
FICHA TÉCNICA

TÍTULO:

Guia RELACRE 16

DETERMINAÇÃO DA MELHOR INCERTEZA DE
MEDIÇÃO ASSOCIADA À CALIBRAÇÃO DE
BALANÇAS MANOMÉTRICAS INDUSTRIAIS

EDIÇÃO: RELACRE

DESIGN GRÁFICO: RELACRE

CAPA: Alda Rosa

IMPRESSÃO: Espaço 2 Gráfico

TIRAGEM: 250 exemplares

DEPÓSITO LEGAL: 154307/00

ISBN: 972-8574-05-3

Guia RELACRE 16

EDIÇÃO: JULHO 00

DETERMINAÇÃO DA MELHOR



INCERTEZA DE MEDIÇÃO ASSOCIADA



À CALIBRAÇÃO DE BALANÇAS



MANOMÉTRICAS INDUSTRIAIS



A presente edição foi elaborada pelo GRUPO DE TRABALHO GT01

“PRESSÃO, FORÇA E MASSA”

da COMISSÃO TÉCNICA RELACRE CTR04

“INCERTEZAS NAS MEDIÇÕES”

O conteúdo é da responsabilidade dos que colaboraram na sua elaboração.

É intenção da RELACRE proceder à revisão deste documento sempre que se revele oportuno.

Na elaboração da presente edição colaboraram:

António Manuel Baptista (<i>coordenador</i>)	LNEC
Álvaro Silva Ribeiro	LNEC
Ana Pascoal	OGMA
Isabel Sphor	IPQ
Rui Simões	APEB

Direitos de Autor protegidos segundo
legislação em vigor.

Proibida cópia total ou parcial sem
autorização escrita da RELACRE.

ÍNDICE

1. OBJECTIVO E CAMPO DE APLICAÇÃO	1
2. REFERÊNCIAS	1
3. SÍMBOLOS E DESIGNAÇÕES	2
4. MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO	3
5. PRINCÍPIOS	4
6. ESTIMATIVA DA INCERTEZA	8
6.1 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À REPETIBILIDADE	10
6.2 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À MASSA DOS PESOS-MORTOS	11
6.3 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À ÁREA EFECTIVA	11
6.4 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA AO COEFICIENTE DE DISTORÇÃO	11
6.5 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À DETERMINAÇÃO DA ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE LOCAL	12
6.6 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À TEMPERATURA DO CONJUNTO PISTÃO-CILINDRO	13
6.7 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA AO COEFICIENTE LINEAR DE EXPANSÃO TÉRMICA DO CONJUNTO PISTÃO-CILINDRO	13
6.8 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À DIFERENÇA DE COTA ENTRE O NÍVEL DE REFERÊNCIA E O NÍVEL DE MEDIÇÃO	14
6.9 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À INCLINAÇÃO DO PISTÃO	14
6.10 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À IMPULSÃO DO AR	15
6.11 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À TAXA DE ROTAÇÃO E/OU AO SENTIDO DE ROTAÇÃO	15
6.12 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À ESTABILIDADE A LONGO PRAZO	15
6.13 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO COMBINADA	16

1. OBJECTIVO E CAMPO DE APLICAÇÃO

O objectivo do presente documento é o de estabelecer o procedimento a seguir na avaliação da melhor incerteza de medição associada à calibração de balanças manométricas industriais utilizadas em laboratórios de calibração como padrões de referência. Estes padrões são considerados como primários (de elevada qualidade metrológica) uma vez que realizam a grandeza derivada (pressão) a partir das grandezas fundamentais: massa, comprimento e tempo.

A aplicação deste documento refere-se a balanças manométricas industriais que incluem conjuntos *pistão-cilindro* ou *esfera flutuante* (sendo a força aplicada directamente sob o pistão ou a esfera), e excluindo dispositivos divisores ou multiplicativos e manómetros de pistão digitais.

As gamas de operação das balanças manométricas são, tipicamente, as seguintes:

- entre 1,5 kPa e 7 MPa no modo absoluto e de 1,5 kPa a 100 MPa no modo relativo, para as que utilizam um gás como meio de transferência;
- entre 0,1 MPa e 500 MPa, para as que utilizam um líquido como meio de transferência.

As definições e os princípios gerais adoptados na formulação da incerteza são os referidos no *Guia para a expressão da incerteza de medição nos laboratórios de calibração* [1], baseado no documento *EAL R2 (97)* [2]. O presente documento baseia-se no guia *EAL-G26* [3], e destina-se a complementar os referidos princípios gerais, indicando as grandezas intervenientes na avaliação da melhor incerteza associada à calibração de balanças manométricas industriais.

Os métodos de cálculo adoptados para a determinação da incerteza associada a cada uma destas grandezas baseiam-se nos documentos *EAL R2 (97)* e no *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* [4] adoptado pelas organizações seguintes: BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, OIML, e são idênticos aos indicados no documento *EAL-G26 (97)*.

2. REFERÊNCIAS

- [1] *Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração*, IPQ, 1998
- [2] *EAL R2 (1997) - Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*
- [3] *EAL-G26 (1997) - Calibration of Pressure Balances*

- [4] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1995
- [5] *VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia - Termos Fundamentais e Gerais*, IPQ, 1996

3. SÍMBOLOS E DESIGNAÇÕES

No âmbito do presente documento adoptam-se os símbolos e designações indicados no quadro 1.

Quadro 1

Símbolo	Unidade	Designação
A	m^2	Área efectiva
A_o	m^2	Área efectiva a pressão nula
A_p	m^2	Área efectiva relativa à interface pistão-cilindro
α_c	$m/^\circ C$	Coefficiente linear de expansão térmica do cilindro
α_p	$m/^\circ C$	Coefficiente linear de expansão térmica do pistão
c	m^2	Perímetro da secção transversal do pistão
Δh	m	Diferença entre altitudes (cotas)
ΔT	$^\circ C$	Diferença entre valores extremos de um intervalo de temperatura
ρ_a	kg/m^3	Massa volúmica do ar
ρ_f	kg/m^3	Massa volúmica do fluido
ρ_{mi}	kg/m^3	Massa volúmica da massa aplicada
g	m/s^2	Aceleração da gravidade local
F	N	Força
h_i	m	Altitude (cota) do nível i
λ	Pa^{-1}	Coefficiente de distorção de primeira ordem
λ'	Pa^{-2}	Coefficiente de distorção de segunda ordem
M	kg	Massa
m_k	kg	Massa do conjunto <i>pesos-mortos</i> e pistão utilizados para gerar o patamar de pressão p_k
m_i	kg	Massa individual aplicada ao pistão ou massa do pistão
μ	Pa	Pressão residual que envolve os <i>pesos</i>
p_k	Pa	Pressão exercida por um conjunto de <i>pesos-mortos</i> e pistão relativo a um patamar de calibração k
p	Pa	Pressão
p_{abs}	Pa	Pressão absoluta medida na base do pistão
p_e	Pa	Pressão medida na base de um pistão
p_e'	Pa	Pressão corrigida
σ	N/m^2	Tensão superficial do líquido
θ	$^\circ$	Ângulo de inclinação do eixo do pistão relativamente à perpendicular definida pelo eixo do cilindro

t_r	°C	Temperatura de referência durante o ensaio
t	°C	Temperatura medida do conjunto pistão-cilindro durante o ensaio
T	°C	Amplitude de variação de temperatura
$u_{\text{rep}}(p)$	Pa	Incerteza de medição padrão associada à repetibilidade
$u_{\text{peso}}(p)$	Pa	Incerteza de medição padrão associada à massa dos <i>pesos-mortos</i>
$U(m)$	kg	Incerteza de medição expandida associada à determinação da massa
$u_{\text{ae}}(p)$	Pa	Incerteza de medição padrão associada à área efectiva
$U_{\text{ae}}(A)$	m ²	Incerteza de medição expandida associada à determinação da área efectiva
$u_{\lambda}(p)$	Pa	Incerteza de medição padrão associada ao coeficiente de distorção
$U(\lambda)$		Incerteza de medição expandida associada à determinação do coeficiente de distorção
$u_g(p)$	Pa	Incerteza de medição padrão associada à aceleração da gravidade no local
$u(g)$	m.s ⁻²	Incerteza de medição padrão associada à determinação da aceleração da gravidade no local
$u_T(p)$	Pa	Incerteza de medição padrão associada à temperatura do conjunto pistão-cilindro
$u_{\alpha}(p)$	Pa	Incerteza de medição padrão associada ao coeficiente linear de expansão térmica do conjunto pistão-cilindro
$u(\alpha_c)$	°C ⁻¹	Incerteza de medição padrão associada ao coeficiente linear de expansão térmica do cilindro
$U(\alpha_c)$	°C ⁻¹	Incerteza de medição expandida associada ao coeficiente linear de expansão térmica do cilindro
$u(\alpha_p)$	°C ⁻¹	Incerteza de medição padrão associada ao coeficiente linear de expansão térmica do pistão
$U(\alpha_p)$	°C ⁻¹	Incerteza de medição expandida associada ao coeficiente linear de expansão térmica do pistão
$u_{\Delta h}(p)$	Pa	Incerteza de medição padrão associada à diferença de cota entre o nível de referência e o nível de medição
$U(\Delta h)$	m	Incerteza de medição expandida associada à determinação da diferença de cota entre o nível de referência e o nível de medição
$u_{\text{mc}}(p)$	Pa	Incerteza de medição padrão associada à inclinação do pistão
$u_{\text{imp}}(p)$	Pa	Incerteza de medição padrão associada à impulsão do ar
$U(\rho_a)$	kg/m ³	Incerteza de medição expandida associada à determinação da massa volúmica do ar

4. MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO

As balanças manométricas industriais com *pesos-mortos* são equipamentos de referência utilizados na calibração de padrões de transferência e de instrumentos de medição de pressão, incluindo a calibração de outras balanças manométricas através do método cruzado. A sua operação é baseada na comparação entre o valor da pressão gerada pelos *pesos-mortos* e receptor de força (pistão ou esfera) e o valor da

pressão medido pelo equipamento em calibração. A transmissão da pressão efectua-se através de um fluido (líquido ou gás), pelo princípio dos vasos comunicantes.

No âmbito deste documento considera-se que a calibração de uma balança manométrica é efectuada por dois métodos distintos:

- método de calibração A, que consiste na determinação da pressão gerada por um conjunto pistão-cilindro sob condições específicas;
- método de calibração B, que consiste na determinação da massa do pistão e dos pesos-mortos, estimando a *área efectiva* do conjunto pistão-cilindro.

O presente documento não considera outros métodos, como por exemplo, os que recorrem a medições dimensionais para determinação da área efectiva.

A calibração deverá ser efectuada de acordo com os procedimentos descritos no documento *EAL-G26* [3]. Em particular, dever-se-á promover a instalação e estabilização apropriada da balança manométrica e padrões associados, a adequada rotação do conjunto *pesos-mortos* e pistão (a fim de se minimizar o atrito entre o pistão e o cilindro, e de se efectuar a centragem entre estes), e verificar a estabilização da temperatura ambiente, da humidade relativa e dos fluxos de ar.

5. PRINCÍPIOS

A balança manométrica consiste num pistão vertical rodando livremente num cilindro. Estes dois elementos possuidores de elevada qualidade de acabamento, definem uma superfície designada por *área efectiva*.

A pressão medida é aplicada à base do pistão, criando uma força vertical ascendente. Esta força é equilibrada pela força gravitacional descendente, resultante do peso do pistão e das massas aplicadas no seu topo, sujeitos à acção da gravidade local (figura 1).

A pressão gerada é transmitida ao elemento móvel através de um fluido, podendo este ser gás (em geral, azoto) ou líquido (habitualmente óleo).

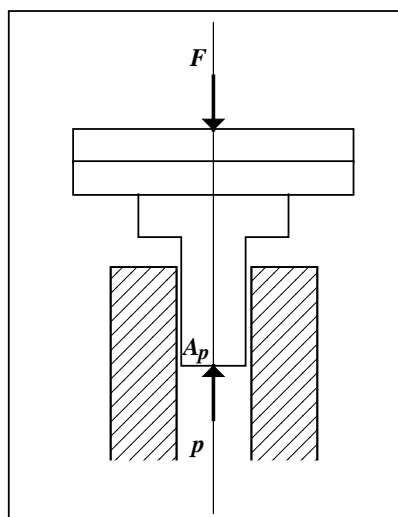


Figura 1 - Representação em corte do conjunto pistão-cilindro

Na figura 1, designa-se por p a pressão exercida pelo fluido actuando na base do pistão, por F ($F=mg$) a força gravitacional actuante sobre o conjunto de massas e pistão, e por A_p a área efectiva do conjunto pistão-cilindro.

Para um determinado patamar de pressão p_k , gerado por uma massa total m_k (resultante da massa do pistão e do conjunto de *pesos-mortos* aplicados), sujeita a uma aceleração da gravidade no local g , e sendo conhecida a área efectiva relativa à interface pistão-cilindro A_p , o valor da pressão transmitida é dado por:

$$p_k = \frac{m_k g}{A_p} \quad (1)$$

A expressão geral da pressão medida pela balança manométrica resulta da análise das diferentes componentes que constituem as forças aplicadas ao sistema.

No primeiro caso, referente a uma balança manométrica operada com gás, no modo relativo, a pressão vem dada por:

$$p_e = \frac{\sum_i m_i g (1 - \rho_a / \rho_{mi})}{A_p [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - t_r)]} \quad (2)$$

em que:

- p_e representa a pressão medida na base do pistão;
- m_i é o valor da massa de cada *peso-morto* aplicado ao pistão, e de cada um dos elementos flutuantes;
- g é a aceleração da gravidade no local;
- ρ_a é a massa volúmica do ar;
- ρ_{mi} é a massa volúmica de cada *peso-morto*;
- A_p é a área efectiva do conjunto pistão-cilindro, à temperatura de referência t_r (normalmente 20 °C), e à pressão p_e ;
- α_p é o coeficiente linear de expansão térmica do pistão;
- α_c é o coeficiente linear de expansão térmica do cilindro;
- t é a temperatura do conjunto pistão-cilindro medida durante o ensaio.

De acordo com o tipo e gama de medição da balança manométrica, a área efectiva A_p , pode ser expressa:

- (a) como uma constante A_o , igual ao valor médio de todas as determinações por medição directa ($A_p = A_o$);
- (b) a partir da área efectiva a pressão nula A_o , e do coeficiente de distorção de primeira ordem λ , de acordo com:

$$A_p = A_o(1 + \lambda p) \quad (3)$$

em que p representa um valor aproximado da pressão medida p_e , ou o seu valor nominal.

- (c) a partir da área efectiva a pressão nula A_o , e dos coeficientes de distorção de primeira ordem λ , e de segunda ordem λ' , de acordo com:

$$A_p = A_o(1 + \lambda p + \lambda' p^2) \quad (4)$$

Para balanças manométricas operadas com líquido, utiliza-se uma expressão similar, em que é adicionalmente contabilizada a componente associada à tensão superficial do líquido:

$$p_e = \frac{\sum_i m_i g (1 - \rho_a / \rho_{mi}) + \sigma c}{A_p [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - t_r)]} \quad (5)$$

onde σ representa a tensão superficial do líquido e c representa o perímetro da secção transversal do pistão, no nível em que emerge do óleo.

Para balanças manométricas operadas com gás, funcionando no modo absoluto, a expressão da pressão medida é dada por:

$$p_{abs} = \frac{\sum_i m_i g}{A_p [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - t_r)]} + \mu \quad (6)$$

onde p_{abs} representa a pressão absoluta medida na base do pistão, μ representa a pressão residual envolvendo os pesos-mortos e m_i representa o valor da massa de cada peso-morto aplicado, determinado com base na respectiva massa volúmica (real e não convencional).

Quando a pressão p_m corresponde a uma cota diferente do nível de referência, é necessário corrigir as equações anteriores, adicionando-se um termo correctivo ao valor obtido através destas equações.

No modo relativo, a correcção resulta na forma:

$$p_m = p_e + (\rho_f - \rho_a) g \Delta h \quad (7)$$

No modo absoluto, a correção resulta na forma:

$$P_m = P_{abs} + \rho_f g \Delta h \quad (8)$$

O símbolo ρ_f representa a massa volúmica do fluido e ρ_a representa a massa volúmica do ar envolvente e Δh representa a diferença entre a cota h_1 do nível de referência da balança manométrica e a cota h_2 do ponto onde a pressão é medida:

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (9)$$

6. ESTIMATIVA DA INCERTEZA

A incerteza combinada associada à medição da pressão é estimada em conformidade com o documento EAL-R2 (97).

As componentes a considerar no cálculo, para os dois métodos de calibração recomendados, são indicadas em seguida.

Método A

A incerteza pode ser estimada através da repetibilidade experimental (a) ou usando componentes de incerteza do tipo B (b).

- (a) Este método baseia-se na determinação da repetibilidade da balança manométrica, estimada em função da pressão através de uma expressão ajustada aos valores do desvio-padrão obtidos em diferentes patamares de calibração (como se descreve no documento EAL-G26). A repetibilidade pode ser expressa através de um termo constante, em unidades de pressão, de um termo variável proporcional à pressão medida, ou através de uma combinação de ambos.

(b) Este método baseia-se na estimação das incertezas padrão para as diversas componentes, determinando-se a incerteza de medição padrão e a incerteza expandida através da formulação apresentada no documento EAL-R2 (97). Consideram-se as seguintes componentes como grandezas de influência na calibração e, como tal, contabilizáveis no cálculo da incerteza associada à medição da pressão:

- *Incerteza associada à massa;*
- *Incerteza associada ao padrão de referência de pressão;*
- *Incerteza associada à medição da aceleração da gravidade no local;*
- *Incerteza associada à temperatura;*
- *Incerteza associada à diferença de cota entre o nível de referência e o nível de medição;*
- *Incerteza associada à inclinação do pistão;*
- *Incerteza associada à impulsão do ar;*
- *Incerteza associada à taxa de rotação e/ou direção de rotação;*
- *Incerteza associada à pressão residual (aplicável à medição no modo absoluto).*

Método B

A incerteza pode ser estimada de forma idêntica à apresentada para o método A, através da repetibilidade experimental (a) ou usando componentes de incerteza do tipo B (b).

- (a) Este método baseia-se na determinação da repetibilidade da balança manométrica, estimada em função da pressão, através de uma expressão ajustada aos valores do desvio-padrão obtidos em diferentes patamares de calibração (como se descreve no documento EAL-G26/97). A repetibilidade pode ser expressa através de um termo constante, em unidades de pressão, e de um termo variável proporcional à pressão medida, ou através de uma combinação de ambos.
- (b) Este método baseia-se na estimação das incertezas padrão para as diversas componentes, determinando-se a incerteza de medição padrão e a incerteza expandida através da formulação apresentada no documento EAL-R2 (97). Consideram-se as seguintes componentes como grandezas de influência no processo de calibração e, como tal, contabilizáveis no cálculo da incerteza:

- Repetibilidade da balança manométrica;
- Incerteza associada às massas;
- Incerteza associada à área efectiva medida, incluindo a incerteza estimada a partir dum método tipo A;
- Incerteza associada ao coeficiente de distorção, incluindo a incerteza estimada a partir dum método tipo A;
- Incerteza associada à medição da aceleração da gravidade no local;
- Incerteza associada à temperatura do conjunto pistão-cilindro;
- Incerteza associada ao coeficiente de expansão térmica do conjunto pistão-cilindro;
- Incerteza associada à diferença de cota entre o nível de referência e o nível de medição;
- Incerteza associada à inclinação do pistão;
- Incerteza associada à impulsão do ar;
- Incerteza associada à taxa de rotação e/ou direcção de rotação;
- Incerteza associada à pressão residual (aplicável à medição no modo absoluto).

Nas secções seguintes descrevem-se os procedimentos de cálculo a adoptar para a quantificação das componentes significativas, da incerteza de medição padrão, aplicada à calibração de uma balança manométrica através do método B. Supõe-se que é conhecida a pressão relativa (10) medida, através de uma balança manométrica operada com óleo, no nível de referência do equipamento a calibrar.

$$p_e = \frac{\sum_i m_i g (1 - \rho_a / \rho_{mi}) + \sigma c}{A_p [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - t_r)]} + \rho_f g \Delta h \quad (10)$$

É de notar que os ensaios para a determinação da pressão medida, da área efectiva e do coeficiente de distorção, se supõem realizadas de acordo com a secção 6.3 do documento EAL-G26 (97).

6.1 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À REPETIBILIDADE

Para cada patamar de ensaio p_k , estima-se o desvio-padrão experimental, designado por $u_{\text{rep}}(p_k)$, com base no respectivo conjunto de valores medidos. A incerteza de medição associada à repetibilidade $u_{\text{rep}}(p)$ é dada pelo valor do maior dos desvios-padrão calculados, ou por uma expressão do tipo da equação 11.

$$u_{\text{rep}}(p) = a + b \times p \quad (11)$$

onde a e b são constantes que resultam do ajustamento linear aos diversos desvios-padrão calculados.

6.2 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À MASSA DOS PESOS-MORTOS

A massa total, m , aplicada ao pistão resulta do somatório de todas as massas (*pesos-mortos* e elementos flutuantes) utilizadas em cada patamar de ensaio.

Se a incerteza de medição expandida $U(m)$, tiver sido obtida com um factor de expansão $k=2$, a componente de incerteza de medição padrão associada à massa dos *pesos-mortos*, $u_{\text{peso}}(p)$, é determinada através da seguinte expressão:

$$u_{\text{peso}}(p) = \frac{p}{m} \times \frac{U(m)}{2} \quad (12)$$

6.3 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À ÁREA EFECTIVA

A incerteza de medição padrão associada à área efectiva, designada por $u_{\text{ae}}(p)$, baseia-se na incerteza de medição expandida associada à determinação da área efectiva $U_{\text{ae}}(A)$, devendo esta constar do certificado respectivo.

Se a incerteza de medição expandida associada à determinação da área efectiva $U_{\text{ae}}(A)$, tiver sido obtida com um factor de expansão $k=2$, esta componente de incerteza é obtida através da seguinte expressão:

$$u_{\text{ae}}(p) = \frac{p}{A} \times \frac{U_{\text{ae}}(A)}{2} \quad (13)$$

6.4 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA AO COEFICIENTE DE DISTORÇÃO

A incerteza de medição padrão associada ao coeficiente de distorção, designada por $u_{\lambda}(p)$, é em geral uma incerteza combinada, incluindo a componente de incerteza associada à determinação do coeficiente de distorção estimada através de um método do tipo A, e componentes de incerteza do tipo B, associadas ao método de interpolação linear adoptado e/ou a especificações dos materiais.

Atendendo à determinação de $A_p = A_o(1 + \lambda p)$, em que $\lambda p \ll 1$, pode utilizar-se um valor aproximado de p_e para indicar a pressão medida (por exemplo: o valor nominal p , ou o valor dado por $p = \sum_i m_i g / A_o$).

Se a incerteza de medição expandida associada à determinação do coeficiente de distorção $U(\lambda)$ tiver sido obtida com um factor de expansão $k=2$, a componente de incerteza é determinada através da seguinte expressão:

$$u_\lambda(p) = p^2 \times \frac{U(\lambda)}{2} \quad (14)$$

6.5 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À DETERMINAÇÃO DA ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE LOCAL

A incerteza de medição padrão associada à determinação da aceleração da gravidade no local, designada por $u(g)$, pode resultar de medições efectuadas com equipamentos adequados ou através de cálculo conhecendo a longitude, a latitude e a altitude locais. No primeiro caso, a incerteza é fornecida pelo respectivo certificado de calibração; no segundo caso, o valor encontrado para a incerteza, deve ser estimado com base nos parâmetros locais referidos, considerando um factor de expansão $k=3$.

A incerteza de medição padrão associada à aceleração da gravidade no local $u_g(p)$ é determinada pela expressão (15):

$$u_g(p) = \frac{p}{g} \times u(g) \quad (15)$$

6.6 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À TEMPERATURA DO CONJUNTO PISTÃO-CILINDRO

A incerteza de medição padrão associada à temperatura do conjunto pistão-cilindro, designada por $u_T(p)$, resulta do facto de se realizar a calibração num ambiente condicionado, com uma amplitude de variação temperatura, T .

Considerando que a variação de temperatura se pode representar por uma distribuição sinusoidal, a incerteza $u_T(p)$ é determinada pela seguinte expressão:

$$u_T(p) = p \times (\alpha_p + \alpha_c) \times \frac{T}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

6.7 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA AO COEFICIENTE LINEAR DE EXPANSÃO TÉRMICA DO CONJUNTO PISTÃO-CILINDRO

A incerteza de medição padrão associada ao coeficiente linear de expansão térmica do conjunto pistão-cilindro, designada por $u_\alpha(p)$, resulta das incertezas associadas aos coeficientes lineares de expansão térmica do pistão $u(\alpha_c)$ e do cilindro $u(\alpha_p)$, e da variação de temperatura ΔT , sendo determinada pela expressão (17):

$$u_\alpha(p) = p \times \frac{U(\alpha_p + \alpha_c)}{2} \times \Delta T \quad (17)$$

onde ΔT representa a máxima diferença entre a temperatura observada durante a utilização da balança e a temperatura de referência. Em geral, os valores de α_c e α_p são baseados nas medições de características dos materiais, sendo recomendada a adopção de um factor de expansão $k=2$, para o cálculo de $U(\alpha_c)$ e de $U(\alpha_p)$.

6.8 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À DIFERENÇA DE COTA ENTRE O NÍVEL DE REFERÊNCIA E O NÍVEL DE MEDIÇÃO

A correcção de cota resulta de três parâmetros: ρ_f , g e Δh , considerando-se que apenas a incerteza do termo Δh contribui para a incerteza associada a esta correcção, $u_{\Delta h}(p)$. Em geral, determina-se estatisticamente o valor de Δh e a incerteza associada, $U(\Delta h)$, usando uma distribuição normal com $k=3$. A componente de incerteza $u_{\Delta h}(p)$ é determinada através da seguinte expressão:

$$u_{\Delta h}(p) = \rho_f \times g \times \frac{U(\Delta h)}{3} \quad (18)$$

6.9 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À INCLINAÇÃO DO PISTÃO

Se o eixo do pistão não for perfeitamente perpendicular, a força aplicada no pistão deve ser corrigida em função do ângulo de inclinação θ ;

$$F' = F \times \cos(\theta) \quad (19)$$

Neste caso, a distribuição da força (e consequentemente da pressão) é assimétrica. Habitualmente, a componente de incerteza resultante é menor que as restantes e desprezável no cálculo final. A sua determinação pode ser efectuada usando níveis inseridos na base da balança manométrica ou colocados no topo do pistão. A incerteza de medição padrão associada à inclinação, $u_{\text{inc}}(p)$, determinada através da expressão (20), resulta da incerteza associada à estimativa do ângulo de inclinação, a qual é obtida a partir de uma distribuição rectangular centrada com limites correspondentes à estimativa do valor máximo da inclinação, θ .

$$u_{\text{inc}}(p) = p \times \sin(\theta) \times \frac{\theta}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

6.10 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À IMPULSÃO DO AR

O cálculo da correcção devido à impulsão do ar envolve a determinação da massa volúmica do ar e a determinação da massa volúmica dos *pesos-mortos*. A segunda componente é, em geral, desprezável, dado que já foi considerada na atribuição dos valores convencionalmente verdadeiros das massas dos *pesos-mortos* e respectivas incertezas, expressas nos seus certificados de calibração.

Relativamente à primeira componente, é necessário determinar a amplitude de variação da massa volúmica do ar no laboratório, $U(\rho_a)$, em função das condições ambientais (pressão, temperatura e humidade relativa). Considerando que a sua distribuição é representada pela forma da distribuição normal, a incerteza de medição padrão associada é determinada através da expressão (21).

$$u_{\text{imp}}(p) = \frac{p}{(\rho_m - \rho_a)} \times \frac{U(\rho_a)}{3} \quad (21)$$

6.11 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À TAXA DE ROTAÇÃO E/OU AO SENTIDO DE ROTAÇÃO

Esta componente de incerteza é considerada desprezável, uma vez que as balanças manométricas, em geral, dispõem de conjuntos pistão-cilindro com baixo atrito, e de motores para realizar a rotação dos pesos durante o ensaio.

6.12 INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO ASSOCIADA À ESTABILIDADE A LONGO PRAZO

O valor desta componente poderá ser obtido a partir do historial do instrumento, com base nos valores das massas e da área efectiva do conjunto pistão-cilindro determinados em sucessivas calibrações.

A realização de calibrações mais frequentes conduz a valores mais baixos para esta componente. Um historial alargado poderá permitir obter uma lei de variação em função do tempo, tornando possível uma antecipação do seu valor por extrapolação.

6.13 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO COMBINADA

A incerteza de medição padrão combinada $u_c(p)$, é calculada a partir da seguinte expressão:

$$u_c^2(p) = \sum_i u_i^2(p) \quad (22)$$

A incerteza expandida $U_c(p)$, correspondente a uma probabilidade de cerca de 95%, é determinada a partir da expressão (23):

$$U_c(p) = k_t \cdot u_c(p) \quad (23)$$

onde k_t é o factor de expansão, determinado a partir do número de graus de liberdade efectivos do ensaio, ν_{ef} , e obtido com base na distribuição t-Student. No quadro 2 são apresentados valores para as variáveis referidas.

Quadro 2

ν_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k_t	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

O número de graus de liberdade efectivos, ν_{ef} , é determinado através da fórmula de Welch-Satterthwaite (24):

$$\nu_{ef} = \frac{u_c^4(p)}{\sum_i \frac{u_{B,i}^4(p)}{\nu_i}} \quad (24)$$

em que cada ν_i representa o número de graus de liberdade associado a cada uma das componentes de incerteza consideradas.

No caso das componentes corresponderem a avaliações de incerteza do tipo A, o número de graus de liberdade é dado por (n-1) sendo n a dimensão da amostra experimental.

No caso de componentes que correspondem a avaliações de incerteza do tipo B, é habitual considerar $\nu_i = 50$.

Finalmente, no caso de componentes de incerteza obtidas através de certificados de calibração, dever-se-á considerar o número de graus de liberdade aí declarado ou, na sua ausência, $\nu_i = 50$.

Últimos guias publicados

- 1** CALIBRAÇÃO DE MATERIAL VOLUMÉTRICO
1995; ISBN 972 - 96727 - 0 - 9
- 2** AUDITORIAS INTERNAS DE LABORATÓRIOS QUÍMICOS
1995; ISBN 972 - 96727 - 1 - 7
- 3** VALIDAÇÃO DE RESULTADOS EM LABORATÓRIOS QUÍMICOS
1996; ISBN 972 - 96727 - 2 - 5
- 4** DETERMINAÇÃO DA MELHOR INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE FORÇAS
1996; ISBN 972 - 96727 - 3 - 3
- 5** DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE FORÇAS
1996; ISBN 972 - 96727 - 4 - 1
- 6** ACREDITAÇÃO DE LABORATÓRIOS DE ENSAIOS MICROBIOLÓGICOS
1996; ISBN 972 - 96727 - 5 - X
- 7** ENSAIOS INTERLABORATORIAIS EM QUÍMICA
1996; ISBN 972 - 96727 - 6 - 8
- 8** DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DA CALIBRAÇÃO DE MASSAS
1997; ISBN 972 - 96727 - 7 - 6
- 9** ALGUNS EXEMPLOS DE CARTAS DE CONTROLO EM LABORATÓRIOS DE ANÁLISE QUÍMICA
1998; ISBN 972 - 96727 - 8 - 4
- 10** DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO NA ÁREA ELÉCTRICA
1999; ISBN 972 - 96727 - 9 - 2
- 11** ELABORAÇÃO DO MANUAL DA QUALIDADE DE LABORATÓRIOS
1999; ISBN 972 - 8574 - 00 - 2
- 12** DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DOS RESULTADOS DE VERIFICAÇÃO DE MÁQUINAS DE ENSAIO DE TRACÇÃO OU COMPRESSÃO
1999; ISBN 972 - 8574 - 01 - 0
- 13** VALIDAÇÃO DE MÉTODOS INTERNOS DE ENSAIO EM ANÁLISE QUÍMICA
2000; ISBN 972 - 8574 - 02 - 9
- 14** QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DA SITUAÇÃO DOS LABORATÓRIOS DE ANÁLISES CLÍNICAS FACE À NOVA NORMA EN ISO/IEC 17025
2000; ISBN 972 - 8574 - 03 - 7
- 15** GARANTIA DA QUALIDADE DE SISTEMAS INFORMÁTICOS EM LABORATÓRIOS
2000; ISBN 972 - 8574 - 04 - 5
- 16** DETERMINAÇÃO DA MELHOR INCERTEZA DE MEDIÇÃO ASSOCIADA À CALIBRAÇÃO DE BALANÇAS MANOMÉTRICAS
2000; ISBN 972 - 8574 - 05 - 3



Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal

Rua Filipe Folque, 2, 6º Dto
1050-113 LISBOA
Telef. 21 313 98 40
Fax 21 313 98 41
relacre@mail.telepac.pt
www.relacre.pt