

*Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial  
Diretoria de Metrologia Científica e Industrial - Dimci  
Divisão de Metrologia Mecânica - Dimec*

# **CALIBRAÇÃO DE BALANÇA DE PRESSÃO**

**DIMEC/gc-03/v.01**

## **Guia de Calibração**

**Maio 2010**



## CALIBRAÇÃO DE BALANÇA DE PRESSÃO

Paulo Roberto Guimarães Couto - [prcouto@inmetro.gov.br](mailto:prcouto@inmetro.gov.br)  
Luiz Henrique Paraguassu de Oliveira - [paraguassu@inmetro.gov.br](mailto:paraguassu@inmetro.gov.br)  
Jackson da Silva Oliveira - [jsoliveira@inmetro.gov.br](mailto:jsoliveira@inmetro.gov.br)  
Paulo Lyra Simões Ferreira - [plferreira@inmetro.gov.br](mailto:plferreira@inmetro.gov.br)

## Conteúdo

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Introdução                                      | 3  |
| 2  | A grandeza pressão                              | 3  |
| 3  | Abrangência e campo de aplicação                | 3  |
| 4  | Definições                                      | 3  |
| 5  | Medidores de pressão                            | 4  |
| 6  | Propriedades dos dispositivos de medição        | 8  |
| 7  | Padrão de Referência e Instrumentos             | 10 |
| 8  | Condições ambientais                            | 10 |
| 9  | Calibração de uma balança de pressão            | 10 |
| 10 | Incerteza de Medição                            | 14 |
| 11 | Planilha de incertezas de medição da calibração | 15 |
| 12 | Certificado de Calibração                       | 17 |
| 13 | Referências                                     | 17 |
|    | Anexo 1 – Modelo de Certificado de Calibração   | 19 |
|    | Anexo 2 – Tabela de Conversão de Unidades       | 21 |

## 1 INTRODUÇÃO

As medidas de pressão têm um extensivo e importante papel nos processos industriais. Existem diversas aplicações da grandeza pressão; por exemplo, nas indústrias de petróleo, petroquímica, meteorológica, aeroespacial, aviação, etc. A confiabilidade destas medições está associada às questões de comércio, qualidade, saúde, segurança, etc.

## 2 A GRANDEZA PRESSÃO

Pressão é uma grandeza derivada do Sistema Internacional de Grandezas. Numa forma geral, a pressão é resultante do efeito da força do impacto das moléculas de um fluido, líquido ou gasoso, nas paredes de um recipiente no qual o fluido está contido. O valor de pressão pode ser calculado na sua forma fundamental pelas equações (1) e (2):

$$P = \frac{m \cdot g}{A} \quad (1)$$

$$P = \rho_f \cdot g \cdot h \quad (2)$$

Onde:

$P$  é a pressão;

$m$  é a massa;

$g$  é a aceleração da gravidade local;

$A$  é a área;

$\rho_f$  é a massa específica do fluido;

$h$  é a altura manométrica do fluido.

## 3 ABRANGÊNCIA E CAMPO DE APLICAÇÃO

Esta nota técnica aplica-se à calibração de Balanças de pressão pelo método “crossing-floating”, utilizando-se uma balança de pressão como padrão de referência.

## 4 DEFINIÇÕES

### 4.1 Pressão

A medição de pressão é sempre realizada a partir de um valor referencial. Dependendo do referencial utilizado, as modalidades de pressão medida são: pressão absoluta, pressão manométrica, vácuo e pressão diferencial.

## 4.2 Pressão Absoluta

A pressão absoluta ( $P_{abs}$ ) é a pressão que está acima da pressão “zero absoluto”.

## 4.3 Pressão Manométrica ( Relativa ou Positiva)

A pressão manométrica é um caso especial de medição de pressão diferencial quando a pressão absoluta medida for maior que a pressão atmosférica local. A pressão manométrica avalia o quanto seu valor está acima da pressão atmosférica local.

## 4.4 Vácuo ( Pressão Negativa)

Vácuo é um caso especial de medição de pressão diferencial quando a pressão absoluta medida for menor que a pressão atmosférica local. Vácuo avalia o quanto a pressão está abaixo da pressão atmosférica local.

## 4.5 Pressão Diferencial

A diferença entre duas pressões  $p_1$  e  $p_2$  é denominada pressão diferencial. Nesta modalidade de pressão o valor da pressão referencial,  $p_1$  ou  $p_2$ , não é a pressão atmosférica local como também a pressão “zero absoluto”

## 4.6 Unidades

A unidade medição da grandeza pressão deriva das unidades das grandezas de base do Sistema Internacional de Unidades (SI): massa, comprimento e tempo. A unidade de pressão do SI é o pascal (Pa), sendo definida pela relação entre as unidades de força e área ( $N/m^2$ ). Existem outras unidades de medida de pressão como, por exemplo: bar, psi, mmHg,  $kgf/cm^2$ , etc. Para a conversão de unidades de pressão são utilizadas tabelas, nas quais devem constar as referências que serviram de base para a sua elaboração. Geralmente estas referências são: valor convencional da aceleração da gravidade ( $g_N = 9,80665 m/s^2$ ); massa específica do mercúrio ( $\rho_{Hg} = 1,359508 \times 10^4 kg/m^3$ ; 0 °C; 101325 Pa); massa específica da água ( $\rho_{H_2O} = 1,000 \times 10^3 kg/m^3$ ; 4°C; 101325 Pa). O desconhecimento destas informações poderá acarretar erros da ordem 0,4% e 0,2 % na conversão de qualquer unidade quando a pressão é medida a partir da altura da coluna de mercúrio e de água respectivamente. Uma tabela de conversão de unidades seguindo estas recomendações é apresentada no anexo 2.

## 5 MEDIDORES DE PRESSÃO

Os instrumentos de medição de pressão podem ser classificados em dois grandes grupos: fundamentais e relativos. Os instrumentos fundamentais medem pressão a partir da definição da grandeza. Neste grupo incluem-se o manômetro de coluna líquida e a balança de pressão. Os instrumentos relativos medem a pressão em função de uma propriedade física ou um fenômeno físico. Neste grupo estão compreendidos os manômetros, vacuômetros, manovacuômetros, manômetros digitais de pistão, transdutores/transmissores de pressão, etc.

## 5.1 Balança de Pressão

A balança de pressão mede a grandeza, a partir do equilíbrio entre as forças provenientes da pressão de um fluido e das massas que agem, respectivamente, na base e no topo de um pistão no interior de um cilindro, conforme seqüência da figura 1.

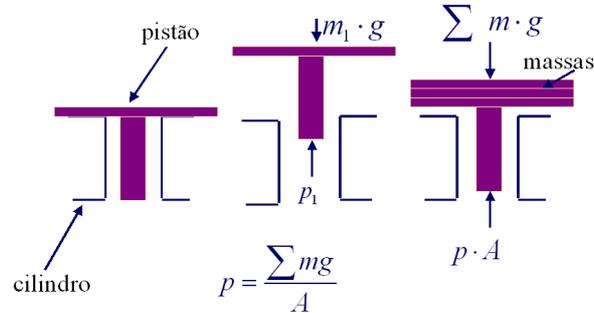


FIGURA 1 - Princípio de medição da balança de pressão

A equação de medição de pressão por uma balança de pressão é definida pela expressão 3:

$$p = \frac{\left[ m_p \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mp}} \right) + \sum m \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \right] \cdot g_l + \sigma C}{A_{0,T} [1 + (\alpha_c + \alpha_p) \cdot (\theta - 20)] \cdot (1 + \lambda p_n)} \pm \rho_{fluido} g_l \Delta h \quad (3)$$

Onde:

- $p$  é a pressão medida, em Pa;
- $m_p$  é a massa do pistão, em kg;
- $\rho_a$  é a massa específica do ar, em kg/m<sup>3</sup>;
- $\rho_{mp}$  é a massa específica do material do pistão, em kg/m<sup>3</sup>;
- $\Sigma m$  é o somatório das massas restantes que atuam no topo do pistão, em kg;
- $\rho_m$  é a massa específica do material das massas restantes, em kg/m<sup>3</sup>;
- $g_l$  é a aceleração devida a gravidade local, em m/s<sup>2</sup>;
- $\sigma$  é a tensão superficial do fluido, em N/m;
- $C$  é o comprimento da circunferência do pistão, em m;
- $A_{0,T}$  é a área do conjunto pistão cilindro, em m<sup>2</sup>;
- $T$  é a temperatura de referência do pistão;
- $\alpha_c + \alpha_p$  é o coeficiente de dilatação térmica linear do conjunto pistão-cilindro, em °C<sup>-1</sup>;
- $\theta$  é a temperatura do pistão no momento da medição, em °C;
- $\lambda$  é o coeficiente de deformação do conjunto pistão-cilindro, em pressão<sup>-1</sup>;
- $p_n$  é a pressão nominal da medição, na unidade pressão do coeficiente de deformação;
- $\rho_{fluido}$  é a massa específica do fluido utilizado, em kg/m<sup>3</sup>;
- $\Delta h$  é o desnível entre a base do pistão e o ponto onde a pressão será medida, em m.

Na equação 3, o valor de  $\Delta h$  é negativo quando a base do pistão da balança de pressão está abaixo do ponto de medição de pressão, e positivo quando a base situar-se acima do ponto de medição da pressão.

## 5.2 Barômetro de Coluna de Mercúrio

O barômetro é um medidor de pressão absoluta. A sua construção objetiva que o instrumento realize a medição da pressão atmosférica. A equação de medição de pressão por um barômetro é definida pela expressão 4:

$$p = \frac{g_l}{g_n} \cdot l \cdot \left[ 1 - \frac{\gamma \cdot \theta - \alpha \cdot (\theta - \theta_B)}{1 + \gamma \cdot \theta} \right] \quad (4)$$

Onde:

- $g$  é a aceleração local da gravidade, m/s<sup>2</sup>;
- $g_n$  é a aceleração normal da gravidade ( 9,80665 m/s<sup>2</sup>);
- $l$  indicação do barômetro, em mmHg ou mbar;
- $\gamma$  é o coeficiente de dilatação volumétrico do mercúrio ( $1,81 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );
- $\alpha$  é o coef. de dil. térmica linear da escala, ( $\alpha_{\text{latão}} = 18,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\alpha_{\text{aço}} = 11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
- $\theta$  é a temperatura no momento da medição da escala e do mercúrio, em  $^\circ\text{C}$ ;
- $\theta_B$  é a temperatura de referência da escala, em  $^\circ\text{C}$ ;

## 5.3 Manômetro de Coluna Líquida

Os manômetros de coluna líquida englobam dois tipos de medidores de pressão, tipo U e de cisterna. Os fluidos utilizados nos manômetros de coluna líquida são geralmente a água e o mercúrio. Com os manômetros de coluna de mercúrio mede-se pressão diferencial, pressão manométrica e pressão absoluta. Com um manômetro de coluna de água pode-se medir pressão diferencial e pressão manométrica, porém devido à pressão de vapor da água ser da ordem de 23 mbar, este tipo não é recomendado para medir pressão absoluta.

A equação geral de medição das modalidades pressão diferencial e manométrica por um manômetro de coluna líquida do tipo U é definida pela expressão 5:

$$\Delta p = \rho_f g_l \Delta h \quad (5)$$

Onde:

- $\Delta p$  é a pressão diferencial em Pa;
- $g_l$  é a aceleração local da gravidade em m/s<sup>2</sup>;
- $\Delta h$  é o desnível entre os meniscos em m.

Sendo o mercúrio o fluido do manômetro de coluna líquida do tipo U a expressão 5 fica:

$$\Delta p = \rho_{\text{Hg}(P0,0^\circ\text{C})} \cdot (1 + \gamma \cdot \theta) \cdot g_l \cdot \Delta h \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \theta) \quad (5a)$$

Onde:

$\Delta p$  é a pressão diferencial, em Pa;

$g_l$  é a aceleração local da gravidade, em m/s<sup>2</sup>;

$\Delta h$  é o desnível entre os meniscos em, m.

$\gamma$  é o coeficiente de dilatação volumétrico do mercúrio igual a  $1,81 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$\theta$  é a temperatura no momento da medição do mercúrio, em  $^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  é o coef. de dil. térmica linear da escala, ( $\alpha_{\text{latão}} = 18,4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\alpha_{\text{aço}} = 11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )

$\Delta\theta$  é a diferença entre as temperatura da escala e de referência, em  $^\circ\text{C}$ ;

#### 5.4 Manômetro Digital de Pistão

Os manômetros digitais de pistão são instrumentos híbridos com propriedades dos medidores fundamentais e relativos. Os manômetros digitais de pistão são compostos de uma base (“dinamômetro”), de um ou mais cabeçotes de medição e acessórios. A base contém um transdutor de força que mede força oriunda da pressão a ser medida, a qual é aplicada no cabeçote no interior do qual tem um conjunto pistão-cilindro. Deste modo o instrumento apresenta uma indicação digital (Número de Incrementos) em função da pressão aplicada. A equação de medição de pressão por um manômetro digital de pistão é definida pela equação 6:

$$p = K_n \cdot \frac{g_l}{g_n} \cdot \frac{N}{N_k} \cdot [1 - (\alpha_p + \alpha_c) \cdot (\theta - 20)] \cdot \left[ \frac{\rho_a - \rho_m}{\rho_{an} - \rho_m} \right] \quad (6)$$

Onde:

$p$  é a pressão medida;

$K_n$  é o coeficiente de conversão do conjunto pistão cilindro;

$g_l$  é a aceleração devida a gravidade local, em m/s<sup>2</sup>;

$g_n$  é a aceleração da gravidade convencional, em m/s<sup>2</sup>;

$N$  é o número de incrementos;

$N_k$  é a sensibilidade do manômetro;

$\alpha_c + \alpha_p$  é o coeficiente de dilatação térmica linear do conjunto pistão-cilindro, em  $^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$\theta$  é a temperatura no momento da medição, em  $^\circ\text{C}$ ;

$\rho_a$  é a massa específica do ar durante a medição, em kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_{an}$  é a massa específica normal do ar, em kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_m$  é a massa específica do material das massas, em kg/m<sup>3</sup>;

#### 5.5 Instrumento de Medição Mostrador Digital de Pressão

Nestes tipos de medidores a estimulação mecânica de um sensor causada pela pressão é convertida em um sinal elétrico, o qual é apresentado na forma digital. Este sinal é amplificado e indicado na unidade de uma modalidade de pressão ou em uma grandeza elétrica. O princípio elétrico de medição de um instrumento mostrador digital de pressão pode ser geralmente: resistivo, capacitivo, indutivo e piezoelétrico. Dependendo da modalidade de pressão medida o instrumento mostrador digital de pressão pode ser um manômetro digital, um vacuômetro digital ou um manovacuumetro digital. Quando a

indicação do dispositivo de medição é na unidade de uma grandeza elétrica o instrumento é um transdutor/ transmissor de pressão.

### **5.6 Transdutor ou Transmissor de Pressão**

Infelizmente, não há uma resposta clara para a pergunta: transdutor ou transmissor de pressão? A distinção entre um transdutor de pressão e um transmissor de pressão pode depender de um país e também de qual é o seu fabricante. Um transdutor de pressão é, fundamentalmente, qualquer dispositivo que converte a pressão aplicada em um sinal elétrico. Os transdutores de pressão fornecem um sinal elétrico normalmente em mV, que varia de acordo com mudanças na pressão quando conectado a uma fonte de alimentação adequada (30 mV ou 100 mV). Os transmissores de pressão fornecem geralmente um sinal elétrico de 4 a 20 mA o qual varia de acordo com as mudanças da pressão quando conectado a uma fonte de alimentação adequada (0-5 VDC, 0-10 VDC OU 1-5 VDC).

## **6 PROPRIEDADES DOS DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO**

A seguir são apresentados alguns conceitos contidos na Portaria INMETRO nº 319, VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA- Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM 2008).

### **6.1 Intervalo de Indicações**

Conjunto de valores compreendidos entre duas indicações extremas.

### **6.2 Intervalo Nominal de Indicações**

Conjunto de valores compreendidos entre duas indicações extremas arredondadas ou aproximadas, obtido com um posicionamento particular dos controles de um instrumento de medição ou sistema de medição e utilizado para designar este posicionamento.

### **6.3 Amplitude de Medição**

Valor absoluto da diferença entre os valores extremos de um intervalo nominal de indicações.

### **6.4 Intervalo de Medição**

Conjunto de valores de grandeza do mesmo tipo que pode ser medido com dado instrumento de medição ou sistema de medição com incerteza instrumental especificada, sob condições determinadas.

### **6.5 Escala de um Instrumento de Medição**

Parte do instrumento de medição que consiste de um conjunto ordenado de marcas associadas aos valores da pressão.

## **6.6 Resolução**

Menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida.

## **6.7 Calibração**

Operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação.

## **6.8 Curva de Calibração**

Expressão da relação entre uma indicação e o valor medido correspondente.

## **6.9 Erro de Medição**

Diferença entre o valor medido e um valor de referência.

## **6.10 Erro Máximo Admissível**

Valor absoluto do extremo do erro de medição, com respeito a um valor de referência conhecido, aceito por especificações ou regulamentos para uma dada medição, instrumento de medição ou sistema de medição. No caso de um medidor mostrador de pressão, o erro máximo admissível é apresentado na forma percentual em relação à amplitude de medição do medidor.

## **6.11 Repetitividade**

A repetitividade de um medidor mostrador de pressão é determinada em um mesmo ponto nominal de pressão, pelo valor absoluto da razão percentual entre a diferença máxima das indicações do instrumento, em um mesmo sentido de aplicação da pressão (ascendente ou descendente), e a amplitude de medição.

## **6.12 Histerese**

A histerese de um medidor mostrador de pressão é determinada num mesmo ponto nominal de pressão, pelo valor absoluto da razão percentual entre a diferença máxima das indicações do instrumento em um dos ciclos (pressão ascendente e pressão descendente), e a amplitude de medição.

## **6.13 Linearidade**

A linearidade de um medidor mostrador de pressão é determinada pelo valor absoluto da razão percentual entre o resíduo máximo e a amplitude de medição. O resíduo para uma dada indicação é definido pela diferença absoluta entre o valor medido e o respectivo valor obtido pela curva de calibração.

#### 6.14 Classe de Exatidão

Classe de instrumentos de medição ou de sistemas de medição que atendem a requisitos metrológicos estabelecidos para manter os erros de medição ou as incertezas de medição instrumentais dentro de limites especificados, sob condições de funcionamento especificadas. A classe de exatidão de uma balança de pressão é determinada pelo valor do seu erro máximo admissível percentual, dentro da amplitude de medição ( $P > 10\%$  pressão máxima). As classes de exatidão das balanças estão mencionadas na tabela 1.

TABELA 1 - Classe de Exatidão das balanças de pressão com erros máximos admissíveis

| Classe de Exatidão | Erro Máximo Admissível % |
|--------------------|--------------------------|
| 0,01               | 0,01                     |
| 0,02               | 0,02                     |
| 0,05               | 0,05                     |
| 0,1                | 0,1                      |
| 0,2                | 0,2                      |

### 7 PADRÃO DE REFERÊNCIA E INSTRUMENTOS

Os padrões e instrumentos necessários à calibração de uma balança de pressão são os seguintes: i) balança de pressão adequada à classe de exatidão do instrumento a ser calibrado, ii) balança eletrônica para a medição das massas com resolução igual ou melhor do que 0,01g, iii) termômetros, iv) um medidor de umidade relativa do ar e v) um medidor de pressão atmosférica.

### 8 CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Durante as medições de pressão, todo o deslocamento de ar deve ser evitado no ambiente de calibração. A calibração deve ser realizada após a equalização entre as temperaturas do instrumento a ser calibrado e a do meio ambiente. O instrumento pode ser calibrado no intervalo de temperatura ambiente de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  mantendo-se estável dentro  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A variação de temperatura durante a calibração não deverá exceder a  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , no caso da calibração ser interrompida até que se normalize a estabilidade térmica do laboratório. A umidade relativa máxima de  $60\% \pm 20\%$  e a pressão barométrica pode variar  $70\text{ kPa}$  a  $110\text{ kPa} \pm 0,1\text{ kPa}$  com isenção de vibração.

### 9 CALIBRAÇÃO DE UMA BALANÇA DE PRESSÃO

A calibração de uma balança de pressão é realizada pelo método “Cross-Floating”. Este método consiste na comparação direta entre uma balança de pressão de referência com a outra balança de pressão a ser calibrada, conforme figura 2.

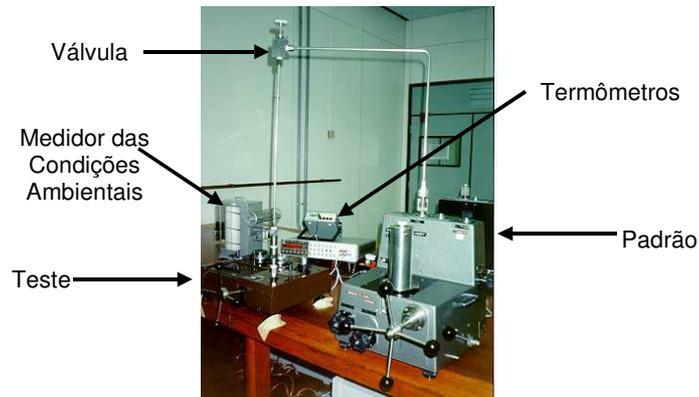


FIGURA 2- Calibração de uma balança de pressão pelo Método Cross-Floating

## 9.1 Preparação da Calibração

### 9.1.1 Limpeza

Antes da calibração é importante que os dois conjuntos pistão-cilindro estejam totalmente limpos e isentos de impurezas. É necessário o uso de luvas para o manuseio das massas e dos conjuntos pistão-cilindro durante a calibração.

### 9.1.2 Pesagem das massas

Identificar e realizar dez pesagens do pistão e de cada uma das massas do conjunto que compõe a balança de pressão registrando todos os valores.

### 9.1.3 Medição do comprimento do pistão

Medir e registrar os comprimentos dos pistões do padrão e do teste.

### 9.1.4 Medição do comprimento do pistão

Remontar os conjuntos pistão-cilindro de referência e da balança de pressão a calibrar.

### 9.1.5 Seleção do padrão

No caso das balanças de pressão de classes de exatidão 0,05 %, 0,1 % e 0,2 % o padrão de referência necessário à calibração deverá ser no mínimo duas vezes melhor do que o da balança de pressão a ser calibrada. Quanto às balanças de pressão 0,01 % e 0,02 %, a incerteza de medição da calibração, a qual inclui a incerteza do padrão, não deverá exceder a 0,01 % e 0,02 % respectivamente da pressão medida.

### 9.1.6 Purga dos sistemas de medição

Caso o fluido manométrico utilizado seja o óleo, retirar totalmente o ar existente nas balanças de pressão, e conectá-las através de uma válvula agulha.

### 9.1.7 Posição de funcionamento dos pistões

Com a válvula de ligação entre as balanças fechada, registrar as alturas de funcionamento das bases dos dois pistões, conforme figura 3.

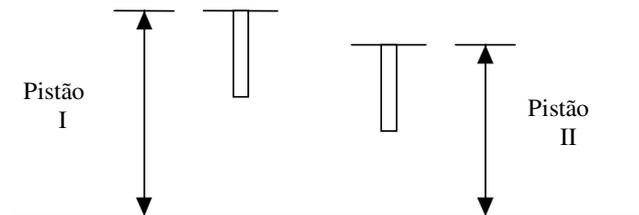


FIGURA 3 – Medição do desnível entre os pistões.

### 9.1.8 Medição do desnível entre os pistões

Calcular o desnível  $\Delta h$  (diferença entre as alturas de funcionamento dos conjuntos I e II, compensada pelos respectivos comprimentos dos pistões do padrão e do teste).

### 9.1.9 Seleção dos pontos nominais da calibração

A balança de pressão é calibrada a partir de 10% do seu intervalo de medição em dez pontos nominais de pressão no intervalo de 10% em 10%.

## 9.2 Procedimento da Calibração

9.2.1 Com a válvula de agulha fechada, gerar a pressão máxima na balança de referência e na balança a ser calibrada, até os dois sistemas funcionarem isoladamente com estabilidade, por cinco minutos.

9.2.2 Aliviar totalmente a pressão no padrão e no instrumento em calibração para iniciar a calibração.

9.2.3 Com a válvula fechada efetuar o equilíbrio nos dois instrumentos no ponto nominal pressão de calibração previamente selecionado (conforme 9.1.9) até que as duas balanças de pressão estejam operando com estabilidade.

9.2.4 Abrir a válvula vagarosamente, até que os dois instrumentos estejam inteiramente conectados.

9.2.5 Recuperar o volume morto da válvula, girando a manivela do padrão, deixando a sua respectiva pressão ligeiramente menor do que a do instrumento em calibração.

9.2.6 Com as duas balanças de pressão conectadas e em funcionamento, retornar o equilíbrio de todo o sistema, adicionando ou retirando massas complementares no conjunto pistão-cilindro do padrão.

9.2.7 Ao Alcançar o equilíbrio entre os dois sistemas, fechar a válvula.

9.2.8 Registrar, as temperaturas dos dois conjuntos pistão-cilindro, as condições ambientais (pressão atmosférica, temperatura e umidade) e a identificação de todas as massas utilizadas no padrão e no instrumento em calibração.

9.2.9 Repetir as operações 9.2.3, 9.2.4, 9.2.5, 9.2.6, 9.2.7 e 9.2.8 para os outros pontos subsequentes da calibração.

9.2.10 Após todas as anotações do último equilíbrio, com a válvula fechada, aliviar lentamente a pressão em cada balança de pressão até que seus respectivos pistões estejam nas suas posições de repouso.

9.2.11 Não desmontar o sistema até a conclusão de todos os cálculos da calibração.

### 9.3 Equação Geral da Calibração

A equação de equilíbrio na calibração de uma balança de pressão é definida pela expressão 7:

$$Pr_{ef} = \frac{\left[ m_{p, teste} \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mp, teste}} \right) + \sum m_T \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mteste}} \right) \right] \cdot g_l + \sigma C_{teste}}{A_{0,T(teste)} \left[ 1 + (\alpha_{c, teste} + \alpha_{p, teste}) \cdot (t_{teste} - 20) \right] \cdot (1 + \lambda_{teste} p_n)} \pm \rho_{fluido} g_l \Delta h \quad (7)$$

Onde:

$P_{ref}$  é a pressão de referência medida, em Pa;

$m_{p, teste}$  é a massa do pistão do conjunto pistão cilindro a calibrar, em kg;

$\rho_a$  é a massa específica do ar, em kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_{mp, teste}$  é a massa específica do material do pistão a calibrar, em kg/m<sup>3</sup>;

$\sum m_{teste}$  é o somatório das massas restantes que atuam no topo do pistão a calibrar, em kg;

$\rho_{m, teste}$  é a massa específica do material das massas restantes do teste, em kg/m<sup>3</sup>;

$g_l$  é a aceleração devida a gravidade local, em m/s<sup>2</sup>;

$\sigma$  é a tensão superficial do fluido, em N/m;

$C_{teste}$  é o comprimento da circunferência do pistão a calibrar, em m;

$A_{0,T(teste)}$  é a área do conjunto pistão cilindro a calibrar, em m<sup>2</sup>;

$\alpha_{c, teste} + \alpha_{p, teste}$  é o coeficiente de dilatação térmica do conjunto pistão-cilindro a calibrar, em °C<sup>-1</sup>;

$t_{teste}$  é a temperatura no momento da medição do conjunto pistão-cilindro a calibrar, em °C;

$\lambda_{teste}$  é o coeficiente de deformação do conjunto pistão-cilindro a calibrar, em pressão<sup>-1</sup>;

$p_n$  é a pressão nominal da medição, na unidade pressão do coeficiente de deformação;

$\rho_{fluido}$  é a massa específica do fluido utilizado, em kg/m<sup>3</sup>;

$\Delta h$  é o desnível entre os conjuntos pistão cilindro, em m.

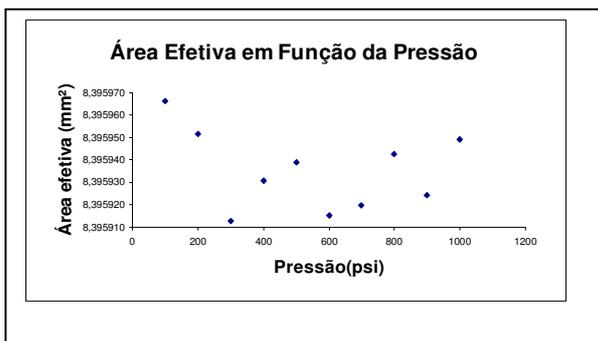
Nota:  $\Delta h$  é positivo se o pistão-cilindro de referência estiver acima do pistão-cilindro a calibrar e negativo se o nível da referência estiver acima do teste, conforme a figura 3.

Na equação 7 todas as variáveis são conhecidas exceto a área efetiva do teste ( $A_{eP}$ ). A área efetiva do instrumento a calibrar é determinada em cada ponto nominal de pressão os quais são definidos em 9.1.9, sendo calculada pela equação (8).

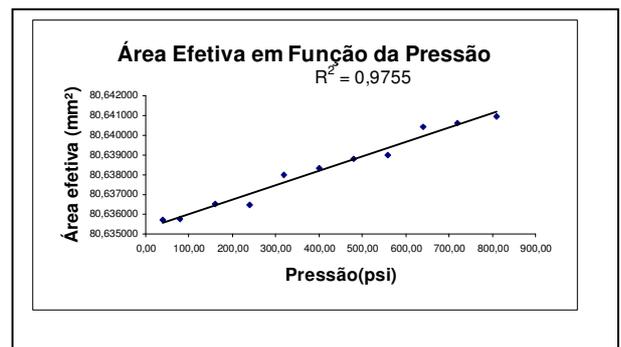
$$A_{eP} = A_{0,T(teste)} [1 + \lambda_{teste} P_n] \quad (8)$$

#### 9.4 Avaliação da Qualidade da Calibração

Precedendo à etapa de realização dos cálculos, é realizado o controle de qualidade da calibração. Este controle é feito graficamente onde se avalia a variação da área efetiva ( $A_{eP}$ ) em função dos pontos nominais de pressão nos quais a calibração foi realizada. O gráfico da figura 4a mostra o comportamento da área efetiva de um conjunto pistão cilindro que não tem coeficiente de deformação e a figura 4 b retrata a variação da área efetiva de um conjunto pistão cilindro que possui coeficiente de deformação ( $\lambda$ ).



4a – Área sem Coeficiente de Deformação



4b – Área com coeficiente de Deformação

### 10 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A incerteza de medição na calibração de uma balança de pressão é estimada conforme o “JCGM 100:2008 - GUM 1995 with minor corrections - Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement - First edition September 2008”. A metodologia do ISO GUM 2008 pode ser resumida nas seguintes etapas de caráter pontual:

- Definição do mensurando;
- Elaboração do diagrama causa-efeito;
- Estimativas das incertezas das fontes de entrada;
- Cálculo dos coeficientes de sensibilidade;
- Cálculo das componentes de incerteza;
- Combinação das componentes;
- Cálculo dos graus de liberdade efetivos;

- Determinação do fator de abrangência;
- Estimativa da incerteza de medição expandida.

O mensurando em uma calibração é o valor da grandeza que define o erro do instrumento. Deste modo, no caso da calibração de uma balança de pressão o valor do mensurando é definido pela equação 9.

$$e(p) = PI - Pref \quad (9)$$

Onde:

$e(p)$  é o erro do instrumento;

$PI$  é o valor da grandeza indicado pelo instrumento;

$Pref$  é o valor da grandeza medido pelo padrão.

A pressão de referência ( $Pref$ ) é calculada pela equação 3 e a pressão indicada ( $PI$ ) é determinada pela expressão 10:

$$PI = \frac{\left[ m_{p, teste} \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mp teste}} \right) + \sum m_T \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{m teste}} \right) \right] \cdot g_l + \sigma C_{teste}}{A_{0,T(teste)} \left[ 1 + (\alpha_{c teste} + \alpha_{p teste}) (\theta - 20) \right] (1 + \lambda_{teste} p_n)} \quad (10)$$

Deste modo considerando as equações 3 e 10 o diagrama causa efeito para o estabelecimento da incerteza da calibração é apresentado na figura 5.

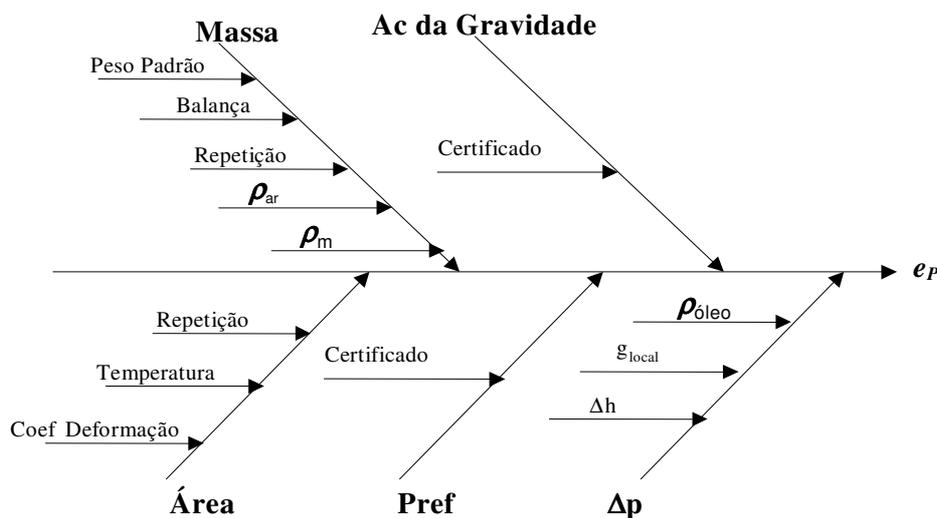


FIGURA 5 - Diagrama causa - efeito da calibração de uma balança de pressão

## 11 PLANILHA DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO DA CALIBRAÇÃO

A Tabela 2 apresenta um modelo da planilha de incertezas da calibração de uma balança de pressão.

TABELA 2 – Modelo da planilha de incerteza da calibração de uma balança de pressão

| Fontes de Incerteza         | Valor                   | Distribuição                   | Divisor    | Coef. de Sensibilidade                          | Incerteza (Pa)             | Graus de liberdade ( $\nu_i$ ) |
|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------|---|----------------------------|--------------------------------|
| Massa Padrão                | $U$ (kg)                | normal                         | 2          | $\frac{g}{A}$<br>( $m/s^2 \cdot m$ )            | $u_{1m}$                   | $\infty$                       |
| Repet. Massas               | $s$ (kg)                | normal                         | $\sqrt{n}$ |   | $u_{2m}$                   | $n - 1$                        |
| Massa.Esp.Ar                | Estimativa (kg)         | retangular                     | $\sqrt{3}$ |   | $u_{3m}$                   | $\infty$                       |
| Massa.Esp.Mat.              | Estimativa (kg)         | retangular                     | $\sqrt{3}$ |   | $u_{4m}$                   | $\infty$                       |
| Acel.Grav.                  | Estimativa ( $m/s^2$ )  | retangular                     | $\sqrt{3}$ | $\frac{m}{A}$<br>( $kg/m^2$ )                   | $u_g$                      | $\infty$                       |
| Tensão Superf.              | Estimativa (Pa)         | retangular                     | $\sqrt{3}$ | 1   | $u_{\text{Tensão}}$        | $\infty$                       |
| Raio do Pistão              | Estimativa (Pa)         | retangular                     | $\sqrt{3}$ | 1   | $u_{\text{Raio}}$          | $\infty$                       |
| Repet. Área                 | $s$ ( $m^2$ )           | normal                         | $\sqrt{n}$ | $\frac{mg}{A^2}$<br>( $N/m^4$ )                 | $u_{1A}$                   | $n - 1$                        |
| Coef. $\alpha_p + \alpha_c$ | Estimativa ( $m^2$ )    | retangular                     | $\sqrt{3}$ |   | $u_{2A}$                   | $\infty$                       |
| Temperatura                 | Estimativa ( $m^2$ )    | retangular                     | $\sqrt{3}$ |   | $u_{3A}$                   | $\infty$                       |
| Coef. Deform                | $s$ ( $m^2$ )           | normal                         | $\sqrt{n}$ |   | $u_{4A}$                   | $n - 1$                        |
| Padrão Ref                  | $U$ (Pa)                | normal                         | 2          | 1   | $u_{\text{Pref}}$          | $\infty$                       |
| Mas.Esp. Fluido             | Estimativa ( $kg/m^3$ ) | retangular                     | $\sqrt{3}$ | $\frac{g \Delta h}{m^2 / s^2}$                  | $u_{\rho_{\text{fluido}}}$ | $\infty$                       |
| Acel.Grav.Local             | Estimativa ( $m/s^2$ )  | retangular                     | $\sqrt{3}$ | $\rho_{\text{fluido}} \Delta h$<br>( $kg/m^2$ ) | $u_g$                      | $\infty$                       |
| Desnível                    | Estimativa ( $m$ )      | retangular                     | $\sqrt{3}$ | $\rho_{\text{fluido}} g$<br>( $N/m^3$ )         | $u_{\Delta h}$             | $\infty$                       |
| Incerteza Combinada         | -                       | normal                         | -          | -   | $u_c = \sqrt{\sum u_i^2}$  | *                              |
| Incerteza Expandida         | -                       | normal<br>$k \sim 2$<br>95,45% | -          | -   | $U = k \cdot u_c$          | *                              |

$$*V_{eff} = \frac{u_c^4}{\frac{u_{2m}^4}{V_{2m}} + \frac{u_{1A}^4}{V_{1A}} + \frac{u_{4A}^4}{V_{4A}}}$$

## 12 CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

A elaboração do certificado de calibração de um instrumento ( Anexo 1) segue o requisito 5.10 da norma NBR ISO/IEC 17025:2005 e o Vocabulário Internacional de Metrologia - VIM.

## 13 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. ISO GUM 95. Terceira Edição Brasileira Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Rio de Janeiro :ABNT , INMETRO. Edição Revisada. Agosto de 2003.120p.
- JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement-First edition September 2008
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 31p.(ABNT ISO/IEC 17025:2005)
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). Quadro Geral de Unidades de Medida. Resolução do CONMETRO nº 12/1988.Segunda Edição 2000.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO).Vocabulário Internacional de Metrologia- Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados 1.ed. Rio de Janeiro, 2008.78p.
- Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na Calibração, INMETRO e ABNT e SBM, Rio de Janeiro, 1999.
- Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02-S1, Suplemento 1 ao EA-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na Calibração - Exemplos, INMETRO e SBM, Rio de Janeiro, 1999.
- Buonanno, G; Ficco,G; Giovinco, G; Molinar, Gi. Ten Years of experience in Modelling Pressure Balances in liquid media up to few Gpa. Noctem edizioni Università Degli Studi di Cassino- febbraio,2007-ISBN:978-88-8317-037-9.
- Couto, P. R. G., Estimativa da Incerteza da Massa Específica da Gasolina pelo ISO GUM 95 e Método de Monte Carlo e seu Impacto na Transferência de Custódia, Dissertação de Mestrado, Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- Legras, J.-C, La Mesure des Pressions Statiques, Monographies du Bureau National de Metrologie, Editions CHIRON- ISBN 2-7027-0384-4, Paris, 1986.

- R. S. Dadson, S. L. Lewis; G. M. Peggs .The Pressure Balance - Theory and Practice - National Physical Laboratory -1982.
- EAL European cooperation for Accreditation of Laboratories Publication- EAL-G26 Reference -European co-operation for Accreditation Publication Reference EA-4/17 - Calibration of Pressure Balances –July 1997
- MASSART, D.L.; VANDEGINSTE, B. M. G.; BUYDENS, L. M. C.; JONG, S.; LEWI. P. J.; SMEYERS-VERBEKE, J. Handbook of Chemometrics and Qualimetrics. Part A. Volume 20A. Elsevier Science B.V. 1997.867p

## ANEXO 1

## MODELO DE CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

- Cliente
- Endereço
- Identificação do Item (Fabricante/Modelo/Tipo/Número de Série/Código de Identificação)
- Informações Administrativas (Ordem de Serviço/Data da Calibração)
- Laboratório Responsável pela Calibração
- Características do Item (Faixa de indicação/Acessórios)
- Informações Pertinentes à Calibração

Os resultados da calibração são rastreados ao Sistema Internacional de Unidades (SI), por intermédio de padrões metrológicos nacionais. A calibração foi realizada na temperatura ambiente de  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ , num sistema de medição (balança de pressão), onde a gravidade foi previamente determinada. A rastreabilidade dos padrões/grandezas que compõem esse sistema é descrita na Tabela 1:

TABELA 1 - Rastreabilidade dos Padrões/Grandezas

| Descrição                  | Identificação | Certificado |        |           |
|----------------------------|---------------|-------------|--------|-----------|
|                            |               | Nº / Ano    | Origem | Incerteza |
| Conjunto Pistão - Cilindro |               |             |        |           |
| Conjunto Massas Padrão     |               |             |        |           |
| Gravidade Local            |               |             |        |           |
| Termômetro                 |               |             |        |           |

- Procedimento de Medição

A área efetiva ( $A_{0,20}$ ) do conjunto pistão-cilindro da balança de pressão foi determinada a partir da comparação direta ao padrão de referência do laboratório de acordo com o procedimento xxxx.

- Resultados e Declaração de Incerteza de Medição

Os valores característicos determinados para o conjunto pistão-cilindro são apresentados na Tabela xxx:

TABELA xxx– Valores Característicos do Conjunto pistão-cilindro

| Identificação | Faixa de Indicação de Pressão | Área $A_{0,20}$ | Desvio padrão | Coefficiente de Deformação |
|---------------|-------------------------------|-----------------|---------------|----------------------------|
|               |                               |                 |               |                            |

A Tabela xxx apresenta os respectivos valores corrigidos das massas e as suas respectivas indicações de pressão, as quais foram calculadas através da seguinte equação:

$$p = \frac{m \cdot g}{A_{0,20}}$$

TABELA xxx – Valores Corrigidos das Massas e Pressões Correspondentes

| Identificação das massas | Valor nominal | m (kg) | Pressão (p) |
|--------------------------|---------------|--------|-------------|
|                          |               |        |             |

Qualquer valor de pressão medida pela balança de pressão é definido pela expressão a seguir:

$$PI = \frac{\left[ m_p \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mp}} \right) + \sum m \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \right] \cdot g_l + \sigma C}{A_{0,20} [1 + (\alpha_c + \alpha_p)(\theta - 20)] (1 + \lambda p_n)}$$

A tabela xxx relata para cada valor de pressão nominal (Pnominal) a respectiva incerteza expandida de medição (U), que é declarada como a incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência “k”, com  $v_{eff}$  graus de liberdade efetivos, correspondendo a uma probabilidade de abrangência de 95,45%. A incerteza expandida da medição foi determinada de acordo com a Terceira Edição Brasileira do “Guia para Expressão da Incerteza de Medição” (ISO GUM).

TABELA xxx – Incerteza de Medição

| Pnominal | U | $k_{95,45\%}$ |
|----------|---|---------------|
|          |   |               |

#### Observações

- unidade do instrumento = .....Pa; pascal é a unidade de pressão do SI;
- $g_l$  = aceleração da gravidade local (m/s<sup>2</sup>);
- $m_p$  e  $\sum m$  = massa do pistão (kg) e o somatório de massas (kg) referente ao ponto medido;
- $\theta$ ,  $\alpha_c$  e  $\alpha_p$  = temperatura de trabalho(°C), coeficiente de dilatação térmica do cilindro e do pistão (°C<sup>-1</sup>) respectivamente;
- $\sigma$  e C = Tensão Superficial do fluido (N/m) e Comprimento da Circunferência do pistão (m);
- $\rho_a$ ,  $\rho_{mp}$  e  $\rho_m$  = massa específica do ar ambiente (1,2 kg/m<sup>3</sup>), do material da massa do pistão(kg/m<sup>3</sup>) e das massa complementares (kg/m<sup>3</sup>), respectivamente (..kg/m<sup>3</sup>).
- Na expressão de medição da balança de pressão deve ser considerada o valor da pressão diferencial ( $\Delta P$ ), referente ao desnível entre o ponto de medição da pressão e a base do pistão da balança.

ASSINATURAS

## ANEXO 2

### TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES

| $\uparrow$<br>$\rightarrow =$            | <b>Pa</b><br>(N/m <sup>2</sup> ) | <b>bar</b>                     | (*)<br><b>psi</b>              | (*)<br><b>kgf/cm<sup>2</sup></b> | (*)(**)<br><b>mm Hg = Torr</b> | (*)(**)<br><b>in Hg</b>        | (*)(***)<br><b>m H<sub>2</sub>O</b> | (*)(***)<br><b>in H<sub>2</sub>O</b> |
|--|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>1Pa =</b><br>(N/m <sup>2</sup> )      | 1                                | 1,000000<br>x 10 <sup>-5</sup> | 1,450377<br>x 10 <sup>-4</sup> | 1,019716<br>x 10 <sup>-5</sup>   | 7,500627<br>x 10 <sup>-3</sup> | 2,953003<br>x 10 <sup>-4</sup> | 1,019716<br>x 10 <sup>-4</sup>      | 4,014531<br>x 10 <sup>-3</sup>       |
| <b>1 bar =</b>                           | 1,00000<br>x 10 <sup>5</sup>     | 1                              | 1,450377<br>x 10               | 1,019716                         | 7,500627<br>x 10 <sup>2</sup>  | 2,953003<br>x 10               | 1,019716<br>x 10                    | 4,014631<br>x 10 <sup>2</sup>        |
| (*)<br><b>1 psi =</b>                    | 6,894757<br>x 10 <sup>3</sup>    | 6,894757<br>x 10 <sup>-2</sup> | 1                              | 7,030696<br>x 10 <sup>-2</sup>   | 5,171500<br>x 10               | 2,036024                       | 7,030696<br>x 10 <sup>-1</sup>      | 2,767990<br>x 10                     |
| (*)<br><b>1 kgf/cm<sup>2</sup> =</b>     | 9,806650<br>x 10 <sup>4</sup>    | 9,806650<br>x 10 <sup>-1</sup> | 1,422334<br>x 10               | 1                                | 7,355602<br>x 10 <sup>2</sup>  | 2,895906<br>x 10               | 1,000000<br>x 10                    | 3,937008<br>x 10 <sup>2</sup>        |
| (*)(**)<br><b>1 mm Hg =</b>              | 1,333222<br>x 10 <sup>2</sup>    | 1,333222<br>x 10 <sup>-3</sup> | 1,933675<br>x 10 <sup>-2</sup> | 1,359508<br>x 10 <sup>-3</sup>   | 1                              | 3,937008<br>x 10 <sup>-2</sup> | 1,359508<br>x 10 <sup>-2</sup>      | 5,352394<br>x 10 <sup>-1</sup>       |
| (*)(**)<br><b>1 in Hg =</b>              | 3,386384<br>x 10 <sup>3</sup>    | 3,386384<br>x 10 <sup>2</sup>  | 4,911534<br>x 10 <sup>-1</sup> | 3,453150<br>x 10 <sup>-2</sup>   | 2,540000<br>x 10               | 1                              | 3,453150<br>x 10 <sup>-1</sup>      | 1,359508<br>x 10                     |
| (*)(***)<br><b>1 m H<sub>2</sub>O =</b>  | 9,806650<br>x 10 <sup>3</sup>    | 9,806650<br>x 10 <sup>-2</sup> | 1,422334                       | 1,000000<br>x 10 <sup>-1</sup>   | 7,355602<br>x 10               | 2,895906                       | 1                                   | 3,937008<br>x 10                     |
| (*)(***)<br><b>1 in H<sub>2</sub>O =</b> | 2,490889<br>x 10 <sup>2</sup>    | 2,490889<br>x 10 <sup>-3</sup> | 3,612729<br>x 10 <sup>-2</sup> | 2,540000<br>x 10 <sup>-3</sup>   | 1,868323                       | 7,355602<br>x 10 <sup>-2</sup> | 2,540000<br>x 10 <sup>-2</sup>      | 1                                    |

#### Observações

(\*)  $g_N = 9,80665 \text{ m/s}^2$  (valor convencional da aceleração da gravidade)

(\*\*)  $\rho_{\text{Hg}} = 1,359508 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$  (massa específica do mercúrio; 0<sup>o</sup> C;  $p_{\text{barométrica}} = 101325 \text{ Pa}$ )

(\*\*\*)  $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1,0000 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  (massa específica da água; 4<sup>o</sup> C ;  $p_{\text{barométrica}} = 101325 \text{ Pa}$ )