

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Conceitos Metrológicos

2.1.1. O Sistema Internacional de Unidades

O Sistema Internacional de Unidades (SI) está dividido em duas classes ;

- Unidades de Base
- Unidades derivadas

Unidades de Base

Em 1960 , a 11^a Conferência Geral de Pesos e medidas (CGPM), através da resolução 12, adotou o nome Sistema Internacional de Unidades para as unidades de Base definidos na Resolução 6 da 10^a CGPM , de 1954 . A 14^a CGPM, de 1971, através de sua resolução 3, definiu como unidade de base as sete grandezas aceitas atualmente, que são comprimento, massa, tempo, temperatura termodinâmica, quantidade de matéria, intensidade de corrente elétrica e intensidade luminosa.

Unidades Derivadas

Unidades Derivadas são as unidades que podem ser expressas em termos das Unidades de Base, através de símbolos e combinações matemáticas de multiplicação e divisão. A pressão é uma unidade derivada do comprimento, massa e tempo ($m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$), denominada pascal, cujo símbolo no SI é Pa.

Sua definição é: Pressão exercida por uma força de 1 newton, uniformemente distribuída sobre uma superfície plana de um metro quadrado de área , perpendicular à direção da força .

O comitê internacional, aprovou em 1996 uma nova classificação de unidades fora do SI que podem ser utilizadas com o SI, deste modo a unidade de pressão Bar, (1 bar = 0,1 MPa = 100 KPa) consta na tabela do BIPM, dentre outras, como Unidades Fora do Sistema, mas utilizadas de maneira corrente junto com as do SI, de maneira a responder às necessidades específicas no domínio

comercial ou jurídico.

Conforme o SI, a equivalência de cada uma destas unidades deve ser mencionada em todos os documentos que as utilizam. A unidade “ torr “ com símbolo Torr ($1 \text{ Torr} = 101\,325/760 \text{ Pa}$) e a unidade “ atmosfera normal “ com símbolo atm ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$) não pertencem ao SI, devendo ser evitadas nos textos e quando utilizadas deve-se mencionar sua equivalência com a unidade do SI correspondente .

2.1.2. Padrão

Padrão é definido como sendo medida materializada, instrumento de medição, ou sistema de medição, tomado como referência e destinado a definir, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência.[4]

2.1.3. Padrão de Referência

É o padrão que possui a melhor exatidão de um determinado laboratório. Padrão de referência é definido como sendo o padrão, tendo a mais alta qualidade metrológica disponível em um dado local ou em uma dada organização, a partir do qual as medições ali executadas são derivadas.[4]

2.1.4. Padrão Primário

Padrão primário é definido como sendo o padrão que é designado ou amplamente reconhecido como tendo as mais altas qualidades metrológicas e cujo valor é aceito sem referência a outros padrões de mesma grandeza. [4] .Para o caso da grandeza pressão os padrões primários podem ser Manômetro de Mercúrio ou Balança de Pressão. [1] .

2.1.5. Padrão Nacional

É o padrão de referência de um determinado país. No caso do Brasil, o laboratório de referência responsável pela realização, manutenção e guarda da unidade de pressão (Pascal) é o Laboratório de Pressão (Lapre) do Inmetro,o

qual possui os seguintes principais padrões [5] ;

- Medidor Iônico
- Spinning Rotor Gauge
- Medidores Capacitivos
- Balanças de Pressão
- Barômetros

2.1.6. Calibração

É definido como o conjunto de operações que estabelece sob, condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada , e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões [4] . Em outras palavras , pode-se dizer que calibração é o levantamento da relação entre um valor medido e um padrão com um valor similar .

Uma calibração somente é válida para um determinado instrumento individualmente , não podendo ser associada a outros instrumentos similares . Porém este instrumento que recebeu a calibração pode ser usado como um padrão para calibração de outros .

2.1.7. Rastreabilidade

Todas as medições devem ser relacionadas a uma mesma referência estabelecida , para que haja homogeneidade nos valores encontrados . Rastreabilidade é definida como sendo a propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas , geralmente a padrões nacionais ou internacionais , através de uma cadeia contínua de comparações , todas tendo incertezas estabelecidas [4]. Essa cadeia contínua de comparações é denominada cadeia de rastreabilidade .

2.1.8. Exatidão de Medição

É um conceito qualitativo definido como o grau de concordância entre o resultado de uma medição e o valor verdadeiro do mensurando . [4]

2.1.9. Repetitividade

É definida como sendo o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição [4]. Pode ser quantificada, através da dispersão dos resultados.

2.1.10. Reprodutibilidade

É definida como sendo o grau de concordância entre os resultados de medições de um mesmo mensurando, efetuadas sob condições variadas de medição [4]. As condições alteradas podem incluir o princípio de medição, o método de medição, o observador, o instrumento de medição, o padrão, o local, as condições de utilização e o tempo.

2.1.11. Histerese

Tendência de um sistema, dispositivo ou circuito de se comportar de maneira diferente, dependendo da direção da alteração feita em um parâmetro de entrada. Os termostatos de aquecimento residencial servem para demonstrar a histerese: quando a temperatura está diminuindo, o termostato pode ser acionado aos 20 graus, mas, quando a temperatura está subindo, ele pode ser desligado aos 22 graus. Sem a histerese, ele seria ativado e desativado à mesma temperatura e, portanto, oscilaria rapidamente. A histerese é importante em muitos circuitos eletrônicos, especialmente nos que utilizam campos magnéticos, como os transformadores e os cabeçotes de leitura/gravação.

2.1.12. Calibração de um Instrumento

É o resultado da comparação do desempenho do instrumento em questão, com o do padrão, reportando-se indiretamente a escala da grandeza em questão. [11]

2.1.13. Mensurando

É uma grandeza específica submetida a medição . Por exemplo, pressão de um recipiente com gás, comprimento de uma barra de cobre .

2.2. Pressão

2.2.1 Conceito de Pressão

Para um fluido em repouso, a pressão pode ser definida como a força exercida pelo fluido em uma área unitária de qualquer superfície, isto é , $P = dF/dA$:

Assim pressão é vista como sendo basicamente um conceito mecânico, o qual pode ser totalmente descrito em termos das dimensões primárias de massa, comprimento e tempo ($ML^{-1} T^{-2}$) .

É um fato conhecido que, a pressão é fortemente influenciada pela posição dentro de um fluido estático mas, em uma dada posição, ela é totalmente independente da direção, (Fig. 1)

Foi também amplamente demonstrado que a pressão não é afetada pela forma do recipiente do líquido.

Finalmente, é bem conhecido que, a pressão aplicada em um fluido confinado através de uma superfície móvel é transferida igualmente através do fluido a todas as paredes. Usando este princípio, funcionam os elevadores hidráulicos e balanças de peso morto [2].

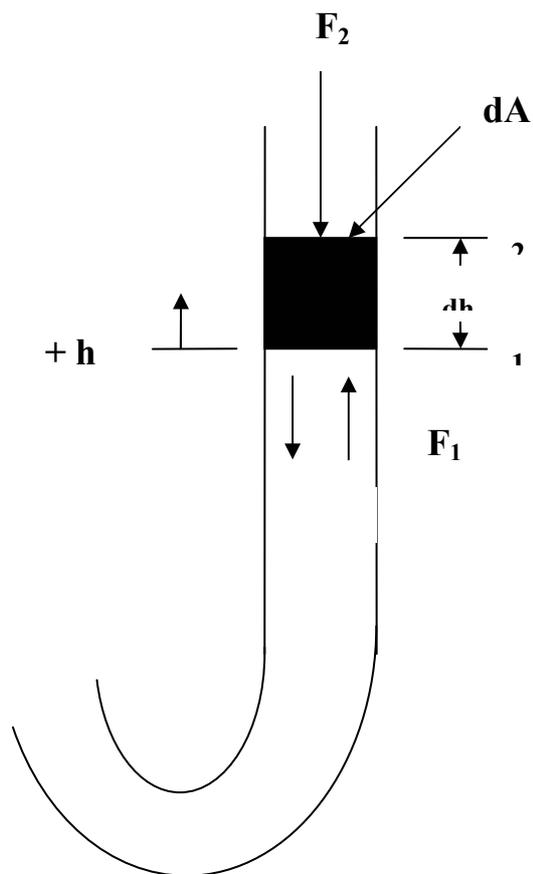


Figura 1: Pressão em um fluido estático em função da posição

- (a) qualitativamente: a pressão do fluido varia com a profundidade mas, é a mesma em todas as direções para um determinada profundidade .
 (b) quantitativamente: variação na pressão do fluido com a elevação é obtida realizando um balanceamento de forças em um elemento de fluido estático.

As seguintes equações podem ser utilizadas, para um líquido com massa específica constante :

$$\sum F_h = 0 \quad (1)$$

$$F_1 = F_2 + W \quad (2)$$

$$p_1 - p_2 = \rho g (h_2 - h_1) \quad (3)$$

onde, W – peso

w – peso específico do fluido.

ρ – densidade do fluido

g – aceleração da gravidade

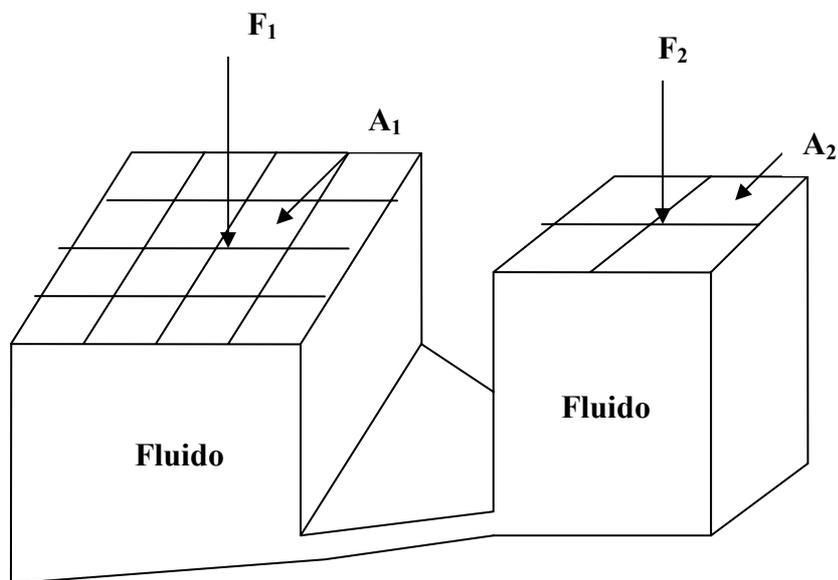


Figura 2: Elevadores Hidráulicos

Elevadores hidráulicos usam a multiplicação de forças baseada na transmissão uniforme da pressão em um fluido confinado, e, portanto :

$$p = F_1/A_1 = F_2/A_2 \quad (4)$$

2.2.2. Pressão Diferencial

Pressão diferencial, conforme a Fig. 3 , é a denominação usual para a pressão medida entre dois pontos distintos em um fluido, com as pressões P_1 e P_2

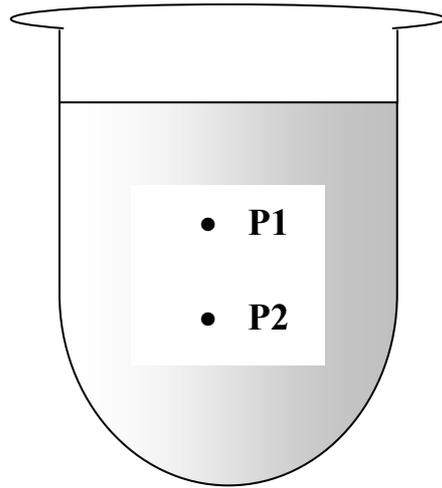


Figura 3: Pressão diferencial

2.2.3. Pressão Absoluta

Pressão absoluta é a denominação convencional para a pressão cujo referencial é o vácuo, teoricamente igual a zero. Este valor nas medições, situa-se entre 0,01 a 0,1 Pa, devendo ser levado em conta quando se requer maior exatidão (Fig. 4).

Pressão absoluta = Pressão atmosférica + Pressão relativa (Pressão manométrica)

A Fig. 4 mostra com mais detalhes a relação entre a pressão atmosférica e a pressão absoluta.

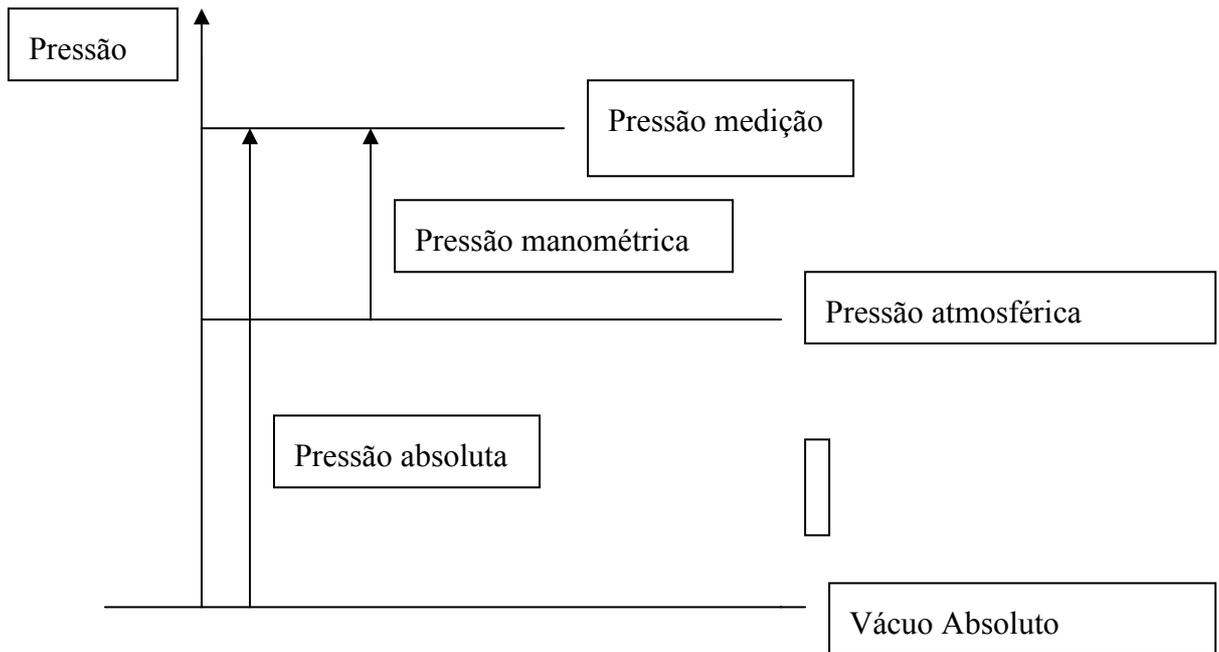


Figura 4: Comparação entre pressão absoluta e manométrica

2.2.4. Pressão Atmosférica

Pressão atmosférica é a pressão exercida pelo ar livre da atmosfera terrestre, cujo referencial situa-se junto ao nível do mar. Devido às condições ambientais mutáveis no tempo, seu valor está sujeito a variações Δp da ordem de 5%. A pressão atmosférica média, ao nível do mar, recebe os nomes “ pressão atmosférica normal ”, “ condição normal de pressão ”, ou simplesmente “ pressão normal ”, com valor convencionalmente exato de 101 325 Pa. Este referencial é utilizado na definição de inúmeros fenômenos físicos influenciados pela pressão atmosférica.

2.2.5. Pressão Manométrica

Pressão manométrica é aquela cujo referencial é a pressão atmosférica local, isto é, a pressão no ponto desejado é medida em relação a pressão atmosférica local. A maioria dos medidores comerciais e industriais funcionam relacionados a este referencial. Quando o valor absoluto é maior que o da pressão atmosférica, pode ser denominada “ Pressão manométrica positiva ”, caso contrário, pode ser denominada “ Pressão manométrica negativa ”, ou vácuo.

2.2.6. Instrumentos de medição de Pressão

Os instrumentos de medição de pressão podem ser classificados em relativos e fundamentais. Os relativos medem a pressão através de uma propriedade ou fenômeno físico e podem ser do tipo:

- “Bourdon “ , nos quais um tubo dobrado em espiral se deforma elasticamente de modo proporcional a pressão aplicada, provocando o movimento giratório de um ponteiro.
- “ Diafragma “ , nos quais a deformação elástica de uma membrana, proporcional à pressão aplicada, aciona um ponteiro através de um sistema mecânico.
- “Transdutores de pressão “ , que utilizam a deformação elástica do material para gerar sinal elétrico, resistivo, indutivo (tensão) ou capacitivo, proporcional a pressão aplicada .

Os medidores fundamentais são os que podem reproduzir as grandezas através de sua definição. Eles podem ou não serem considerados primários, conforme atendam aos requisitos do método primário, ou seja, que tenham a mais alta qualidade metrológica.

2.2.7. Balança de Peso Morto

2.2.7.1. Descrição

A balança de pressão, também denominada balança de peso morto, tem seu projeto fundamentado na aplicação da definição de pressão em um fluido qualquer, assim enunciada: “ A pressão em um fluido qualquer é a relação da força normal dF exercida sobre um elemento dA , que inclui o ponto, para esta área, “ $P = dF/dA$ ” .

Se a pressão é a mesma em todos os pontos de uma superfície plana finita de área A , a expressão acima se reduz a $P= F/A$.

A balança de pressão, cujo esquema pode ser visto na Fig. 5, é constituída por um gerador de pressão hidráulica ou gasosa, um conjunto de cilindro –pistão e pesos auxiliares. Quando em uso, um número de pesos conhecidos são primeiro colocados sob o pistão livre. A pressão no fluido é então aplicada no outro lado do pistão até que uma força suficiente é desenvolvida de tal sorte a erguer a

combinação pistão- pesos.

Quando o pistão está flutuando livremente dentro do cilindro (entre os limites marcados), o pistão está em equilíbrio com a desconhecida pressão interna e portanto tem-se que $P = F/A$, onde F , a força equivalente do conjunto pistões-peso, entre outras depende da gravidade local e do empuxo do ar. A área equivalente da combinação pistão-cilindro (A), depende da folga pistão-cilindro, nível de pressão e temperatura.

Haverá uma pequena perda de fluido do sistema através da folga pistão-cilindro. Este filme de fluido proverá a lubrificação necessária entre as duas faces

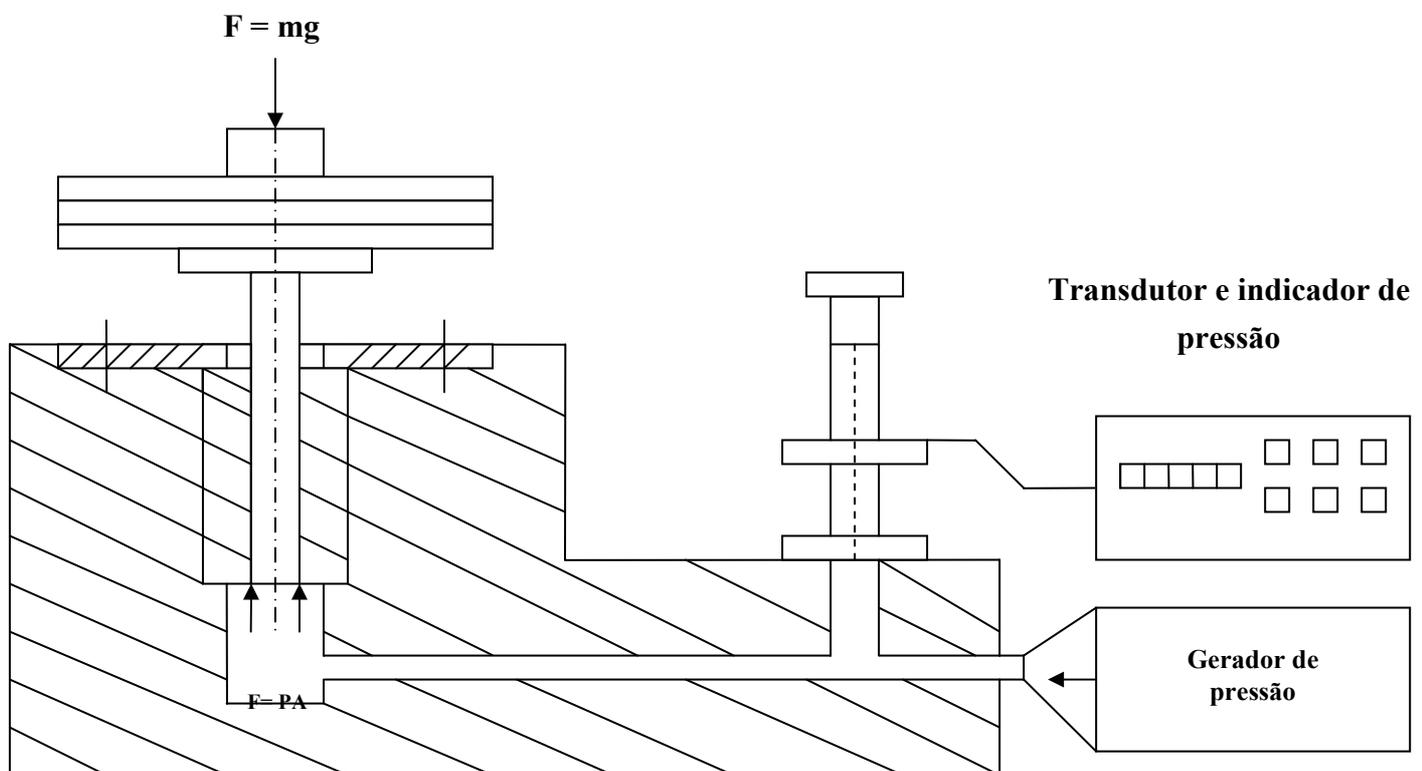


Figura 5: Esquemático de uma balança de peso morto

A incerteza na determinação da área do conjunto pistão-cilindro, sua variação com a temperatura e pressão, o atrito e a estabilidade da posição do pistão com a pressão aplicada são as principais fonte de erros na medição com a balança.

O instrumento é usado para definir pressões entre 69 Pa a 69 MPa, em

degraus tão pequenos quanto 0,01% da faixa, com uma incerteza de medição de 0,01 a 0,05% da leitura .

2.2.7.2. Correções

As duas mais importantes correções a serem aplicadas a indicação da balança de peso morto, P, para obter a pressão do sistema são, o empuxo do ar e a gravidade local. Conforme o Princípio de Arquimedes o ar deslocado pelos pesos e pistão exerce uma força flutuante, a qual causa uma indicação a maior da balança. O termo de correção para este efeito é:

$$C_{tb} = - (w_{ar} / w_{pesos}) \quad (5)$$

O valor dos pesos são normalmente fornecidos em função do valor da gravidade padrão de 9,80665 m/s² ao nível do mar. Sempre que houver variação do valor de g, decorrente de alterações na altitude e longitude, uma correção devido a gravidade tem de ser efetuada . Esta correção é aplicada conforme Eq. (6):

$$C_g = (g_{local} / g_{padrão} - 1) \quad (6)$$

A correção do resultado da balança de peso morto é dado em função das Eq. (5) e (6) .

$$P_{dw} = P_i (1 + C_{tb} + C_g) \quad (7)$$

As características de exatidão, sensibilidade e portabilidade fazem da balança de pressão o equipamento mais utilizado nas comparações entre as colunas de líquido, padrões primários dos diversos países que as detém.

2.2.8. Manômetro

2.2.8.1. Descrição

O manômetro (Fig 6) foi usada em 1662 por R. Boyle para a precisa determinação de pressões com fluido estático. Em decorrência que a mesma foi

desenvolvida baseando-se nos princípios básicos da hidráulica e por causa de sua inerente simplicidade, o manômetro tipo tubo em U, é usado como padrão de pressão na faixa de 25 Pa a 689,5 KPa, com uma incerteza de calibração de 0,02 a 0,2% do valor medido .

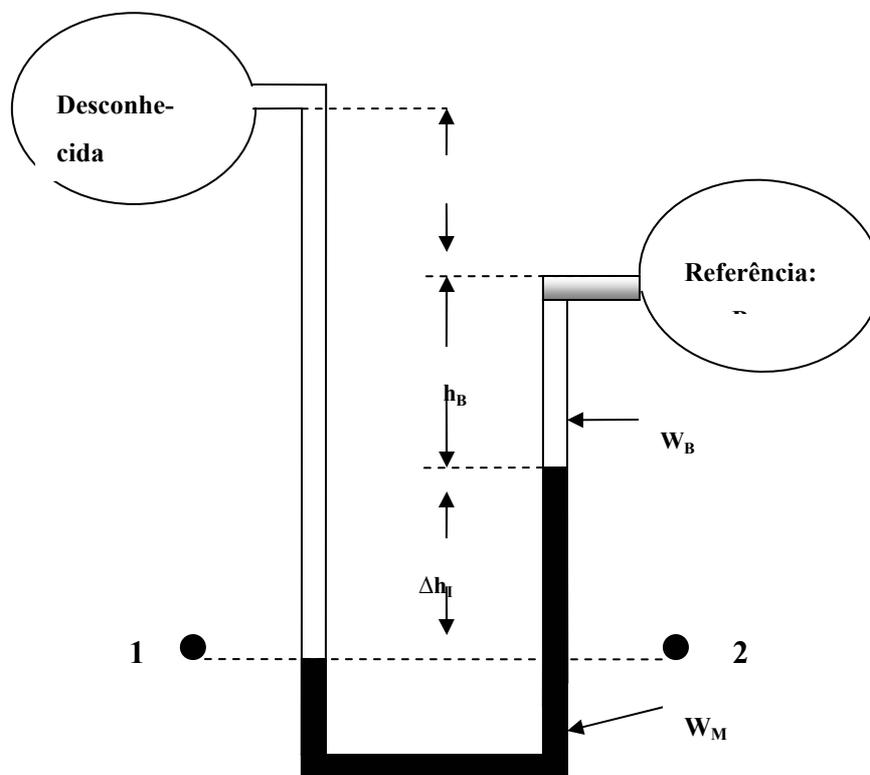


Figura 6: Manômetro para medição de pressão com fluidos estáticos

C_h _ Fator de correção hidráulico para um manômetro genérico (efeito capilar desprezado). Dado que $P_1=P_2$ (isto é , mesmo nível em um fluido em repouso possui a mesma pressão), tem-se [2] :

$$p_A + w_A (h_A + h_B + \Delta h_I) = p_B + w_B h_B + w_M \Delta h_I \quad (8)$$

Para $h_A = 0$ e $w_A = w_B$, tem-se que $C_h = 1 - w_A / w_M$ e assim,

$$p_A - p_B = \Delta h_I g (\rho_M - \rho_A) \quad (9)$$

O manômetro consiste de um tubo transparente (usualmente em vidro)

construído em forma de um U alongado e parcialmente preenchido com um líquido adequado. Mercúrio e água são os mais comuns tipos utilizados devido as suas informações de peso específico disponíveis. Se o fluido cuja pressão deve ser medida é um líquido, o fluido do manômetro deve ser imiscível e possuir uma densidade maior que aquele. Os fluidos devem também possuir diferentes cores, de tal sorte a visualizar facilmente a interface entre eles.

Para gases, ρ_A é muito pequeno em relação a ρ_M e pode ser desprezado, o que implicaria que:

$$p_A - p_B = \rho_M g \Delta h_I \quad (10)$$

Embora a pressão no SI seja expressa em Pa, é comum expressa-la na altura da coluna de líquido. Se a diferença de pressão for dividida por $\rho_M g$, o resultado possui a unidade de altura. Por exemplo, no Sistema Inglês, se for usada a densidade da água, a pressão pode ser expressa em pés de água ou polegada de água ou metros/ milímetros de coluna de água. A Pressão atmosférica absoluta é usualmente expressada em 760 mm de água. Quando a pressão é expressa na altura da coluna líquida, é também necessário especificar a temperatura do fluido, uma vez que esta altera a densidade. Por exemplo, a densidade da água varia 0,75% entre 10 e 40^o C. É comum usar a densidade da água a 4^o C, 1000 Kg/m³.

Manômetros possuem geralmente alta exatidão, mesmo quando não são regularmente calibrados. Os principais fatores que afetam a exatidão são a escala e a densidade do fluido interno. Escalas podem ser construídas com alta exatidão e mantêm a exatidão ao longo do tempo de uso. As densidades dos fluidos são bem conhecidas e podem ser facilmente checadas. A expansão térmica afeta a ambos, a escala e a densidade do fluido, mas analíticas correções podem ser implementadas para eliminar os erros.

2.2.8.2. Correções

As variações do peso específico da água e do mercúrio com a variação da temperatura, dentro do faixa de uso dos manômetros, são bem descritas conforme as fórmulas abaixo:

$$W_{s,t \text{ mercúrio}} = \frac{0,0491154}{1+1,01(t-32) 10^{-4}} \cdot 27678 \text{ kg/m}^3 \quad (11)$$

$$W_{s,t \text{ água}} = \frac{(62,2523 + 0,978476 \times 10^{-2} t - 0,145 \times 10^{-3} t^2 + 0,217 \times 10^{-6} t^3)}{1728} \cdot 27678 \text{ kg/m}^3 \quad (12)$$

Onde o subscrito s,t significa que os cálculos estão sendo desenvolvidos para a gravidade padrão e a temperatura do fluido do manômetro em °F. Para aceleração da gravidade diferente da padrão, o peso específico será corrigido conforme abaixo:

$$W_c = W_{s,t} (g_{\text{local}} / g_{\text{padrão}}) \quad (13)$$

Onde, W_c é o peso específico corrigido para o g_{local} .

Gradientes de temperatura ao longo do manômetro podem causar variações no peso específico do fluido deste e devem ser evitados, devido as incertezas que os mesmos necessariamente introduzem.

O efeito da temperatura na escala calibrada, não é considerada como significativa nas medições com o manômetro, uma vez que estas escalas são usualmente calibradas e usadas em salas com temperaturas aproximadas.

2.2.9. Análise das Incertezas

As incertezas associadas ao processo de medição decorrem da própria natureza dos elementos desenvolvidos, do processo e dos instrumentos auxiliares. Seu tratamento é realizado, neste trabalho, de acordo com o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. Durante os trabalhos, admite-se suficiente o nível de confiança de 95,45 % .

2.2.10. Introdução ao Guia para Expressão da Incerteza de Medição .

O BIPM no início de 1979 recebeu as respostas de um questionário enviado

a 32 laboratórios Nacionais, com o objetivo de se chegar a um consenso sobre um procedimento para expressar a incerteza de medição.

Este Guia é fruto de esforço conjunto das seguintes Organizações Internacionais:

- BIPM Bureau Internacional de Pesos e medidas
- IEC Comissão Eletrotécnica Internacional
- IFCC Federação Internacional de Química Clínica
- ISSO Organização Internacional de Normalização
- IAUPAC União Internacional de Química Pura e Aplicada
- IUPAP União Internacional de Física Pura e Aplicada
- OIML Organização Internacional de Metrologia Legal

O Guia [8] foi publicado em 1983 e revisado em 1993. A primeira versão brasileira foi publicada em 1996. Este trabalho baseia-se na terceira versão brasileira de agosto de 2003.

Dentre as definições apresentadas pelo guia, relataremos a seguir as mais importantes.

- Incerteza - A palavra incerteza significa dúvida, e assim, no sentido mais amplo, “ incerteza de medição “ significa dúvida acerca da validade do resultado de uma medição. Por falta de palavras diferentes para este conceito geral de incerteza e para as grandezas específicas que proporcionam medidas quantitativas do conceito, como, por exemplo, o desvio padrão, é necessário utilizar a palavra “incerteza “ nestas duas opções diferentes. [8]

É o parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos a um mensurando. VIM 3.9 [9]

- Valor Verdadeiro Convencional

É o valor atribuído a uma grandeza específica.

Uma vez que o valor verdadeiro não pode ser determinado, utiliza-se na

prática, um valor verdadeiro convencional [10].

- Erro de Medição

É o resultado de uma medição menos o valor verdadeiro do mensurando.

VIM 3.10

- Incerteza tipo A

É a incerteza obtida pelo método de avaliação através de análise estatística de uma série de observações.

- Incerteza tipo B

É a incerteza obtida pelo método de avaliação através de outros métodos que não a análise estatística [8].

As informações podem estar disponíveis de forma incompleta, sem a caracterização estatística necessária, podendo inclusive estar disponível de forma não científica e subjetiva [11]. Este conjunto de informações podem incluir o seguinte:

* Dados de medições prévias, sem caracterização estatística.

* Experiência ou o conhecimento geral do comportamento e propriedade de materiais e instrumentos relevantes, especificando os limites superiores e inferiores do parâmetro.

* Informações do fabricante, com faixa de erro máxima, sem caracterização estatística.

* Dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados, representando o comportamento médio, ou com informações incompletas.

* Incertezas relacionadas a dados de referência extraídos de manuais, como limites superiores e erros.

- Incerteza padrão combinada

Incerteza padrão do resultado de uma medição (u), quando este resultado é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas.

- Incerteza Expandida .

É a incerteza padrão combinada, multiplicada por um valor denominado fator de abrangência (k), de modo a estabelecer um determinado nível de confiança ao intervalo de incerteza apresentado.

$$U = k \cdot u \quad (14)$$

2.2.11 . Metodologia para obtenção da Incerteza

A metodologia para a obtenção da incerteza de medição associada pode ser resumida nos seguintes passos:

1 Modelamento da Medição [8]

Na maioria dos casos o mensurando Y não é medido diretamente, mas é determinado a partir de N outras grandezas X_1 , X_2 , ..., X_n através de uma relação funcional f .

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (15)$$

2 Avaliação da Incerteza tipo A [8]

Na maioria dos casos, a melhor estimativa possível da esperança, ou valor esperado μ_q de uma grandeza q que varia aleatoriamente e para a qual n informações independentes q_k foram obtidos, é a média aritmética \bar{q} , Eq. (16). A variância experimental [8] é dada pela Eq. (17).

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (16)$$

$$S^2(q) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum (q_k - \bar{q})^2 \quad (17)$$

A variância da média conforme o Teorema Central do Limite é dado por :

$$S^2(\bar{q}) = \frac{1}{n} S^2(q) \quad (18)$$

3 Avaliação da Incerteza tipo B

Para uma estimativa x_i de uma grandeza de entrada X_i que não tenha sido obtida através de observações repetidas, a variância estimada $u^2(x_i)$ ou a incerteza padrão $u(x_i)$ é avaliada por julgamento científico, baseando-se em todas as informações disponíveis as quais podem ser:

- Dados de medições prévias.
- A experiência ou o conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos.
- Especificações do fabricante.
- Dados fornecidos em certificados de calibração.
- Incertezas atribuídas a dados de referência extraídos de manuais.

4 Determinando a incerteza padrão combinada

4.1 Quando todas as grandezas de entrada são não correlacionadas a variância combinada é dada por :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2 \quad (19)$$

4.2 Quando todas as grandezas de entrada são correlacionadas a variância combinada é dada por :

$$u^2_c(y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (20)$$

5 - Incerteza Expandida [8]

Incerteza expandida (U) é definida como a grandeza que define um intervalo em torno do resultado da medição, com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. Normalmente o nível de confiabilidade adotado é de 95,45%, ou seja dois desvios padrões quando a distribuição é normal.

O fator de abrangência (k) é definido como o fator numérico utilizado como um multiplicador da incerteza padrão combinada (u_c) de modo a se obter a incerteza expandida (U), ou seja:

$$U = k \cdot u_c \quad (21)$$