fundo) é desprezada.

$$c_{\text{He}} = \frac{V_{\text{He}}}{V_{\text{rec}}} = \frac{1}{10\,000} = 100 \text{ ppm} \quad (\text{equação 15.2})$$

onde

- c_{He} é a concentração de hélio no interior do recipiente após se injetar 1 cm^3 de hélio, em ppm;
- V_{He} é o volume de hélio injetado no recipiente, em $[\text{cm}^3]$;
- V_{rec} é o volume do recipiente, em $[\text{cm}^3]$.

Após a homogeneização da mistura gasosa no recipiente, a ponta da sonda aspiradora de hélio é introduzida na sua abertura através da fita adesiva, quando é feita nova medida com o detector de vazamento de hélio. Com base nos valores das duas medidas feitas com a sonda aspiradora, bem como conhecendo a concentração de gás de ensaio na mistura gasosa, determina-se, utilizando a equação 15.3, a sensibilidade do sistema de ensaio.

$$S_{\text{ens}} = \frac{c_{\text{He}}}{A_2 - A_1} \quad (\text{equação 15.3})$$

onde

- S_{ens} é a sensibilidade do sistema de ensaio;
- c_{He} é a concentração de hélio no interior do recipiente após se introduzir 1 cm^3 de hélio;
- A_2 é o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio após a homogeneização da mistura de gás no recipiente;
- A_1 é o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio quando se faz a medida do valor zero.

15.5.4 Realização de ensaio

15.5.4.1 Preparativos para o ensaio

Dependendo de seu tamanho, o objeto de ensaio pode ser parcial ou totalmente encoberto com um envoltório durante a sua inspeção. Em qualquer um desses dois casos, porém, é muito importante que o volume livre sob o envoltório, que pode ser calculado matematicamente ou avaliado aproximadamente, seja o menor possível. Além disso, também é muito importante que o envoltório colocado sobre o cordão de solda esteja sempre bem vedado em suas bordas. O envoltório utilizado nos ensaios

de uma maneira geral pode ser de polivinilcloreto (PVC) ou de polietileno (PE), e a sua fixação sobre o objeto de ensaio pode ser feita com uma fita adesiva comum. Existe no mercado uma fita (envoltório) especial, destinada à inspeção de cordão de solda e de flange, que já vem com cola em suas bordas.

15.5.4.2 Determinação da taxa de vazamento

A taxa de vazamento através de uma descontinuidade é calculada utilizando a equação 15.4.

$$q_L = \frac{\Delta p \cdot V}{\Delta t} \quad (\text{equação 15.4})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento;
- Δp é a variação de pressão;
- V é o volume do objeto de ensaio;
- Δt é o tempo de ensaio.

Quando se faz ensaio utilizando envoltório e hélio como gás rastreador, a diferença de pressão utilizada na equação 15.4 é determinada pela variação de pressão parcial do hélio (equação 15.5). O volume empregado na equação 15.4 passa a ser, nesse caso, o volume livre do envoltório. Das equações 15.4 e 15.5, obtém-se, então, para o método de ensaio do envoltório, e levando-se em consideração a concentração de hélio dentro do objeto de ensaio, a equação 15.6.

$$\Delta p_{He} = \Delta c_{He} \cdot p_{amb} \quad (\text{equação 15.5})$$

onde

- Δp_{He} é a variação de pressão parcial do hélio;
- Δc_{He} é a variação de concentração de hélio;
- p_{amb} é a pressão ambiente.

$$q_L = \frac{\Delta p_{He} \cdot V_{env}}{\Delta t} = \frac{\Delta c_{He} \cdot p_{amb} \cdot V_{env}}{\Delta t \cdot c_{He}} \quad (\text{equação 15.6})$$

onde

- q_L é a taxa de vazamento;
- Δp_{He} é a variação da pressão parcial do hélio sob o envoltório;
- V_{env} é o volume livre do envoltório;
- Δt é o tempo de ensaio;
- Δc_{He} é a variação de concentração de hélio sob o envoltório;
- p_{amb} é a pressão ambiente;
- c_{He} é a concentração de hélio dentro do objeto de ensaio.

Após determinar o volume livre do envoltório, introduz-se a ponta da sonda aspiradora dentro dele e mede-se o valor zero. O valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio é anotado, para ser utilizado posteriormente no cálculo da variação da concentração de hélio. A seguir, enche-se o objeto de ensaio com hélio (ou mistura gasosa) até se atingir a pressão de ensaio desejada. Após transcorrido o tempo mínimo de ensaio, que é calculado com o auxílio de fórmulas matemáticas, a ponta da sonda aspiradora é introduzida novamente sob o envoltório, quando é feita uma segunda leitura do valor da pressão parcial do hélio, sendo o valor lido anotado. Se o objeto de ensaio tiver um vazamento na região que está sendo inspecionada, então a concentração de hélio sob o envoltório irá aumentar. Os valores obtidos na primeira (valor zero) e na segunda leitura, juntamente com a sensibilidade de medida do sistema de ensaio, são empregados no cálculo da variação da concentração de gás de ensaio sob o envoltório, conforme mostra a equação 15.7.

$$\Delta C_{\text{He}} = (A_2 - A_1) \cdot S_{\text{ens}} \quad (\text{equação 15.7})$$

onde

- ΔC_{He} é a variação da concentração de hélio sob o envoltório;
- A_2 é o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio após transcorrido o tempo mínimo de ensaio;
- A_1 é o valor lido no mostrador do detector de vazamento de hélio no início do ensaio (valor zero);
- S_{ens} é a sensibilidade do sistema de ensaio.

Conhecendo-se a variação da concentração de hélio sob o envoltório, determina-se, então, a taxa de vazamento utilizando a equação 15.6.

O tempo mínimo de ensaio, que depende da estanqueidade especificada para o objeto de ensaio, ou seja, da maior taxa de vazamento admissível, bem como do volume livre do envoltório, da menor variação de concentração de hélio que pode ser medida com o detector de vazamento de hélio e da concentração de hélio usada no ensaio, pode ser calculado utilizando a equação 15.8, ou obtido no nomograma apresentado na figura 15.9.

$$\Delta t_{\text{mín}} = \frac{\Delta C_{\text{He,mín}} \cdot p_{\text{amb}} \cdot V_{\text{env}}}{q_{\text{L,adm}} \cdot C_{\text{He}}} \quad (\text{equação 15.8})$$

onde

- $\Delta t_{\text{mín}}$ é o tempo mínimo de ensaio;
- $\Delta C_{\text{He,mín}}$ é a menor variação de concentração de hélio sob o envoltório que pode ser medida com o detector de vazamento de hélio;
- p_{amb} é a pressão ambiente;
- V_{env} é o volume livre do envoltório;
- $q_{\text{L,adm}}$ é a maior taxa de vazamento admissível;
- C_{He} é a concentração de hélio dentro do objeto de ensaio.

Os tempos mínimos de ensaio obtidos no nomograma apresentado na figura 15.9 são válidos para uma variação de concentração de hélio detectável de 5 ppm e para uma concentração de hélio dentro do objeto de ensaio de 100 % ($c_{He} = 1$).

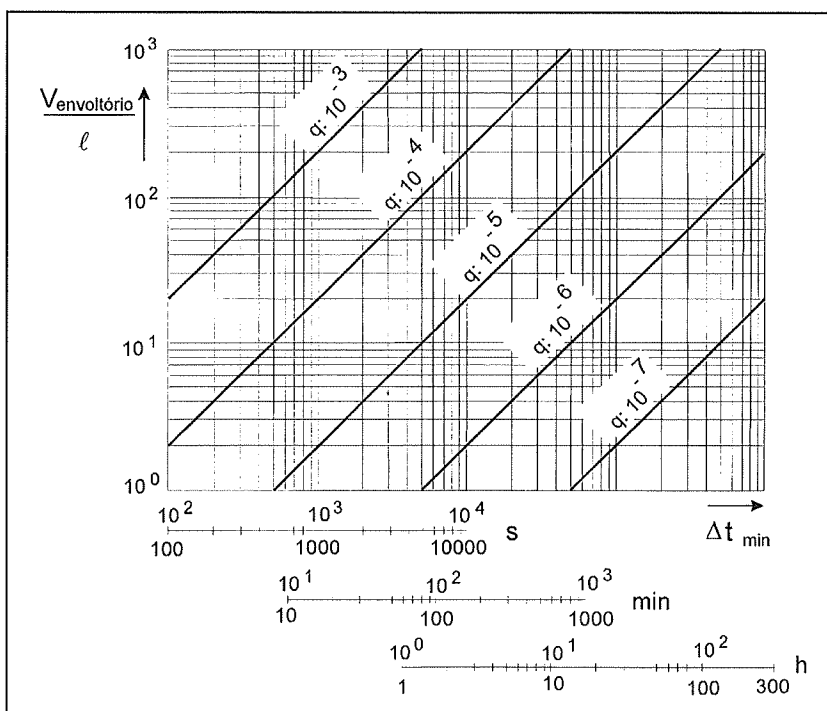


Figura 15.9: Nomograma para a determinação do tempo mínimo de ensaio com o método do envoltório com hélio.

15.5.5 Erro de medida

O procedimento de ensaio descrito no item anterior geralmente não permite medir com precisão a taxa de vazamento de hélio integral. Esta desvantagem se deve ao fato do volume livre do envoltório ter que ser conhecido. Muitas vezes, porém, este volume é difícil de ser calculado ou estimado, visto que freqüentemente o objeto de ensaio tem diversos componentes ou estruturas fixos em sua superfície. Além deste motivo, existe um outro igualmente muito importante: o hélio pode se distribuir irregularmente sob o envoltório. Como a sonda aspiradora é introduzida sob o envoltório em um local aleatório, pode ser que este local esteja muito próximo de um vazamento, o que fará com que a concentração de hélio medida seja muito elevada. Pode ocorrer, também, o contrário, ou seja, que ela seja introduzida em um local bastante afastado do vazamento, quando a concentração de hélio medida será muito baixa. Como a difusão do hélio no ar à pressão atmosférica não é tão rápida

como muitas pessoas imaginam ser, é muito importante misturá-lo com o ar atmosférico antes de medir a sua concentração sacudindo o envoltório, por exemplo, ou, caso o envoltório seja grande o suficiente e haja espaço para tal, colocando um ventilador dentro dele. Para controlar melhor a distribuição do hélio sob o envoltório, é necessário introduzir a ponta da sonda aspiradora e fazer medidas em diferentes locais. Se os valores medidos forem parecidos, então tem-se a certeza de que o hélio se distribuiu uniformemente sob o envoltório. Além disso, o volume livre do envoltório deve ser o menor possível, pois o aumento da concentração de hélio, decorrente de um vazamento que porventura possa existir no objeto de ensaio, pode ser detectado mais rapidamente em um volume pequeno do que em um grande.

15.5.6 Relatório de ensaio

Para poder comparar os resultados de diferentes ensaios, é sempre necessário mencionar no relatório de ensaio qual foi a diferença de pressão entre os lados interno e externo do objeto de ensaio durante a inspeção. Mais ainda, deve-se, também, colocar no relatório de ensaio todos os valores (ou faixa de valores) selecionados no detector de vazamento de hélio e lidos em seu mostrador, a concentração hélio empregada, bem como o tipo de vazamento padrão utilizado e a data da sua última calibração.

15.6 Ensaio bombing

15.6.1 Procedimento de ensaio

Todos os métodos de ensaio vistos neste capítulo partem da premissa de que o objeto de ensaio possui um orifício através da qual pode ser introduzido gás de ensaio nele, ou tem um flange para a sua conexão com o detector de vazamento de hélio. No caso de objeto hermeticamente fechado, porém, não se tem nenhuma destas duas possibilidades. Este objeto é, por isso, enchido com gás de ensaio durante o processo de fabricação ou, conforme mostrado na figura 15.2, dentro de uma câmara de pressurização. Neste último caso, o hélio penetra no objeto de ensaio através de uma descontinuidade que possivelmente possa existir. O método de ensaio que envolve o emprego de câmara de pressurização é denominado ensaio bombing ou "back-pressurising", e é muito empregado na inspeção de componentes eletrônicos, como transistores e comutadores integrados.

O ensaio bombing é dividido em três diferentes etapas:

- uma inicial, na qual o hélio é introduzido no objeto de ensaio em uma câmara de pressurização, com gás de ensaio sob elevada pressão (pressão bombing, p_B), durante um determinado tempo (tempo bombing, t_B);
- uma intermediária, na qual o objeto de ensaio é retirado da câmara de pressurização e fica exposto ao ar atmosférico por um determinado intervalo

de tempo (tempo de espera, t_{esp}) antes de ser introduzido na câmara de vácuo;

- e uma final, na qual o objeto de ensaio é introduzido em uma câmara de vácuo, conectada com um detector de vazamento de hélio, quando é submetido a um ensaio de estanqueidade integral.

É muito importante que todos os parâmetros de ensaio destas três etapas (pressão e tempo bombing, bem como tempo de espera) sejam mantidos constantes, de maneira que se possa comparar resultados de diversos ensaios. A figura 15.10 mostra a variação da taxa de vazamento medida com o detector de vazamento de hélio durante um ensaio bombing em função da taxa de vazamento real (tamanho da descontinuidade) do objeto de ensaio.

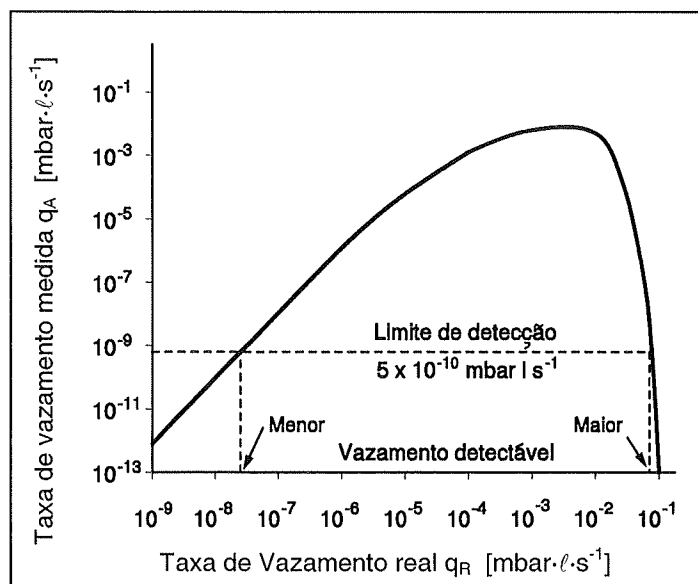


Figura 15.10: Variação da taxa de vazamento medida com o detector de vazamento de hélio durante o ensaio bombing (q_A) em função da taxa de vazamento real (q_R) de um objeto de ensaio de 1 cm³ de volume, para uma pressão bombing de 8 bar, um tempo bombing de 20 h e um tempo de espera de 5 min.

A curva apresentada na figura 15.10 é válida para um conjunto de parâmetros de ensaio (pressão bombing, tempo bombing, tempo de espera e volume do objeto de ensaio). A queda observada nesta curva quando se tem uma taxa de vazamento real elevada se deve ao tempo que o objeto de ensaio fica exposto ao ar atmosférico antes de ser introduzido na câmara de vácuo, visto que, durante este tempo, ele deixa escapar uma determinada quantidade de gás de ensaio. Neste caso, apesar

da taxa de vazamento real do objeto de ensaio ser elevada, a taxa de vazamento medida pelo detector de vazamento de hélio é bem pequena. Em vista disso, o limite superior da faixa de taxas de vazamento que são medidas no ensaio bombing é definido pelo tempo de espera entre as etapas de pressurização e de evacuação; o limite inferior, por outro lado, é determinado pela menor taxa de vazamento que pode ser medida com o detector de vazamento de hélio.

15.6.2 Equipamentos, instrumentos e acessórios

Para fazer o ensaio bombing, é necessária uma câmara de pressurização resistente à pressão bombing, que geralmente varia entre 5 bar e 30 bar, e que possa acomodar um elevado número de objetos de ensaio. Em alguns casos é preciso também um aquecedor para acelerar a dessorção do hélio adsorvido pela superfície externa do objeto de ensaio durante o tempo de espera entre as etapas de pressurização e de evacuação.

A taxa de vazamento é medida com um detector de vazamento de hélio normalmente encontrado no mercado, conectado a um recipiente que possa ser evacuado (câmara de vácuo). Para reduzir o tempo de ensaio, é interessante utilizar uma câmara de vácuo que tenha a mesma geometria do objeto de ensaio e um volume um pouco maior que o dele. Assim, é possível reduzir bastante o tempo de evacuação e as constantes de tempo.

15.6.3 Determinação da taxa de vazamento

Muitos semicondutores apresentam uma taxa de vazamento (q_R) muito semelhante àquela medida no ensaio bombing (q_A), sendo por isso este ensaio ideal para a inspeção destes componentes eletrônicos. A taxa de vazamento de um objeto medida com o detector de vazamento de hélio durante o ensaio bombing pode ser calculada utilizando a equação 15.9. Esta equação, porém, só é válida se o escoamento do gás de ensaio através da descontinuidade por onde ocorre o vazamento for molecular, o que é realmente o que ocorre quando a taxa de vazamento real do objeto de ensaio é menor que $10^{-6} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$.

$$q_A = p_B \cdot C_L \cdot \left(1 - e^{-\frac{C_L \cdot t_B}{V}} \right) \cdot e^{-\frac{C_L \cdot t_{\text{esp}}}{V}} \quad (\text{equação 15.9})$$

onde

- q_A é a taxa de vazamento medida com o detector de vazamento de hélio;
- p_B é a pressão bombing;
- C_L é a condutância da descontinuidade por onde ocorre o vazamento;
- t_B é o tempo bombing;
- V é o volume interno livre do objeto de ensaio;
- t_{esp} é o tempo de espera.

A equação 15.9, contudo, não pode ser dissociada da condutância da descontinuidade por onde ocorre o vazamento (C_L da taxa de vazamento real), que é determinada através de iteração (por tentativa e cálculo aproximado). Por isso, no procedimento de ensaio devem estar especificados a pressão bombing, o tempo bombing, o tempo de espera e a maior taxa de vazamento que pode ser medida com o detector de vazamento de hélio empregado.

O produto da pressão bombing pelo tempo bombing ($p_B \cdot t_B$), denominado produto bombing e calculado utilizando a equação 15.10, é um parâmetro de ensaio muito importante.

$$p_B \cdot t_B = \frac{q_{A,min} \cdot V}{(q_R / p_{amb})^2} \quad (\text{equação 15.10})$$

onde

- p_B é a pressão bombing;
- t_B é o tempo bombing;
- $q_{A,min}$ é a menor taxa de vazamento que pode ser medida com o detector de vazamento de hélio;
- V é o volume interno livre do objeto de ensaio;
- q_R é a taxa de vazamento real do objeto de ensaio;
- p_{amb} é a pressão ambiente ($\approx 1000 \text{ mbar} = 10^5 \text{ Pa}$).

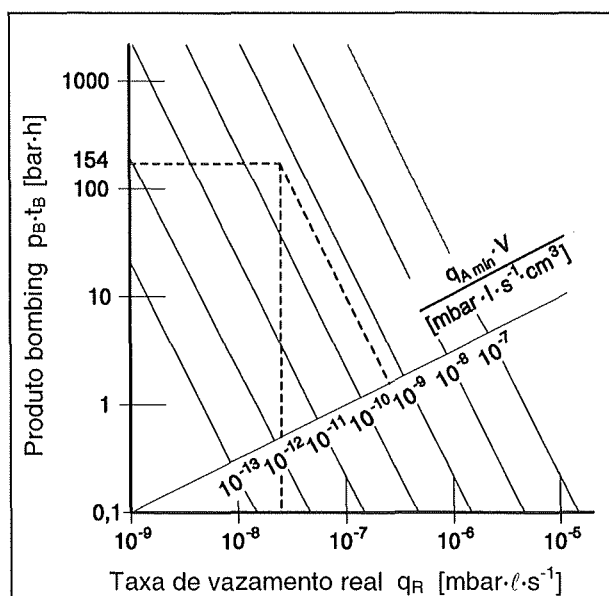
A menor taxa de vazamento que pode ser medida depende não somente do detector de vazamento de hélio empregado, como também do ruído de fundo de gás de ensaio no local de inspeção, que, por sua vez, é determinado pela quantidade de gás de ensaio dessorvida pela superfície do objeto de ensaio.

Para uma pressão bombing de 5 bar a 30 bar, devendo o objeto de ensaio neste caso, naturalmente, ter uma resistência mecânica que suporte tal pressão, o tempo bombing é geralmente de algumas horas (figura 15.11). Quanto maior for o volume interno livre do objeto de ensaio, maior deverá ser o produto bombing. Este fato restringe o emprego do ensaio bombing à inspeção de objeto com volume menor que cerca de 10 cm^3 , pois se o volume for maior, o tempo bombing tornaria o ensaio antieconômico.

O exemplo, apresentado a seguir, ilustra a metodologia de determinação dos parâmetros de um ensaio bombing.

Exemplo

A maior taxa de vazamento admissível de um transistor de 1 cm^3 de volume interno livre é $3 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. Supondo que este transistor suporte uma pressão de no

Dados do exemplo:

Sensibilidade do detector de vazamento de He:

$$q_{A, \min} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Volume do objeto de ensaio:

$$V = 1 \text{ cm}^3$$

Taxa de vazamento real:

$$q_R = 3 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\Rightarrow p_B \cdot t_B = 154 \text{ bar} \cdot \text{h}$$

Figura 15.11: Variação do produto bombing ($p_B \cdot t_B$) necessário para a realização do ensaio bombing em função da taxa de vazamento (real) do objeto de ensaio.

máximo 8 bar, e que a menor taxa de vazamento que se pode medir com o detector de vazamento de hélio a ser utilizado é $5 \cdot 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, qual é o tempo que este transistor deverá permanecer na câmara de pressurização? Qual a maior taxa de vazamento que pode ser medida no ensaio bombing se o tempo que o transistor permanece exposto ao ar atmosférico entre as etapas de pressurização e de evacuação for de 5 minutos?

Solução

São conhecidos:

- $V = 1 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \ell$;
- $q_R = 3 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$;
- $q_{A, \min} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$;
- $p_{\text{amb}} = 1 \text{ bar} = 10^3 \text{ mbar}$;
- $t_{\text{esp}} = 5 \text{ min}$;

e deseja-se calcular t_B .

Primeiramente, o produto bombing pode ser calculado utilizando a equação 15.10, conforme mostrado a seguir.

$$p_B \cdot t_B = \frac{q_{A,\min} \cdot V}{(q_R / p_{\text{amb}})^2} = \frac{5 \cdot 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-3} \ell}{(3 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} / 10^3 \text{ mbar})^2}$$

$$p_B \cdot t_B = 154 \text{ bar} \cdot \text{h}$$

Este produto bombing também pode ser obtido diretamente da figura 15.11. Nesta figura, para determinar o produto bombing, traça-se uma reta perpendicular ao eixo das abcissas partindo do valor $q_R = 3 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, e uma reta perpendicular à reta $(q_{A,\min} \cdot V)$ partindo do valor $5 \cdot 10^{-10} [\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}]$, até elas se encontrarem. A seguir, traça-se uma reta perpendicular ao eixo das ordenadas partindo deste ponto de encontro. Esta última reta irá interceptar o eixo das ordenadas no valor 154 bar·h, que é o produto bombing que se deseja calcular.

Como a maior pressão que o transistor suporta é 8 bar, então ele deverá ficar cerca de 20 h dentro da câmara de pressurização.

$$t_B = \frac{154 \text{ bar} \cdot \text{h}}{8 \text{ bar}} \approx 20 \text{ h}$$

O produto bombing varia linearmente com a menor taxa de vazamento detectável. Se a menor taxa de vazamento que pode ser medida pelo detector de vazamento de hélio fosse $5 \cdot 10^{-9} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, ao invés de $5 \cdot 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, então o tempo bombing seria de 8 dias, o que demonstra claramente a importância do emprego de um equipamento de elevada sensibilidade na realização do ensaio bombing.

Para determinar a maior taxa de vazamento ($q_{R,\text{máx}}$) que pode ser medida, calcula-se as taxas de vazamento medidas em função das taxas de vazamento reais, e obtém-se a curva apresentada na figura 15.11. Nesta curva, para $q_{A,\text{mín}}$, tem-se a maior taxa de vazamento que pode ser medida, que é, neste caso, aproximadamente $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. Como a reta da figura 15.11 é ambígua, eventualmente é necessário utilizar outro método de ensaio para detectar vazamentos grandes.

Exemplos de Cálculo

- 16.1 Introdução
- 16.2 Cálculo do diâmetro de uma descontinuidade capilar
- 16.3 Conversão de taxa de vazamento expressa em $\text{g}\cdot\text{ano}^{-1}$ para taxa de vazamento expressa $\text{mbar}\cdot\ell\cdot\text{s}^{-1}$
- 16.4 Método do envoltório com uso de sonda aspiradora
- 16.5 Conversão de taxa de vazamento de líquido em taxa de vazamento de gás



[L]

16 Exemplos de cálculo

16.1 Introdução

A detecção de vazamento e o ensaio de estanqueidade muitas vezes exigem a realização de vários cálculos, em função dos diferentes métodos e técnicas de ensaio existentes, bem como dos diversos objetos de ensaio que devem ser inspecionados. A realização destes cálculos é muito importante, visto que eles determinam a confiabilidade do resultado de inspeção obtido e a aplicabilidade econômica e técnica de um determinado método ou técnica de ensaio. Em vista disso, bem como com o objetivo de familiarizar o leitor com a execução de cálculos e com os valores obtidos, são apresentados neste capítulo alguns exemplos importantes de cálculo realizado na detecção de vazamento e no ensaio de estanqueidade.

16.2 Cálculo do diâmetro de uma descontinuidade capilar

O cálculo do diâmetro de uma descontinuidade capilar fictícia e ideal (tubo reto com seção transversal circular e cujo comprimento é maior que o seu diâmetro), através da qual ocorre um vazamento, pode ser efetuado utilizando-se a equação 16.1, que define as condições de escoamento laminar. Raramente há necessidade de se determinar o diâmetro da descontinuidade quando se realiza ensaios de detecção de vazamento e de estanqueidade, porém é interessante fazer os cálculos que serão apresentados no exemplo a seguir, de maneira que se tenha uma noção das dimensões da descontinuidade capilar.

$$q_{L, \text{lam}} = \frac{\pi \cdot r^4}{16 \cdot \eta \cdot \ell} \cdot (p_1^2 - p_2^2) \quad (\text{equação 16.1})$$

onde

- $q_{L, \text{lam}}$ é a taxa de vazamento quando se tem escoamento laminar, em $[\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$;
- r é o raio do tubo capilar reto com seção transversal circular, em $[\text{m}]$;
- η é a viscosidade do gás, em $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$;
- ℓ é o comprimento do tubo capilar reto com seção transversal circular, em $[\text{m}]$;
- p_1 é a pressão maior, em $[\text{Pa}]$;
- p_2 é a pressão menor, em $[\text{Pa}]$.

Exemplo 1

A estanqueidade de um objeto é inspecionada não destrutivamente empregando-se hélio como gás de ensaio. Constata-se que este objeto apresenta um vazamento em regime de escoamento laminar através de uma descontinuidade capilar fictícia e ideal, de geometria tubular com seção transversal circular. Qual é o raio (r) da descontinuidade? São dados:

- a taxa de vazamento; $q_{L,He} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- a viscosidade do hélio a 20°C ; $\eta_{He} = 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;
- o comprimento da descontinuidade; $\ell = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$;
- a pressão maior; $p_1 = 10^5 \text{ Pa}$;
- a pressão menor; $p_2 = 0 \text{ Pa}$.

Solução

Quando o escoamento é laminar, a taxa de vazamento é definida pela equação 16.1. O raio da descontinuidade capilar fictícia e ideal é calculado colocando-o em evidência nesta equação. Tem-se, então:

$$r^4 = \left[\frac{q_{L,He} \cdot 16 \cdot \eta \cdot \ell}{\pi \cdot (p_1^2 - p_2^2)} \right] = \frac{5 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 16 \cdot 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{\pi \cdot (10^{10} - 0^2) \text{ Pa}^2}$$

$$r^4 = 1,482 \cdot 10^{-23} \text{ m}^4$$

$$r = \sqrt[4]{1,482 \cdot 10^{-23} \text{ m}^4} = 1,96 \cdot 10^{-6} \text{ m} \approx 2 \text{ } \mu\text{m}$$

16.3 Conversão de taxa de vazamento expressa em $\text{g} \cdot \text{ano}^{-1}$ para taxa de vazamento expressa em $\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$

Muitas vezes é preciso detectar vazamento e fazer ensaio de estanqueidade em objetos que trabalham com os mais diferentes líquidos, gases ou vapores empregando hélio como gás de ensaio. Visto que a inspeção não destrutiva na maioria das vezes é realizada com um gás de ensaio diferente da substância com que o objeto opera, é muito importante a conversão de taxas de vazamento, como, por exemplo, aquela expressa em $\text{g} \cdot \text{ano}^{-1}$, muito usada na indústria de equipamentos de refrigeração, para outra expressa em $\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. Este tipo de conversão está ilustrado no exemplo apresentado a seguir.

Exemplo 2

Um equipamento de refrigeração que trabalha com freon (R12) apresenta uma taxa de vazamento (perda de massa ao longo do tempo) de 5 g por ano e a 0°C . Qual é a taxa de vazamento de hélio, em $\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, a 20°C , deste equipamento? São dados:

- a massa de freon perdida por ano a $1,013 \text{ bar}$ e a 0°C ; $m_{R12} = 5 \text{ g}$;
- o peso molecular do freon; $M_{R12} = 121 \text{ g}$;
- o peso molecular do hélio; $M_{He} = 4 \text{ g}$;
- a viscosidade do freon a 20°C ; $\eta_{R12} = 1,18 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;
- a viscosidade do hélio a 20°C ; $\eta_{He} = 1,92 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

Solução

1º passo: conversão da massa de freon (m_{R12}) que se perde por ano em volume de freon (V_{R12}) que se perde por ano, para $p = 1,013 \text{ bar}$ e 0°C , empregando-se a lei de Avogadro.

Considerando que 1 mol de um gás ocupa um volume de $22,413 \text{ l}$ (para $p = 1,0133 \text{ bar}$ e $T = 0^\circ\text{C}$) e o peso molecular do freon (M_{R12}) é de 121 g , a conversão da perda de massa de freon por ano (m_{R12}) para perda de volume (V_{R12}) é feita conforme mostrado a seguir.

$$V_{R12} = \frac{22,413 \cdot \ell \cdot m_{R12}}{M_{R12}} = \frac{22,413 \cdot \ell \cdot 5 \text{ g}}{121 \text{ g}} = 0,926 \text{ l}$$

(para $p = 1,013 \text{ bar}$ e $T = 0^\circ\text{C}$)

2º passo: determinação da influência da temperatura no volume de gás que escapa (lei de Charles).

Visto que o ensaio é realizado à temperatura ambiente, há necessidade de calcular o volume que $0,926 \text{ l}$ de freon a 0°C ocupa à temperatura de 20°C . Este cálculo é feito empregando-se a equação de Charles (equação 16.2), conforme mostrado a seguir.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (\text{equação 16.2})$$

$$V_{R12} = \frac{0,926 \text{ l} \cdot 293 \text{ K}}{273 \text{ K}} = 0,994 \text{ l} \quad (\text{para } p = 1,013 \text{ bar e } T = 20^\circ\text{C})$$

3º passo: conversão de $\text{bar} \cdot \ell$ em $\text{mbar} \cdot \ell$.

O volume de freon que escapa por ano é de $0,994 \text{ l}$ à pressão de $1,013 \text{ bar}$ e a 20°C . A conversão deste valor para $\text{mbar} \cdot \ell$, também a 20°C , é feita conforme mostrado a seguir.

$$1013 \text{ mbar} \cdot 0,994 \text{ l} = 1006,9 \text{ mbar} \cdot \ell$$

4º passo: inclusão do tempo.

A perda de freon é de 5 g , ou seja, $1006,9 \text{ mbar} \cdot \ell$, em um determinado período de tempo (1 ano). A perda de freon (em $\text{mbar} \cdot \ell$) por segundo, isto é, a taxa de vazamento de freon em $\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, é calculada conforme mostrado a seguir.

1 ano tem $3,1536 \cdot 10^7$ segundos

$$5 \text{ g de R12 por ano} = \frac{1006,9 \text{ mbar} \cdot \ell}{3,1536 \cdot 10^7 \text{ s}} = 3,19 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

$$q_{L,R12} = 3,19 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

5º passo: conversão da taxa de vazamento de freon para taxa de vazamento de hélio.

Quando a taxa de vazamento de freon é somente $3 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, então o regime de escoamento é laminar. Conforme mostrado anteriormente (item 4.1.2), a taxa de vazamento de um gás em regime de escoamento laminar é inversamente proporcional à sua viscosidade (equação 16.3). Tem-se, então:

$$\frac{q_{L,1}}{q_{L,2}} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad (\text{equação 16.3})$$

A conversão da taxa de vazamento de freon para taxa de vazamento de hélio é feita conforme apresentado a seguir.

$$\frac{q_{L,He}}{q_{L,R12}} = \frac{\eta_{R12}}{\eta_{He}} \quad \text{ou} \quad q_{L,He} = \frac{q_{L,R12} \cdot \eta_{R12}}{\eta_{He}}$$

onde

- $q_{L,He}$ é a taxa de vazamento de hélio, em $[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}]$;
- $q_{L,R12}$ é a taxa de vazamento de freon, em $[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}]$;
- η_{R12} é a viscosidade do freon a 20°C , em $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$;
- η_{He} a viscosidade do hélio a 20°C , em $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$.

$$q_{L,He} = \frac{q_{L,R12} \cdot \eta_{R12}}{\eta_{He}} = \frac{3,19 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} \cdot 1,18 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}}{1,92 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}}$$

$$q_{L,He} = 1,96 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Ao se agrupar todos os passos necessários para a conversão da taxa de vazamento (em massa por ano) de freon ($q_{L,R12}$) em taxa de vazamento (em pressão-volume por segundo) de hélio ($q_{L,He}$), tem-se a seguinte equação:

$$q_{L,He} = \frac{22,413 \ell \cdot m_{R12} \cdot 293 \text{ K} \cdot \eta_{R12} \cdot 1013 \text{ mbar}}{M_{R12} \cdot 273 \text{ K} \cdot \eta_{He} \cdot 3,1536 \cdot 10^7 \text{ s}}$$

Se o escoamento do gás for molecular, em vez de laminar, então a conversão da taxa de vazamento será diferente. Neste caso, a taxa de vazamento de um dado gás é inversamente proporcional à raiz quadrada de seu peso molecular (equação 16.4).

$$\frac{q_{L,1}}{q_{L,2}} = \frac{\sqrt{M_2}}{\sqrt{M_1}} \quad (\text{equação 16.4})$$

A taxa de vazamento de freon de $5 \text{ g}\cdot\text{ano}^{-1}$ é considerada muito elevada, tendo sido usada neste exemplo somente a título de ilustração de um caso de vazamento com escoamento laminar. A taxa de vazamento geralmente aceita pela indústria de refrigeração é de cerca de $0,01 \text{ g}\cdot\text{ano}^{-1}$. A conversão da taxa de vazamento de freon (agora de $0,01 \text{ g}\cdot\text{ano}^{-1}$) para taxa de vazamento de hélio ($\text{mbar}\cdot\ell\cdot\text{s}^{-1}$) será realizada mais uma vez, porém considerando o regime de escoamento como sendo molecular. A diferença de temperatura é de 20°C e a diferença de pressão é a mesma para os dois gases. A fórmula de conversão da taxa de vazamento é:

$$q_{L,\text{He}} = \frac{22,413 \ell \cdot m_{R12} \cdot 293 \text{ K} \cdot \sqrt{M_{R12}} \cdot 1013 \text{ mbar}}{M_{R12} \cdot 273 \text{ K} \cdot \sqrt{M_{\text{He}}} \cdot 3,1536 \cdot 10^7 \text{ s}}$$

A taxa de vazamento de hélio é:

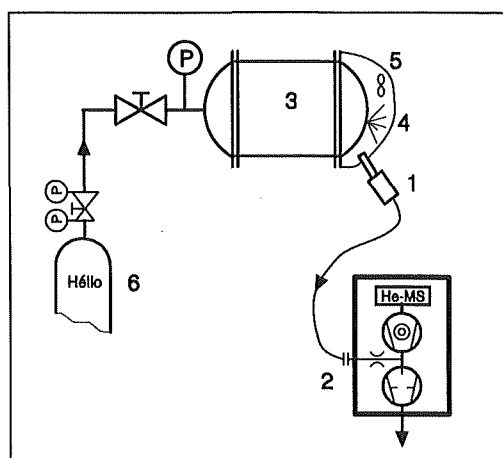
$$q_{L,\text{He}} = \frac{22,413 \ell \cdot 0,01 \text{ g} \cdot 293 \text{ K} \cdot \sqrt{121 \text{ g}} \cdot 1013 \text{ mbar}}{121 \text{ g} \cdot 273 \text{ K} \cdot \sqrt{4 \text{ g}} \cdot 3,1536 \cdot 10^{-7} \text{ s}} = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

16.4 Método do envoltório com uso de sonda aspiradora

Neste item é apresentado um exemplo de realização de ensaio de estanqueidade em um trocador de calor, bem como mostradas as condições de ensaio e apresentados os resultados obtidos.

Exemplo 3

Um trocador de calor, projetado para trabalhar com vácuo, é lavado e secado antes de ter alguns dos tubos de seu feixe de tubos reparados por soldagem. Após a soldagem de reparo, o trocador de calor é submetido a um teste hidrostático, sendo que a pressão máxima de trabalho admissível para a sua carcaça é $p_e = 6 \text{ bar}$. Deve-se realizar um ensaio de estanqueidade com hélio neste trocador de calor empregando-se o método do envoltório e utilizando-se sonda aspiradora, conforme mostrado na figura 16.1. Visto que é possível ensaiar o trocador de calor com uma pressão de 6 bar, então emprega-se uma mistura ar-hélio; a concentração de hélio nesta mistura, todavia, é escolhida com base na sensibilidade do detector de hélio.



- 1 Sonda aspiradora de hélio
- 2 Detector de vazamento de hélio
- 3 Objeto de ensaio
- 4 Envoltório de plástico
- 5 Ventilador
- 6 Garrafa de hélio

Figura 16.1:

Ilustração esquemática do ensaio de estanqueidade, empregando o método do envoltório, sonda aspiradora e hélio como gás de ensaio, realizado no trocador de calor.

A seguir, são fornecidos dados e especificações para a realização do ensaio de estanqueidade.

- *Especificação da estanqueidade*
A estanqueidade especificada para o trocador de calor nas condições padrão é $q_{L,adm} < 1 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$.
- *Ensaio preliminar*
A realização de um ensaio de estanqueidade preliminar é sempre muito importante e tem por objetivo descobrir a existência ou inexistência de grandes vazamentos no objeto de ensaio. O ensaio de estanqueidade preliminar realizado indicou a inexistência de grande vazamento no trocador de calor.
- *Dados do detector de hélio*
A menor variação de concentração de hélio detectável ($\Delta c_{\text{He,min}}$) é de 1 ppm. O limite de detecção do método de ensaio ($q_{L,min}$) empregando a sonda aspiradora rápida é aproximadamente $5 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$.
- *Dados do trocador de calor*
Volume da carcaça: $V = 1000 \ell$
Volume do feixe de tubos: $V = 500 \ell$
Pressão de serviço admissível da carcaça: $p_e = 6 \text{ bar}$
Pressão de serviço admissível do feixe de tubos: $p_e = 6 \text{ bar}$.

A seguir, é feita uma proposta para a condução do ensaio de estanqueidade no trocador de calor, visando satisfazer às exigências apresentadas acima. Com base no exposto, deseja-se:

- a conversão da estanqueidade especificada para as condições de ensaio escolhidas;
- o cálculo do tempo de ensaio para uma concentração de gás de ensaio de 100 %;
- a escolha da concentração de gás de ensaio, levando-se em consideração o limite de detecção.

Solução

a) *Conversão da estanqueidade especificada para as condições de ensaio escolhidas*

• Estanqueidade especificada	Estanqueidade convertida
• $q_A = 1 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$	$q_B = ?$
• $p_{A1} = 1 \text{ bar}$	$p_{B1} = 7 \text{ bar}$ (pressão absoluta)
• $p_{A2} = 0 \text{ bar}$	$p_{B2} = 1 \text{ bar}$ (pressão absoluta)

Quando a taxa de vazamento é $1 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, geralmente não se tem, mesmo com o processo de sobrepressão, escoamento puramente laminar. No caso de escoamento laminar, a taxa de vazamento é diretamente proporcional ao quadrado da pressão; no caso de escoamento molecular, por outro lado, a taxa de vazamento é diretamente proporcional à pressão. Relações semelhantes entre taxas de vazamento e pressão são vistas quando o assunto referente ao vazamento padrão TL 4-6 é abordado neste livro. Supondo a ocorrência de escoamento puramente laminar na conversão da estanqueidade especificada, então ter-se-á a seguinte estanqueidade:

$$\frac{q_A}{p_{A1}^2 - p_{A2}^2} = \frac{q_B}{p_{B1}^2 - p_{B2}^2} \quad (\text{equação 16.5})$$

$$q_B = \frac{q_A \cdot (p_{B1}^2 - p_{B2}^2)}{p_{A1}^2 - p_{A2}^2} = \frac{1 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} \cdot (7^2 - 1^2) \text{ bar}^2}{(1^2 - 0^2) \text{ bar}^2} \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Supondo-se que o escoamento possa ser totalmente molecular (caso mais conservador), tem-se:

$$\frac{q_A}{p_{A1} - p_{A2}} = \frac{q_B}{p_{B1} - p_{B2}} \quad (\text{equação 16.6})$$

$$q_B = \frac{q_A \cdot (p_{B1} - p_{B2})}{p_{A1} - p_{A2}} = \frac{1 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} \cdot (7 - 1) \text{ bar}}{(1 - 0) \text{ bar}} \approx 6 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Este último caso permite que o ensaio de estanqueidade seja realizado com a maior margem de segurança possível. Entretanto, ao se realizar estes cálculos, foi suposto

que a geometria da descontinuidade através da qual ocorre o vazamento não foi afetada pela elevada pressão de ensaio.

A utilização da equação de Knudsen para vazamento através de uma descontinuidade capilar pode acarretar cálculos que envolvam erros, visto que a geometria da descontinuidade não é conhecida com precisão.

b) Cálculo do tempo de ensaio para uma concentração de gás de ensaio de 100 %

Ao se utilizar o método do envoltório com sonda aspiradora na determinação da taxa de vazamento, a variação da concentração de hélio dentro do tubo do trocador de calor é medida com a solda aspiradora. O tempo de ensaio é calculado empregando-se a equação 16.7.

$$\Delta t = \frac{\Delta c_{\text{He,min}} \cdot p_{\text{amb}} \cdot V_{\text{env}}}{q_{\text{L,adm}} \cdot c_{\text{ens}}} \quad (\text{equação 16.7})$$

onde

- Δt é o tempo de ensaio;
- $\Delta c_{\text{He,min}}$ é a menor variação da concentração de hélio detectável;
- p_{amb} é a pressão ambiente;
- V_{env} é o volume do envoltório;
- $q_{\text{L,adm}}$ é a taxa de vazamento admissível;
- c_{ens} é a concentração do gás de ensaio.

$$\Delta t = \frac{1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 \text{ mbar} \cdot 5 \cdot 10^2 \ell}{6 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} \cdot 1} \approx 0,8 \cdot 10^4 \text{ s} \approx 2,3 \text{ h}$$

O tempo de ensaio de estanqueidade não deve ser muito longo, de maneira que não se consiga acompanhar mais a sua execução. Um tempo de ensaio maior que 12 h deve, por motivos de ordem econômica, ser evitado.

c) Escolha da concentração de gás de ensaio, levando-se em consideração o limite de detecção

Uma concentração de gás de ensaio de 50% tem como consequência um aumento do tempo de ensaio de 100%, o que ainda seria aceitável. A diminuição da concentração de gás de ensaio tem como grande vantagem a redução dos custos do ensaio de estanqueidade no que diz respeito ao gasto com gás de ensaio. No caso da inspeção do trocador de calor em questão, a economia que se faz quando se diminui a concentração de hélio é tão pequena, que não permite usar este argumento para reduzir os custos.

Visto que o trocador de calor foi projetado para trabalhar com vácuo, é possível evacuar a sua carcaça antes de enchê-la com gás de ensaio. Este procedimento é muito importante, visto que o gás de ensaio se distribui uniformemente dentro da carcaça do trocador de calor, diminuindo bastante o tempo de realização do ensaio.

16.5 Conversão de taxa de vazamento de líquido em taxa de vazamento de gás

Neste item é apresentado um exemplo de conversão de uma taxa de vazamento de líquido, como no caso de uma torneira estragada, em taxa de vazamento de gás.

Exemplo 4

Supondo-se que a taxa de vazamento de uma torneira seja $q_{L,líq} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para uma pressão na tubulação de 5 bar, qual seria a taxa de vazamento de ar ($k = 100$) para a mesma pressão?

Solução

A conversão da taxa de vazamento de líquido em taxa de vazamento de gás é feita empregando-se a equação 16.8.

$$q_{L,gás} = k \cdot q_{L,líq} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (\text{equação 16.8})$$

sendo

$$k = \frac{\eta_{líq}}{\eta_{gás}}$$

onde

- $q_{L,gás}$ é a taxa de vazamento de gás, em $[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}]$;
- k é a relação existente entre a viscosidade do líquido e a viscosidade do gás;
- $q_{L,líq}$ é a taxa de vazamento de líquido, em $[\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$;
- p_1 é a pressão maior, em [bar];
- p_2 é a pressão menor, em [bar];
- $\eta_{líq}$ é a viscosidade do líquido;
- $\eta_{gás}$ é a viscosidade do gás.

Inserindo-se os dados do exemplo citado acima na equação 16.8, tem-se:

$$q_{L,gás} = 100 \cdot 3 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \left(\frac{5+1}{2} \right) \text{ bar} \approx 10 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

Medida de Pressão Parcial e Análise de Gás Residual

- 17.1 Introdução
- 17.2 Equipamentos de medida de pressão parcial e análise de gás residual
 - 17.2.1 Fonte iônica
 - 17.2.2 Sistema de separação de íons
 - 17.2.3 Sistema de detecção de íons
 - 17.2.4 Espectrômetro de massa de campo setorial magnético
 - 17.2.4.1 Construção e funcionamento
 - 17.2.4.2 Aplicação
 - 17.2.5 Espectrômetro de massa quadrupolo
 - 17.2.5.1 Construção e funcionamento
 - 17.2.5.2 Aplicação
 - 17.2.6 Sistema de admissão de gás
 - 17.2.7 Características do medidor de vácuo de pressão parcial
 - 17.2.7.1 Sensibilidade
 - 17.2.7.2 Linearidade
 - 17.2.7.3 Resolução
 - 17.2.7.4 Estabilidade
 - 17.2.7.5 Acurácia
- 17.3 Ionização do gás
- 17.4 Espectros de massa típicos da tecnologia do vácuo
 - 17.4.1 Câmara de vácuo limpa
 - 17.4.2 Câmara de vácuo suja
- 17.5 Procedimento de análise de espectro de massa
 - 17.5.1 Sequência de identificação de um gás puro
 - 17.5.2 Sequência de análise qualitativa de uma mistura gasosa
 - 17.5.3 Problemas e limitações
 - 17.5.4 Medida de pressão parcial
 - 17.5.4.1 Calibração
 - 17.5.4.2 Problemas e limitações
- 17.6 Localização de vazamento e ensaio de estanqueidade

17 Medida de pressão parcial e análise de gás residual

17.1 Introdução

A espectrometria de massa com equipamento do tipo quadrupolo, como método de análise de gás residual, já ultrapassou há muito tempo a fronteira da sua finalidade inicial. Nos últimos anos, ela se tornou um processo de grande importância, tanto na análise de gases como no controle e na automação de processos. Devido às crescentes e constantes exigências impostas pela indústria e pela pesquisa, os equipamentos se tornaram bastante sofisticados, ficaram mais fáceis de serem operados, e o procedimento de ensaio e a análise dos resultados, devido ao emprego de microprocessadores, foram totalmente automatizados. Visto que os espectrômetros de massa estão relativamente baratos, bem como pelo fato dos fabricantes produzirem equipamentos compactos, esta técnica de medida adquiriu importância crescente no ensaio de estanqueidade.

17.2 Equipamentos de medida de pressão parcial e análise de gás residual

Os componentes mais importantes de um espectrômetro de massa são a fonte de íons do gás a ser analisado, o sistema de separação de íons e o sistema de detecção de íons.

17.2.1 Fonte iônica

As partículas de gás eletricamente neutras são transformadas na fonte de íons em partículas (íons) positivas. Na fonte iônica, um cátodo incandescente, denominado canhão eletrônico, emite elétrons, que, por sua vez, são acelerados em direção a um ânodo. Em seu percurso, estes elétrons se chocam com as partículas (átomos ou moléculas) de gás, dissociando-as e ionizando-as. Desta maneira, uma partícula é fragmentada em diversas outras menores, que apresentam uma relação muito específica entre si e formam um espectro de fragmentação.

17.2.2 Sistema de separação de íons

O sistema de separação de íons de um espectrômetro de massa possui campos elétricos ou magnéticos, que atuam nos íons, separando-os segundo as suas relações massa/carga (número de massa M).

17.2.3 Sistema de detecção de íons

O sistema de detecção de um espectrômetro de massa, também denominado sistema de amostragem gasosa, é constituído de um ou mais coletores de íons, que se encontram conectados a um amplificador de corrente de elevada sensibilidade. Os íons, ao chegarem ao coletor, são neutralizados, gerando uma corrente iônica, que, após ser transformada em tensão pelo amplificador, é indicada no mostrador do espectrômetro de massa.

17.2.4 Espectrômetro de massa de campo setorial magnético

17.2.4.1 Construção e funcionamento

Em um espectrômetro de massa de campo setorial (figura 17.1), os íons produzidos na fonte iônica precisam ter uma energia cinética muito bem definida antes de serem introduzidos em um campo magnético transversal, onde serão separados. Em um campo magnético desta natureza, os íons descrevem trajetórias semicirculares, cujos raios dependem de seus números de massa. Desta maneira, os íons atingem a saída do campo magnético em diferentes posições, o que permite que eles sejam, então, detectados separadamente. A detecção dos íons pode ser feita ou por diversos coletores situados nestas posições ou por um único coletor. Neste último caso, quando a captura é feita em série, ou a energia dos íons ou o campo magnético devem estar defasados em relação ao tempo, de maneira que as partículas com diferentes números de massa atinjam, uma após a outra, o mesmo local de saída do campo magnético, onde se encontra o coletor.

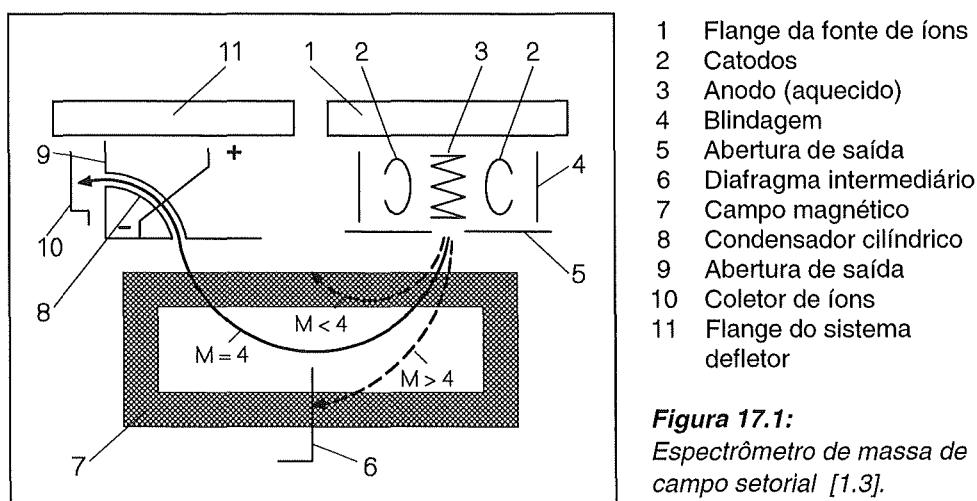


Figura 17.1:
Espectrômetro de massa de
campo setorial [1.3].

17.2.4.2 Aplicação

O espectrômetro de massa de campo setorial empregado na tecnologia do vácuo é utilizado quase que exclusivamente como espectrômetro de massa de hélio. Isto se deve ao fato de neste tipo de aplicação, por causa do pequeno número de massa do hélio, os íons gerados só descreverem trajetórias semicirculares de pequeno raio, o que permite a fabricação de equipamentos de pequenas dimensões. Além disso, não é preciso, quando se emprega o espectrômetro de massa de hélio, varrer todo o espectro de números de massa existentes, de maneira que o processamento de seu sinal é bastante simplificado. Espectrômetros de massa de campo setorial maiores são empregados quase que exclusivamente em ensaios analíticos, sendo que nestes casos o vácuo é somente uma condição necessária para que o equipamento possa operar.

17.2.5 Espectrômetro de massa quadrupolo

17.2.5.1 Construção e funcionamento

A fonte de íons de um espectrômetro de massa quadrupolo (figura 17.2) precisa gerar um feixe de íons muito fino, cuja energia, contudo, não constitui um fator de operacionalidade crítico. Este feixe de íons fino é introduzido em um campo elétrico quadripolar (quadrupolo), onde é realizada a separação dos íons segundo os seus números de massa. Esta separação é feita por uma corrente alternada de alta frequência, sobreposta por uma corrente contínua. Assim, os íons que não satisfazem as condições de transposição atingem a superfície dos quatro eletrodos, que atuam como uma espécie de filtro. Somente os íons para os quais as tensões de separação são adequadas é que transpõem o sistema de separação e conseguem atingir o coletor. O espectrômetro de massa quadrupolo necessita, devido ao seu princípio de construção, de somente um coletor. Para varrer uma faixa extensa de números de massa, os potenciais de separação são variados de zero até o valor final, mas tanto a relação entre as intensidades destas correntes como a frequência da corrente alternada permanecem sempre constantes.

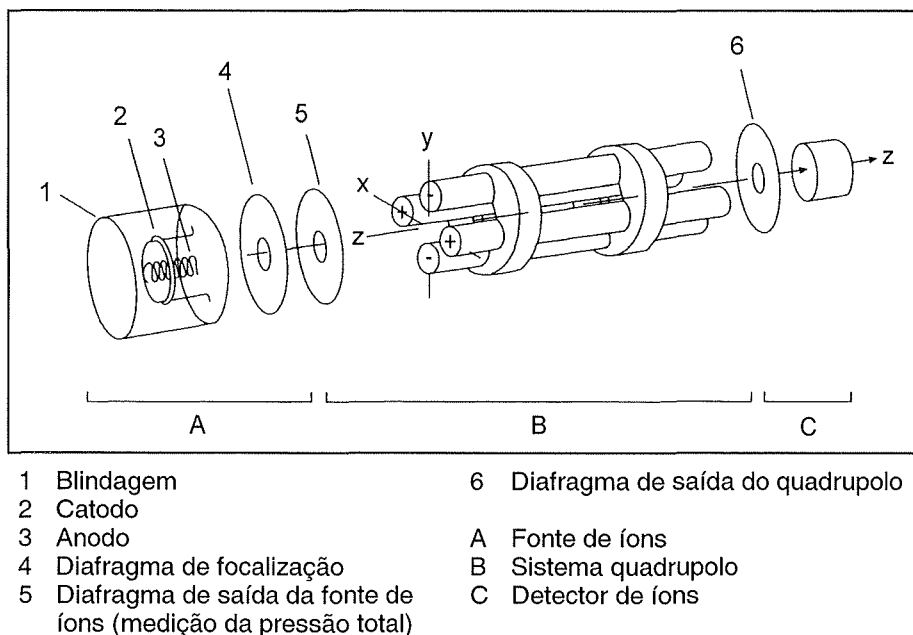


Figura 17.2: Desenho esquemático mostrando o funcionamento de um espectrômetro de massa quadrupolo [1.3].

Uma particularidade do espectrômetro de massa quadrupolo é o fato da largura do pico poder ser ajustada variando-se o valor da corrente contínua aplicada, o que significa que não só a resolução, como também a sensibilidade, pode ser mudada com relativa facilidade. Em condições normais de operação, em que a largura do

pico é constante ao longo de toda a faixa de números de massa, a sensibilidade diminui com o aumento do número de massa (comportamento de transmissão), fato este que deve ser levado em consideração durante a interpretação dos resultados.

17.2.5.2 Aplicação

O espectrômetro de massa quadrupolo é empregado principalmente na análise de gás residual, visto que, devido ao seu pequeno tamanho, bem como ao fato poder ser aquecido, ele pode ser introduzido diretamente em um sistema com vácuo. Ultimamente, porém, o espectrômetro de massa quadrupolo vem sendo também empregado na análise de gases de processos, sendo sua grande versatilidade, em comparação com os outros processos de medida, o fator decisivo para este tipo de emprego.

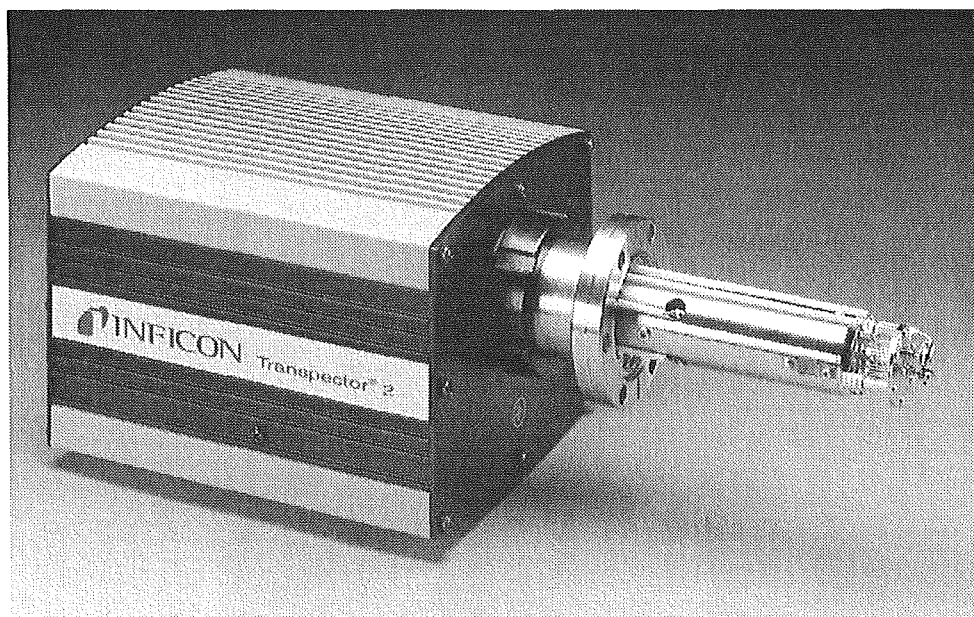


Figura 17.3: Sensor de espectrômetro de massa quadrupolo com sistema de processamento de sinal, modelo Transpector, fabricado pela INFICON [2.1].

Os espectrômetros de massa encontrados no mercado se destinam à análise de gases com números de massa variando dentro de determinadas faixas. A faixa de número de massa de 2 a 50 é, na maioria dos casos, suficiente quando se trata de análise em ultra-alto vácuo ou de ensaio de estanqueidade. Todavia, caso seja necessário identificar fluidos de bombas de vácuo ou outras substâncias com estrutura molecular complexa, então pode ser necessário utilizar um espectrômetro que analise até número de massa 500.

17.2.6 Sistema de admissão de gás

Antes de atingir o espectrômetro de massa, o gás a ser analisado tem que passar por um sistema de admissão de gás. Neste sistema, a pressão total de uma mistura gasosa, que é bastante elevada (aproximadamente 1000 mbar, ou seja, pressão atmosférica), é reduzida até a pressão de operação do espectrômetro de massa (pressão menor que 10^{-4} mbar), sem, porém, haver alteração na composição da mistura gasosa, isto é, sem que o teor do gás a ser analisado na mistura gasosa em questão seja alterado. Dependendo do tipo de aplicação, o sistema de admissão de gás pode ser equipado com uma válvula reguladora (válvula de agulha) de precisão ou com um conversor de pressão.

17.2.7 Características do medidor de vácuo de pressão parcial

17.2.7.1 Sensibilidade

A corrente iônica, que é expressa em A/mbar e definida pela equação 17.1, é registrada no mostrador do espectrômetro de massa. Esta corrente é proporcional à pressão parcial do gás correspondente na mistura gasosa, sendo a constante de proporcionalidade definida como sensibilidade do equipamento.

$$i_{M,G}^+ = E_{M,G} \cdot p_G \quad \text{ou} \quad p_G = i_{M,G}^+ \cdot \frac{1}{E_{M,G}} \quad (\text{equação 17.1})$$

onde

- $i_{M,G}^+$ é a corrente iônica;
- M é o número de massa da partícula;
- G é o tipo de partícula (gás ou vapor);
- p_G é a pressão parcial;
- $E_{M,G}$ é a sensibilidade.

A sensibilidade pode variar com a pressão e com outras condições de operação. Em alguns espectrômetros de massa, a sensibilidade depende do tipo de gás. Se, no caso destes equipamentos, não for informado o tipo de gás utilizado na determinação da sensibilidade, então subentende-se que ele seja o nitrogênio (N_2).

17.2.7.2 Linearidade

A linearidade é definida como a independência da sensibilidade em relação à pressão total da mistura gasosa. Esta importante característica do espectrômetro de massa é determinada principalmente pela sua fonte de íons. Quando a pressão é elevada, ou seja, o seu valor é geralmente maior que 10^{-5} mbar, a sensibilidade da fonte iônica pode, devido à influência das cargas superficiais e espaciais, se tornar mais acentuada ainda, principalmente quando a superfície interna do objeto de ensaio está contaminada, por exemplo, com um filme isolante de algum

hidrocarboneto. Estas variações de sensibilidade devidas à pressão dependem do tipo de gás (sendo maiores no caso de gases mais pesados), visto que elas são determinadas pelo potencial de ionização.

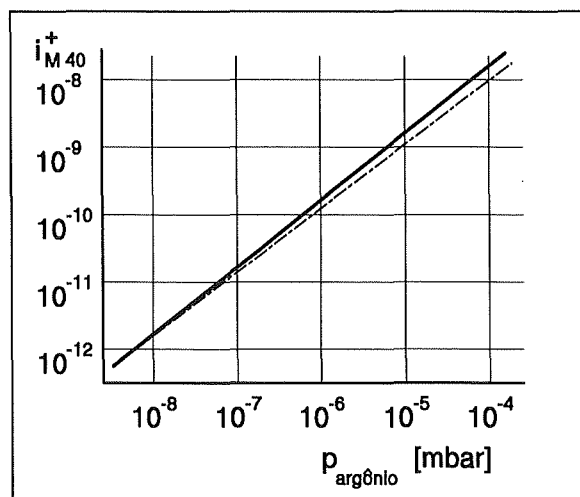


Figura 17.4:
Linearidade de um espectrômetro de massa quadrupolo, referente ao argônio como gás de ensaio, obtida para a massa 40.

17.2.7.3 Resolução

A resolução de um espectrômetro de massa é definida como a capacidade que este equipamento tem de discernir intensidades de picos correspondentes a números de massa diferentes, porém próximos. A resolução é determinada pelo quociente entre o número de massa em questão e a largura do pico em uma determinada altura sua (por exemplo, para 5 % da altura do pico).

$$R = \frac{M}{\Delta M} \quad (\text{equação 17.2})$$

onde

- R é a resolução;
- M é o número de massa;
- ΔM é a largura do pico.

Ao contrário do que ocorre com o espectrômetro de massa de campo setorial, a resolução do espectrômetro de massa quadrupolo não é constante. Neste último equipamento, a resolução pode ser ajustada dentro de uma determinada faixa, ao se selecionar um potencial de separação adequado. Neste caso, existe uma resolução máxima que pode ser obtida, que é definida pelas dimensões do espectrômetro de massa.

17.2.7.4 Estabilidade

A estabilidade é definida como sendo a constância tanto da sensibilidade como do valor zero de um instrumento de medida. Um parâmetro que influencia muito a estabilidade do espectrômetro de massa é a temperatura; os outros efeitos são considerados como sendo temporais. A instabilidade da sensibilidade se deve, na maioria das vezes, à contaminação da fonte de íons ou do sistema de separação. No caso do espectrômetro de massa quadrupolo, a instabilidade do potencial de separação é de extrema importância, visto que este potencial influencia bastante a resolução e a sensibilidade deste tipo de equipamento. A instabilidade do valor zero do espectrômetro de massa se deve, na maior parte dos casos, a uma flutuação no comportamento do amplificador da corrente iônica.

17.2.7.5 Acurácia

No caso da análise de gás residual, a acurácia do espectrômetro de massa, ou seja, o seu comportamento ao longo do tempo, é determinada quase que exclusivamente pela acurácia de seu amplificador. Com isso, a constante de tempo (fator de amortecimento) depende da faixa de medida escolhida, isto é, quanto mais sensível for esta faixa, maior será a constante de tempo.

17.3 Ionização do gás

Na maioria das vezes, quando um gás é ionizado, ocorre não só o aparecimento de um pico principal, de intensidade maior, no número de massa de seu gás ionizado, como também de um ou mais picos secundários, de intensidades menores, em outros números de massa vizinhos a este pico principal. No caso de uma molécula, quando a sua complexidade aumenta, cresce muito rapidamente o número de íons de diferentes naturezas produzidos durante a sua ionização. Ao se ionizar uma molécula, além dos íons com cargas simples e múltiplas, também são produzidos íons de fragmentação adicionais. O aparecimento de fragmentos da molécula ionizada, bem como a frequência com que determinados fragmentos ocorrem, constituem uma característica muito importante na identificação do tipo de molécula que foi ionizada. A tabela 17.1 mostra, a título de ilustração, o íon principal e os íons de fragmentação da ionização da molécula de CO_2 com uma energia de eletrônica de 70 eV [1.7].

Os fragmentos iônicos que se formam na ionização de uma partícula apresentam picos de energia com intensidades menores, quando comparadas com a intensidade do pico de energia do íon da partícula, em números de massa diferentes daquele do íon da partícula. Em vista disso, quando se tem um sistema com diferentes substâncias, como, por exemplo, uma mistura gasosa complexa, é freqüente ocorrer sobreposição de picos de energia de fragmentos iônicos de um gás no picos de energia de íons de outros gases, o que pode dificultar bastante a interpretação do espectro obtido.

Tabela 17.1: Espectro de massa da ionização da molécula de CO_2 com uma energia eletrônica de 70 eV [1.7].

m / e	Intensidade	Íon
12	2,26	$^{12}\text{C}^+$
16	6,24	$^{16}\text{O}^+$
22	1,78	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2^{++}$
28	6,55	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}^+$
29	0,06	$^{13}\text{C}^{16}\text{O}^+$
44	100,00	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2^+$
45	1,16	$^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2^+$
46	0,41	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}^+$

As partículas oriundas da ionização com energia eletrônica de 90 eV dos gases mais importantes na espectrometria de massa em sistemas com vácuo encontram-se compiladas na tabela 17.2. Nesta tabela, os valores apresentados são apenas de referência. As intensidades de energia dos íons apresentados nesta tabela depende de vários fatores, como, por exemplo, dentre outros, da energia de ionização, da temperatura e das características do analisador de massa. Ao número de massa do íon mais freqüente é atribuído o valor máximo 100, sendo que os números de massa dos outros íons são identificados com valores que tomam este valor máximo como referência. Em muitos casos o íon mais freqüente na ionização não é o íon da molécula. Além disso, os diferentes isótopos de um elemento apresentam um comportamento idêntico durante a ionização. Para facilitar a interpretação dos espectros de massa obtidos na análise de gases residuais, existem catálogos especiais com os espectros de massa das mais variadas substâncias, bem como com tabelas das correntes iônicas relativas dos diferentes fragmentos iônicos dos gases ionizados com diversas energias eletrônicas (tabela 17.2). Porém, a comparação dos resultados obtidos em um ensaio com aqueles existentes na literatura especializada só é possível se a corrente de íons foi medida na inspeção empregando-se as mesmas condições em que a corrente de íons foi medida no levantamento dos espectros encontrados no banco de dados.

17.4 Espectros de massa típicos da tecnologia do vácuo

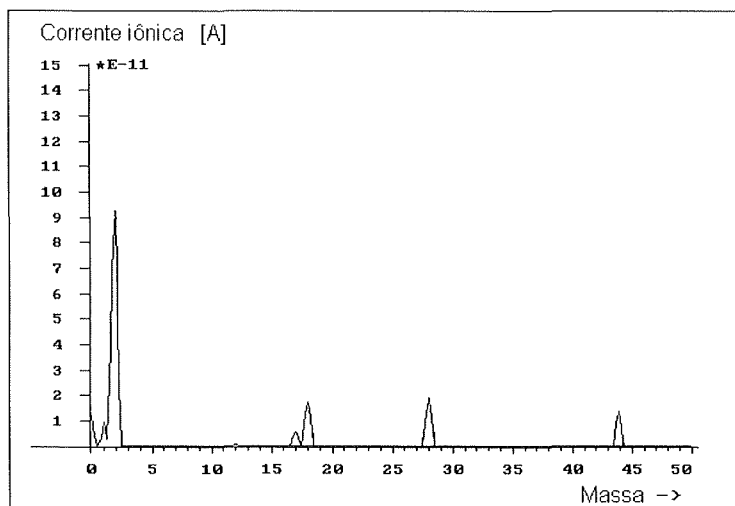
A maioria esmagadora dos objetos com vácuo submetidos a ensaio de estanqueidade normalmente não contém uma substância pura, mas, sim, uma mistura gasosa (na maior parte das vezes, ar atmosférico), cujo espectro de massa deve ser analisado. Os picos de maior intensidade de um espectro de massa obtido em um ensaio de estanqueidade (determinação de pressão parcial ou na análise de gás residual) se encontram nos números de massa relativos aos gases que compõem o ar atmosférico (N_2 , O_2 , Ar e CO_2) e ao vapor de água (H_2O), presentes

Tabela 17.2: Corrente iônica relativa dos fragmentos da ionização com uma energia eletrônica de 90 eV dos gases mais importantes na tecnologia do vácuo [1.7].

[illegible]

17.4.1 Câmara de vácuo limpa

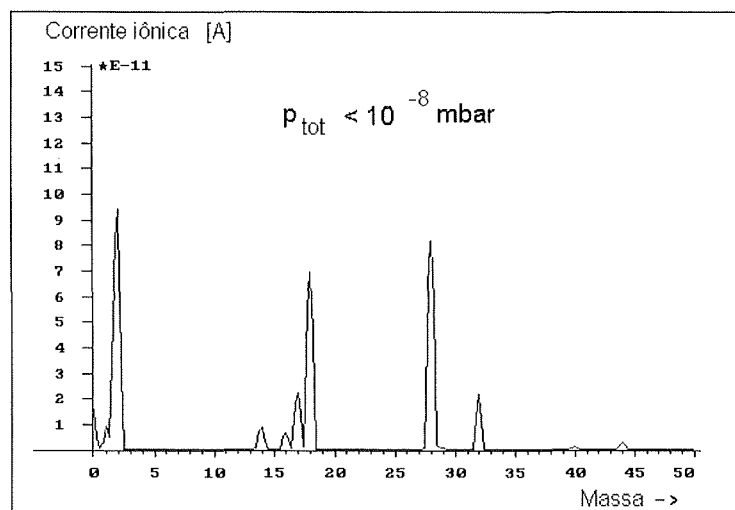
O espectro de massa de uma câmara de vácuo seca e limpa, isto é, sem resíduos de água ou de sujeira, como óleo, graxa, querosene ou outros derivados do petróleo, por exemplo, apresenta somente picos de gases e/ou vapores de H_2 , H_2O , CO e CO_2 (figura 17.5). Se, porém, o espectro apresentar picos de grande intensidade de outros gases ou vapores (figura 17.6), então é porque a câmara de vácuo está suja ou tem um vazamento.



Picos:

H_2 amu 2
 H_2O amu 1, 16,
 17 e 18
 CO amu 18
 N_2 amu 28
 CO_2 amu 44

Figura 17.5:
 Espectro de gás residual de uma câmara de vácuo limpa.



Picos:

H_2 amu 2
 H_2O amu 1, 16,
 17 e 18
 N_2 amu 28
 O_2 amu 32
 Ar amu 40
 CO_2 amu 44

Figura 17.6:
 Espectro de massa de gás residual de uma câmara de vácuo com vazamento e que não foi secada.

17.4.2 Câmara de vácuo suja

A sujeira normalmente encontrada em um sistema com vácuo é o óleo de bomba de vácuo, a graxa, assim como os solventes (removedores de sujeira), cujas moléculas são constituídas de hidrocarbonetos em cadeia. Por isso, quando se faz análise de gás residual em um objeto com sujeira, o espectro de massa obtido apresenta diversos grupos de picos, cujos picos de maior intensidade estão distantes 14 amu uns dos outros. A causa do aparecimento destes picos de intensidade máxima eqüidistantes pode ser explicada com base nos grupos de CH_2 presentes na substância que está sendo ionizada (molécula de sujeira), que são separados uns dos outros durante o processo de ionização (figura 17.7). Mais ainda, o pico referente ao número de massa 12 (carbono) sempre estará presente em um espectro de massa deste tipo. Além destes grupos de picos, existe uma série de outros picos isolados, mas não há a formação de outros grupos de picos.

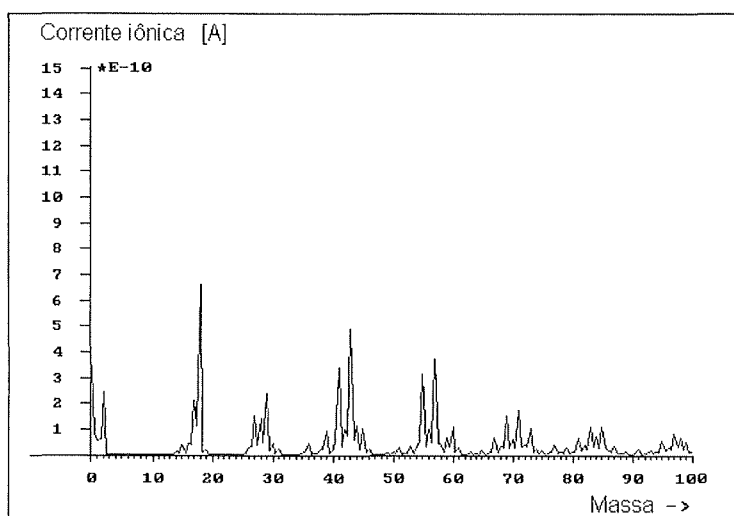


Figura 17.7:
Espectro de massa
de gás residual de
uma câmara de
vácuo suja.

17.5 Procedimento de análise de espectro de massa

17.5.1 Sequência de identificação de um gás puro

A interpretação do espectro de massa obtido em uma medida de pressão parcial ou em uma análise de gás residual deve ser feito seguindo-se as seguintes etapas:

- identificar o pico da molécula que está sendo analisada, ou seja, o maior número de massa do espectro de massa que apresenta um pico;
- listar todos os picos do espectro de massa em ordem crescente de suas intensidades;

- comparar a seqüência de picos do espectro de massa com as existentes no banco de dados;
- determinar a substância que tenha a maior probabilidade de ser a substância que foi analisada;
- fazer um ensaio (controle) com a substância mais provável.

17.5.2 Seqüência de análise qualitativa de uma mistura gasosa

A seqüência de análise de uma mistura gasosa deve ser feita seguindo-se as seguintes etapas:

- escolher um pico da molécula;
- normalizar o espectro de massa em relação ao pico de maior intensidade (valor de referência);
- identificar, no banco de dados, a substância com o peso molecular correto e o pico com a maior intensidade;
- subtração do espectro encontrado no banco de dados (muita atenção nesta etapa, pois não pode haver um resíduo negativo);
- escolher um novo pico da molécula, e proceder como descrito na segunda, terceira e quarta etapas citadas acima, até que todos os picos tenham sido analisados.

17.5.3 Problemas e limitações

Ao se comparar o espectro de massa obtido em um ensaio com aqueles disponíveis no banco de dados, podem ocorrer os seguintes problemas:

- haver variação das relações de intensidades de picos, pelo fato da fonte de íons não ser a mesma, se a energia eletrônica empregada tiver sido diferente, ou se tiver havido efeito de transmissão no espectrômetro de massa quadrupolo;
- haver dificuldade de identificar o pico da molécula que está sendo analisada, devido à presença de muitas substâncias na mistura gasosa;
- obter valores negativos durante a subtração, devido à incerteza de medida.

Como regra geral, pode-se dizer que só é possível analisar mistura gasosa relativamente simples, visto que na maioria as vezes só se consegue levantar suposições sobre a possível composição química de uma mistura gasosa contendo determinadas substâncias.

17.5.4 Medida de pressão parcial

Para medir corretamente a pressão parcial de um determinado gás em uma mistura gasosa, é preciso conhecer a sensibilidade do espectrômetro de massa em relação a este gás. Esta sensibilidade normalmente encontra-se especificada no catálogo do equipamento. Às vezes, entretanto, o fabricante do equipamento não fornece estes dados, isto é, o catálogo de seu produto informa somente o valor de sensibilidade, que, neste caso, se refere ao nitrogênio. Se isso ocorrer, para simplificar a medida de pressão parcial, pode-se avaliar aproximadamente o valor da sensibilidade desejada utilizando a sensibilidade fornecida pelo fabricante do equipamento. Para isso, porém, é preciso fazer uma grande correção da transmissão, principalmente no caso do número de massa ser pequeno. É possível, também, medir a pressão parcial com precisão utilizando o valor da probabilidade de ionização e o fator de fragmentação, encontrados em bancos de dados. Todavia, é melhor, neste caso, quando se faz uma análise quantitativa, ou seja, quando se mede a pressão parcial de um gás em uma mistura gasosa, fazer uma calibração.

17.5.4.1 Calibração

A calibração para a medida de pressão parcial consiste na determinação da sensibilidade do transdutor do espectrômetro de massa relativa a um determinado tipo de gás. Para isso, deixa-se que o gás puro, para o qual será determinada a sensibilidade do espectrômetro de massa, entre no sistema que será ensaiado através de uma válvula reguladora, e mede-se a pressão exercida por esse gás com um medidor de pressão calibrado (por exemplo, com um manômetro de viscosidade de esfera rotativa). O relação entre a corrente iônica medida com o espectrômetro de massa e a pressão medida com o medidor de pressão fornece a sensibilidade desejada, que pode ser empregada como fator de calibração.

17.5.4.2 Problemas e limitações

Durante a medida de pressão parcial podem ocorrer diversos problemas que alteram a sensibilidade medida durante a calibragem do sistema de ensaio. Estes problemas são:

- mudança da linearidade, devido à variação da pressão total;
- deslocamento da linha de base (referência), devido à variação da pressão total;
- oscilação da sensibilidade, caso o sensor esteja sujo ou o sistema multiplicador de sinal existente no sensor esteja velho;
- outros problemas especiais, devido ao CO e ao CO₂, que podem se formar quando se tem oxigênio no cátodo.

17.6 Localização de vazamento e ensaio de estanqueidade

O ensaio de estanqueidade empregando o método de análise de gás residual é realizado, na maioria das vezes, como ensaio integral em objeto com vácuo e no qual não se pode localizar vazamentos. O espectro de massa de gás residual é bastante adequado para este tipo de ensaio, pois o ar atmosférico que penetra no objeto de ensaio pode ser detectado com extrema facilidade (veja figura 17.6). Neste caso, observa-se as intensidades dos picos do espectro de massa do gás residual referentes aos números de massa 28 (N_2) e 32 (O_2), que, para o vazamento de ar atmosférico, devem ter, aproximadamente, uma relação de 4:1, visto que a composição química do ar atmosférico é de cerca de 80 % de N_2 e 20 % de O_2 .

Se o local onde se suspeita que exista uma descontinuidade for evolvido com gás de ensaio, como, por exemplo, com argônio sob um envoltório, então a análise de gás residual também poderá ser empregada como método de localização de vazamento. Caso ocorra vazamento de gás através desta descontinuidade, então o espectro de massa de gás residual apresentará prontamente um pico maior no número de massa do gás de ensaio empregado.

A taxa de vazamento de um gás, como, por exemplo, do nitrogênio, através de uma descontinuidade pode ser determinada medindo-se o pico deste gás no espectro de massa de análise de gás residual obtido. Para isso, deve-se seguir o seguinte procedimento:

- determinar (veja item 17.5.4.1) ou avaliar a pressão parcial do nitrogênio;
- determinar ou avaliar a capacidade de sucção do equipamento de ensaio;
- determinar a taxa de vazamento empregando a equação 17.3.

$$q = p_{N_2} \cdot S \quad (\text{equação 17.3})$$

onde

- q é a taxa de vazamento, em $[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}]$;
- p_{N_2} é a pressão parcial do nitrogênio, em $[\text{mbar}]$;
- S é a capacidade de sucção, em $[\ell \cdot \text{s}^{-1}]$.

É possível, também, localizar vazamento analisando o gás residual de um objeto com pressão maior que a pressão de trabalho do espectrômetro de massa. Nesta técnica de ensaio, contudo, o sistema de admissão de gás do espectrômetro de massa deve ter uma válvula reguladora de precisão, de maneira que a pressão do gás de ensaio contido no objeto que será inspecionado possa ser reduzida para a pressão de trabalho do espectrômetro de massa ($p < 10^{-4} \text{ mbar}$). O equipamento de análise de gás residual é empregado, neste caso, como uma espécie de sonda aspiradora. A condição fundamental para a realização deste tipo de ensaio é que o objeto a ser inspecionado esteja cheio com gás de ensaio (que não deve ser o ar atmosférico), bem como que sua pressão seja menor que a pressão atmosférica.

Escolha do Método de Ensaio

- 18.1 Conhecimentos necessários para a escolha do método de ensaio
- 18.2 Áreas de utilização e limites de detecção dos principais métodos de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade
- 18.3 Classificação dos métodos de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade segundo a norma DIN EN 1779
- 18.4 Outras técnicas
 - 18.4.1 Introdução
 - 18.4.2 Ampliação dos métodos através de técnicas especiais
 - 18.4.3 Técnica "Tracer" (rastreadora)
 - 18.4.3.1 Gases de ensaio radioativos
 - 18.4.3.2 Rastreadores químicos
 - 18.4.3.3 Rastreadores físicos
 - 18.4.3.4 Espectroscopia de chama
 - 18.4.4 Emissão acústica
- 18.5 Limites da técnica de detecção de vazamento
- 18.6 Dispositivos de testes automáticos

18 Escolha do método de ensaio

18.1 Conhecimentos necessários para a escolha do método de ensaio

O sucesso da localização de vazamento ou do ensaio de estanqueidade depende não somente do cuidado com que o inspetor realiza a inspeção e da qualidade de seu trabalho, como também da escolha do método de ensaio correto. Para que essa escolha seja feita corretamente, é preciso que as condições e o objetivo do ensaio sejam definidos com muita clareza em uma conversa com o cliente.

Antes de se escolher o método de ensaio a ser empregado na inspeção de um determinado objeto, é preciso saber:

- qual é a maior taxa de vazamento admissível especificada (obs.: segundo as normas existentes, não se pode especificar uma taxa de vazamento zero);
- qual deve ser a pressão de ensaio;
- qual é a direção de ensaio à qual ele será submetido, isto é, se o objeto será pressurizado ou evacuado (pressão no seu interior maior ou menor que a pressão em seu exterior, respectivamente);
- se ele tem resistência mecânica suficiente para suportar a pressão (sobrepresão ou vácuo) de ensaio à qual será submetido;
- se o que se deseja é localizar vazamento (ensaio local) ou medir a taxa de vazamento (ensaio integral);
- se o que se deseja é avaliar a ordem de grandeza da taxa de vazamento;
- se existem aspectos técnicos relativos à segurança que precisam ser observados.

Pode ainda ser que outros fatores influenciem a escolha do método de ensaio a ser empregado, como, por exemplo, a incompatibilidade do objeto de ensaio com o meio de ensaio, ou o tipo e a forma do relatório desejado.

18.2 Áreas de utilização e limites de detecção dos principais métodos de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade

Atualmente, é possível medir taxas de vazamento dentro de uma faixa de mais de 12 ordens de grandeza. Ao longo do tempo, foram desenvolvidos, com o objetivo de medir estas diferentes taxas de vazamento, diversos métodos de ensaio. A tabela 18.1 apresenta os métodos de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade mais importantes, assim como as suas respectivas faixas de taxa de vazamento detectável para condições de inspeção semelhantes às encontradas na prática.

Tabela 18.1: Áreas de utilização e faixas de taxa de vazamento detectável dos diferentes métodos de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade para condições de inspeção semelhantes às encontradas na prática.

Métodos com sobrepressão

Taxa de vazamento detectável [mbar·ℓ·s ⁻¹]												Possibilidade de quantificação	Ensaio local	Ensaio integral
10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²			
Líquido												sim	sim	sim
			Localização de vazamento com ultra-som									não	sim	não
			Método da bolha (ar / água)									sim	sim	sim
			Método da bolha (ar / solução formadora de espuma)									não	sim	não
			Método da diminuição da pressão									sim	não	sim
			Gás rastreador (NH ₃ , etc.)									sim ¹⁾	sim	sim
			Método do gás de ensaio: sonda aspiradora de hélio									sim ¹⁾	sim	sim

¹⁾ A quantificação da taxa de vazamento com a sonda aspiradora é limitada.

Métodos com vácuo

Taxa de vazamento detectável [mbar·ℓ·s ⁻¹]												Possibilidade de quantificação	Ensaio local	Ensaio integral
10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²			
			Localização de vazamento com ultra-som									não	sim	não
			Método do aumento da pressão									sim	não	sim
			Gás rastreador (halogênio, NH ₃ , etc.)									sim	sim	sim
			Ensaio de estanqueidade com hélio									sim	sim	sim
			Análise de gás residual									(sim)	(sim)	(não)

As faixas de taxa de vazamento detectável dos diferentes métodos de ensaio apresentadas na tabela 18.1 devem ser consideradas, em princípio, apenas como sendo valores de referência. Alguns métodos de ensaio envolvem propriedades físicas e/ou condições de medição que limitam suas faixas de taxa de vazamento

detectável. Muitas vezes, porém, além das limitações impostas por estas propriedades e condições, estas faixas são influenciadas pelas condições do ambiente em que a inspeção é realizada. Normalmente é possível medir um valor durante um ensaio feito em laboratório com uma precisão maior que aquela que se conseguiria caso a medição deste valor fosse em uma inspeção em campo, quando geralmente as condições de ensaio são desfavoráveis.

Em vista do exposto acima, é fácil compreender porque as informações sobre as faixas de taxa de vazamento detectável dos diferentes métodos de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade encontradas na literatura podem ser tão díspares. Quando uma fonte cita a taxa de vazamento de aproximadamente $10^{-6} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ como sendo a menor taxa de vazamento que se pode detectar com o método do ultra-som, por exemplo, esta fonte não pode ser considerada, sob o ponto de vista físico ou técnico, como sendo infidedigna. Sob o ponto de vista econômico, e também no que diz respeito à praticidade, por outro lado, este valor é considerado como sendo incorreto, visto que é necessário esperar 10^3 segundos, ou seja, 17 minutos, para que uma bolha de 1 mm^3 se forme.

A escolha de um determinado método de ensaio, porém, além de ter que ser feita levando-se em consideração a faixa de taxa de vazamento detectável, tem ainda que ser feita observando-se outros fatores. O método escolhido deve ser bastante seguro, bem como excluir toda e qualquer possibilidade de que ele possa causar dano no objeto de ensaio. Além disso, o custo de realização da inspeção também influencia bastante a escolha entre um e outro método de ensaio. Este custo é relativo não só ao tempo de realização da inspeção, como também aos equipamentos e instrumentos necessários e à quantidade e ao tipo de gás de ensaio que será empregado.

A figura 18.1, que mostra a freqüência com que descontinuidades com diferentes tamanhos (ou seja, taxas de vazamento) são encontradas na pesquisa e nos diversos segmentos da indústria, apresenta algumas informações importantes e que estão correlacionadas com os dados fornecidos acima. Esta curva "freqüência versus tamanho da descontinuidade", que na realidade é uma curva de Gauss, permite constatar que a maior parte das descontinuidades encontradas na prática apresenta uma taxa de vazamento que se situa em torno de $10^{-4} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. A partir de $10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, outros efeitos se sobrepõem a esta curva, como o da permeação de gás em objetos que são considerados como sendo estanques. Importante para o inspetor, contudo, é o fato de que para localizar vazamento ou realizar ensaio de estanqueidade em um objeto que apresente uma taxa de vazamento dentro da faixa de maior interesse, isto é, entre $1 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$ e $10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, existem vários métodos de ensaio à disposição que podem ser uma boa alternativa de escolha.

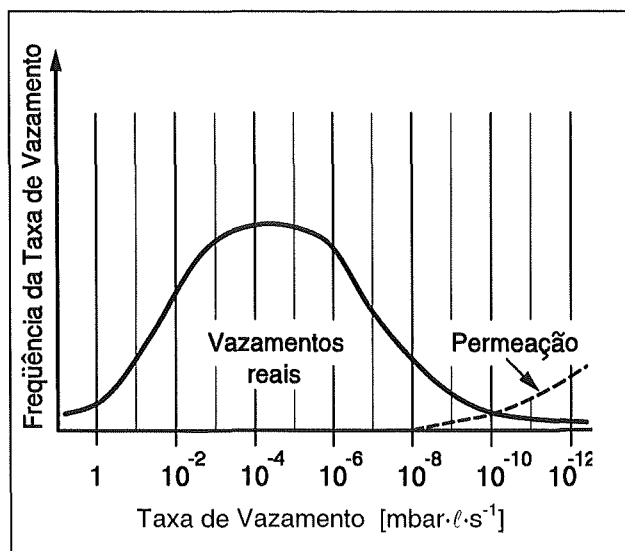


Figura 18.1: *Frequência com que descontinuidades com diferentes taxas de vazamento são encontradas na pesquisa e nos diversos segmentos da indústria [1.1].*

18.3 Classificação dos métodos de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade segundo a norma DIN EN 1779

O anexo A da norma DIN EN 1779 [4.5] apresenta, sistematicamente compilados em tabelas, e levando em consideração as condições de inspeção mencionadas anteriormente, todos os métodos de localização de vazamento e de ensaio de estanqueidade, sendo cada um destes métodos caracterizado por uma letra e um algarismo. Além da menor taxa de vazamento detectável com cada método, são citados neste anexo detalhes importantes relativos ao princípio de medição, os instrumentos e equipamentos necessários para a inspeção, bem como as limitações e as restrições relativas ao objeto de ensaio. A seguir são apresentados a seção 6 e o anexo A da norma DIN EN 1779.

Trecho da DIN EN 1779, seção 6: "Ensaio de Estanqueidade" [4.5]

Ensaio de Localização de Vazamento e de Estanqueidade: Metodologia para a Escolha de um Processo de Ensaio.

Tabela 1: Metodologia para a escolha do ensaio para a inspeção de um objeto.

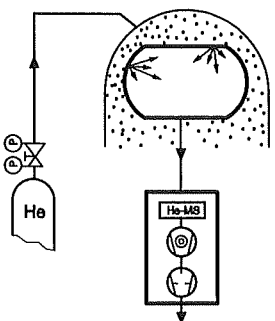
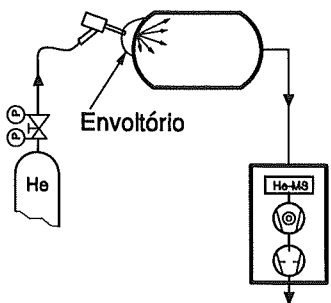
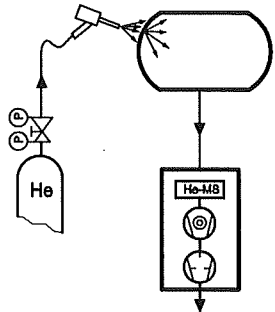
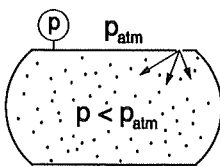
Fluxo de matéria	Tipo de ensaio	Aplicação na	Ensaio
De dentro para fora do objeto de ensaio	Local	Localização	B1, B2.2, B4, C3
		Medição quantitativa	B2.1, B3, D3
	Integral	Localização	C1, C2
		Medição quantitativa	B5, D1, C1, B3, B6, D3, D4
De fora para dentro do objeto de ensaio	Local	Localização	A3
		Medição quantitativa	A2, D3
	Integral	Localização	
		Medição quantitativa	A1, D2, D3, D4

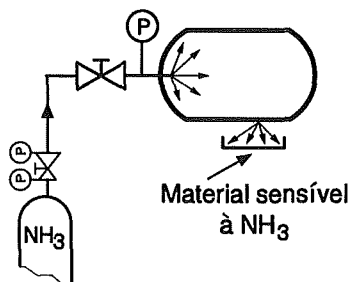
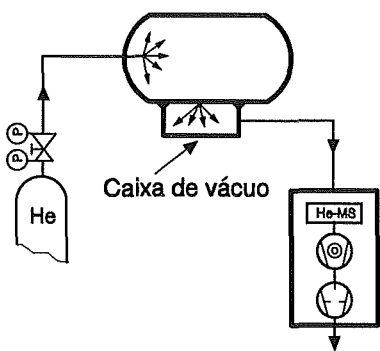
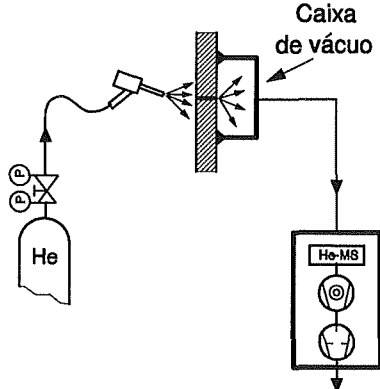
Etapas:

1. escolher, da esquerda para a direita, a seqüência de ensaio a ser adotada;
2. definir se somente uma região do objeto será inspecionada (ensaio local), ou se será o objeto inteiro (ensaio integral);
3. definir o objetivo da inspeção: se é detectar ou localizar um vazamento, ou se é medir a taxa de vazamento;
4. escolher o procedimento de ensaio (A a D do anexo);
5. controle dos problemas que ocorrem na prática e que estão correlacionados com o ensaio.

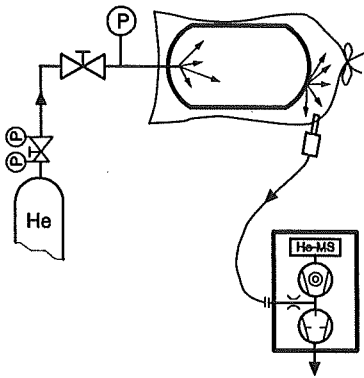
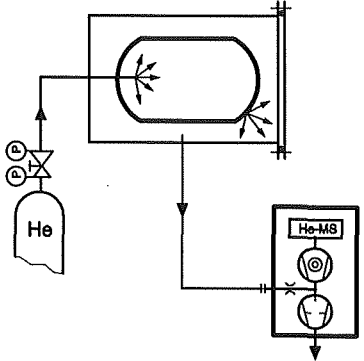
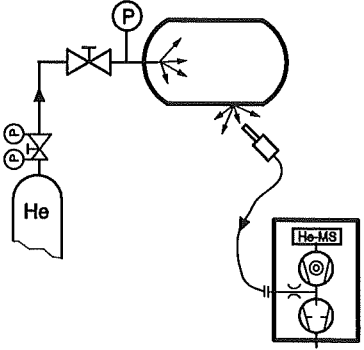
Obs.: Alguns ensaios utilizados na localização de vazamento também podem ser empregados na avaliação grosseira da taxa de vazamento. Estes ensaios, entretanto, não podem ser realizados seguindo o procedimento apresentado nesta norma.

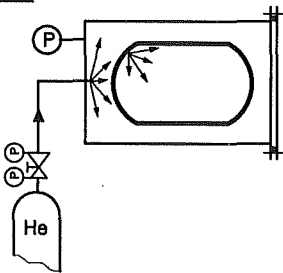
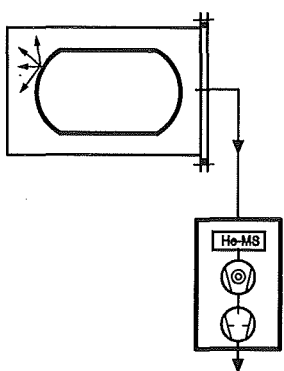
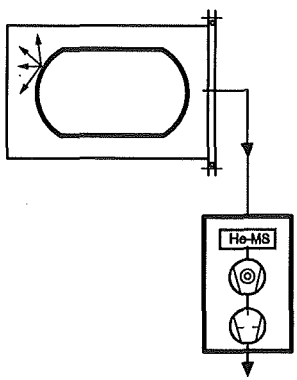
DIN EN 1779: Anexo A (Parte) [4.5]

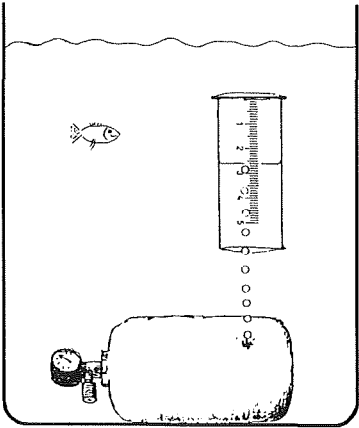
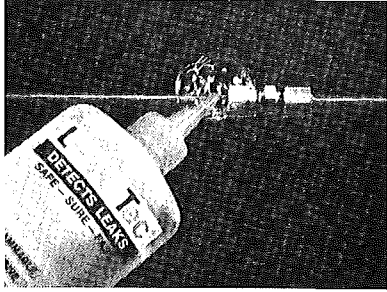
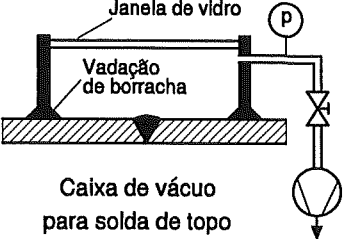
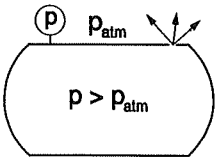
O gás de ensaio PENETRA no objeto de ensaio			
A 1	Método de vácuo (integral) <i>Gás de ensaio:</i> normalmente hélio	Medida $q_{L, \min}: 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (com He)	
A 2	Método de vácuo (local) <i>Gás de ensaio:</i> normalmente hélio	Medida $q_{L, \min}: 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (com He)	
A 3	Método de vácuo (local) <i>Gás de ensaio:</i> normalmente hélio	Detecção Localização $q_{L, \min}: 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
D 2	Aumento da pressão <i>Gás de ensaio:</i> ar atmosférico	Medida $q_{L, \min}: 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ *)	

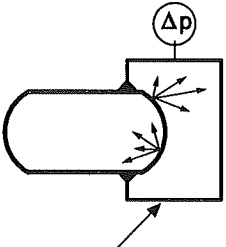
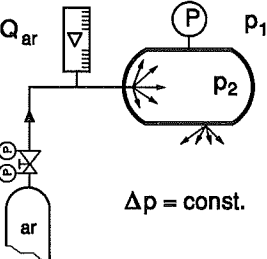
O gás de ensaio ESCAPA do objeto de ensaio			
B 1	Deteccção química com amônia <i>Gás de ensaio:</i> <i>amônia</i>	Deteccção Localização q_L, mín: 10^{-7} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
B 2.1	Câmara de vácuo, p/ usar a pressão do gás no interior do objeto <i>Gás de ensaio:</i> <i>normalmente hélio</i>	Medida q_L, mín: 10^{-9} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
B 2.2	Caixa de vácuo, c/ aspersão de gás de ensaio no lado oposto do objeto de ensaio <i>Gás de ensaio:</i> <i>normalmente hélio</i>	Deteccção Localização q_L, mín: 10^{-7} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	

O gás de ensaio ESCAPA do objeto de ensaio (continuação)

B 3	Sobrepessão (captura do gás que escapa) <i>Gás de ensaio:</i> <i>hélio, halogênio</i>	Medida q_L, mín: 10^{-5} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ *)	<u>Com envoltório de plástico:</u>  <u>ou vaso estanque sob vácuo:</u> 
B 4	Sonda aspiradora <i>Gás de ensaio:</i> <i>hélio, halogênio</i>	Medida q_L, mín: 10^{-7} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	

O gás de ensaio ESCAPA do objeto de ensaio (continuação)			
B 5	Ensaio Bombing <i>Gás de ensaio:</i> <i>normalmente hélio</i>	Medida q_L , mín: 10^{-9} até 10^{-6} $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	<u>Etapa 1:</u>  <u>Etapa 2:</u> 
B 6	Objeto de ensaio envolvido Método do vácuo (externo) <i>Gás de ensaio:</i> <i>hélio, halogênio</i>	Medida q_L , mín: 10^{-9} $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	

O gás de ensaio ESCAPA do objeto de ensaio (continuação)			
C 1	Método da Bolha (ensaio de imersão) <i>Gás de ensaio:</i> normalmente ar atmosférico	Detecção Localização q_L , mín: 10^{-4} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
C 2	Método da Bolha com solução formadora de bolha <i>Gás de ensaio:</i> normalmente ar atmosférico	Localização q_L , mín: 10^{-4} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
C 3	Método da Bolha com caixa de vácuo <i>Gás de ensaio:</i> normalmente ar atmosférico	Localização q_L , mín: 10^{-3} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
D 1	Diminuição da pressão <i>Gás de ensaio:</i> ar atmosférico ou outro gás não condensável	Medida q_L , mín: 10^{-5} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ *)	

O gás de ensaio ESCAPA ou PENETRA no objeto de ensaio			
D 3	Medição da variação de pressão <i>Gás de ensaio: ar atmosférico ou outro gás não condensável</i>	Medida $q_L, \text{ min:}$ 10^{-6} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ *)	 Câmara de ensaio
D 4	Medição do fluxo de gás <i>Gás de ensaio: ar atmosférico</i>	Medida $q_L, \text{ min:}$ 10^{-4} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	 $\Delta p = \text{const.}$

Observações:

*) Limites de detecção de pequenas taxas de vazamento, veja norma DIN EN 1779 [4.5].

No teste hidrostático e na detecção de vazamento por ultra-som as normas não são utilizadas.

Os desenhos **não** fazem parte da norma DIN EN 1779!

Conversão: $1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 10 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$

18.4 Outras Técnicas

18.4.1 Introdução

Foi visto anteriormente que existe uma série de diferentes processos muito comuns de inspeção de estanqueidade e de detecção de vazamentos com os quais é possível não só detectar ou localizar pequenos e grandes vazamentos, como também quantificar suas taxas de vazamento. A decisão da escolha do emprego de algum destes processos na inspeção da estanqueidade ou na detecção de vazamentos de um objeto de ensaio, entretanto, depende não só da sensibilidade de medida exigida, como também das diferentes condições de ensaio, como por exemplo, o acesso ao local de ensaio, a resistência mecânica do objeto de ensaio (é ou não adequado para vácuo?), a compatibilidade do objeto de ensaio com o meio de ensaio, etc.

Quando o processo de ensaio a ser empregado não for determinado pelo cliente, pelo chefe do serviço de inspeção ou por uma ordem de serviço que por acaso tenha sido expedida, então a decisão da escolha do processo de ensaio adequado e a condução correta do mesmo vai depender da experiência e da habilidade do inspetor de ensaio.

18.4.2 Ampliação dos métodos através de técnicas especiais

Na inspeção da estanqueidade e na detecção de vazamentos existem sempre casos ou situações em que os processos de ensaios comuns não podem ser empregados. Em vista disso, a seguir serão abordados alguns processos especiais que podem ser empregados nestes casos ou situações incomuns.

A listagem destes processos especiais com certeza não é completa, mas existe sempre a possibilidade de se delegar ao inspetor de ensaios, tendo em vista a sua capacidade, o desenvolvimento de novos processos de ensaio para casos de inspeção muito especiais.

18.4.3 Técnica "Tracer" (rastreadora)

18.4.3.1 Gases de ensaio radioativos

ou misturas de gases contendo substâncias voláteis radioativas

A detecção de vazamentos utilizando-se detectores de radiação vem obtendo aplicações em muitos casos nos quais uma medição sensível da radiação é necessária, como, por exemplo, em instalações nucleares.

O controle da radioatividade em um ambiente pode ser realizado explorando uma propriedade do gás ou vapor que está escapando de um objeto ou de um dado sistema, como, por exemplo, a sua atividade. Ao se constatar a existência de um vazamento em algum lugar deste ambiente, é possível localizá-lo com a ajuda de um

medidor de radiação. Com um contador sensível, como um fluxômetro para metano, por exemplo, consegue-se localizar o vazamento com uma sensibilidade altíssima (na faixa de ppb).

A técnica de ensaio com gases radioativos, devido aos problemas relacionados com a proteção radiológica (a fonte de radiação é aberta, havendo, conseqüentemente, o perigo de exposição de pessoas, animais e plantas à radiação), é empregada quase que exclusivamente na área nuclear, sendo o seu emprego em outras áreas limitado a casos extremamente especiais. Como exemplo do uso desta técnica de ensaio, pode-se citar a inspeção de fontes de radiação.

8.4.3.2 Rastreador químico

O princípio da técnica de ensaio do rastreador químico, isto é, do emprego de um meio de ensaio que seja a própria substância que esteja sendo fabricada ou processada em uma instalação, ou armazenada ou transportada em um recipiente, pode ser explicado da seguinte maneira: a substância que escapa através de uma descontinuidade reage com um indicador colocado na superfície de algum trecho da instalação, ou do objeto de ensaio, e atua, desta maneira, como meio de ensaio. Esta substância pode ser, por exemplo, amônia, algum tipo de ácido orgânico ou inorgânico, um solvente, etc..

As vantagens da técnica de ensaio do rastreador químico são:

- a possibilidade de inspecionar uma instalação sem que ela tenha que ser desligada;
- a possibilidade de localizar um vazamento com precisão;
- fato de ser de elevada sensibilidade.

Como desvantagens, pode-se citar:

- fato da inspeção somente poder ser realizada com a substância que está escapando pela descontinuidade;
- fato da substância que escapa pela descontinuidade geralmente ser agressiva, corrosiva, tóxica ou poluente.

18.4.3.3 Rastreador físicos

Praticamente todos os líquidos conseguem dissolver uma pequena quantidade de hélio, sendo esta característica dos líquidos usada na técnica de ensaio do rastreador físico. Quando um líquido dissolve uma pequena quantidade de hélio, costuma-se dizer que este líquido está marcado. Se em um determinado sistema fechado contendo um líquido não marcado for constatada a presença de hélio, então é porque este sistema está com vazamento.

Como exemplo do emprego desta técnica de inspeção, pode-se citar o ensaio em trocador de calor que opera com dois fluidos líquidos distintos. Neste caso, o líquido marcado se encontra no circuito quente e o não marcado no circuito frio, ou vice-versa. O ensaio consiste na dissolução de hélio em um dos líquidos do trocador de calor. A seguir, introduz-se no circuito do trocador de calor que contém o líquido não marcado a extremidade de um tubo sinterizado revestido com uma membrana de plástico com alta permeabilidade no que diz respeito ao hélio, mas que não permita a passagem de nenhum dos dois líquidos presentes no trocador de calor. A outra extremidade do tubo é conectada a um detector de vazamento de hélio, que faz vácuo no seu interior. Se houver um vazamento no trocador de calor, o líquido marcado penetrará no circuito que contém líquido não marcado, contaminando-o com hélio. O líquido contaminado, então, entrará em contato com a superfície externa do tubo sinterizado revestido com película de plástico, quando o hélio passa, por permeação, para o interior do tubo. Ao atingir o interior do tubo, o hélio é conduzido para o detector de vazamento de hélio e prontamente detectado. Desta maneira, pode-se constatar facilmente a existência de vazamento no trocador de calor. A sensibilidade da técnica de ensaio do rastreador físico é bastante elevada, visto que se consegue detectar uma concentração de 1 ppm de líquido marcado no líquido não marcado.

18.4.3.4 Espectroscopia de chama

Uma chama incolor, ao entrar em contato com um gás halogenado, como aqueles que contêm cloro ou flúor, passa a apresentar uma coloração que vai do verde até o azul, sendo esta sua característica utilizada como princípio de funcionamento do detector de vazamento de halogênio de chama. Na detecção de vazamento de halogênio de chama, o gás halogenado, como o freon, por exemplo, que escapa de um objeto de ensaio, é sugado por uma sonda aspiradora e conduzido até uma chama incolor. Esta chama, então, passa a apresentar uma determinada coloração. Como a sensibilidade desta técnica de ensaio não é elevada (a menor concentração de halogênio no ar atmosférico que pode ser detectada é de 100), é possível detectar somente descontinuidade com taxa de vazamento maior que $1 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. Devido aos males que provoca à saúde do inspetor, causados pela decomposição de gases contendo cloro e/ou flúor, a detecção de vazamento de halogênio com chama atualmente é utilizada somente em raríssimos casos.

18.4.4 Emissão acústica

O princípio da técnica de ensaio de emissão acústica é, nada mais nada menos, a detecção de som de diferentes frequências, seja na faixa audível ou inaudível (ultra-som). Uma descontinuidade com vazamento, seja ele de fluido gasoso ou líquido, emite um som que pode ser captado por um microfone especial. No caso do fluido ser líquido, se o seu escoamento através da descontinuidade for laminar, então é possível detectá-lo empregando um transdutor específico, que capta os ruídos na estrutura do objeto de ensaio. Utilizando-se vários transdutores acoplados

simultaneamente na superfície do objeto de ensaio, é possível, através de monitoramento adequado, localizar o vazamento de líquido comparando-se a intensidade do ruído captado.

A técnica de ensaio de emissão acústica é bastante usada na área nuclear no monitoramento do circuito primário de reatores nucleares de água pressurizada. Quando ocorre um vazamento, e ele é captado pelo equipamento de monitoração por emissão acústica, Além disso, ela também é empregada em alguns casos na indústria química.

18.5 Limites da técnica de detecção de vazamento

Os limites de um método de detecção de vazamentos são alcançados quando o transporte de massa de um lado para outro não é mais detectável.

Os motivos para isto podem ser:

- pequena quantidade, ou seja, concentração, para que o detector envie uma resposta;
- a captura da substância indicadora do outro lado é problemática por exemplo:
 - durante a operação de um sistema;
 - devido ao projeto de construção;
 - porque o outro lado não é definido, ou seja, é o ambiente exterior.

18.6 Dispositivos de testes automáticos

Sempre que o controle de qualidade exige a inspeção de peças produzidas em grande número, leva-se em consideração a automação do processo de ensaio. Na indústria existe um número muito grande de equipamentos automáticos ou semi-automáticos para o ensaio de peças dos mais diferentes tipos, especialmente quando o ensaio a ser realizado é o de variação (queda ou aumento) de pressão e de detecção de vazamento com hélio. Em vista disso, só será possível fazer apenas algumas observações gerais a respeito de ensaio em série.

Os equipamentos de inspeção em série são empregados, entre outras, nas seguintes indústrias:

- automobilística (ensaio de estanqueidade em motores, cabeçotes de cilindros, tanques de combustível, sistemas de injeção de combustível, rodas para pneus sem câmara, ...);
- processamento de metais (extintores de incêndio, barris, vasos, recipientes, tubulações, aquecedores, ...);
- elétrica (lâmpadas, luminárias, tubos, componentes eletrônicos, ...);
- refrigeração (compressores, circuitos de refrigeração, trocadores de calor,...).

Nestes casos são feitas freqüentemente as seguintes exigências no que diz respeito ao equipamento de ensaio de estanqueidade:

- fácil operacionalidade (operação com um único botão);
- observação da entrada das peças a ensaiar;
- reprodutibilidade dos resultados;
- solucionar rapidamente possíveis problemas que acarretem parada de funcionamento do equipamento de ensaio;
- baixos custos operacionais;
- economia de gases de ensaio através de reciclagem.

Estas exigências impostas resultam nas seguintes vantagens para o empresário:

- elevada confiabilidade no controle final;
- evita erros de operação;
- ensaio de lotes com grande número de peças;
- melhoria das condições de trabalho;
- aumenta a segurança no local de trabalho;
- economia de postos de trabalho.

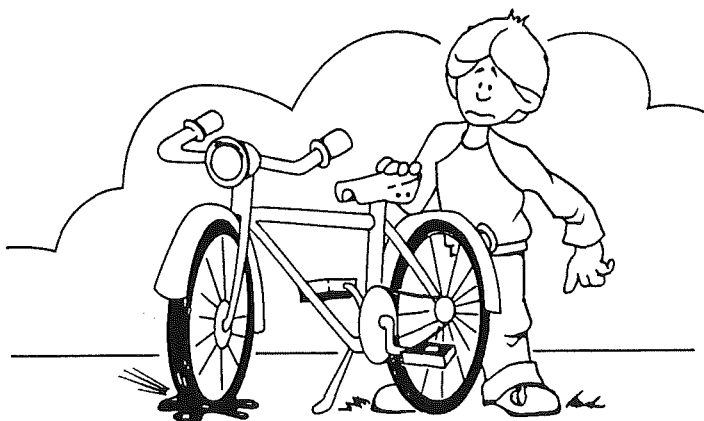
Sendo que este último ponto, pelo menos sob o ponto de vista do pessoal de ensaio, não é visto bem como uma vantagem.



[L]

Vazamentos Reais e Virtuais

- 19.1 Introdução
- 19.2 Vazamentos reais
 - 19.2.1 Vazamento de ar
 - 19.2.2 Vazamento de água
 - 19.2.3 Água no objeto de ensaio (obstrução de descontinuidade)
- 19.3 Vazamentos virtuais
 - 19.3.1 Degasagem
 - 19.3.2 Superfície suja
 - 19.3.3 Volume aprisionado
 - 19.3.4 Permeação



[1.1]

19 Vazamentos reais e virtuais

19.1 Introdução

Sob o ponto de vista físico, todos os objetos apresentam vazamento em maior ou menor grau. Átomos de hidrogênio, por exemplo, se difundem através de todos os materiais. O problema consiste em saber qual a quantidade de gás que atravessa um dado material. Em muitos casos o vazamento é tão pequeno, que não prejudica a realização de vácuo em um objeto ou não atrapalha o funcionamento do mesmo na condição de serviço preestabelecida, podendo, desta maneira, ser ignorado. Somente quando a taxa de vazamento real é maior que a maior taxa de vazamento admissível para um dado objeto, é que o vazamento deve ser localizado, para que seja providenciado o seu reparo. Neste caso, solicita-se o serviço de um especialista em ensaio de localização de vazamento.

Quando a estanqueidade especificada para um sistema ou um componente que trabalha com vácuo se torna mais severa, a maior taxa de vazamento admissível para este sistema ou componente diminui. Neste caso, a localização do vazamento é mais difícil e deve ser feita com mais cuidado. Quando isto ocorre, o inspetor encarregado da localização de vazamento se depara com fenômenos que dão a impressão de existência de vazamento. Apesar do vazamento não existir, estes fenômenos, denominados vazamentos virtuais, são reais e devem, portanto, ser distinguidos dos vazamentos reais, como vazamento de gás ou de água, que porventura possa existir.

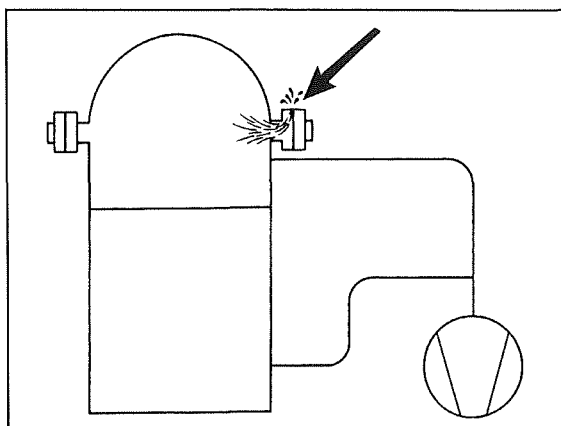
As causas dos vazamentos virtuais podem ser inúmeras; defeitos de fabricação ou de projeto, bem como a utilização de um material inadequado para emprego em vácuo, podem impedir que se atinja o vácuo almejado. Além disso, uma superfície suja também pode dificultar bastante a obtenção do vácuo desejado.

19.2 Vazamentos reais

19.2.1 Vazamento de ar

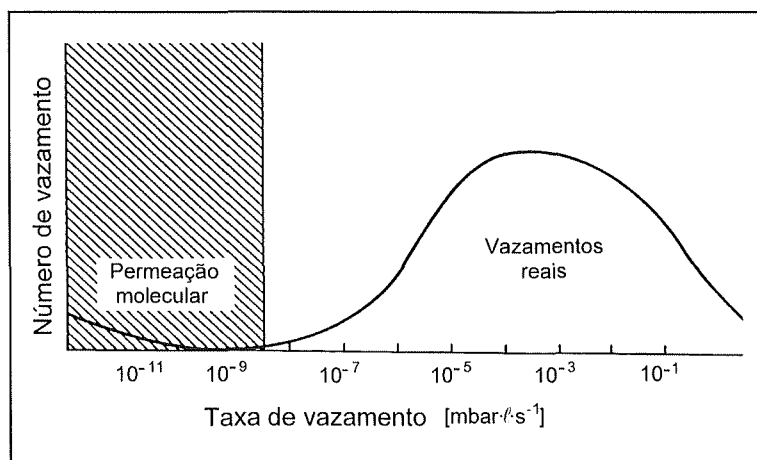
Vazamento real, como uma trinca, um poro ou um flange vedado incorretamente, pode ser facilmente encontrado com os processos de localização de vazamento conhecidos, como, por exemplo, com o processo de localização de vazamento de hélio. Este vazamento é freqüentemente denominado vazamento de ar.

Em um equipamento industrial moderno que trabalha com vácuo e que possui vários dutos e conexões existem inúmeros locais que podem apresentar vazamento. A figura 19.1 mostra, a título de exemplo, um vazamento em um flange. O vazamento que pode prejudicar um sistema que trabalha com vácuo é, na maioria das vezes, muito pequeno. Trata-se de vazamento que não é uma grande abertura, e, sim, uma pequena fresta ou trinca, que pode aparecer em um cordão de solda, em um flange ou até mesmo no material empregado na construção do equipamento.

**Figura 19.1:**

Flange com vazamento em equipamento que trabalha com vácuo [1.1].

Como se sabe, na prática são encontrados vazamentos dos mais variados tamanhos. Ao se classificar estes vazamentos segundo a frequência de ocorrência e o tamanho, obtém-se uma curva de distribuição (curva de Gauss), conforme a apresentada na figura 19.2. Observando-se esta figura, constata-se que existe um número relativamente pequeno de vazamentos grandes (maiores que $10^{-1} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$) e quase nenhum vazamento muito pequeno (menor que $10^{-7} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$). Os vazamentos encontrados em maior número apresentam taxas de vazamentos que variam entre 10^{-2} e $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$. No caso de valores menores que $10^{-8} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$, pode se tratar, além de vazamentos reais, de permeação molecular (por exemplo, em selos de vedação, como O-ring), o que faz com que o número de vazamentos apresentado na figura 19.2 sofra um pequeno crescimento aparente.

**Figura 19.2:**

Curva de distribuição de vazamentos encontrados na indústria [1.1].

19.2.2 Vazamento de água

Vazamento de água, especialmente aquele muito pequeno, em um sistema que trabalha com vácuo é quase sempre desagradável e problemático. Caso um objeto de ensaio contenha um sistema interno de refrigeração a água com vazamento, então o vazamento não terá ligação direta com o meio exterior (figura 19.3), sendo, portanto, muito difícil localizá-lo. Se o vazamento for pequeno o suficiente, ele pode ser muito traiçoeiro, pois, sob certas condições, talvez não seja possível encontrá-lo com a técnica de localização de vazamento que no caso esteja sendo empregada. Isto pode prejudicar a qualidade do produto que está sendo ensaiado e acarretar problemas sérios quando o mesmo estiver em serviço, o que muitas vezes exige que se tome medidas posteriores de melhoria muito dispendiosas. A possibilidade de aparecer vazamento de água aumenta, naturalmente, com o número de componentes de um sistema com vácuo que tenham que ser refrigerados a água.

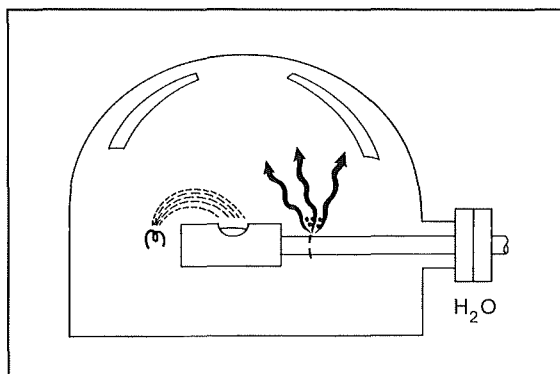


Figura 19.3:
Vazamento de água em um sistema de refrigeração [1.1].

Tabela 19.1: Pressão de vapor da água (p) a diferentes temperaturas (T) [1.1].

Temperatura, T [°C]		Pressão de vapor, p [mbar]
100	temperatura de ebulição	1013
50		130
25		31,7
0		6,3
-40	temperatura de fusão	$1,3 \cdot 10^{-1}$
-78,5		$6,6 \cdot 10^{-4}$
-196		10^{-24}

Além do exposto acima, também é importante mencionar que a água escapa por uma pequena descontinuidade somente na forma de vapor, de maneira que o vazamento de água não pode ser sempre identificado através da umidade ao seu redor. Os selos de vedação de silicone e O-rings são permeáveis ao

vapor de água e podem, assim, constituir uma fonte de água em um sistema de vácuo. A tabela 19.1 mostra a pressão de vapor da água a diferentes temperaturas. Observa-se que quanto menor for a temperatura, menor será também a pressão de vapor, sendo este comportamento válido para todas as outras substâncias.

19.2.3 Água no objeto de ensaio (obstrução de descontinuidade)

Um problema que ocorre com frequência durante a realização do ensaio de estanqueidade e que pode colocar o inspetor em dificuldades é a obstrução de uma descontinuidade com água ou outro tipo de líquido. Esta descontinuidade pode acarretar um vazamento real, porém ele não é detectado quando o objeto de ensaio é inspecionado.

O problema supracitado ocorre com frequência durante o ensaio de estanqueidade em vaso de pressão novo que, após a sua fabricação e antes de seu envio para o cliente, é submetido pelo fabricante a um teste hidrostático. Também é muito comum em instalação que deve ser inspecionada após ter trabalhado com algum tipo de líquido sob alta pressão. Em ambos os casos, pode ser que o líquido presente sob alta pressão penetre na descontinuidade. Caso a descontinuidade seja pequena, este tipo de obstrução raramente pode ser eliminado pelo sistema de bombas de um detector de vazamento quando se emprega, como geralmente é o caso, uma diferença de pressão de 1 bar ($\Delta p = 1 \text{ bar}$).

Quando a maior taxa de vazamento admissível para um objeto é muito pequena e se sabe que ele já entrou em contato com líquido sob pressão antes da realização do ensaio de estanqueidade, só é possível tomar uma providência que realmente seja efetiva: aquecer corretamente o objeto de ensaio. Neste caso, não é suficiente aquecer o objeto de ensaio com ar quente, como, por exemplo, com um soprador térmico. O aquecimento deverá ser feito empregando-se resistência elétrica e manta de amianto em torno da região a ensaiar (cordões de solda ou paredes do objeto), sendo que ela deverá ser aquecida a uma temperatura acima de 100°C (geralmente em torno de 200°C). O interior do objeto de ensaio deve ser evacuado com uma bomba de vácuo e o tempo de aquecimento, dependendo do tamanho do objeto, pode atingir várias horas.

Antes de se ensaiar o objeto, deve-se verificar se o mesmo pode ser evacuado ou contém materiais (inclusive selos de vedação) que suportam as altas temperaturas de aquecimento. Além disso, deve-se tomar medidas de segurança para a proteção do inspetor contra queimaduras, como colocar à sua disposição luvas e roupa antitérmica, empregar dispositivos que combatam a ação do calor, instruí-lo sobre segurança no trabalho, etc..

A experiência tem demonstrado que não é sempre que se pode confiar na informação do cliente de que o objeto de ensaio não foi submetido a ensaio hidrostático antes da realização do ensaio de estanqueidade. Quando o objeto de ensaio é evacuado com dificuldade, ou quando o indicador de pressão fica

estagnado no valor de cerca 25 mbar (pressão absoluta, valor este que corresponde à pressão de vapor da água a aproximadamente 20°C), na maioria das vezes não é a bomba de vácuo que está estragada e, sim, o objeto de ensaio é que contém algum resto de líquido em seu interior. Este líquido pode ser resíduo dos processos de lavagem e limpeza ou de alguma operação de decapagem química que tenha sido previamente realizada. Às vezes, todavia, o objeto de ensaio pode ter ficado aberto exposto à água da chuva antes da realização do ensaio de estanqueidade.

19.3 Vazamentos virtuais

Quando não se consegue evacuar um objeto de ensaio até um determinado valor de vácuo, pode ser que as causas dessa impossibilidade sejam diferentes daquelas relacionadas com os vazamentos reais supracitados. Isto se deve ao fato

- da degasagem;
- da contaminação da superfície;
- de um volume aprisionado;
- e do fluxo de gás através de um material (permeação);

freqüentemente se comportarem durante a realização do ensaio de estanqueidade como vazamentos reais, apesar de não o serem. Em vista disso, estas fontes de gás ou vapor são chamadas de vazamentos virtuais. Um vazamento virtual pode não só aumentar bastante o tempo de evacuação, caso não tenha sido detectado a tempo, como também reduzir o tempo de funcionamento de um sistema de produção ou comprometer a qualidade do produto fabricado com o objeto ensaiado.

19.3.1 Degasagem

Todo corpo sólido introduzido em um vácuo libera, em maior ou menor grau, uma grande quantidade de moléculas de gás ou vapor, liberação esta que é denominada degasagem. A degasagem se deve, fundamentalmente,

- à pressão de vapor do próprio corpo sólido;
- à liberação de moléculas adsorvidas (dessorção) pela superfície do corpo sólido;
- à difusão, no interior do corpo sólido, de moléculas de gás ou vapor dissolvidas ou absorvidas.

Todas as substâncias, inclusive as sólidas, desprendem moléculas de vapor e se encontram, quando estão em um sistema fechado, em equilíbrio termodinâmico com a fase no estado gasoso (figura 19.4). A pressão de vapor que se forma é chamada de pressão de vapor de saturação. No caso de um corpo sólido, por exemplo, a taxa de sublimação (passagem do estado sólido para o gasoso) relativa à sua superfície e a pressão de vapor de saturação dependem da temperatura e se tornam maiores quando a temperatura aumenta.

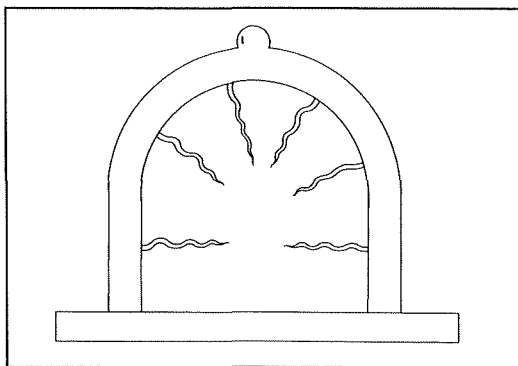


Figura 19.4:

Degasagem na parede interna de um equipamento com vácuo [1.1].

O conhecimento da pressão de vapor de saturação dos materiais empregados na tecnologia do vácuo é, em vista do descrito anteriormente, muito importante. Este tema, porém, é muito complexo e extenso para ser abordado neste livro. Em vista disso, serão feitos apenas alguns comentários fundamentais sobre este assunto. Os metais, como os aços inoxidáveis, o titânio, o alumínio, o cobre e suas ligas, são, devido à pequena quantidade de vapor que desprendem, adequados para o uso na tecnologia do vácuo. Isto, contudo, não é válido para todos os metais. O emprego do magnésio, do cádmio, do zinco e suas ligas na tecnologia do vácuo deve ser evitado em virtude de suas elevadas pressões de vapor. Eles são empregados, sob a forma de ligas comerciais mais usuais, na fabricação de componentes e podem, por isso, a elevadas temperaturas e no vácuo, sublimar por possuírem elevada pressão de vapor.

O problema da vaporização e da sublimação se torna mais grave quando se trabalha com materiais não metálicos, como vidros, cerâmicas e, principalmente, plásticos, ou com substâncias líquidas ou pastosas, como graxas e óleos, visto que estes materiais e substâncias químicas possuem estrutura química relativamente complexa e são compostos de moléculas de diferentes grupos. Por isso, quando se emprega estes materiais e substâncias, é preciso levar em consideração a pressão de vapor, a cada temperatura de trabalho em questão, de todos os grupos de moléculas que os constituem.

Os vidros, as cerâmicas e os quartzos específicos para uso técnico são constituídos de diferentes óxidos que possuem estrutura que pode ser amorfa ou cristalina. Estes óxidos têm uma pressão de vapor baixa, mesmo a elevadas temperaturas, sendo, portanto, na maioria das vezes, adequados para o uso na tecnologia do vácuo. Materiais à base de borracha, graxas, resinas e óleos, por outro lado, apresentam comportamento adverso por conterem substâncias com pressão de vapor elevada, devendo, por conseguinte, ter sua aplicação em equipamentos que trabalhem com vácuo restringida ao máximo. No caso de ser absolutamente necessária a utilização destes materiais, então deve-se empregar plásticos especiais e lubrificantes específicos para o uso em vácuo e com baixa pressão de vapor.

Existem inúmeros trabalhos sobre a dessorção de gases e vapores de diferentes materiais em vácuo. A tabela 19.2 mostra, a título de exemplo, as taxas de degasagem a 20°C de alguns dos materiais mais comuns na tecnologia do vácuo. Maiores informações sobre estes e outros materiais podem ser obtidas na literatura técnica específica [1.2].

Tabela 19.2: Taxa de degasagem, em $[\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}]$, a 20°C de diferentes materiais em função do tempo [1.2].

Material	Tempo, t [h]			
	1/2	1	3	5
Metais				
Ag	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$	—
Al	$2 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-9}$	—	—
Cu	$4 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-9}$
Aço inoxidável	—	$9 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Não metais				
Si	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Perbunan	$4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Viton	$7 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Acrílico	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$

Obs.: os valores fornecidos servem somente como orientação, pois dependem bastante do estado dos materiais.

Até mesmo o ar atmosférico pode atuar de maneira maléfica na superfície interna de um sistema de ultra-alto vácuo quando este sistema é novo ou é aberto e, em seguida, evacuado novamente até se atingir o vácuo desejado para serviço. A superfície interna deste sistema se encontra, nestes casos, recoberta com uma camada composta essencialmente de gases, como o oxigênio e nitrogênio, bem como de vapor de água, presentes no ar atmosférico. As moléculas destas substâncias aderem na superfície e não apresentam uma boa propensão a se desprenderem dos lugares em que se encontram durante a evacuação.

A camada prejudicial de gases e vapor de água deve ser removida o mais rápido possível, sendo que neste caso muitas vezes somente o aquecimento a uma temperatura entre 350°C e 400°C de todo o equipamento, por algumas horas, antes do mesmo ser colocado em funcionamento, é que permite resolver o problema. Como regra geral, pode-se dizer que para cada 100°C de aumento de temperatura de secagem, a taxa de degasagem (q_{pv}) após o aquecimento diminui em uma ordem de grandeza [1.2]. A taxa de degasagem de superfícies metálicas, vítreas ou cerâmicas bem limpas atinge, após um aquecimento por algumas horas a 450°C, cerca de $10^{-8} \dots 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. O aquecimento tem que ser conduzido de maneira que todas as partes sejam aquecidas simultaneamente; caso contrário, o

gás removido de um local quente pode se condensar novamente em um local que estiver frio.

19.3.2 Superfície suja

Superfície interna suja em um sistema que trabalha com ultra-alto vácuo (UHV) e extra-ultra-alto vácuo (XUHV) constitui um problema sério (figura 19.5). Tocar a superfície interna deste sistema com a mão suja de óleo, úmida ou suada, bem como empregar ferramenta de trabalho suja, pode ter graves conseqüências. É importante mencionar que uma mancha de óleo ao se vaporizar, não só produz uma grande quantidade de vapor de óleo à pressão ambiente, como também gera um volume de vapor de óleo várias ordens de grandeza maior que o seu tamanho. Neste caso, naturalmente, a lei de Boyle-Mariotte ($p \cdot V = \text{constante}$) é que rege esta transformação de estado.

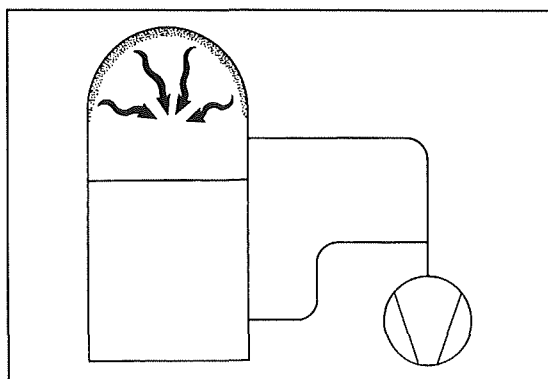


Figura 19.5:
Superfície interna suja em um equipamento que trabalha com ultra-alto vácuo [1.1].

O exemplo descrito a seguir ilustra, de maneira mais clara, o problema da contaminação da superfície.

Exemplo

Qual o volume que 1 g de óleo no estado líquido ocupa quando ele passa para o estado vapor a uma pressão de $1 \cdot 10^{-6}$ mbar ? São dados: a temperatura $T = 25^\circ\text{C}$ e o peso molecular do óleo $M = 200$ g/mol.

Segundo a equação de estado de um gás ideal, $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$, tem-se para

- $p = 1 \cdot 10^{-6}$ mbar;
- $M = 200$ g/mol; onde 1 g de óleo = $1/200$ mol e, com isso,
- $N = 1/200$ mol (número de mols);
- $R = 83,14$ mbar·ℓ·mol⁻¹·K⁻¹;
- $T = 298$ K;

um volume $V = 1,24 \cdot 10^8$ ℓ.

Desta maneira, uma pequena mancha de óleo pode se transformar rapidamente em vários metros cúbicos de vapor de óleo, que são retirados do sistema com muito esforço (figura 19.6). Supondo que se empregue uma bomba com capacidade de sucção $S = 200$ ℓ/s para evacuar o objeto de ensaio, então o tempo de evacuação (t_{eva}) é

$$t_{\text{eva}} = V / S = 6,2 \cdot 10^5 \text{ s} = 172 \text{ h.}$$



Figura 19.6:
O diabo está na mancha de óleo [1.1].

Os efeitos da degasagem de superfície suja de óleo muitas vezes só podem ser eliminados através de uma limpeza sistemática de toda a superfície que está sob ação do vácuo. Um sistema contaminado (por exemplo, com óleo, água, resto de produto de limpeza, etc.) pode também degasar tanto que não seja mais possível obter o vácuo desejado. Tem-se, então, a impressão de que o sistema apresenta um vazamento real. Na realidade, o que se tem é um problema de vazamento virtual.

19.3.3 Volume aprisionado

Volume aprisionado, considerado um vazamento virtual, é uma fonte de gás em um sistema com vácuo que libera partículas de gás ao longo de todo o tempo em que este sistema se encontra com vácuo. Este problema só pode ser resolvido quando se toma medidas preventivas, ainda durante o projeto do sistema de vácuo, que evitem a formação de volumes aprisionados.

A figura 19.7 mostra um parafuso que se encontra dentro de um sistema de vácuo e que aprisiona um pequeno volume de gás entre a sua ponta e a ponta do furo em que foi rosqueado. Este problema de aprisionamento de gás pode ser facilmente solucionado fazendo-se uma ranhura axial bem fina na rosca, ao longo de todo o comprimento da rosca do parafuso, ou fazendo-se um furo passante de pequeno diâmetro, que vai da cabeça do parafuso até a sua ponta.

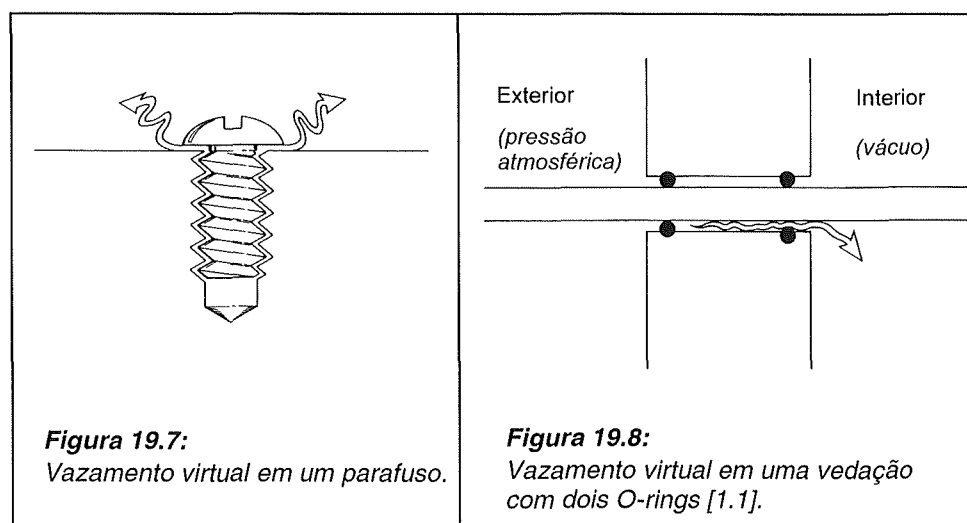
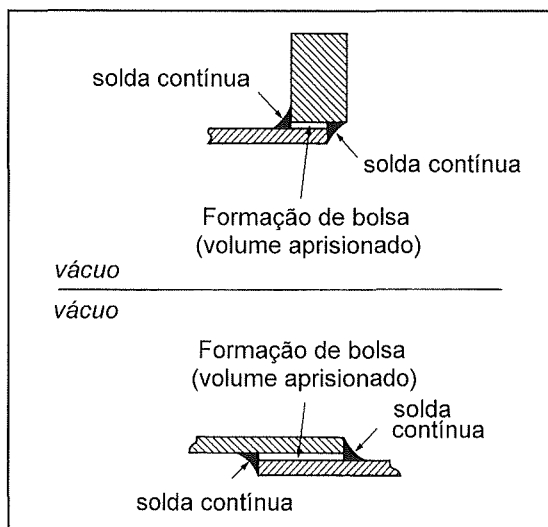


Figura 19.7:
Vazamento virtual em um parafuso.

Figura 19.8:
Vazamento virtual em uma vedação com dois O-rings [1.1].

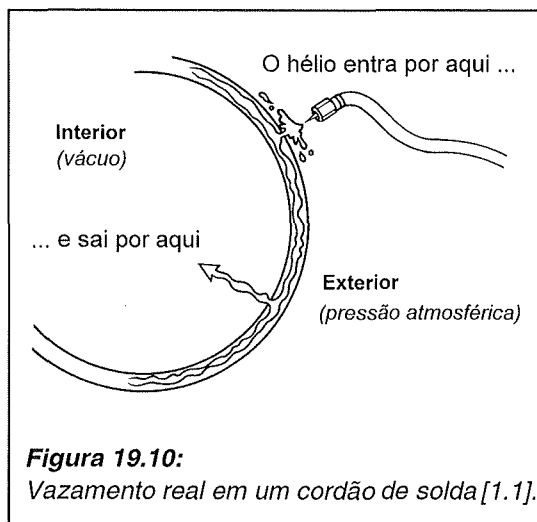
Vazamentos virtuais também podem ser causados por uma selagem feita simultaneamente com dois O-rings, conforme ilustra a figura 19.8. Quando, por motivos de projeto, tal sistema de selagem não puder ser evitado, pode-se resolver este problema empregando-se uma pequena bomba de vácuo, conectada ao volume que aprisiona o gás. Esta bomba, então, poderia perfeitamente remover o gás aprisionado entre os dois O-rings.

Um projeto de junta soldada inadequado também pode constituir um problema, no que diz respeito a vazamento virtual. Quando um equipamento é soldado internamente e externamente (figura 19.9), isto é, quando uma solda é feita no lado externo (sob pressão atmosférica) e outra no lado interno (com vácuo) do equipamento, ocorre o aprisionamento de gás no espaço entre as duas soldas.

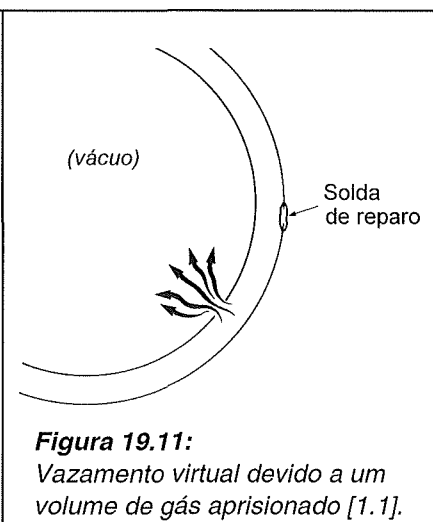
**Figura 19.9:**

Volume de gás aprisionado entre dois cordões de solda [1.1].

Quando a solda que se encontra no lado interno tem uma trinca capilar, o volume aprisionado cede continuamente, e por longo tempo, partículas de gás para o lado com vácuo. Neste caso, tem-se dois problemas, pois, por um lado, imagina-se, devido ao longo tempo necessário para se obter o vácuo desejado, que se tem um vazamento real no equipamento; por outro lado, não é possível localizar a trinca pelo lado externo do equipamento quando se emprega um detector de vazamento de hélio, mesmo quando se realiza o ensaio com a maior precaução possível. Até mesmo quando ambos os cordões de solda (externo e interno) têm um vazamento, não é sempre possível garantir que os dois vazamentos estão no mesmo local. Isto

**Figura 19.10:**

Vazamento real em um cordão de solda [1.1].

**Figura 19.11:**

Vazamento virtual devido a um volume de gás aprisionado [1.1].

significa que ao se fazer ensaio de detecção de vazamento de hélio no lado externo do equipamento, o He penetra no volume aprisionado por um determinado local e sai deste volume, penetrando no interior do equipamento por outro local totalmente diferente (figura 19.10).

O vazamento no cordão de solda externo pode ser reparado, porém o problema ainda não estará resolvido (figura 19.11). Enquanto o vazamento no cordão de solda interno não for localizado e reparado, o problema de vazamento virtual ainda persistirá.

Na tecnologia do vácuo é comum, em vista do problema de volume aprisionado descrito acima, fazer solda interna contínua e no lado externo somente fazer solda de ponteamto (figura 19.12). Desta maneira, é possível localizar com facilidade um vazamento e evitar volume aprisionado entre os dois cordões de solda. Melhor seria fazer uma única solda, de penetração total, unindo todo o material; entretanto, por motivos de projeto, nem sempre isto é possível.

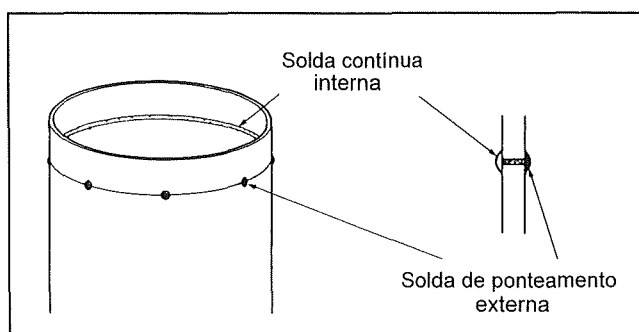


Figura 19.12:
*Realização da soldagem
na tecnologia do vácuo
[1.1].*

Na soldagem de componentes de um sistema que trabalha com vácuo emprega-se, na maioria das vezes, o processo TIG (figura 19.13). Este processo envolve o uso de arco elétrico e alta energia na união dos materiais, sendo possível realizar a soldagem autogenamente (sem o uso de material de adição). A soldagem TIG é bastante adequada para unir os diversos tipos de aços inoxidáveis existentes, cujas temperaturas de fusão variam entre 1450°C e 1550°C. Até mesmo o tungstênio, cuja temperatura de fusão é 2620°C, pode ser soldado com este processo. Durante a soldagem com o processo TIG, a poça de fusão é protegida por um fluxo de gás inerte, ou seja, um gás não reativo (por exemplo, o argônio), que sai da pistola de soldagem. Assim, é possível evitar a oxidação do cordão de solda e das superfícies do metal de base adjacente. Esta medida de proteção permite soldar até mesmo materiais como o alumínio que, caso não se empregasse gás de proteção, iria se oxidar muito rapidamente em virtude da presença do oxigênio do ar atmosférico que circunvizinha a solda.

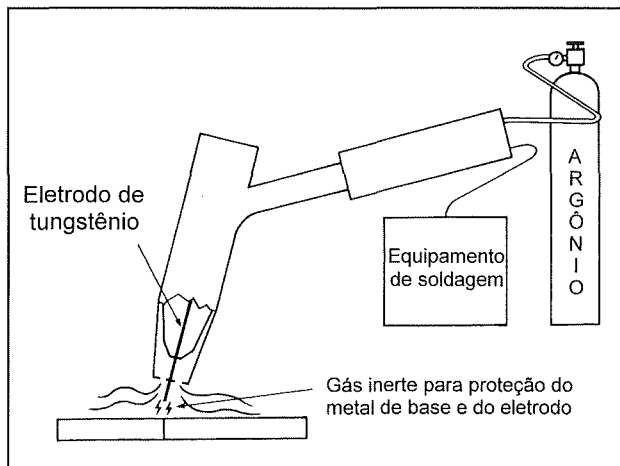


Figura 19.13:
Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) sem oxidação dos materiais empregados [1.1].

19.3.4 Permeação

É sempre necessário saber qual é a permeabilidade dos gases em todos os materiais empregados no revestimento ou na vedação de um sistema com vácuo. Esta propriedade é muito importante não só quando se usa materiais não metálicos, como também quando se emprega os metálicos. A passagem de gás através de um material sólido é chamada de permeação, sendo que este processo pode ser subdividido em três etapas:

- absorção do gás pela superfície do material que se encontra no lado de maior pressão;
- difusão do gás ao longo da espessura do material;
- dessorção do gás pela superfície do material que se encontra no lado de menor pressão.

A permeação de um gás em um material sólido depende muito da temperatura e é bastante influenciada pelo tipo de material em questão. Metais e vidros, por exemplo, possuem uma permeabilidade algumas ordens de grandeza menor que a permeabilidade dos plásticos.

Plásticos são empregados com freqüência na tecnologia de vácuo como materiais de vedação. Dentre eles, pode-se destacar os:

- durômeros, que possuem uma estrutura molecular tão entrelaçada, que até a altas temperaturas não possuem plasticidade, ou seja, não apresentam deformação quando tracionados. Resinas epóxi, como araldite® (nome comercial), por exemplo, são compostas de mais de um componente (na maioria das vezes dois componentes), que devem ser misturados somente imediatamente antes de serem usados. Após os componentes serem

misturados, forma-se uma massa endurecível, muito usada na tecnologia de vácuo para vedar, fixar ou unir pequenos componentes;

- termoplásticos, que são um pouco mais ou um pouco menos duros à temperatura ambiente, mas que a altas temperaturas são moles e deformáveis. Os artigos de plástico são, na maioria das vezes, fabricados com termoplásticos;
- elastômeros, que possuem uma elasticidade característica da borracha. Eles se deformam facilmente quando se encontram sob a ação de uma força e são empregados, por exemplo, como O-ring para a vedação de flanges. Neste caso, emprega-se principalmente três materiais distintos, conhecidos comercialmente como Perbunan[®], Viton[®] e Silikon[®] (veja tabela 19.3). Com relação à resistência destes materiais à ação corrosiva de meios agressivos, devem ser observados os dados dos fabricantes.

Tabela 19.3: Designação e propriedades dos materiais dos O-rings.

Nome Comercial	Designação			Polímero-base	Cor do O-ring	Dureza Shore A	Elasticidade (*)	Temperatura de serviço (°C)
	ASTM	ISO	DIN					
Perbunan N	NBR	NBR	NB	Borracha de acrilonitrila	Preta	70	elástico	-30 a +100 (+120)
Viton A	FKM	FPM	FP	Borracha fluorada	Preta / marron	80	amortecido e anelástico	-15 a +200 (+230)
Silikon	VMQ	MPQ	SI	Polisiloxano (silicone)	Vermelha ou azul	70	muito elástico	-60 a +180

(*) A informação sobre a elasticidade foi fornecida somente para poder diferenciar com rapidez os diversos materiais.

Devido às diferentes propriedades, como a resistência ao ataque químico em meio agressivo, a temperatura máxima de serviço, a taxa de permeação de hélio, etc., é fundamental a escolha do O-ring correto.

Os O-rings têm uma identificação na superfície. O-ring de silicone (Silikon[®]), por exemplo, é facilmente identificável devido à sua cor vermelha ou azul. Os O-rings classificados pela ISO como NBR e FPM, entretanto, não são muito fáceis de serem distinguidos um do outro, principalmente quando já foram retirados da embalagem. A identificação, neste caso, pode ser feita empregando-se um truque muito simples: os O-rings são colocados sobre uma base plana e dura; bate-se com uma chave de fenda sobre eles e o O-ring de Perbunan[®] (NBR) apresentará um comportamento muito mais elástico que o O-ring de Viton[®]. Neste caso, o O-ring de Viton[®] amortece e abafa o impacto da chave de fenda contra ele.

Quando se emprega plástico na tecnologia do vácuo, deve-se levar em consideração que a permeabilidade do hélio nos elastômeros é em geral bem elevada. Dos três materiais, o silicone (Silikon®) é o que tem a maior taxa de permeação (figura 19.14). O ensaio de estanqueidade em um sistema selado com O-ring pode, portanto, apresentar problemas. Pode ser que o ensaio de estanqueidade com hélio apresente problemas devidos à passagem de hélio através do O-ring, sendo por este motivo que quase não se emprega selo de silicone.

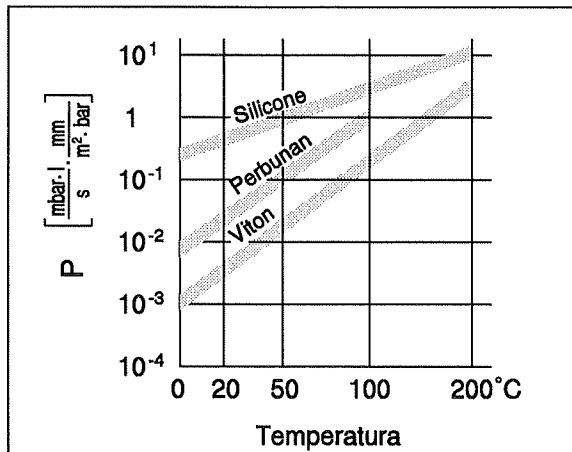


Figura 19.14:

Coeficiente de permeação (P) de O-rings de diferentes materiais [1.3].

A prática tem demonstrado que nos ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade com hélio feitos em um sistema que foi impregnado com hélio e que contenha O-rings NBR e FPM, somente após cerca de 10 a 15 minutos é que a permeação de hélio é acusada pelo detector de vazamento.

Um material auxiliar indispensável nos ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade é a massa para calafetagem; um plástico de elasticidade permanente, conhecido comercialmente pelos nomes Prestik AE® ou Bostik®. Muito empregado em carroceria de veículo automotor, este plástico, à base de poliiisobutileno, é fornecido na forma de rolo de tira ou de barra. Ele pode ser usado com muita eficiência como selo na conexão do objeto de ensaio com o detector de vazamento, sendo que sua colocação é muito rápida e fácil. Isto é muito importante, pois na prática, ao contrário das condições de ensaio realizado em laboratório, muitas vezes não se tem um objeto de ensaio com um flange ao qual se possa conectar adequadamente o detector de vazamento de hélio. Além disso, com este plástico pode-se vedar bem e rapidamente um vazamento que porventura venha a ser localizado, permitindo continuar a realização do ensaio caso existam ainda outros vazamentos no objeto de ensaio. Este plástico se desprende facilmente da superfície metálica sem deixar resíduo, pode ser utilizado várias vezes e ainda apresenta uma vantagem muito importante, que é a sua pequena taxa de permeação de hélio.

A tabela 19.4 mostra a permeabilidade de diferentes gases em alguns materiais. Esta permeabilidade é em alguns casos bem diferente, o que torna a escolha do material a ser empregado um pouco mais ou um pouco menos difícil. Esta escolha é um fator fundamental na avaliação da qualidade de um sistema que trabalha com vácuo.

Tabela 19.4: Permeabilidade, em $[\text{mbar} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{bar}] \cdot 10^{-8}$, de diferentes gases em alguns materiais [1.1].

Tipo ou nome comercial	CO ₂	He	H ₂	N ₂	O ₂	C ₃ H ₈	H ₂ O
Borracha de butadieno-estireno	92,8	17,3	30,1	4,7	12,8		
Borracha de butadieno-acrilonitrila							
Perbunan 18		12,7	18,9	1,89	6,12		
Perbunan alemão		9,2	11,3	0,84	3,0		
Hycar-OR-15		5,13	5,35	0,178	0,72		
Hycar-OR-25		7,40	8,85	0,45	1,76		
Acetato de celulose							
Celanese P-912			6,6		0,81		
Acetobutirato de celulose							
Kodapak II		10,8	15,8	1,1	2,8	2,0/ 31°C	
Nitrato de celulose		5,1			1,48	0,0057	4740
Etil celulose							
Ethocel 610	31,6		22,4	5,5	17,9		9750
Hidropol	36,3	11,8		3,0	8,5	40,5	
Mipolam MP	3,95		4,3	0,2	0,69		
Neoprene G	19,2	3,38	10,2	0,88	3,0		
Nylon 6	0,92			0,0063	0,023		53
Polibutadieno	103,9		31,6	4,85	14,3		
Polycarbonato							
MEM-213	713	90	150	75	128	900	750
Policloro trifluór etileno							
Kel-F			0,73	0,0025	0,02		0,22/ 30°C
Tritheno		25,5/ 30°C	0,73		0,0079/ 23°C		
Polietileno							
Alathon 14	9,5	3,7	5,88	0,73	1,65		
Poli(tereftalato de etileno)							
Mylar A	0,888	0,73	0,44	0,0031	0,019		97,8
Polipropileno (0,907g/cm ³)				0,33/ 30°C	1,72/ 30°C		36,8
Poliestireno							
Dow 0641	5,63/ 20°C		67,6	5,8	18,3		

(continuação da tabela 19.4)

Tipo ou nome comercial	CO₂	He	H₂	N₂	O₂	C₃H₈	H₂O
Poliestireno							
Dow 0641	5,63/ 20°C		67,6	5,8	18,3		
Poli(cloreto de vinila) plastificado							
101-EP-100	0,765/ 30°C		2,6/ 30°C				
Poli(cloreto de vinilideno)							
Saran 517	0,024	0,01	0,05		0,0018	2,7·10 ⁻⁴	7,4
Borracha butílica							
Oppanol-B-200			4,8	0,22	0,89		
Borracha clorada							
Pliofilm 140-N2	0,48		1,20				
Pliofilm PM1	0,70			0,109	0,40		
Borracha de poliisopreno, sintética	8,3	10,9	12,8	0,36	1,6		
Borracha natural	105	25,0	38,3	7,4	17,5	126	2570
Borracha de polissulfeto orgânica							
Thiokol B	2,37		1,2		0,22		
Borracha de silicone	2030	263	495	210	450	3080	28500
Teflon							
FEP	7,51	30,1	9,89	1,44	3,37		
TFE		523	17,8	2,4	7,5		
Vidro							
Sílica fundida		0,75	1,1·10 ⁻⁴				
Vycor		1,13	3,8·10 ⁻⁴				
Pyrex		0,09					
Soda lime		5,6·10 ⁻⁴					
protegido com raio X		3,1·10 ⁻⁷					
Vitreosil		0,48					

Na construção de sistema de ultra-alto ou extra-ultra-alto vácuo tem-se condições muito específicas, como o uso de materiais muito especiais e, às vezes, a realização de aquecimento das superfícies segundo procedimentos também muito específicos. Em virtude da elevada permeabilidade dos gases nos elastômeros, não é permitido o uso de selo de vedação destes materiais. Os componentes destes sistemas devem ser construídos com selo de vedação metálico caro e especial, porém que possa ser aquecido.

Não é permitido o uso de ferramenta com graxa em sistema de ultra-alto e extra-ultra-alto vácuo. O ambiente de trabalho tem que ser bem limpo e deve-se sempre usar luvas de pano limpas. No intervalo de tempo em que sistema não está operando, deve-se fechar provisoriamente todas as aberturas que estejam livres, com uma folha de alumínio, por exemplo, para evitar que o seu interior seja contaminado com sujeira.

Registro dos Resultados e Certificado de Teste de Vazamento / Estanqueidade

- 20.1 Registro dos resultados
 - 20.1.1 Detalhes do objeto de testes e da especificação
 - 20.1.2 Informações sobre a execução do teste
 - 20.1.3 Resultados
 - 20.1.4 Assinatura dos relatórios
- 20.2 Conceitos gerais para o relato dos resultados do ensaio
- 20.3 Certificado de teste de vazamento / estanqueidade



*Um trabalho só está concluído
quando toda a papelada foi feita*

20 Registro dos resultados e certificado de teste de vazamento / estanqueidade

20.1 Registro dos resultados

Dependendo do ensaio a ser feito, assim como da estrutura da empresa encarregada de realizá-lo, muitas vezes é necessário fazer um procedimento e um relatório de ensaio. Estes dois documentos, que constituem uma importante parte do ensaio de estanqueidade, não devem ser subestimados ou relegados a segundo plano, visto que o fabricante vem sendo responsabilizado cada vez mais pela qualidade de seu produto, bem como que o sistema de gerência da qualidade (por exemplo, a norma DIN EN ISO 9000 [4.12]) assumiu um papel significativo, não só no mercado europeu, como em outros mercados internacionais muito importantes.

Um relatório de ensaio bem elaborado constitui não só uma prova de que a inspeção foi realizada corretamente, como também, no caso de se ter que reparar o objeto de ensaio, uma ferramenta indispensável para que o reparo possa ser feito de uma maneira barata e eficiente, visto que ele mostrará com clareza e precisão os locais que apresentam vazamento e que devem ser reparados.

Independente do fato de uma pessoa estar elaborando um relatório de ensaio, ou simplesmente de tê-lo em mãos e estar avaliando os resultados da inspeção, o princípio apresentado a seguir constitui o critério básico para a avaliação da qualidade de um relatório de ensaio.

Um relatório de ensaio bom é aquele que permite que o ensaio possa ser repetido facilmente, com todos os seus detalhes, tanto na prática como no papel, sem que se tenha problema de qualquer natureza.

Para tanto, as seguintes informações devem constar do relatório de inspeção:

- ① • **O QUÊ**
- ② • **ONDE**
- ③ • **DE ACORDO COM O QUÊ,** o teste foi executado?
- ④ • **COMO**
- ⑤ • **COM O QUÊ,** o teste foi executado?
- ⑥ • **QUE RESULTADO** foi obtido?
- ⑦ • **QUEM** executou o teste e • **QUANDO ?**

De maneira a simplificar o trabalho de preenchimento, bem como assegurar que nenhum ponto importante seja esquecido, é de boa prática a confecção de formulários previamente impressos contendo todas as informações básicas necessárias que devem constar do relatório de inspeção.

Para melhor entendimento, alguns pontos importantes são abaixo descritos:

20.1.1 Detalhes do objeto de testes e da especificação

① **O QUÊ:** Descrição do objeto de teste através do desenho de fabricação ou listagem das dimensões específicas, etc.

No caso da inspeção de vários componentes do mesmo tipo, a identificação de cada componente testado deve ser realizada de modo não haver dúvidas.

Adicionalmente, no relatório deve constar se todo o componente ou somente certas partes, como soldas, câmaras, etc foram inspecionadas. Neste aspecto um croquis ou desenho ajuda a mostrar as partes inspecionadas.

② **ONDE:** O local onde foi realizada a inspeção deve estar descrito (laboratório, canteiro de obra, fábrica, etc). Também deve ser descrito se o objeto de teste estava montado e se havia alguma restrição quanto a acessibilidade.

③ **DE ACORDO COM O QUÊ:** As normas, especificações ou programas de inspeção que a inspeção de vazamentos seguiu devem ser mencionadas.

20.1.2 Informações sobre a execução do teste

Esta é a principal parte do relatório de inspeção e, se não for cuidadosamente preenchida, pode comprometer toda a inspeção realizada.

④ **COMO:** A seqüência de eventos na inspeção, localização dos instrumentos de medição, equipamentos auxiliares (exemplo: bombas de vácuo), sentido do teste (se do interior para o exterior e vice-versa), pressão em ambos os lados do objeto de teste, temperatura do objeto de teste e do ambiente, grau e procedimento de limpeza, procedimento de secagem, etc, devem ser informados. Também deve constar se a inspeção foi executada antes ou após o teste hidrostático.

⑤ **COM O QUÊ:** O tipo de equipamento de inspeção e medição utilizado, como modelo e fabricante, devem ser descritos. Caso o ensaio tenha sido realizado com vários equipamentos ou instrumentos do mesmo tipo, deve-se colocar no relatório o número de série ou de patrimônio destes equipamentos e instrumentos, de modo que se possa esclarecer quaisquer dúvidas que ocorram após a realização da inspeção. Quando for o caso, informações sobre a calibração e a sensibilidade do

equipamento, os fatores de amplificação e a faixa de medidas também devem ser descritas. O meio de ensaio, como o tipo de gás ou líquido, o teor da mistura de gás, ou a solução formadora de bolha, por exemplo, que venha a ser empregado, também deve constar no relatório.

20.1.3 Resultados

⑥ Em princípio, o relatório de inspeção deve descrever os resultados tal qual lidos no instrumento de medida, por exemplo sem arredondamentos. Também as unidades utilizadas não devem ser esquecidas. Para medidas tabeladas, é necessária a descrição dos parâmetros medidos, bem como as unidades que aparecem no título da tabela.

Conversões em outras unidades de medidas não devem ser realizadas na confecção do relatório de inspeção. Esta é uma grande fonte de erros. Qualquer alteração tanto nas unidades de medidas quanto em qualquer parte pré-impressa do relatório deve ser assinada pelo responsável e datada.

20.1.4 Assinatura dos relatórios

⑦ **QUEM e QUANDO:** Os relatórios de inspeção, e se necessário seus anexos, devem ser assinados e datados pelo inspetor. A assinatura deve ser legível, de modo a identificar posteriormente o inspetor.

Além dos itens básicos supramencionados, o relatório de ensaio pode conter outras informações. A norma DIN EN 45001 [4.11], por exemplo, exige que o laboratório de inspeção credenciado informe no relatório de ensaio *"... que o resultado da inspeção é válido somente para o instante em que o objeto de ensaio foi inspecionado ..."*, bem como *"... que o relatório de ensaio não pode ser parcialmente reproduzido sem permissão por escrito do laboratório de ensaio credenciado"*.

20.2 Conceitos gerais para o relato dos resultados do ensaio

Em geral devem-se observar os seguintes conceitos gerais:

O relatório deve ser feito com máquina de escrever ou com impressora que use somente tinta para documentos ou com caneta esferográfica. Não é permitido o uso de lápis ou de líquido corretivo em um relatório.

O relatório deve ser legível e feito de tal maneira que não haja necessidade de passá-lo a limpo para reduzir os erros de preenchimento. Importante: escreva o relatório com clareza, pois dados ilegíveis são considerados como não tendo valor.

As páginas do relatório devem ser numeradas e identificadas (por exemplo, página 3 do relatório 117/86), de maneira que, caso sejam misturadas, seja possível ordená-las e identificá-las sem problemas. Essa numeração e caracterização das páginas é muito importante, especialmente no caso de registros de equipamentos de medida ou de impressão de plotter ou de computadores que porventura venham a ser anexados ao relatório. Neste caso, se a identificação e a explicação ou descrição do documento não forem feitas corretamente logo após a realização da medida, muitas vezes é praticamente impossível ordenar e identificar registros e curvas algumas horas ou alguns dias após serem obtidos.

Observações incomuns importantes feitas durante o preparo ou a realização do ensaio devem ser necessariamente documentadas por escrito. Quando um formulário de relatório não tem espaço para "Observações", então deve-se anexar uma folha com identificação, sem se esquecer de assiná-la e datá-la.

Nota:

Raramente se percebe que um relatório de ensaio contém dados ou detalhes em excesso. Na maioria das vezes critica-se, sim, o fato do relatório não conter dados importantes!!

20.3 Certificado de teste de vazamento / estanqueidade

A área de ensaio de estanqueidade e vazamento é muito diversificada e existe um número muito grande de diferentes processos de detecção de vazamento. Ao se fazer o relatório, dependendo do processo empregado, deve-se relatar os diferentes fatos, conforme os conceitos descritos nos itens 20.1 e 20.2.

O relatório deve ser feito de maneira a facilitar o seu preenchimento. A seguir é apresentado um relatório que leva em consideração os dados dos ensaios de estanqueidade e vazamento mais importantes.

Este formulário pode ser usado em qualquer localização de vazamento e ensaio de estanqueidade que venham a ser feitos.



CERTIFICADO DE ENSAIO DE VAZAMENTO / ESTANQUEIDADE

Relatório Nº: _____

Pág.: _____ de _____ pág. (s)

☐ Nº de suplementos: _____**OBJETO :**conforme
Ordem de Serviço

Objeto Nº: _____

LOCALIZAÇÃO :**MOMENTO DO ENSAIO :**

- ☐ ensaio recebimento ☐ ensaio de campo ☐ auditoria ☐ controle geral
☐ antes ou $\Leftrightarrow$ ☐ após $\Leftrightarrow$ ☐ reparo ☐ montagem ☐ decapagem ☐ ensaio hidrostático c/ água
☐ _____

OBJETIVO DO ENSAIO :☐ Objeto de ensaio de acordo com desenho Nº: _____

- Local 1 ☐ atmosfera ☐ área de produção ☐ área de aquecimento ☐ área de resfriamento ☐ carcaça externa
Local 2 ☐ atmosfera ☐ área de produção ☐ área de aquecimento ☐ área de resfriamento ☐ carcaça externa

AGENTE DE ENSAIO / GÁS DE ENSAIO E CONCENTRAÇÃO DO GÁS DE ENSAIO :

- ☐ água ☐ ar ☐ hélio ☐ halogênio outro : ☐ _____

Concentração do gás de ensaio na área _____ : Cens = _____ %

- ☐ solução formadora de bolhas : $\Leftrightarrow$ Nome: _____ Tipo : _____

PRESSÃO DE ENSAIO :

- Local 1 ☐ pens = _____ ☐ bar Local 2 ☐ pens = _____ ☐ bar
☐ pabs ☐ mbar ☐ pabs ☐ mbar

Local foi evacuado antes do enchimento: ☐ SIM ☐ NÃO**TÉCNICA DE ENSAIO :**☐ conforme procedimento Nº: _____ de _____

- ☐ líquidos penetrantes ☐ ultra-som ☐ _____
☐ método da bolha : $\Leftrightarrow$ ☐ sob água ☐ com solução formadora de bolhas ☐ caixa de vácuo
☐ método da variação de pressão: $\Leftrightarrow$ ☐ queda de pressão ☐ aumento de pressão ☐ diferença de pressão
☐ método do hélio : $\Leftrightarrow$ ☐ método do vácuo : $\Leftrightarrow$ ☐ local ou ☐ integral
☐ sonda aspiradora : $\Leftrightarrow$ ☐ local ou ☐ integral

EQUIPAMENTO DE ENSAIO :

Fabricante: _____ Modelo: _____ Nº: _____

TAXA DE VAZAMENTO MÁXIMA ACEITÁVEL :taxa máxima aceitável $q_L =$ _____ mbar $\cdot$ l $\cdot$ s⁻¹ ☐ taxa simples ☐ taxa total**RESULTADO DO ENSAIO :**

- ☐ s/ objeções ☐ Nº de vazamentos detectados : _____
☐ rejeitado ☐ taxa de vazamento determinada $q_L =$ _____ mbar $\cdot$ l $\cdot$ s⁻¹ ☐ taxa simples
☐ taxa total

OBSERVAÇÕES:

LOCAL

DATA

INSPETOR

SUPERVISOR

Procedimento de Ensaio

- 21.1 Introdução
- 21.2 A importância do procedimento de ensaio
- 21.3 Etapas da elaboração de um procedimento de ensaio
 - 21.3.1 Identificação do objeto de ensaio
 - 21.3.2 Escolha do método de ensaio
 - 21.3.3 A redação do procedimento de ensaio
- 21.4 Estrutura e conteúdo do procedimento de ensaio
 - 21.4.1 Folha de rosto
 - 21.4.2 Objetivo do ensaio
 - 21.4.3 Inspetor e equipe técnica
 - 21.4.4 Condições prévias ao ensaio
 - 21.4.5 Equipamento de ensaio
 - 21.4.6 Sistema de ensaio
 - 21.4.7 Proteção da equipe técnica, do equipamento e do objeto de ensaio
 - 21.4.8 Objeto de ensaio com vazamento
 - 21.4.9 Conclusão do procedimento de ensaio
 - 21.4.10 Resultado do ensaio
- 21.5 Estrutura de um procedimento de ensaio



[L]

21 Procedimento de ensaio

21.1 Introdução

Segundo a diretriz de qualificação da "Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung – DGZfP" (Associação Alemã de Ensaios Não Destrutivos, [6.1]), bem como de acordo com outros documentos equivalentes existentes, como, por exemplo, a especificação americana SNT TC 1A [5.12], o inspetor de ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade nível 1 (LT1) deve ser capaz de fazer um ensaio com base em um procedimento de ensaio escrito ou falado, bem como de elaborar corretamente o relatório de ensaio.

O inspetor nível 2 (LT2) deve ser capaz de trabalhar com autonomia ao utilizar normas e outros documentos existentes. Além disso, este inspetor também deve ser capaz de elaborar um procedimento de ensaio e de interpretar os resultados de um relatório de ensaio realizado.

Uma pessoa com certificado de ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade nível 3 (LT3) deve ser capaz de acompanhar e orientar uma equipe técnica que porventura esteja realizando um ensaio, bem como ser responsável por essa equipe técnica e pelos equipamentos de inspeção. Além disso, o inspetor nível 3 deve estar bastante familiarizado com a elaboração, por escrito, de procedimentos de ensaio e deve interpretar os resultados de um relatório de ensaio realizado.

21.2 A importância do procedimento de ensaio

A diversidade de ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade realizados em uma única empresa que atua nesta área é muito grande, visto que se pode fazer ensaios em série em um número elevado de objetos relativamente simples ou realizar um ensaio complexo em um objeto de difícil inspeção, em uma parte de uma instalação ou até mesmo na instalação inteira. Os resultados esperados nestes ensaios também podem ser bastante diferentes: em alguns casos é suficiente responder sim/não, isto é, dizer se um objeto de ensaio apresenta ou não uma taxa de vazamento maior que a maior taxa de vazamento admissível (ensaio de estanqueidade, que avalia a *taxa de vazamento integral*); em outros casos o cliente deseja, além da determinação da taxa de vazamento, que o inspetor localize o vazamento (ensaio de *localização de vazamento*), de maneira que se possa fazer o seu reparo. Em todos estes casos, todavia, deve-se escolher cuidadosamente o método de ensaio adequado, elaborar um procedimento de ensaio completo e dar instruções precisas e claras à equipe técnica que está executando o ensaio.

Na maioria das vezes as instruções sobre a inspeção são transmitidas à equipe técnica por escrito, sendo denominadas, então, procedimento de ensaio. Desta maneira, é possível garantir que:

- o cliente receberá a informação correta sobre a estanqueidade de um determinado objeto ou sobre a localização de um dado vazamento;
- o resultado do ensaio não irá gerar dúvidas, pelo fato do procedimento de ensaio conter informações imprecisas;
- a realização de um ensaio posteriormente, ou a realização do mesmo ensaio em vários objetos iguais produzidos em série, será feita sempre da mesma maneira;
- o objeto de ensaio não será danificado, em decorrência de um manuseio irregular, como, por exemplo, uma pressurização indevida;
- a saúde da equipe técnica que realizará o ensaio não será prejudicada por falta de informações específicas sobre o assunto;
- a inspeção do objeto de ensaio foi realizada de uma maneira econômica e sem prejudicar o meio ambiente;
- as tarefas e as obrigações das pessoas envolvidas na inspeção estão bem definidas.

21.3 Etapas da elaboração de um procedimento de ensaio

21.3.1 Identificação do objeto de ensaio

É muito importante que a pessoa que vai elaborar um procedimento de ensaio conheça minuciosamente o objeto a ser inspecionado e o ambiente onde ele opera. Se houver necessidade, ela deverá solicitar ao usuário ou ao fabricante do objeto de ensaio uma visita ao local de inspeção. O objetivo e as particularidades do ensaio devem, então, durante esta visita, ser discutidos detalhadamente com o pessoal competente.

A inspeção de um componente, ou de uma peça, que esteja montado em uma instalação ou em um equipamento, e que se encontre em um ambiente diferente daquele que reina em um laboratório de inspeção, pode gerar uma série de dúvidas que têm que ser esclarecidas, como, por exemplo, se o acesso ao objeto de ensaio é fácil, se há necessidade de remover algum isolante térmico ou tinta antes de ensaiar o objeto, quem será a pessoa com quem o inspetor deverá entrar em contato no local de ensaio e se ele poderá contar com a ajuda desta pessoa. O inspetor também deve se informar sobre os materiais que se encontram próximos ou que são utilizados nas imediações do objeto de ensaio, bem como avaliar se eles podem influenciar o resultado da inspeção, se são venenosos ou explosivos, ou se há necessidade de adotar medidas de precaução especiais.

Se o objeto de ensaio já esteve em serviço, deve-se perguntar à pessoa competente com que fluido ele operou, assim como se este fluido era venenoso, inflamável ou prejudicial à saúde. Também deve ser esclarecido de que maneira e quem deve limpar o objeto de ensaio antes dele ser inspecionado. Independentemente dos custos envolvidos, é sempre muito importante definir quem assumirá a competência e será o responsável pela inspeção. É importante, também, lembrar que não é

somente a equipe técnica encarregada da inspeção que deve ser protegida durante a execução do ensaio. Uma limpeza inadequada do objeto de ensaio pode deixar resto da substância usada em sua limpeza em seu interior, de modo que esta substância pode contaminar o óleo da bomba de vácuo, degradando-o e fazendo com que ele perca as suas propriedades, necessárias para a obtenção do vácuo almejado. Se isto ocorrer, este óleo deve ser trocado imediatamente, ou, no mais tardar, na próxima manutenção ou no reparo da bomba de vácuo, sendo que a firma que está realizando esta troca deverá ser informada sobre o tipo de fluido que contaminou o óleo da bomba de vácuo. Assim, a pessoa que está realizando a troca do óleo não estará correndo nenhum perigo.

É necessário se informar junto ao cliente se há possibilidade de conectar o equipamento de ensaio, a bomba de vácuo, a garrafa de gás de ensaio, etc., ao objeto de ensaio, bem como se haverá necessidade de utilizar flange de transição (flange de ensaio) ou dispositivos auxiliares. Caso haja, qual seriam os fabricantes destes dispositivos. Mais ainda, é importante se certificar se existe energia elétrica no local de ensaio, se o acesso ao objeto de ensaio é fácil ou se há necessidade de se montar um andaime, se é preciso isolar a área, se é necessário montar um toldo, etc.

A pessoa encarregada da elaboração do procedimento de ensaio também deve ter em mãos os dados do projeto do objeto de ensaio, contendo seus desenhos com suas principais dimensões, e informações sobre os materiais utilizados na sua construção. No caso da inspeção de uma instalação completa, ou de somente um setor dela, é preciso ter o esquema da instalação mostrando suas válvulas, seus registros, seus locais de medição, etc. De posse destes documentos, pode-se obter as identificações das peças e dos componentes (por exemplo, das válvulas, tubulações, etc.) que o cliente utiliza e adotá-las no procedimento de inspeção a ser elaborado, excluindo-se, assim, a possibilidade de ocorrer confusão causada por uma designação diferente daquela usada pelo cliente. Além disso, o esquema da instalação é excelente para se anotar nele as áreas a ser inspecionadas, devendo, portanto, ser anexado ao procedimento de ensaio com estas informações.

21.3.2 Escolha do método de ensaio

Após se tomar conhecimento de todas as solicitações e necessidades do cliente, de se obter todas as informações, bem como de se ter inspecionado corretamente o objeto de ensaio, deve-se escolher o método de inspeção a ser empregado. Esta escolha, entretanto, deve ser feita levando-se em consideração alguns fatores, como, por exemplo, se o objeto de ensaio trabalha com vácuo ou sobrepressão. Os ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade devem ser feitos empregando-se a mesma pressão à qual o objeto de ensaio deve ser submetido em serviço, devendo, naturalmente, a sensibilidade do equipamento de inspeção ou do método de ensaio ser maior que a menor taxa de vazamento a ser detectada. Além

disso, a especificação de um ensaio de localização de vazamento ou de estanqueidade será decisiva na escolha do método de ensaio a ser empregado.

Finalmente, é necessário mencionar que o custo do ensaio de localização de vazamento ou de estanqueidade também é muito importante na escolha de um determinado método de ensaio. O tempo de ensaio é muitas vezes decisivo nesta escolha, visto que a sua redução pode significar uma enorme diminuição de custos. O método da aspersão de gás de ensaio permite inspecionar muito mais rapidamente que o método da variação da concentração de gás de ensaio empregando a técnica do envoltório, considerado muito demorado. A combinação de diferentes métodos de ensaio, por outro lado, também pode ser vantajosa; se os flanges em um objeto de ensaio de grande volume, por exemplo, forem pressurizados com ar e, com o objetivo de localizar grandes vazamentos, forem inspecionados com solução formadora de espuma antes da realização do ensaio de estanqueidade preestabelecido, pode-se economizar uma quantidade significativa de gás de ensaio.

21.3.3 A redação do procedimento de ensaio

A pessoa encarregada da elaboração do procedimento de ensaio constitui, na realidade, o elo de ligação do cliente com o inspetor. Nem sempre é fácil para esta pessoa colocar no papel todas as informações obtidas junto ao cliente, ou que ela coletou com enorme esforço, necessárias para a inspeção correta do objeto de ensaio. Na elaboração do procedimento de ensaio, todas as informações importantes devem ser citadas, de maneira que o inspetor, que não participou da reunião entre o cliente e o elaborador do procedimento de ensaio, possa ensaiar com facilidade e corretamente um objeto, sem que seja obrigado a fazer perguntas tanto à pessoa encarregada da elaboração do procedimento quanto ao cliente.

Alguns fatos que podem parecer óbvios para um inspetor ou chefe de um grupo de inspeção experiente e detentor de muito conhecimento, podem, talvez, passar despercebidos por um inspetor inexperiente. Por isso, o encarregado da elaboração do procedimento de ensaio deve mencionar, de maneira clara e precisa, em seu procedimento, todos os fatos e todas as informações a serem observados durante a inspeção do objeto de ensaio, bem como todos os resultados que devem ser utilizados e a maneira como deve ser feito o relatório de ensaio. É sempre muito desagradável quando um inspetor, após a realização do ensaio, em uma conversa crítica com a pessoa que elaborou o procedimento de ensaio, desaprova a maneira como o objeto de ensaio foi inspecionado e/ou questiona a validade do resultado da inspeção, afirmando que não podia adivinhar que o elaborador do procedimento de ensaio desejava que o ensaio fosse conduzido de outra maneira.

21.4 Estrutura e conteúdo do procedimento de ensaio

A estrutura e o conteúdo de um procedimento de ensaio são dois fatores muito importantes e fundamentais para o sucesso de uma inspeção. Primeiramente, o ensaio a ser realizado deve ser mencionado claramente no procedimento de ensaio. Após isto, são registrados, também com detalhes, os dados relativos ao método de ensaio adotado, às condições necessárias para a realização da inspeção e ao sistema de ensaio a ser montado, com seus respectivos equipamentos, bem como feita uma descrição de como o ensaio deve ser realizado. Informações importantes referentes à proteção tanto da equipe técnica que fará a inspeção como do objeto de ensaio também não podem ser esquecidas. Por fim, são citadas informações referentes à documentação de todos os fatos importantes e dos resultados da inspeção. Nos itens a seguir serão abordados tópicos relativos à elaboração do procedimento de ensaio.

21.4.1 Folha de rosto

Um procedimento de ensaio sem folha de rosto é como um automóvel sem placa. A folha de rosto contém informações importantíssimas, como o número de identificação do procedimento de ensaio, o nome da pessoa que o elaborou e a data de sua elaboração. Caso o procedimento de ensaio contenha várias folhas, então estas informações devem ser repetidas em cada uma das folhas seguintes. Além disso, a folha de rosto também deve citar o objetivo do ensaio e o método de ensaio a ser empregado, como, por exemplo, "Determinação da Taxa de Vazamento Integral de Hélio em um Recipiente de Transporte do Tipo XY" ou "Avaliação da Estanqueidade de Válvulas Empregando o Método da Solução Formadora de Espuma". Após isto, deve-se registrar na folha de rosto do procedimento de ensaio as suas áreas de validade e de utilização, identificando-se com precisão o objeto de ensaio e, caso necessário, informando o número de um desenho com sua descrição.

Antes de se iniciar o ensaio, é interessante e necessário que o cliente leia e assine na folha de rosto do procedimento de ensaio. A assinatura do cliente constitui uma prova de sua concordância com o conteúdo do documento, ou seja, significa que ele aceita os preparativos para o ensaio, bem como todas as atividades envolvidas durante a sua realização. Além disso, o elaborador do procedimento de ensaio fica respaldado por um documento oficial, evitando, desta maneira, reclamações e declarações do cliente do tipo "Isto não foi combinado entre nós e, por isso, não vou pagar.". A data constante na folha de rosto corresponde, naturalmente, à data da última revisão do procedimento de ensaio.

Se alguém que não estiver acostumado com os ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade tiver que ler o procedimento de ensaio, então é muito importante explicar alguns termos técnicos logo no início do procedimento de ensaio, de maneira que todos passem a utilizar uma mesma linguagem técnica.

21.4.2 Objetivo do ensaio

No início do procedimento de ensaio deve-se dizer com clareza e precisão o que será feito, ou seja, o objetivo do ensaio. Como objetivo do ensaio entende-se aquilo que se pretende atingir. Além de citar o objetivo do ensaio, tem-se que identificar o objeto a ser inspecionado, bem como escrever a data e o local de inspeção.

21.4.3 Inspetor e equipe técnica

É muito importante definir quem está autorizado a executar o ensaio. Se para a sua execução é exigida uma determinada qualificação ou conhecimento técnico da equipe envolvida ou do inspetor de ensaio, então esta exigência deve constar no procedimento de ensaio. De qualquer maneira, a equipe técnica envolvida na inspeção deve ter experiência suficiente com o método de ensaio a ser empregado.

21.4.4 Condições prévias ao ensaio

Freqüentemente o objeto de ensaio tem que ser preparado antes de ser inspecionado. Estes preparativos podem ser a desmontagem do objeto de ensaio do equipamento ou da instalação onde ele se encontra, ou a remoção de componentes do sistema, de isolamentos, de resto fluido que tenha sido armazenado ou produzido no objeto de ensaio, etc.. Além disso, pode ser necessário usar elementos de isolamento, de maneira a separar o objeto de ensaio, ou um trecho de uma instalação a ser ensaiada, do resto da instalação.

Se o objeto de ensaio tiver que ser submetido a um tratamento prévio especial antes de ser ensaiado, como, por exemplo, a uma limpeza (devendo ser definido quando e como ela deve ser feita) ou a uma secagem (devendo ser definido a que pressão e temperatura deve ser feita, bem como por quanto tempo), ou se ele opera com ultra-alto vácuo e deve ser manuseado com luvas limpas, então esta exigência precisa constar no procedimento de ensaio.

Mesmo que os preparativos prévios absolutamente necessários para a inspeção, como aqueles supracitados, por exemplo, não sejam de responsabilidade da equipe técnica que executará o ensaio, eles devem ser definidos e constar no procedimento de ensaio. É muito importante que no procedimento de ensaio conste quem deve fazer estes preparativos, não só por motivos relacionados com os custos do ensaio, como também para definir de quem é a responsabilidade pela sua execução.

21.4.5 Equipamento de ensaio

O procedimento de ensaio também deve informar com que equipamento a inspeção deve ser realizada, bem como quais serão os instrumentos auxiliares (manômetro, medidor de temperatura, etc.) necessários e suas respectivas precisões e faixas de medição. O elaborador do procedimento de ensaio deve especificar, também, de

que maneira o equipamento de inspeção e os instrumentos auxiliares devem ser examinados quanto ao seu estado de funcionamento e calibrados. No caso de determinados equipamentos de ensaio basta somente verificar se eles estão funcionando ou não. Ao se empregar um detector de vazamento de gás de ensaio (como o hélio, por exemplo), porém, deve-se calibrar o equipamento antes dele ser utilizado e realizar nova inspeção ao término do ensaio. Se o ensaio for muito demorado, é aconselhável verificar, no decorrer da inspeção, se o equipamento está funcionando perfeitamente.

O vazamento padrão empregado na calibração do equipamento de inspeção deve ter uma taxa de vazamento aproximadamente semelhante à maior taxa de vazamento admissível para o objeto de ensaio, bem como ser inspecionado regularmente (por exemplo, segundo o "Deutscher Kalibrierdienst – DKD" (Serviço Alemão de Calibração [6.9]). O procedimento de ensaio deve exigir que o número do vazamento padrão empregado na calibração, sua taxa de vazamento e a data de sua última aferição constem no relatório de ensaio.

As informações sobre o meio de ensaio também são indispensáveis no procedimento de ensaio, especialmente quando se trabalha com mistura gasosa, assim como sobre os meios auxiliares, como, por exemplo, flanges, conexões, dispositivos extras, etc., visto que se estes meios auxiliares não estiverem disponíveis, o ensaio pode atrasar, o que aumentaria o custo de sua realização.

21.4.6 Sistema de ensaio

A descrição do sistema de ensaio deve ser bastante precisa e detalhada, independentemente se o objeto de ensaio é muito grande ou de dimensões reduzidas. Neste sistema deve estar assinalado com clareza onde o equipamento de ensaio, como um detector de vazamento de hélio, por exemplo, deve ser acoplado, bem como que válvulas, orifícios e dutos devem permanecer abertos ou fechados. Nestes casos, é aconselhável fazer um desenho do sistema de ensaio, que pode ser bastante útil na compreensão destas informações.

Na maioria das vezes também é necessário informar minuciosamente qual deve ser a seqüência de ensaio e dos passos a serem dados durante a realização de uma inspeção, como, por exemplo, naquela feita em um objeto muito grande ou em uma instalação de grande porte. O procedimento de ensaio, nestes casos, informaria qual a seqüência de ensaio mais conveniente dos diferentes trechos desta instalação ou deste objeto. O ensaio hidrostático, por exemplo, só pode ser realizado após os ensaios de localização de vazamento e estanqueidade tiverem sido feitos, visto que, caso contrário, as descontinuidades, que por acaso estejam presentes, podem ser obstruídas pela água utilizada no teste hidrostático e não serem detectadas nos ensaios de localização de vazamento e estanqueidade realizados posteriormente.

Na seqüência de ensaio também devem ser informados os tempos de ensaio e de espera. Caso não se conheça o tempo de resposta do ensaio, então é preciso determiná-lo com o auxílio de um vazamento padrão de hélio antes da inspeção. Para isso, conecta-se o vazamento padrão no objeto de ensaio o mais distante possível do detector de vazamento de hélio. Se a inspeção está sendo feita em uma instalação com tubulações de diâmetro reduzido, o maior tempo de resposta só pode ser determinado após o vazamento padrão ter sido conectado em diferentes lugares destas tubulações e os respectivos tempos de resposta tiverem sido medidos. Estas medições serão, então, usadas no(s) ensaio(s) de estanqueidade a ser(em) realizado(s) posteriormente. O procedimento de medição do tempo de resposta, a taxa de vazamento do vazamento padrão, o local de sua conexão com o objeto de ensaio e o modo de documentação dos tempos de resposta (por exemplo, através de registros obtidos com um registrador gráfico x-t), naturalmente, devem ser anexados ou inseridos no procedimento de ensaio, para que ele possa ser considerado com tendo sido elaborado corretamente.

Visando-se evitar que o objeto de ensaio seja danificado durante a inspeção, a pressão de ensaio, por motivos técnicos, deve ser informada tanto no lado interno como no lado externo do local a ser inspecionado.

21.4.7 Proteção da equipe técnica, do equipamento e do objeto de ensaio

Dependendo do método de ensaio empregado e das condições como ele é feito, pode ser necessário colocar no procedimento de ensaio informações sobre as medidas tomadas na área de segurança no trabalho, como a proteção contra explosão (por exemplo, no caso do uso de equipamentos elétricos em instalações químicas que trabalhem com substâncias explosivas), o regulamento sobre o trabalho com os gases de ensaio, a determinação da pressão de trabalho, o modo (lento e cuidadosamente) como o objeto de ensaio será despressurizado, bem como a maneira como proceder, após a inspeção, no que diz respeito aos gases de ensaio prejudiciais ao meio ambiente. Alguns gases de ensaio são mais pesados que o ar atmosférico, podendo, em vista disso, se acumular no local de ensaio, em determinados recintos que fiquem em um nível inferior ou em escavações. Antes de se entrar nestes locais, é muito importante que eles sejam arejados, que a concentração de gases neles seja medida, e que estes gases sejam removidos de onde se encontram. Quando for necessário o uso de meios auxiliares, como elementos de isolamento, avisos, instrumentos de medição, etc., eles devem ser mencionados no procedimento de ensaio, de maneira que o inspetor tenha estes meios à disposição no momento em que ele precisar.

21.4.8 Objeto de ensaio com vazamento

O procedimento de ensaio deve detalhar como se deve proceder caso a taxa de vazamento do objeto de ensaio seja maior que aquela permitida. O inspetor deve ser

informado se ele deverá localizar o vazamento, bem como quem (oficina mecânica, cliente, executor responsável pelo ensaio, etc.) ele precisará avisar. Caso haja necessidade de repetir a inspeção após o reparo do objeto de ensaio, então o procedimento de ensaio deve especificar se ela será feita no objeto de ensaio todo ou se somente na região onde foi realizado o reparo.

21.4.9 Conclusão do procedimento de ensaio

Quando a seqüência de ensaio completa é muito detalhada e longa, o desenvolvimento de um fluxograma explicativo pode ser de grande utilidade na sua visualização. Desta forma, é possível acompanhar rápida e facilmente as decisões que um inspetor tem que tomar quando está inspecionando o objeto de ensaio. A figura 21.1, apresentada abaixo, mostra um trecho de um fluxograma desenvolvido especialmente para acompanhar uma seqüência de ensaio longa e detalhada.

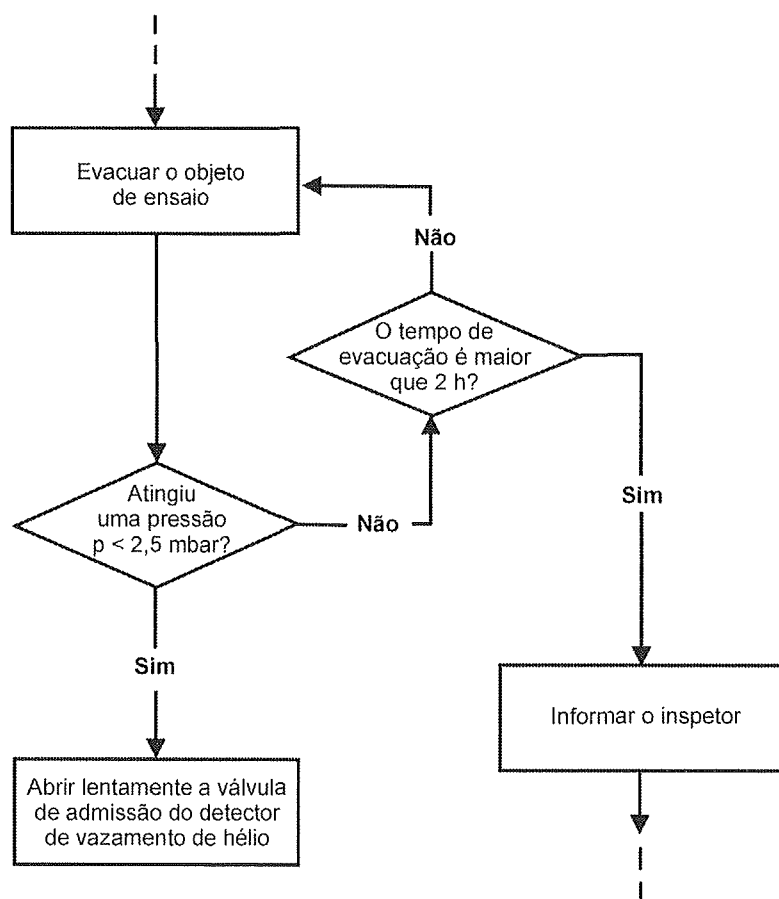


Figura 21.1: Fluxograma para acompanhamento de seqüência de ensaio.

21.4.10 Resultado do ensaio

As informações referentes ao registro do resultado do ensaio no relatório de ensaio são fornecidas somente no final do procedimento de ensaio. Neste caso, tem-se que informar que dados são importantes e como o registro dos mesmos deve ser feito. Se o procedimento de ensaio não contiver estas informações, pode ser que alguns dados ou resultados parciais importantes se percam, o que poderia exigir, em determinadas situações, a repetição do ensaio. Anexar uma folha de relatório ou de resultados ao procedimento de ensaio muitas vezes ajuda o inspetor na realização do ensaio.

Devido à abrangência dos ensaios de localização de vazamento e de estanqueidade, não é possível comentar, neste capítulo, todos os fatores que devem ser observados durante a elaboração de um procedimento de ensaio. No item a seguir será apresentado, a título de ilustração, um procedimento de ensaio, bem como citados alguns dados importantes que ele deve conter.

21.5 Estrutura de um procedimento de ensaio

A estrutura apresentada abaixo, desenvolvida a partir de uma análise criteriosa e detalhada de diferentes procedimentos de ensaio de diversas empresas, abrange todos os pontos importantes que devem ser abordados em um procedimento de ensaio.

Folha de rosto	<i>Número de identificação, método de ensaio, área de validade, assinatura do cliente e nome do elaborador</i>
0 Índice	
1 Área de validade e objetivo do ensaio	<i>Explicação sucinta do que se trata</i>
2 Equipe técnica encarregada do ensaio	<i>Por exemplo, citação da qualificação mínima exigida</i>
3 Condições para a realização do ensaio	<i>Preparação prévia, como, por exemplo, desmontagem, limpeza e secagem do objeto de ensaio, delimitação da abrangência do ensaio, bem como determinação do responsável por cada tarefa</i>
4 Medidas de segurança	<i>Medidas de segurança relativas à equipe técnica de inspeção e aos equipamentos e instrumentos</i>
5 Equipamento	<i>Tipo, faixa de medição, precisão, etc.</i>
6 Sistema de ensaio	<i>Fazer um esquema</i>
7 Preparativos para o ensaio	<i>Trabalhos relativos à equipe técnica de inspeção</i>

8	Seqüência de ensaio	<i>Esta seção deve ser elaborada com riqueza de detalhes</i>
8.1	Realização do ensaio	
8.2	Esvaziamento do objeto de ensaio e demais tarefas finais	
9	Repetição do ensaio	<i>Medidas a serem tomadas relativas aos vazamentos encontrados, procedimento após o reparo do objeto de ensaio</i>
10	Elaboração do relatório de ensaio	<i>Um trabalho muito bem executado deve ser muito bem apresentado</i>

Literatura, Referências Bibliográficas e Informações Gerais

- 22.1 Literatura e livros
- 22.2 Empresas e catálogos
- 22.3 Normas DIN (normas alemãs)
- 22.4 Normas DIN EN e DIN ISO (normas européias e internacionais)
- 22.5 Outras normas e documentos oficiais
- 22.6 Associações e instituições
- 22.7 Endereço dos autores



[L]

22 Literatura, referências bibliográficas e informações gerais

Obs.: Os títulos em itálico são traduções para o português somente dos títulos da literatura em alemão utilizada. Até o presente momento, as normas e a literatura citadas neste livro só estão disponíveis em alemão e/ou inglês.

22.1 Literatura e livros

- [1.1] **Basic Vacuum Practice**
Prática de Vácuo Básica
Varian Vacuum Products Division
Varian Associates, Inc., Palo Alto, California, 1986, Part No. 900-0085
USA / EUA
- [1.2] Wutz, M.; Adam, H.; Walcher, W.
Theorie und Praxis der Vakuum-Technik
Teoria e Prática da Tecnologia do Vácuo
Verlag / Editora: Fried. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1982
Deutschland / Alemanha
ISBN 3-528-04884-0
- [1.3] **Grundlagen der Vakuumtechnik. Berechnungen und Tabellen**
Fundamentos da Tecnologia do Vácuo. Exercícios e Tabelas
Leybold Vakuum GmbH, Köln, 1998
Deutschland / Alemanha
- [1.4] Kutzke, K.
Dichtheitsprüfungen und Lecksuche mit dem Helium-Leckdetektor
Ensaio de Estanqueidade e Localização de Vazamento com Detector de Vazamento de Hélio
Verlag / Editora: Expert-Verlag, D - 71272 Renningen-Malmsheim, 1998
Deutschland / Alemanha
ISBN 3-8169-0822-5
- [1.5] Adam, H.; Hartmann, H.-K.; Schwarz, W.,
Vakuumtechnik, Aufgabensammlung
Tecnologia do Vácuo, Exercícios
Verlag / Editora: Vieweg Verlag, D - 65100 Wiesbaden, 1996
Deutschland / Alemanha
ISBN 3-528-06758-6
- [1.6] B. Thier
Leckagen
Vazamentos
Verlag / Editora: Vulkan-Verlag, D - 45127 Essen, 1993
Deutschland / Alemanha
ISBN 3-8027-2701-0

- [1.7] **Partialdruckmessung in der Vakuumtechnik**
Medida da Pressão Parcial na Tecnologia do Vácuo
Firmenschrift / *Catálogo de empresa*
Balzers AG / Arthur Pfeiffer; D - 35614 Asslar
Deutschland / *Alemanha*
- [1.8] Schröder, G.; Schmidt, W.; Payão Filho, J. da Cruz
Exercícios Teóricos e Práticos de Ensaio de Vazamento e Estanqueidade
Scientific Series of the International Bureau, Volume 40
Forschungszentrum Jülich GmbH, D - 52425 Jülich, 1996
Deutschland / *Alemanha*
ISBN 3-89366-203-7; ISSN 0938-7676

22.2 Empresas e catálogos

As firmas e os catálogos mencionados a seguir foram utilizados nestre livro.

- [2.1] **Leybold** Vakuum GmbH
Bonner Straße 498
D - 50968 Köln
Deutschland / *Alemanha*
- [2.2] **Balzers** AG Instrumente
FL - 9496 Balzers
Fürstentum Liechtenstein / *Principado de Liechtenstein*
- Obs.: Os Departamentos de Ensaio de Estanqueidade da Leybold e da Balzers se juntaram, em 1 de julho de 2000, e deram origem à empresa denominada INFICON GmbH. Os endereços destes dois Departamentos, todavia, permaneceram inalterados.*
- [2.3] **Pfeiffer** Vacuum GmbH
Emmeliusstraße 33
D - 35614 Asslar
Deutschland / *Alemanha*
- [2.4] **Alcatel** CIT
98 – Avenue de Brogny – BP 2069
F-74009 Annecy
France / *França*
- [2.5] **Varian** Vacuum Products Lexington
121 Hartwell Avenue, Lexington, Massachusetts 02173
USA / *EUA*

22.3 Normas DIN (normas alemãs)

- [3.1] **DIN 1314**
Druck: Grundbegriffe, Einheiten
Pressure: Basic Concepts, Units
Pressão: Conceitos Básicos, Unidades
- [3.2] **DIN 1343**
Referenzzustand: Normzustand, Normvolumen
Reference Conditions, Normal Conditions, Normal Volume
Condições de Referência, Condições Normais, Volume Normal
- [3.3] **DIN 3230 (Teil / parte 1 ... 6)**
Technische Lieferbedingungen für Armaturen
Teil 3: Zusammenstellung möglicher Prüfungen
Technical Conditions of Delivery for Valves
Part 3: Survey of Methods of Test
Condições Técnicas para o Fornecimento de Válvulas
Parte 3: Lista dos Possíveis de Métodos de Ensaio
- [3.4] **DIN 25412**
Handschuhkästen. Teil 2: Dichtheitsprüfung
Glove Boxes. Part 2: Leak Test
Caixa de Vácuo. Parte 2: Ensaio de Estanqueidade
- [3.5] **DIN 25426**
Umschlossene radioaktive Stoffe
Teil 4: Dichtheitsprüfung während des Umgangs
Sealed Radioactive Sources
Part 4: Leakage Test Methods for Recurrent Inspections
Materiais Radioativos Encapsulados
Parte 4: Ensaio de Estanqueidade Durante o Manuseio
- [3.6] **DIN 25436**
Integrale Leckratenprüfung des Sicherheitsbehälters mit der Absolutdruckmethode: Sicherheitstechnische Anforderungen
Integral Leakage Rate Test of Containment with the Absolute Pressure Method
Ensaio de Estanqueidade de Vaso de Contenção com o Método da Pressão Absoluta
A norma DIN 25436 é idêntica à norma KTA 3405 (onde KTA significa "Kerntechnischer Ausschuß", isto é, Comitê de Tecnologia Nuclear)

- [3.7] **DIN 28400** (Teil / parte 1 ... 8)
Vakuumtechnik: Benennung und Definitionen
Vacuum Technology: Terms and Definitions
Tecnologia do Vácuo: Termos e Definições
- [3.8] **DIN 28401**
Vakuumtechnik: Bildzeichen – Übersicht
Vacuum Technology: Graphical Symbols
Tecnologia do Vácuo: Símbolos Gráficos
- [3.9] **DIN 28402**
Vakuumtechnik: Größen, Formelzeichen, Einheiten
Vacuum Technology: Quantities, Symbols, Units
Tecnologia do Vácuo: Grandezas, Símbolos, Unidades
- [3.10] **DIN 28416**
**Kalibrierung von Vakuummetern im Bereich von 10^{-3} bis 10^{-7} mbar:
Allgemeines Verfahren, Druckerniedrigung durch beständige
Strömung**
Vacuum Technology: Calibration of Vacuum Gauges Within the Range of
 10^{-3} to 10^{-7} mbar:
General Method, Pressure Reduction by Continuous Flow
*Tecnologia do Vácuo: Calibragem de Medidores de Vácuo na Faixa de
 10^{-3} a 10^{-7} mbar:
Método Geral, Redução de Pressão Através de Fluxo Contínuo*
- [3.11] **DIN 28417**
**Vakuumtechnik: Messen des pV-Durchflusses nach dem
volumetrischen Verfahren bei konstantem Druck**
Vacuum Technology: Measurement of Throughput by Volumetric Method
at Constant Pressure
*Tecnologia do Vácuo: Medida de Fluxo pelo Método Volumétrico para
Pressão Constante*
- [3.12] **DIN 28418**
**Vakuumtechnik: Standard-Verfahren zum Kalibrieren von
Vakuummetern durch direkten Vergleich mit einem Bezugsmeßgerät**
Vacuum Technology: Standard Method for Vacuum Gauge Calibration by
Direct Comparison
*Tecnologia do Vácuo: Método Padrão para a Calibragem de Medidor de
Vácuo por Meio de Comparação Direta*

22.4	Normas DIN EN e DIN ISO (normas européias e internacionais)

- [4.1] **DIN EN 473**
Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung; Allgemeine Grundlagen
Qualification and Certification of Non-destructive Testing Personnel;
General principles
Qualificação e Certificação de Inspetor de Ensaio Não Destrutivo
- [4.2] **DIN EN 1330-8**
Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie
Teil 8: Begriffe für die Dichtheitsprüfung
Non-destructive Testing – Terminology
Part 8: Terms used in Leak Tightness Testing
Ensaio Não Destrutivo – Terminologia
Parte 8: Termos Usados no Ensaio de Estanqueidade
- [4.3] **DIN EN 1518**
Dichtheitsprüfung: Charakterisierung von massenspektrometrischen Leckdetektoren
Leak Testing: Characterization of Mass Spectrometer Leak Detectors
Ensaio de Estanqueidade: Caracterização de Detectores de Vazamento de Espectrometria de Massa
- [4.4] **DIN EN 1593**
Dichtheitsprüfung: Blasenprüfverfahren
Leak Testing: Bubble Test Method
Ensaio de Estanqueidade: Método da Bolha
- [4.5] **DIN EN 1779**
Dichtheitsprüfung: Kriterien zur Auswahl von Prüfverfahren und -methoden
Leak Testing: Criteria for Method and Technique Selection
Ensaio de Estanqueidade: Critérios para a Escolha do Método e da Técnica de Ensaio
- [4.6] **DIN EN 10204**
Metallische Erzeugnisse: Arten von Prüfbescheinigungen
Metallic Products: Types of Inspection Documents
Produtos Metálicos: Tipos de Documentos de Inspeção
- [4.7] **DIN EN 13184**
Dichtheitsprüfung: Druckänderungsverfahren
Leak Testing: Pressure Change Method
Ensaio de Estanqueidade: Método da Variação da Pressão

- [4.8] **DIN EN 13185**
Dichtheitsprüfung: Prüfgasverfahren
Leak Testing: Tracer Gas Method
Ensaio de Estanqueidade: Método do Gás de Ensaio
- [4.9] **DIN EN 13192**
Dichtheitsprüfung: Kalibrieren von Referenzlecks für Gase
Leak Testing: Calibration of Gaseous Reference Leaks
Ensaio de Estanqueidade: Calibragem de Vazamento Padrão de Gases
- [4.10] **DIN EN 13625**
Dichtheitsprüfung: Anleitung zur Auswahl von Dichtheitsprüfgeräten
Leak Testing: Guide to the Selection of Leak Test Instrumentation
Ensaio de Estanqueidade: Guia para a Seleção de Equipamentos de Ensaio de Estanqueidade
- [4.11] **DIN EN 45001**
Allgemeine Kriterien zum Betreiben von Prüflaboratorien
General Criteria for the Operation of Testing Laboratories
Crítérios Gerais para a Operação de Laboratórios de Ensaio
- [4.12] **DIN EN ISO 9000**
Normen zum Qualitätsmanagement und zur Qualitätssicherung
Quality Management and Quality Assurance Standards
Normas de Gerência da Qualidade e Garantia da Qualidade

22.5	Outras normas e documentos oficiais

- [5.1] **Druckbehälterverordnung (DruckbehV)**
Decreto sobre Vasos de Pressão (DruckbehV)
- [5.2] **TRB - Technische Regeln Druckbehälter**
Regulamentos Técnicos sobre Vasos de Pressão – TRB
- [5.2.1] **TRB 500 bis TRB 533**
Verfahrens- und Prüfrichtlinien für Druckbehälter
TRB 500 a TRB 533
Diretrizes sobre Processo e Ensaio de Vasos de Pressão
- [5.2.2] **TRB 600**
Aufstellung der Druckbehälter
Montagem de Vasos de Pressão

- [5.3] **TRR - Technische Regeln Rohrleitungen**
Regulamentos Técnicos sobre Tubulações – TRR
- [5.4] **TRG - Technische Regeln Gas**
Regulamentos Técnicos sobre Gás – TRG
- [5.5] **AD-Merkblätter**
Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter
Folhas de Instrução AD
Grupo de Trabalho de Vaso de Pressão
Vertrieb durch / Solicitação de Cópia destas Normas em [6.5]
- [5.5.1] **AD-Merkblatt A 2**
Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung:
Sicherheitsventile
Folha de Instrução AD A 2
Dispositivo de Segurança para Pressão Elevada: Válvulas de Segurança
- [5.5.2] **AD-Merkblatt A 4**
Gehäuse von Armaturen
Anlage 1: Hinweise zur Anwendung der AD-Merkblätter der Reihen
HP und W für Gehäuse von Armaturen
Folha de Instrução AD A 4
Carcaça de Válvulas
Anexo 1: Informações para a Utilização das Folhas de Instrução AD – das
Séries HP e W para Carcaça de Válvulas
- [5.5.3] **AD-Merkblatt HP 0**
Allgemeine Grundsätze für Auslegung, Herstellung und damit
verbundene Prüfungen
Folha de Instrução AD HP 0
Princípios Gerais da Interpretação, da Fabricação e dos Ensaio
Obrigatórios Correlatos
- [5.5.4] **AD-Merkblatt HP 20**
Erstmalige Prüfung von Druckbehältern; Bauprüfung und
Druckprüfung
Folha de Instrução AD HP 20
Primeiro Ensaio de Vasos de Pressão; Teste de Construção e Teste
Hidrostático
- [5.5.5] **AD-Merkblatt HP 30**
Durchführung von Druckprüfungen
Folha de Instrução AD HP 30
Realização de Testes Hidrostáticos

- [5.6] **DVGW Regelwerk**
Deutscher Verband für Gas und Wasser
Regulamento DVGW
Associação Alemã de Gás e Água
- [5.6.1] **Arbeitsblatt G 469**
Druckprüfverfahren für Leitungen und Anlagen der Gasversorgung
Folha de Trabalho G 469
Teste Hidrostático em Tubulações e Instalações de Fornecimento de Gás
- [5.7] **DECHEMA Informationsblatt ZfP-1**
Dichtheitsprüfungen an Apparaten und Komponenten von Chemieanlagen
Folha de Informação DECHEMA ZfP-1
Ensaio de Estanqueidade em Equipamentos e Componentes de Instalações Químicas
Quelle / Fonte: [6.6]
- [5.8] **Richtlinie A1: Richtlinie über Schulung und fachliche Eignungsfeststellung von Prüfwerken der zerstörungsfreien Prüfung (Prüfwerker-ZfP)**
Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP)
Diretriz A 1: Diretriz de Instrução e Constatação de Capacitação Técnica de Oficina de Ensaio Não Destrutivo (Inspetor de Oficina de END)
Associação Alemã de Ensaio Não Destrutivos S.A. (DGZfP)
Quelle / Fonte: [6.1]
- [5.9] **TRGS - Technische Regeln für Gefahrenstoffe**
Regulamentos Técnicos sobre Substâncias Perigosas – TRGS
- [5.10] **TA-Luft: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft**
Instrução Técnica para a Manutenção da Pureza do Ar – TA-Luft
- [5.11] **VdTÜV-Merkblätter**
Verband der Technischen Überwachungsvereine e.V., Essen
Folhas de Informação VdTÜV
Associação das Sociedades de Fiscalização Técnica S.A., Essen
Vertrieb / Cópia: Verlag TÜV Rheinland
Postfach 90 30 60
D - 51123 Köln
Deutschland / Alemanha
- [5.11.1] **VdTÜV-Merkblatt 1051**
Rohrleitungen: Wasserdruckprüfung von erdverlegten Rohrleitungen
Folha de Informação VdTÜV 1051
Tubulações: Teste Hidrostático em Tubulações Subterrâneas de Água

- [5.11.2] **VdTÜV-Merkblatt 1060**
Rohrleitungen: Richtlinie für die Durchführung des Stresstests
Folha de Informação VdTÜV 1060
Tubulações: Diretriz para a Realização de Teste de Resistência
- [5.12] **SNT-TC-1A**
Recommended Practice for the Qualification of Nondestructive Testing Personnel
Práticas recomendadas para a qualificação de pessoal em ensaios não destrutivos
Published by the American Society for Nondestructive Testing, Inc.
Publicado pela Associação Americana de Ensaios Não Destrutivos
(American Society for Nondestructive Testing, Inc.)
1711 Arlingate Lane
Columbus, OH 43228-0518, USA / EUA
ISBN 1-57117-050-2

22.6 Associações e instituições

- [6.1] **Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP)**
Associação Alemã de Ensaios Não Destrutivos S.A. (DGZfP)
Max-Planck-Straße 6
D - 12489 Berlin
Deutschland / Alemanha
www.dgzfp.de/
- [6.2] **ABENDE**
Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos
Rua Guapiáçu, 05 - Vila Clementino
04024-020 São Paulo (SP)
Brasilien / Brasil
www.abende.org.br
- [6.3] **Forschungszentrum Jülich GmbH**
Centro de Pesquisa de Jülich S.A.
D - 52425 Jülich
Deutschland / Alemanha
www.fz-juelich.de/
- [6.4] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin**
Instituto Alemão de Normalização S.A.
Burggrafenstraße 6
D - 10787 Berlin
Deutschland / Alemanha

- [6.5] **Vertrieb aller Normen über: / *Solicitação de Cópia de Qualquer Tipo de Norma:***
Verlag / Editora: **Beuth-Verlag GmbH**
D - 10772 Berlin
Deutschland / *Alemanha*
- [6.6] **DECHEMA**
Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
Sociedade de Tecnologia Química e Biotecnologia S.A.
Theodor-Heuss-Allee 25
D - 60486 Frankfurt am Main
Deutschland / *Alemanha*
- [6.7] **pneurop**
Europäisches Komitee der Hersteller von Verdichtern, Vakuumpumpen und Druckluftwerkzeugen
European Committee of Manufactures of Compressors, Vacuum Pumps and Pneumatic Tools
Comitê Europeu dos Fabricantes de Compressores, Bombas de Vácuo e Ferramentas Pneumáticas
80, bd A. Reyers
B - 1030 Brussels
Belgien / *Bélgica*
- [6.8] **Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTP)**
Instituto Nacional Físico-técnico (PTB)
Bundesallee 110
D-38116 Braunschweig
Deutschland / *Alemanha*
- [6.9] **Deutscher Kalibrierdienst (DKD)**
bei der PTB (siehe [6.8])
Serviço Alemão de Calibragem (DKD) do PTB (veja [6.8])
- [L] As figuras das páginas 9-1, 9-10, 10-1, 12-18, 16-1, 18-18, 21-1 e 22-1 são cortesia do Sr. H.-U. Lesten (fig. 14.3).

22.7 Endereço dos autores

Prof. Dr.-Ing. João da Cruz **Payão** Filho
Instituto Alberto Luiz Coimbra de
Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia
Universidade Federal do Rio de Janeiro
(COPPE / UFRJ)

Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Centro de Tecnologia - Sala F 210
Cidade Universitária - Ilha do Fundão
Caixa Postal 68.505
21.945-970 RIO DE JANEIRO (RJ)

① (0xx21) 562-85 20 e
560-88 32 r. 414

FAX (0xx21) 290-6626
e-mail jpayao@metalmat.ufrj.br



Dr. Willi **Schmidt**
DGZfP - Ausbildungszentrum
Otto-Hahn-Straße 29
D - 44227 DORTMUND (Eichlingh.)
Deutschland / *Alemanha*

① ++49 (0)231 / 975 009 16
FAX: ++49 (0)231 / 975 009 9
e-mail sm@dgzfp.de



Dipl.-Ing. Gerald **Schröder**
Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralabteilung Technologie (ZAT)
D - 52425 JÜLICH
Deutschland / *Alemanha*

① ++49 (0)2461 / 61 5607
FAX: ++49 (0)2461 / 61 6816
e-mail g.schroeder@fz-juelich.de



ANEXOS

A.1 Lista de fórmulas

A.2 Dados, Tabelas de Conversão, etc.

Tabela A.2.1: Conversão de unidades de pressão

Tabela A.2.2: Conversão de unidades de escoamento

Tabela A.2.3: Tipos de escoamento de gases em vazamento

Tabela A.2.4: Conversão da taxa de escoamento
(valores para $T \approx 300 \text{ K}$)

Tabela A.2.5: Pressão de vapor de diferentes líquidos a 20°C

Tabela A.2.6: Pressão de vapor da água a diferentes temperaturas

Tabela A.2.7: Pressões parciais e composição do ar seco

Tabela A.2.8: Símbolo e propriedades dos diferentes gases

Tabela A.2.9: Livre percurso médio de alguns gases a 20°C e a diferentes pressões

Tabela A.2.10: Constante específica R_i de diferentes gases

Tabela A.2.11: Nomenclatura e símbolo da potência decimal

Tabela A.2.12: Letras do alfabeto grego

A.3 Símbolos Importantes na Tecnologia de Vácuo

A.4 Certificado de Ensaio de Vazamento / Estanqueidade

A.1 Lista de fórmulas

EQUAÇÃO	TERMINOLOGIA	UNIDADE

QUANTIDADE DE GÁS		
$Q = p \cdot V$	p pressão V volume	mbar ℓ

EQUAÇÃO GERAL DOS GASES IDEAIS		
$p \cdot V = \frac{m}{M_{\text{molar}}} \cdot R \cdot T$	m massa M _{molar} massa molar T temperatura absoluta R const. geral dos gases	g g·mol ⁻¹ K (0 °C = 273,15 K) R = 83,14 mbar·ℓ·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = \text{const.}$	T temperatura absoluta	[T] em K (!)

FLUXO DE GÁS		
$q_{pV} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$	q _{pV} fluxo do produto p·V	mbar·ℓ·s ⁻¹
$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$	q _m fluxo de massa	g·a ⁻¹ (onde a = ano)
$q_{pV} = q_m \cdot \frac{R \cdot T}{M_{\text{molar}}}$		
q _{des}	q _{des} taxa de dessorção	mbar·ℓ·s ⁻¹
q _{per}	q _{per} taxa de permeação	mbar·ℓ·s ⁻¹

CONCENTRAÇÃO		
c	c concentração	ppm
C _{ens}	concentração de gás de ensaio	

PRESSÃO		
p	p pressão	bar, mbar, Pa
p _{aceit}	sobrepresão de projeto aceitável	bar
p _{ens}	pressão de ensaio	bar, mbar
p _{amb}	pressão (do ar) ambiente	bar, mbar

p_e	sobrepressão	bar, mbar
p_{fin}	pressão final	mbar
p_{abs}	pressão absoluta	bar, mbar
p_{tot}	pressão total	mbar
p_i	pressão parcial	mbar
p_N	pressão normal	<i>condições normais:</i> $p_N = 1013,25 \text{ mbar}$ $T = 273,15 \text{ K}$

TAXA DE VAZAMENTO		
$q_L = p \cdot S_{efe}$	q_L taxa de vazamento	$\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$
$q_L = p \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}$		
$q_L = V \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t}$		
q_{TL}	taxa de vazamento do vazamento padrão	$\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$
$q_{L, \text{ aceit}}$	taxa de vazamento aceitável	$\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$
$q_{L, N}$	taxa de vazamento sob condições normais	<i>condições normais:</i> $p_N = 1013,25 \text{ mbar}$ $T = 273,15 \text{ K}$
<i>Método da bolha sob água:</i> $q_L = \frac{p_{amb} \cdot n \cdot V_B}{t}$	n número de bolhas no tempo de ensaio t V_B volume da bolha <i>(obs.: a bolha tem o formato de uma bola)</i> V_{esfera} volume da esfera: $V_{esfera} = \frac{\pi}{6} \cdot d^3$ d diâmetro da esfera	$\text{m}\ell, \ell$ $\text{m}\ell, \ell$ mm
<i>Método do envoltório:</i> $q_L = \frac{\Delta c_{He} \cdot p_{amb} \cdot V_{bolha}}{c \cdot \Delta t}$		

$q_{\text{per}} = P \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta p$	q_{per}	taxa de permeação	$[P] \text{ em } \frac{\text{mbar} \cdot \ell}{\text{s}} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{m}^2 \cdot \text{bar}}$ $[A] \text{ em } \text{m}^2$ $[d] \text{ em } \text{mm}$ $[\Delta p] \text{ em } \text{bar}$
	P	coeficiente de permeação	
	A	área	
	d	espessura	
	Δp	diferença de pressão parcial	
$q_L = q_{L,N} \cdot \frac{(p_2^2 - p_1^2)}{(1^2 - 0^2) \text{ bar}^2}$	$q_{L,N}$	taxa de vazamento <i>padrão escoamento laminar:</i> ($q_L \approx 10^{-1} - 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$)	$\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$
$q_L = q_{L,N} \cdot \frac{(p_2 - p_1)}{(1 - 0) \text{ bar}}$	$q_{L,N}$	taxa de vazamento <i>padrão escoamento molecular:</i> ($q_L \leq 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$)	$\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$

SENSIBILIDADE / INDICAÇÃO

E	E sensibilidade	ppm / PESC ou $\text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1} / \text{PESC}$
A	indicação de detector de vazamento	PESC (= partes da escala, faixa)
A_{TL}	indicação de vazamento do vazamento padrão	PESC
A_U	indicação de ruído de fundo	PESC
A_L	indicação do vazamento	PESC

PRECISÃO DE MEDIÇÃO

Δp_{res}	precisão do manômetro	mbar
$\Delta \vartheta_{\text{res}}$	precisão do medidor de temperatura	K

GRANDEZAS DEPENDENTES DO TEMPO**TEMPO DE SUÇÃO**

$t_{\text{suc}} = 2,3 \cdot \frac{V}{S_{\text{efe}}} \cdot \lg \frac{p_0}{p - p_{\text{fin}}}$	válido para vácuo grosseiro	s

$p_{fin} = \frac{q_{des} + q_L}{S_{efe}}$		mbar
$R = \frac{1}{L}$	R resistência ao fluxo L condutância	$s \cdot \ell^{-1}$ $\ell \cdot s^{-1}$
$\frac{1}{S_{efe}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L}$	S capacidade de sucção S _{efe} capacidade efetiva de sucção	$\ell \cdot s^{-1}$ $\ell \cdot s^{-1}$

CONSTANTE DE TEMPO		
$\tau_{63\%} = \frac{V}{S_{ef}}$	$\tau_{63\%}$ constante de tempo V volume S _{efe} capacidade efetiva de sucção	s ℓ $\ell \cdot s^{-1}$
$t_A \approx 3 \tau_{63\%}$	tempo para o hélio chegar ao detector de vazamento	s

TEMPO DE DIFUSÃO		
$t_{dif} = 0,4 \cdot l^2 \cdot p$ <i>para hélio</i>	t_{dif} tempo de difusão l distância p pressão	[t_{dif}] em s [l] em cm [p] em bar

GENERALIDADES

$\bar{l}$	livre percurso médio	m
$\bar{l}_p = 0,33 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{mbar}$	<i>para o ar</i>	m·mbar
λ	condutividade térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
η	viscosidade dinâmica	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = Pa \cdot s$
V_{molar}	volume molar	$V_{molar} = 22,415 \ell$
N_A	número de Avogadro	$N_A = 6,023 \times 10^{23}$ partículas

CONVERSÃO

Taxa de Vazamento de Gás - Taxa de Vazamento de Líquido

Tem-se:

$$q_L^{\text{gás}} = k \cdot q_L^{\text{líq}} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2}$$

$$[q_L^{\text{gás}}] \quad \text{em} \quad \text{mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$$

$$[q_L^{\text{líq}}] \quad \text{em} \quad \text{cm}^3/\text{s}$$

$$[p_1, p_2] \quad \text{em} \quad \text{bar}$$

$\eta \Rightarrow$ Tabela A.2.8

$$k = \frac{\eta^{\text{líq}}}{\eta^{\text{gás}}}$$

Líquido	k^{ar}	k^{He}
Água	100	96
Álcool	66	64
Benzeno	37	36

Tabela A.2.1: Conversão de unidades de pressão [1.2]

	Pa	bar	mbar	at	atm	Torr	PSI
1 Pa = 1 N/m ²	1	10 ⁻⁵	10 ⁻²	1,0197 · 10 ⁻⁵	9,87 · 10 ⁻⁶	750,06 · 10 ⁻⁵	1,4504 · 10 ⁻⁴
1 bar = 0,1 MPa	10 ⁵	1	10 ³	1,0197	0,9869	750,06	14,5032
1 mbar = 102 Pa	10 ²	10 ⁻³	1	1,0197 · 10 ⁻³	0,9869 · 10 ⁻³	0,75006	14,5032 · 10 ⁻³
1 at = 1 kp/cm ²	98066,5	~0,981	980,68	1	0,96784	735,56	14,2247
1 atm = 760 Torr	101325	1,013	1013,25	1,03323	1	760	14,6959
1 Torr = 1 mm Hg	133,322	≈ 0,00133	1,333	0,00136	1,3158 · 10 ⁻³	1	0,01934
1 PSI	6894,8	0,06895	68,95	0,0703	0,06804	51,715	1

Tabela A.2.2: Conversão de unidades de escoamento [1.3]

	mbar·ℓ·s ⁻¹	kg·h ⁻¹ (ar, 20°C)	cm ³ (CNP)·h ⁻¹	cm ³ (CNP)·s ⁻¹	Torr·ℓ·s ⁻¹
mbar·ℓ·s⁻¹	1	4,28 · 10 ⁻³	3554	0,987	0,75
kg·h⁻¹ (ar, 20°C)	234	1	8,31 · 10 ⁵	231	175
cm³(CNP)·h⁻¹	2,81 · 10 ⁻⁴	1,20 · 10 ⁻⁶	1	2,78 · 10 ⁻⁴	2,11 · 10 ⁻⁴
cm³(CNP)·s⁻¹	1,013	4,33 · 10 ⁻³	3600	1	0,760
Torr·ℓ·s⁻¹	1,33	5,70 · 10 ⁻³	4737	1,32	1

1 cm³(CNP) = 1 cm³ sob condições normais (T = 273,15 K; p = 1013,25 mbar)

1 cm³(CNP)·h⁻¹ = 1 std ccmh

Tabela A.2.3: Tipos de escoamento de gases em vazamento

Escoamento	Taxa [mbar·ℓ·s ⁻¹]
Turbulento	$> 10^{-2}$
Laminar	10^{-1} a 10^{-4}
Transiente	10^{-4} a 10^{-7}
Molecular	$< 10^{-7}$

Tabela A.2.4: Conversão da taxa de escoamento (valores para $T \approx 300$ K) [1.2]

		Vácuo grosseiro GV	Vácuo médio FV	Alto vácuo HV	Ultra alto vácuo UHV
Pressão p	mbar	$1 \cdot 10^3 - 1$	$1 - 1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-7}$	$< 1 \cdot 10^{-7}$
	Pa	$1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-5}$	$< 1 \cdot 10^{-5}$
Número de partículas n	cm ⁻³	$10^{19} - 10^{16}$	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^9$	$< 10^9$
Livre percurso médio $\bar{l}$	cm	$< 10^{-2}$	$10^{-2} - 10$	$10 - 10^5$	$> 10^5$
Tipo de escoamento de gás		Escoamento viscoso - laminar	Escoamento de Knudson	Escoamento misto	Escoamento molecular
Taxa superficial de colisão Z_A	cm ⁻² ·s ⁻¹	$10^{23} - 10^{20}$	$10^{20} - 10^{17}$	$10^{17} - 10^{13}$	$< 10^{13}$
Taxa volumétrica de colisão Z_V	cm ⁻³ ·s ⁻¹	$10^{29} - 10^{23}$	$10^{23} - 10^{17}$	$10^{17} - 10^9$	$< 10^9$

Tabela A.2.5: Pressão de vapor de diferentes líquidos a 20 °C

Líquido	Pressão de vapor [mbar]
Álcool metílico	127,7
Álcool etílico	58,3
Acetona	245,8
Água	23,3
Tetracloroeto de carbono	121,0
Óleo para bomba de alto vácuo	10^{-7} a 10^{-9}

Tabela A.2.6: Pressão de vapor da água a diferentes temperaturas

Temperatura [°C]	Pressão [mbar]
100	1010,8
50	130,3
25	31,7
0	7,3
- 40	0,13
- 78,5	$7,7 \cdot 10^{-3}$
-196	$1,3 \cdot 10^{-24}$

Tabela A.2.7: Pressões parciais e composição do ar seco [1.2]

Gás		Composição do ar [Vol.-%]	Pressão parcial no ar *) [mbar]	Densidade [kg·m ³]
Nitrogênio	N ₂	78,09	780,9	1,2505
Oxigênio	O ₂	20,95	209,5	1,42895
Argônio	Ar	$9,3 \cdot 10^{-1}$	9,3	1,7839
Dióxido de carbono	CO ₂	$\sim 3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-1}$	1,9768
Neônio	Ne	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	0,8999
Hidrogênio	H ₂	$< 10^{-3}$	$< 10^{-2}$	0,08987
Hélio	He	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	0,1785
Metano	CH ₄	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,7168
Criptônio	Kr	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	3,74
Xenônio	Xe	$9 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-5}$	5,89
Óxido de nitrogênio	N ₂ O	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	1,978
Ozônio	O ₃	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	2,14

*) Ar seco ao nível do mar (a pressão do ar seco ao nível do mar é 1000 mbar)

Tabela A.2.8: Símbolo e propriedades dos diferentes gases

Gás	Símbolo químico	Massa molecular M_{molar} [g·mol ⁻¹]	Diâmetro da molécula [pm] ^{*)}	Condutividade térmica λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Viscosidade dinâmica η [Pa·s]
Ar		~ 29		0,0257	18,2
Argônio	Ar	39,94	288	0,0175	22,1
Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	334	0,0160	14,6
Hélio	He	4,00	190	0,149	19,6
Metano	CH ₄	16,04			10,8
Neônio	Ne	20,18		0,048	
Freon R12	CCl ₂ F ₂	121,00		0,0160	13,2
Oxigênio	O ₂	31,99	298	0,0262	20,2
Nitrogênio	N ₂	28,01	315	0,0256	17,5
Vapor de água	H ₂ O	18,02	460	0,017	9,0
Hidrogênio	H ₂	2,02	240	0,183	8,8

^{*)} 1pm (1 picômetro) = 10⁻¹² m

Tabela A.2.9: Livre percurso médio de alguns gases a 20°C e a diferentes pressões

Pressão [Pa]	10 ⁻⁶	10 ⁻³	10 ⁰	10 ³	10 ⁶
Pressão [mbar]	10 ⁻⁸	10 ⁻⁵	10 ⁻²	10	10 ⁴
$\bar{l}$	km	m	mm	μm	nm ^{*)}
Ar	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
Argônio	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
CO ₂	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
H ₂	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Vapor de água	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
Hélio	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6
Nitrogênio	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Neônio	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
Oxigênio	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2

^{*)} 1 nm (1 nanômetro) = 10⁻⁹ m

Tabela A.2.10: Constante específica R_i de diferentes gases

Gás	R_i [J/kg·K]
Ar	287
Argônio	488
Hélio	2079
Hidrogênio	4116
Nitrogênio	297
Oxigênio	260
Vapor	461
Freon R12	68,7
Freon R22	96,1

Tabela A.2.11: Nomenclatura e símbolo da potência decimal

	Símbolo	Potência de dez	
Femto ...	f	10^{-15}	Quatrillionésimo
Pico ...	p	10^{-12}	Trillionésimo
Nano ...	n	10^{-9}	Billionésimo
Micro ...	μ	10^{-6}	Millionésimo
Mili ...	m	10^{-3}	Milésimo
Centi ...	c	10^{-2}	Centésimo
Deci ...	d	10^{-1}	Décimo
Deca ...	da	10	
Hecto ...	h	10^{+2}	Cem
Quilo ...	k	10^{+3}	Mil
Mega ...	M	10^{+6}	Milhão
Giga ...	G	10^{+9}	Bilhão
Tera ...	T	10^{+12}	Trilhão
Peta ...	P	10^{+15}	Quatrilhão

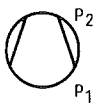
Tabela A.2.12: Letras do alfabeto grego

α	A	Alfa
β	B	Beta
γ	Γ	Gama
δ	Δ	Delta
ϵ	E	Épsilon
ζ	Z	Zeta
η	H	Eta
θ	Θ	Teta
ι	I	Iota
κ	K	Kapa
λ	Λ	Lâmbda
μ	M	Mu
ν	N	Nu
ξ	Ξ	Ksi
$\omicron$	O	Ômicron
π	Π	Pi
ρ	P	Ro
σ	Σ	Sigma
τ	T	Tau
υ	Y	Ypsilon
ϕ	Φ	Fi
χ	X	Chi
ψ	Ψ	Psi
ω	Ω	Ômega

A.3 Símbolos importantes na tecnologia de vácuo

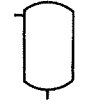
Bomba de vácuo *)

Vakuumpumpen
Vacuum pumps

	Bomba de vácuo, em geral A: Vakuumpumpe, allgemein E: Vacuum pump, general No caso de bombas de vácuo: a pressão maior é a do lado do estreitamento. $P_1 < P_2$
	Bomba mecânica Drehschieber-Vakuumpumpe Sliding vane rotary vacuum pump
	Bomba de vácuo roots Wälzkolben-Vakuumpumpe Roots vacuum pump
	(Óleo-) Bomba de difusão (Öl-) Diffusionspumpe (Oil-) Diffusion pump
	Bomba turbomolecular Turbomolekularpumpe Turbomolecular pump

Câmara de vácuo *)

Vakuum-Behälter
Vacuum chambers

	Câmara de vácuo, em geral Vakuumbehälter, allgemein Vacuum chamber, general

Órgãos de vedação *)

Absperrorgane
Isolating devices

	Órgãos de vedação, em geral Absperrorgan, allgemein Shut-off device, general
	Válvula de vedação, válvula de passagem Absperrorgan, Durchgangsventil Isolating valve, Straight-through valve
	Válvula de esquadria Eckventil Right angle valve
	Chapeleta de retenção Rückschlagklappe Non-return Valve

Acessórios de vácuo *)

Vakuuzubehör
Vacuum accessories

	Separador, em geral Abscheider, allgemein Condensate trap, general
	Filtro, dispositivo de filtragem, em geral Filter, Filterapparat, allgemein Filtering apparatus, general
	Baffle, em geral Dampfsperre, allgemein Baffle, general
	Armadilha de resfriamento, em geral Kühlfalle, allgemein Cold trap, general
	Armadilha de resfriamento com reservatório de refrigerante líquido Kühlfalle mit Vorratsgefäß Cold trap with coolant reservoir

Modo de operação dos órgãos de vedação *)

Antriebe für Absperrorgane
Modes of operation

	Operação manual Antrieb von Hand Manual operation
	Válvula reguladora Dosierventil Variable leak valve
	Comando eletromagnético Antrieb durch Elektromagnet Electromagnetic operation
	Comando hidráulico ou pneumático Fluidantrieb (hydraul. oder pneumatisch) Hydraulik or pneumatic operation
	Comando por motor elétrico Antrieb durch Elektromotor Electric motor operation

Conexões e canalizações *)
Verbindungen und Leitungen
Connections and tubes

	Junta de flanges, em geral <i>Flanschverbindung, allgemein</i> <i>Flange connection, general</i>
	Mudança da seção transversal de uma canalização <i>Veränderung des Rohrleitungsquerschnitts</i> <i>Change in the cross section of a duct</i>
	Cruzamento de duas canalizações com conexão <i>Kreuzung zweier Leitungen mit Verbindungsstelle</i> <i>Intersection of two ducts with connection</i>
	Cruzamento de duas canalizações sem conexão <i>Kreuzung zweier Leitungen ohne Verbindungsstelle</i> <i>Intersection of two ducts without connection</i>
	OU: or:
	Ponto de derivação <i>Abzweigstelle</i> <i>Branch-off point</i>
	Canalização flexível (por exemplo, compensador ou mangueira) <i>Bewegliche Leitung, (z.B. Kompensator oder Verbindungsschlauch)</i> <i>Flexible Connection (e.g. bellows or flex. tubing)</i>

Medida e instrumentos de medição *)
Messung und Meßgeräte
General symbols and gauges

	Símbolos gerais para vácuo **) <i>Allgemeines Symbol für Vakuum</i> <i>General symbol for vacuum</i>
	Medida de vácuo, captador, em geral **) <i>Vakuummessung, Vakuum-Meßzelle, allgemein</i> <i>Vacuum measurement, vacuum gauge head, general</i>
	Instrumento de medida de vácuo, unidade de controle **) <i>Vakuummessgerät, Betriebs- und Anzeigegerät für Meßzelle</i> <i>Vacuum gauge, control unit</i>
	Medidor de vácuo, com registrador **) <i>Vakuummessgerät, schreibend</i>
	Medidor de vácuo analógico **) <i>Vakuummessgerät mit Analog-Meßwertanzeige</i>
	Medidor de vácuo digital **) <i>Vakuummessgerät mit Digital-Meßwertanzeige</i>
	Medida de pressão (manômetro) <i>Druckmessung (Manometer)</i>

(Trecho da DIN 28401 [6])

(Auszug aus DIN 28401 [6])

Observação:

*) Estes símbolos podem ser usados em qualquer posição. Exceção: o símbolo para a medida de vácuo.

**) Estes símbolos só podem ser usados na posição apresentada acima (com a ponta apontando sempre para baixo).

Bemerkung:

*) Alle Symbole können in beliebiger Lage gezeichnet werden. Ausnahme: das Symbol für die Druckmessung im Vakuum.

**) Diese Bildzeichen dürfen nur in der hier dargestellten Lage verwendet werden (die Spitze des Winkels zeigt immer nach unten).



CERTIFICADO DE ENSAIO DE VAZAMENTO / ESTANQUEIDADE

Relatório Nº: _____

Pág.: ____ de ____ pág. (s)

☐ Nº de suplementos: _____

OBJETO :

conforme
Ordem de Serviço

Objeto Nº: _____

LOCALIZAÇÃO :

MOMENTO DO ENSAIO :

- ☐ ensaio recebimento ☐ ensaio de campo ☐ auditoria ☐ controle geral
☐ antes ou ⇔ ☐ após ⇔ ☐ reparo ☐ montagem ☐ decapagem ☐ ensaio hidrostático c/ água
☐ _____

OBJETIVO DO ENSAIO :

☐ Objeto de ensaio de acordo com desenho Nº: _____

- Local 1 ☐ atmosfera ☐ área de produção ☐ área de aquecimento ☐ área de resfriamento ☐ carcaça externa
Local 2 ☐ atmosfera ☐ área de produção ☐ área de aquecimento ☐ área de resfriamento ☐ carcaça externa

AGENTE DE ENSAIO / GÁS DE ENSAIO E CONCENTRAÇÃO DO GÁS DE ENSAIO :

- ☐ água ☐ ar ☐ hélio ☐ halogênio outro : ☐ _____

Concentração do gás de ensaio na área _____ : Cens = _____ %

- ☐ solução formadora de bolhas : ⇔ Nome: _____ Tipo : _____

PRESSÃO DE ENSAIO :

- Local 1 ☐ pens = _____ ☐ bar Local 2 ☐ pens = _____ ☐ bar
☐ pabs ☐ mbar ☐ pabs ☐ mbar

Local foi evacuado antes do enchimento: ☐ SIM ☐ NÃO

TÉCNICA DE ENSAIO :

☐ conforme procedimento Nº: _____ de _____

- ☐ líquidos penetrantes ☐ ultra-som ☐ _____
☐ método da bolha : ⇔ ☐ sob água ☐ com solução formadora de bolhas ☐ caixa de vácuo
☐ método da variação de pressão: ⇔ ☐ queda de pressão ☐ aumento de pressão ☐ diferença de pressão
☐ método do hélio : ⇔ ☐ método do vácuo : ⇔ ☐ local ou ☐ integral
☐ sonda aspiradora : ⇔ ☐ local ou ☐ integral

EQUIPAMENTO DE ENSAIO :

Fabricante: _____ Modelo: _____ Nº: _____

TAXA DE VAZAMENTO MÁXIMA ACEITÁVEL :

taxa máxima aceitável q_L = _____ mbar.l.s⁻¹ ☐ taxa simples ☐ taxa total

RESULTADO DO ENSAIO :

- ☐ s/ objeções ☐ Nº de vazamentos detectados : _____
☐ rejeitado ☐ taxa de vazamento determinada q_L = _____ mbar.l.s⁻¹ ☐ taxa simples
☐ taxa total

OBSERVAÇÕES:

LOCAL

DATA

INSPETOR

SUPERVISOR

Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Allgemeines / General:
Publicações do Centro de Pesquisa de Jülich. Série Geral:

1. **Fundamentos de Ensaio de Vazamento e Estanqueidade**
von J. da Cruz Payão Filho, W. Schmidt, G. Schröder (2000), 340 Seiten
ISBN 3-89336-278-9

