

*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 - prcouth@inmetro.gov.br
Luiz Henrique Paraguassu de Oliveira - paraguassu@inmetro.gov.br
Jackson da Silva Oliveira - jsoliveira@inmetro.gov.br
Paulo Lyra Simões Ferreira - 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;

ρ_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.

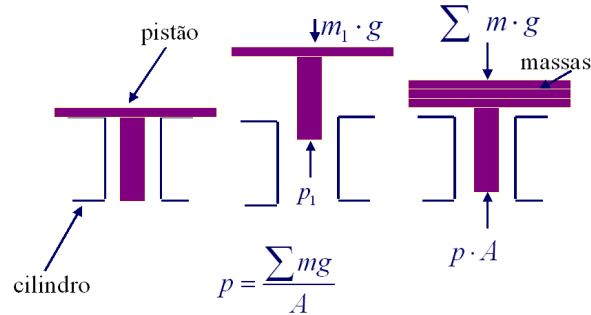


FIGURA 1 - Princípio de medição da balança de pressão

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;
- ρ_a é a massa específica do ar, em kg/m³;
- ρ_{mp} é a massa específica do material do pistão, em kg/m³;
- Σm é o somatório das massas restantes que atuam no topo do pistão, em kg;
- ρ_m é a massa específica do material das massas restantes, em kg/m³;
- g_l é a aceleração devida a gravidade local, em m/s²;
- σ 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 m²;
- 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⁻¹;
- θ é a temperatura do pistão no momento da medição, em °C;
- λ é o coeficiente de deformação do conjunto pistão-cilindro, em pressão⁻¹;
- p_n é a pressão nominal da medição, na unidade pressão do coeficiente de deformação;
- ρ_{fluido} é a massa específica do fluido utilizado, em kg/m³;
- Δh é o desnível entre a base do pistão e o ponto onde a pressão será medida, em m.

Na equação 3, o valor de Δh 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/s²;
- g_n é a aceleração normal da gravidade (9,80665 m/s²);
- l indicação do barômetro, em mmHg ou mbar;
- γ é o coeficiente de dilatação volumétrico do mercúrio ($1,81 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);
- α é o coef. de dil. térmica linear da escala, ($\alpha_{\text{latão}} = 18,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_{\text{aço}} = 11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- θ é a temperatura no momento da medição da escala e do mercúrio, em $^\circ\text{C}$;
- θ_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:

- Δp é a pressão diferencial em Pa;
- g_l é a aceleração local da gravidade em m/s²;
- Δh 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:

Δp é a pressão diferencial, em Pa;

g_l é a aceleração local da gravidade, em m/s²;

Δh é o desnível entre os meniscos em, m.

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

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

α 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/s²;

g_n é a aceleração da gravidade convencional, em m/s²;

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 $^\circ\text{C}^{-1}$;

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

ρ_a é a massa específica do ar durante a medição, em kg/m³;

ρ_{an} é a massa específica normal do ar, em kg/m³;

ρ_m é a massa específica do material das massas, em kg/m³;

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 manovacuômetro 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 INTERNACIONALDE 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 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.

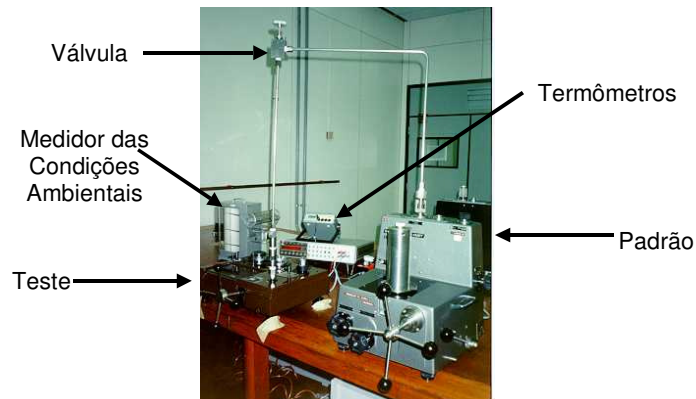


FIGURA 2- Calibração de uma balança de pressão pelo Método Cross-Floating

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.

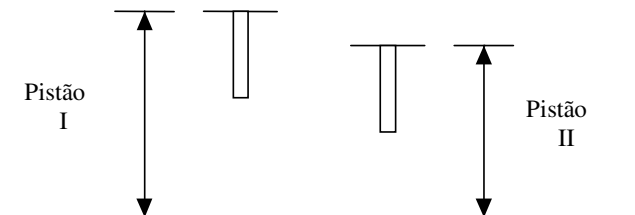


FIGURA 3 – Medição do desnível entre os pistões.

9.1.8 Medição do desnível entre os pistões

Calcular o desnível Δh (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;

ρ_a é a massa específica do ar, em kg/m³;

$\rho_{mp, teste}$ é a massa específica do material do pistão a calibrar, em kg/m³;

$\sum m_{teste}$ 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/m³;

g_l é a aceleração devida a gravidade local, em m/s²;

σ 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 m²;

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

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

λ_{teste} é o coeficiente de deformação do conjunto pistão-cilindro a calibrar, em pressão⁻¹;

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

ρ_{fluido} é a massa específica do fluido utilizado, em kg/m³;

Δh é o desnível entre os conjuntos pistão cilindro, em m.

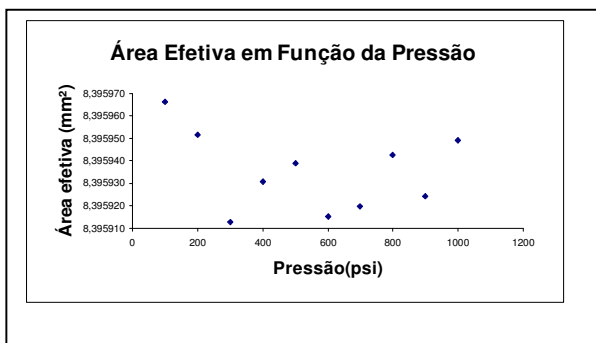
Nota: Δh é positivo se o pistão-cilindro de referência estiver acima do pistão-cilindro a calibrar e negativo se o nível da referência estiver acima do teste, conforme a figura 3.

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).

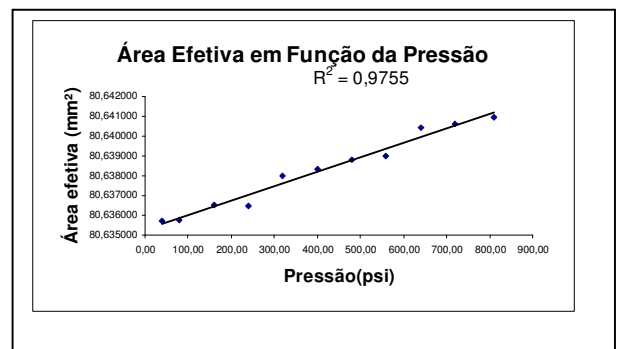
$$A_{eP} = A_{0,T(teste)} [1 + \lambda_{teste} P_n] \quad (8)$$

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 (λ).



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.

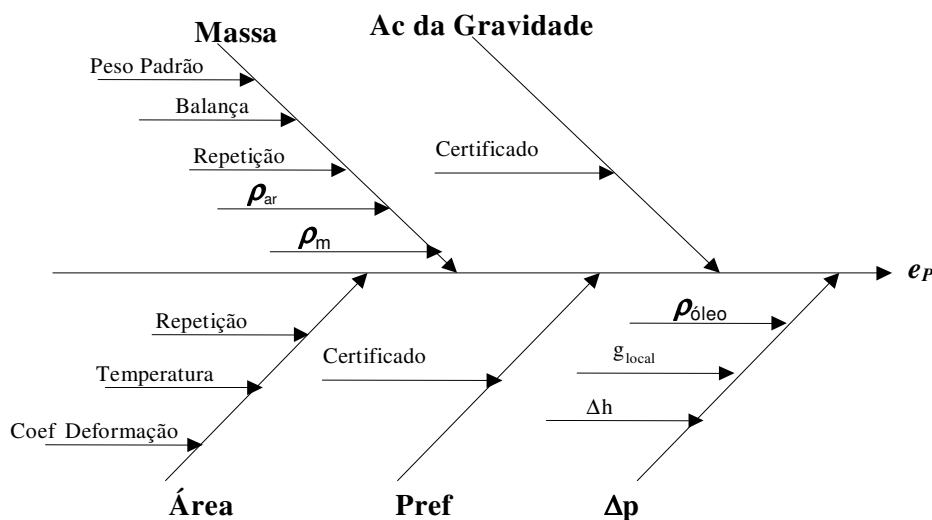


FIGURA 5 - Diagrama causa - efeito da calibração de uma balança de pressão

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 (ν_i)
Massa Padrão	U (kg)	normal	2	g/A ($m/s^2 \cdot m$)	u_{1m}	∞
Repet. Massas	s (kg)	normal	\sqrt{n}		u_{2m}	$n - 1$
Massa.Esp.Ar	Estimativa (kg)	retangular	$\sqrt{3}$		u_{3m}	∞
Massa.Esp.Mat.	Estimativa (kg)	retangular	$\sqrt{3}$		u_{4m}	∞
Acel.Grav.	Estimativa (m/s^2)	retangular	$\sqrt{3}$	m/A (kg/m^2)	u_g	∞
Tensão Superf.	Estimativa (Pa)	retangular	$\sqrt{3}$	1	$u_{\text{Tensão}}$	∞
Raio do Pistão	Estimativa (Pa)	retangular	$\sqrt{3}$	1	u_{Raio}	∞
Repet. Área	s (m^2)	normal	\sqrt{n}	mg/A^2 (N/m^4)	u_{1A}	$n - 1$
Coef. $\alpha_p + \alpha_c$	Estimativa (m^2)	retangular	$\sqrt{3}$		u_{2A}	∞
Temperatura	Estimativa (m^2)	retangular	$\sqrt{3}$		u_{3A}	∞
Coef. Deform	s (m^2)	normal	\sqrt{n}		u_{4A}	$n - 1$
Padrão Ref	U (Pa)	normal	2	1	u_{Pref}	∞
Mas.Esp. Fluido	Estimativa (kg/m^3)	retangular	$\sqrt{3}$	$\frac{g \Delta h}{m^2 / s^2}$	$u_{\rho_{\text{fluido}}}$	∞
Acel.Grav.Local	Estimativa (m/s^2)	retangular	$\sqrt{3}$	$\rho_{\text{fluido}} \Delta h$ (kg/m^2)	u_g	∞
Desnível	Estimativa (m)	retangular	$\sqrt{3}$	$\rho_{\text{fluido}} g$ (N/m^3)	$u_{\Delta h}$	∞
Incerteza Combinada	-	normal	-	-	$u_c = \sqrt{\sum u_i^2}$	*
Incerteza Expandida	-	normal $k \sim 2$ 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/s²);
- m_p e $\sum m$ = massa do pistão (kg) e o somatório de massas (kg) referente ao ponto medido;
- θ , α_c e α_p = temperatura de trabalho(°C), coeficiente de dilatação térmica do cilindro e do pistão (°C⁻¹) respectivamente;
- σ e C = Tensão Superficial do fluido (N/m) e Comprimento da Circunferência do pistão (m);
- ρ_a , ρ_{mp} e ρ_m = massa específica do ar ambiente (1,2 kg/m³), do material da massa do pistão(kg/m³) e das massa complementares (kg/m³), respectivamente (..kg/m³).
- Na expressão de medição da balança de pressão deve ser considerada o valor da pressão diferencial (ΔP), 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 $\rightarrow =$	Pa (N/m ²)	bar	(*) psi	(*) kgf/cm²	(*)(**) mm Hg = Torr	(*)(**) in Hg	(*)(***) m H₂O	(*)(***) in H₂O
1Pa = (N/m ²)	1	1,000000 x 10 ⁻⁵	1,450377 x 10 ⁻⁴	1,019716 x 10 ⁻⁵	7,500627 x 10 ⁻³	2,953003 x 10 ⁻⁴	1,019716 x 10 ⁻⁴	4,014531 x 10 ⁻³
1 bar =	1,00000 x 10 ⁵	1	1,450377 x 10	1,019716	7,500627 x 10 ²	2,953003 x 10	1,019716 x 10	4,014631 x 10 ²
(*) 1 psi =	6,894757 x 10 ³	6,894757 x 10 ⁻²	1	7,030696 x 10 ⁻²	5,171500 x 10	2,036024	7,030696 x 10 ⁻¹	2,767990 x 10
(*) 1 kgf/cm² =	9,806650 x 10 ⁴	9,806650 x 10 ⁻¹	1,422334 x 10	1	7,355602 x 10 ²	2,895906 x 10	1,000000 x 10	3,937008 x 10 ²
(*)(**) 1 mm Hg =	1,333222 x 10 ²	1,333222 x 10 ⁻³	1,933675 x 10 ⁻²	1,359508 x 10 ⁻³	1	3,937008 x 10 ⁻²	1,359508 x 10 ⁻²	5,352394 x 10 ⁻¹
(*)(**) 1 in Hg =	3,386384 x 10 ³	3,386384 x 10 ²	4,911534 x 10 ⁻¹	3,453150 x 10 ⁻²	2,540000 x 10	1	3,453150 x 10 ⁻¹	1,359508 x 10
(*)(***) 1 m H₂O =	9,806650 x 10 ³	9,806650 x 10 ⁻²	1,422334	1,000000 x 10 ⁻¹	7,355602 x 10	2,895906	1	3,937008 x 10
(*)(***) 1 in H₂O =	2,490889 x 10 ²	2,490889 x 10 ⁻³	3,612729 x 10 ⁻²	2,540000 x 10 ⁻³	1,868323	7,355602 x 10 ⁻²	2,540000 x 10 ⁻²	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^o 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^o C ; $p_{\text{barométrica}} = 101325 \text{ Pa}$)