



INFLUÊNCIA DO FLUIDO NA CALIBRAÇÃO DE UMA BALANÇA DE PRESSÃO

Luiz Henrique Paraguassú de Oliveira¹, Paulo Roberto Guimarães Couto¹, Jackson da Silva Oliveira¹, Walmir Sérgio da Silva¹, Paulo Lyra Simões Rodrigues¹, Elisama Melo da Silva¹

¹ Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO, Rio de Janeiro, Brasil
paraguassu@inmetro.gov.br, prcouth@inmetro.gov.br, jsoliveira@inmetro.gov.br, wssilva@inmetro.gov.br, plferreira@inmetro.gov.br, emelo@inmetro.gov.br

Resumo: Este artigo apresenta o estudo da influência do tipo de óleo utilizado na determinação das características metroológicas de dois conjuntos pistão-cilindro (baixa e alta pressão) utilizados nas balanças de pressão. A balança de pressão é um instrumento utilizado como padrão de referência para a calibração de barômetros, manômetros, transdutores de pressão, etc. Com isso, é possível garantir a rastreabilidade da medição de pressão para esses diferentes tipos de medidores de pressão. A rastreabilidade quando associada à confiabilidade metroológica, se constitui num importante parâmetro para assegurar a qualidade de um determinado produto que dependa da medição da grandeza pressão.

Palavras-chave: balança de pressão, metrologia, pressão, incerteza de medição.

1. INTRODUÇÃO

No comércio de produtos, um dos parâmetros de comercialização é o resultado de medição. Deste modo, não há dúvidas sobre a importância da metrologia para a qualidade e comercialização dos produtos em todas as áreas.

De acordo com o VIM [1], o resultado de uma medição é o valor atribuído a um mensurando e deve incluir informações sobre sua incerteza. A incerteza de medição é a avaliação da qualidade de um resultado de medição, o qual por questões de ratificação da sua confiabilidade, sempre deve estar disponível para que seja utilizado em uma comparação. Deste modo, no mercado globalizado há a necessidade de se padronizar métodos para se expressar e avaliar a incerteza do resultado de medição, tornando possível a comparabilidade dos resultados obtidos entre diversos sistemas metroológicos. Tal processo de comparação possibilita o reconhecimento mútuo entre os sistemas metroológicos e consequentemente estabelece uma melhoria da facilidade da comercialização dos produtos entre nações, com a superação de barreiras técnicas.

As medições de pressão têm um extensivo e importante papel nos processos de diversas áreas tais como: petróleo, petroquímica, meteorológica, aeroespacial, aviação, etc.

Na área de pressão, medições com boa exatidão e baixos valores de incerteza adequados às necessidades de um determinado processo, são importantes para assegurar o controle e a qualidade dos resultados.

A balança de pressão é um instrumento de medição de pressão que possui uma boa exatidão. É largamente utilizada para calibrar medidores de pressão mecânicos e elétricos, na faixa de 3 kPa (meio gasoso - relativo ou absoluto) até 1 GPa (meio hidráulico - relativo).

De acordo com Dadson *et al* [2], a balança de pressão surgiu como um instrumento de medição exato há aproximadamente 150 anos. Este instrumento é constituído de um conjunto pistão-cilindro e de um conjunto de massas. A medição da grandeza pressão através de uma balança de pressão é realizada basicamente em função das grandezas massa, aceleração da gravidade local, tensão superficial do fluido manométrico e a área do conjunto pistão-cilindro.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo realizar as seguintes etapas: *i*) realizar o estudo da influência do óleo na estabilidade de funcionamento de uma balança de pressão utilizando três tipos diferentes; *ii*) comparar os valores das áreas efetivas dos conjuntos pistão-cilindro da marca Budenberg, determinadas nas calibrações, utilizando os três tipos diferentes de fluidos; *iii*) estimar a incerteza de medição das calibrações para os conjuntos pistão-cilindro, seguindo a metodologia do “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” (ISO GUM 2008); *iv*) avaliar a compatibilidade entre os resultados de medição de pressão, obtidos a partir das áreas efetivas determinadas nas calibrações, dos conjuntos pistão-cilindro utilizando-se os três tipos diferentes de fluidos.

Nas calibrações foram utilizados três tipos de óleo, cujas especificações são descritas na tabela 1, apresentada a seguir:

Tabela 1: Especificações técnicas dos óleos na temperatura de 20 °C.

Código de Identificação	Tipo	Fabricante	Massa Específica (g/cm ³)	Tensão Superficial (mN/m)
Óleo 1	EP46	Lubrax Industrial HR	0,8671	31,300
Óleo 2	Sebacate	DH – Desgranges et Hout	0,9137	31,439
Óleo 3	Nuto H5	DH – Desgranges et Hout	0,8434	28,690

3. METODOLOGIA

O método utilizado para a calibração dos conjuntos pistão-cilindro nesta pesquisa foi o método “crossfloating”, o qual se caracteriza por conectar as duas balanças de pressão (referência e teste) em série, colocando-se uma válvula de isolamento entre os dois sistemas, através de uma tubulação. Posteriormente, são estabelecidos os equilíbrios entre as pressões medidas pela referência e pelo teste, de forma a contemplar toda a faixa de medição do instrumento sob calibração. O método tem o intuito de determinar a área efetiva do conjunto pistão-cilindro em calibração e comparar valores de pressão medidos pela referência e pelo teste.

A equação de equilíbrio, a partir do qual se determina a área do conjunto pistão-cilindro em calibração é definida pela equação (1) a seguir:

$$P_{ref} = \frac{\sum m_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{m_i}}\right) \cdot g_l + \sigma_i \cdot c_i}{A_{T0,20} \left[1 + (\alpha_{c_i} + \alpha_{p_i}) \cdot (\theta_i - 20)\right] \cdot (1 + \lambda_i p_n)} \pm \rho_{oleo} g_l \Delta h$$

Onde:

P_{ref} = pressão de referência em pascal (Pa);
 $\sum m_i$ = soma das massas atuantes sobre o pistão teste (kg);
 ρ_a = massa específica do ar (kg/m³);
 ρ_{m_i} = massa específica das massas do teste (kg/m³);
 g_l = aceleração referente à gravidade local (m/s²);
 σ_i = tensão superficial do fluído do teste (N/m);
 c_i = circunferência do pistão do teste (m);
 $A_{T0,20}$ = área do conjunto pistão-cilindro do teste (m²);
 $\alpha_{c_i}, \alpha_{p_i}$ = coef. dilat. térmica do pistão-cilindro teste (°C⁻¹);
 θ_i = temperatura no momento da medição do teste (°C);
 λ_i = coef. de deformação do pistão teste (unidade de pressão⁻¹);
 p_n = pressão nominal da medição (unidade de pressão);
 ρ_{oleo} = massa específica do óleo usado (kg/m³);
 Δh = desnível (m) entre as bases dos pistões de referência e teste. (Δh é positivo ou negativo se a referência estiver acima ou abaixo do teste respectivamente).

Na equação de equilíbrio (1), todas as variáveis são conhecidas, exceto a área efetiva (A_e) do teste, a qual é definida pela equação (2), onde cada ponto de pressão nominal (p_n) de equilíbrio é definido por 10% em 10% da faixa de escala do instrumento a calibrar:

$$A_e = A_{0,20} [1 + \lambda p_n] \quad (2)$$

Operando a equação (2) a mesma pode ser representada pela equação de reta, conforme a equação (2a):

$$A_e = A_{0,20} [1 + \lambda p_n] = a + b p_n \quad (2a)$$

Deste modo, se o conjunto pistão-cilindro apresentar um coeficiente de deformação, o comportamento da área efetiva

em função da pressão é determinado pela equação de uma reta, onde $A_{0,20}$ é o coeficiente linear da curva e b o coeficiente angular é igual a $A_{0,20}\lambda$.

Deste modo, o coeficiente de deformação é determinado através da relação entre os coeficientes angular e linear da reta conforme equação (3).

$$\lambda = \frac{b}{A_{0,20}} \quad (3)$$

Se não ocorrer a deformação do conjunto pistão-cilindro, a área $A_{0,20}$ será determinada pela média de todas as áreas calculadas para a calibração, ao longo de toda a faixa de escala do instrumento.

A metodologia de cálculo da incerteza de medição foi realizada de acordo com o documento de referência ISO GUM 2008, seguindo as seguintes etapas: 1) definição do mensurando; 2) elaboração do diagrama causa-efeito; 3) estimativa das incertezas das fontes de entrada; 4) cálculo dos coeficientes de sensibilidade; 5) cálculo das componentes de incerteza; 6) combinação das componentes de incerteza; 7) cálculo do número de graus de liberdade; 8) determinação do fator de abrangência; 9) cálculo da incerteza expandida.

Além do cálculo da incerteza expandida foi calculado o erro normalizado (E_n) conforme equação (4), a fim de avaliar a compatibilidade entre resultados de medição, sendo que este deve ser menor ou igual a 1.

$$E_n = \frac{|X - Y|}{\sqrt{U_X^2 - U_Y^2}} \quad (4)$$

Onde:

X = resultado de medição da pressão utilizando um determinado tipo de óleo;

Y = resultado da medição da pressão utilizando outro determinado tipo de óleo;

U_X^2 = a incerteza expandida do resultado de medição x;

U_Y^2 = a incerteza expandida do resultado de medição y.

4. RESULTADOS

As tabelas 2 e 3 apresentam os valores pontuais das áreas efetivas determinadas nas calibrações, em função da pressão para cada tipo diferente de óleo dos conjuntos pistão-cilindro para baixa e alta pressão, respectivamente.

Tabela 2: Área efetiva em função da pressão para o conjunto pistão-cilindro de baixa pressão.

Pressão Nominal MPa (bar)	Área efetiva ($\times 10^{-6} \text{ m}^2$)		
	EP46	Sebacate	Nuto H5
0,5 (5)	80,660022	80,663584	80,666011
1,0 (10)	80,660069	80,663081	80,665571
1,5 (15)	80,661270	80,664298	80,665912
2,0 (20)	80,661683	80,663429	80,668328
2,5 (25)	80,662415	80,663408	80,667777
3,0 (30)	80,662184	80,663689	80,667053
3,5 (35)	80,662409	80,663899	80,666566
4,0 (40)	80,662474	80,663516	80,666978
4,5 (45)	80,662439	80,663444	80,667042
5,0 (50)	80,662831	80,664109	80,666634
5,5 (55)	80,663083	80,664521	80,666868

Tabela 3: Área efetiva em função da pressão para o conjunto pistão-cilindro de alta pressão.

Pressão Nominal MPa (bar)	Área efetiva ($\times 10^{-6} \text{ m}^2$)		
	EP46	Sebacate	Nuto H5
10 (100)	4,0322973	4,0322105	4,0322980
20 (200)	4,0324276	4,0325109	4,0327440
30 (300)	4,0327105	4,0327525	4,0332323
40 (400)	4,0328886	4,0329516	4,0330777
50 (500)	4,0330691	4,0331739	4,0334179
60 (600)	4,0332511	4,0333105	-
70 (700)	4,0334956	4,0334962	-
80 (800)	4,0336311	4,0336432	-
90 (900)	4,0339392	4,0338208	-
100 (1000)	4,0339072	4,0339565	-
110 (1100)	4,0340427	-	-

As tabelas 4 e 5 apresentam os valores de área efetiva do conjunto pistão-cilindro, desvio padrão das áreas obtidas e os coeficientes de deformação quando presentes na calibração para os três diferentes tipos de óleo nas configurações dos conjuntos pistão-cilindro para baixa e alta pressão, respectivamente.

Tabela 4: Valores característicos do sistema de 1 a 60 bar

Baixa Pressão			
Óleo	$A_{0,20} \text{ (m}^2\text{)}$	Desvio Padrão (m^2)	Coef. Deformação (bar)
EP46	$8,06602 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-10}$	-
Sebacate	$8,06637 \times 10^{-5}$	$4,3 \times 10^{-10}$	-
Nuto H5	$8,066679 \times 10^{-5}$	$8,0 \times 10^{-10}$	-

Tabela 5: Valores característicos do sistema de 10 a 1100 bar

Alta Pressão			
Óleo	$A_{0,20} \text{ (m}^2\text{)}$	Desvio Padrão (m^2)	Coef. Deformação (bar)
EP46	$4,03214 \times 10^{-6}$	$8,2 \times 10^{-10}$	$4,6 \times 10^{-7}$
Sebacate	$4,03215 \times 10^{-6}$	$6,6 \times 10^{-10}$	$4,7 \times 10^{-7}$
Nuto H5	$4,03222 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$4,6 \times 10^{-7}$

Os gráficos 1 e 2 retratam a variação das áreas efetivas de cada conjunto pistão-cilindro em função da pressão, para cada tipo de óleo utilizado.

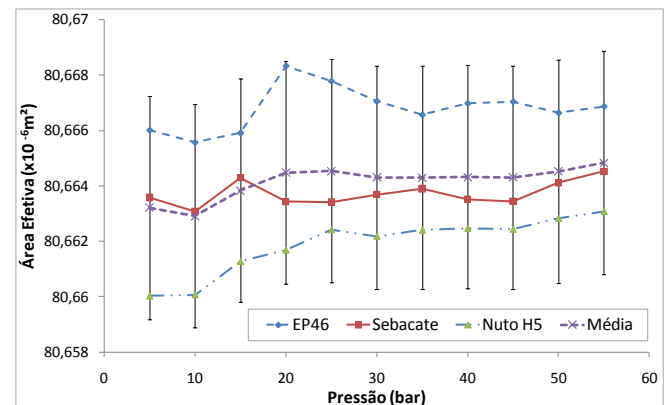


Gráfico 1: Área Efetiva vs Pressão (intervalo de indicação de 0,5 a 5,5MPa)

Observa-se no gráfico 1 que os valores das áreas $A_{0,20}$ do conjunto pistão-cilindro de baixa pressão não variaram significativamente para os diferentes fluidos utilizados. As variações da área efetiva em função da pressão do pistão de baixa variaram aleatoriamente na faixa de pressão do conjunto pistão cilindro e apresentaram valores maiores para um tipo de óleo, o EP 46. Todos os valores de $A_{p,20}$ do conjunto pistão-cilindro de baixa pressão para os diferentes tipos de óleos utilizados na calibração, apesar de

apresentarem variabilidade em função da pressão, todos eles ficaram contidos dentro do intervalo definido $\bar{A}_{0,20} \pm 0,01\%$; sendo 0,01% a classe de exatidão declarada pelo fabricante do pistão de baixa pressão da balança de pressão.

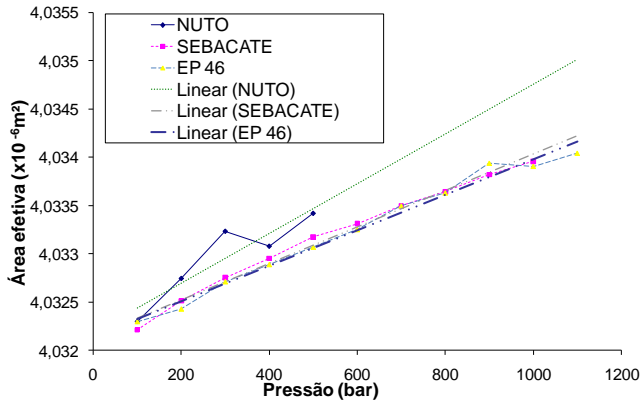


Gráfico 2: Área Efetiva vs Pressão (intervalo de indicação de 10 a 110 MPa)

Conforme pode ser observado no gráfico 2, para o pistão de alta pressão as áreas efetivas apresentaram uma deformação em função da pressão, para os três tipos de óleo. Em um tipo de fluido, somente foi possível a determinação da área efetiva até 500 bar (50 MPa), devido a baixa viscosidade do óleo que não possibilitou a estabilização da pressão no instrumento em calibração. Porém até 50 MPa os resultados de área efetiva ficaram próximos dos valores obtidos com a utilização dos outros fluidos. As áreas $A_{0,20}$ não variaram significativamente e apresentaram valores semelhantes do coeficiente de deformação do conjunto pistão-cilindro para os três tipos de óleo utilizados, contudo com desvios padrão distintos. Todos os valores de $A_{0,20}$ do conjunto pistão-cilindro de alta pressão para os diferentes tipos de óleos utilizados na calibração, ficaram contidos dentro do intervalo definido $\bar{A}_{0,20} \pm 0,01\%$, sendo 0,01% a classe de exatidão declarado pelo fabricante do conjunto pistão-cilindro da balança de pressão.

A tabela 6 apresenta as incertezas obtidas nas calibrações realizadas com os três óleos para o conjunto pistão-cilindro de baixa pressão.

Tabela 6: Incertezas dos Pontos Nominais para baixa pressão.

Incertezas dos Pontos Nominais			
Pn MPa (bar)	U_{EP46} (bar)	$U_{Sebacate}$ (bar)	$U_{Nuto H5}$ (bar)
0,5 (5)	0,00034694	0,00034505	0,00034523
0,5 (5)	0,00034694	0,00034505	0,00034523
0,9 (9)	0,00066722	0,00066721	0,00066799
1,0 (10)	0,00074759	0,00074780	0,00074873
1,0 (10)	0,00074759	0,00074780	0,00074873
1,0 (10)	0,00074759	0,00074780	0,00074873

A tabela 7 apresenta os erros normalizados calculados a partir dos resultados obtidos nas calibrações realizadas com os três óleos para o conjunto pistão-cilindro de baixa pressão. Conforme se observa na tabela 7, para o conjunto

pistão-cilindro de alta pressão, os erros normalizados nas comparações entre os resultados obtidos nos três tipos de óleo utilizados, foram sempre menores do que 1.

Tabela 7: Erro normalizado para baixa pressão.

Erro Normalizado			
Pn MPa (bar)	EP46-Sebacate	EP46-Nuto H5	Sebacate-Nuto H5
0,5 (5)	0,45	0,84	0,39
0,5 (5)	0,45	0,84	0,39
0,9 (9)	0,42	0,78	0,36
1,0 (10)	0,42	0,77	0,36
1,0 (10)	0,42	0,77	0,36
1,0 (10)	0,42	0,77	0,36

A tabela 8 apresenta as incertezas obtidas nas calibrações realizadas com os três óleos para o conjunto pistão-cilindro de baixa pressão.

Tabela 8: Incertezas dos Pontos Nominais para alta pressão.

Incertezas dos Pontos Nominais			
Pn MPa (bar)	U_{EP46} (bar)	$U_{Sebacate}$ (bar)	$U_{Nuto H5}$ (bar)
1,0 (10)	0,00247098	0,00309737	0,00239982
2,0 (20)	0,00368918	0,00424937	0,00360222
4,0 (40)	0,00613758	0,00657737	0,00603702
4,0 (40)	0,00613758	0,00657737	0,00603702
10,0 (100)	0,01357878	0,01375337	0,01358142
10,0 (100)	0,01357878	0,01375337	0,01358142
18,0 (180)	0,02372438	0,02376937	0,02420062
20,0 (200)	0,02630078	0,02635337	0,02695542
20,0 (200)	0,02630078	0,02635337	0,02695542
20,0 (200)	0,02630078	0,02635337	0,02695542

A tabela 9 apresenta os erros normalizados calculados a partir dos resultados obtidos nas calibrações realizadas com os três óleos para o conjunto pistão-cilindro de baixa pressão. Conforme se observa na tabela 9, para o conjunto pistão-cilindro de alta pressão, os erros normalizados nas comparações entre os resultados obtidos nos três tipos de óleo utilizados, foram sempre menores do que 1.

Tabela 9: Erro normalizado para alta pressão.

Erro Normalizado			
Pn MPa (bar)	EP46-Sebacate	EP46-Nuto H5	Sebacate-Nuto H5
1,0 (10)	0,005	0,079	0,065
2,0 (20)	0,007	0,106	0,091
4,0 (40)	0,009	0,127	0,113
4,0 (40)	0,009	0,127	0,114
10,0 (100)	0,010	0,142	0,131
10,0 (100)	0,010	0,142	0,131
18,0 (180)	0,011	0,145	0,134
20,0 (200)	0,011	0,145	0,134
20,0 (200)	0,011	0,145	0,134
20,0 (200)	0,011	0,145	0,134

5. CONCLUSÕES

5.1 Conjunto Pistão-cilindro de Baixa Pressão

- De acordo com a avaliação de todos os valores de $A_{0,20}$ do conjunto pistão-cilindro para os diferentes tipos de óleos utilizados na calibração, conclui-se que apesar de haver uma variação aleatória dos valores em função da pressão, todos eles estavam contidos dentro do intervalo definido pela classe de exatidão, declarada pelo fabricante da balança de pressão. As diferenças das áreas determinadas com os três tipos de óleo utilizados na calibração não comprometem a classe de exatidão do instrumento de acordo com o fabricante;
- Apesar de o cálculo do desvio padrão da área efetiva de um dos óleos ter sido maior do que os demais (óleo Nuto H5 $s = 8,0 \times 10^{-10} \text{m}^2$), esta diferença não influenciou no estudo da compatibilidade entre resultados das medições;
- Os resultados de medição obtidos com os três tipos de óleo são compatíveis entre si, visto que os valores dos erros normalizados sempre foram menores do que 1;
- Como todos os resultados foram compatíveis entre si, no caso do conjunto pistão-cilindro de baixa pressão, qualquer um dos três tipos de fluidos estudados pode ser utilizado na balança de pressão.

5.2 Conjunto Pistão-cilindro de Alta Pressão

- As diferenças das áreas determinadas com os três tipos de óleo utilizados na calibração não comprometem a classe de exatidão do instrumento declarada pelo seu fabricante;
- Apesar da dificuldade de medição quando foi utilizado um tipo de fluido, não houve diferença entre os valores dos coeficientes de deformação determinados para os três tipos de óleos;
- Os desvios padrão das áreas efetivas são diferentes para os três tipos de óleo, entretanto as diferenças não influenciaram o estudo da compatibilidade entre os resultados de medição;
- Os resultados de medição obtidos com os três tipos de óleo foram compatíveis entre si, visto que os valores dos erros normalizados sempre foram menores do que 1;
- Devido a dificuldade de estabilização da balança de pressão acima de 50 MPa, quando um tipo de óleo foi utilizado, o mesmo não é recomendado para o conjunto pistão-cilindro de alta pressão na balança de pressão utilizada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à colaboração do técnico metrologista Rodrigo Soares de Souza pela realização das medições no Laboratório de Pressão – Lapre e da técnica metrologista

Elisama Melo da Silva que produziu uma monografia a partir deste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] INMETRO. *Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia*, 5ª ed., Rio de Janeiro, 2008.
- [2] DADSON, R.S., LEWIS, S.L., PEGGS, G.N., *The Pressure Balance, Theory and Practice*, National Physical Laboratory, United Kingdom.
- [3] 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.
- [4] CINELLI, L. R., COUTO, P. R. G., PARAGUASSÚ, L. H., SOARES, R. S. “Estudo de Padrões e Estabelecimento da Melhor Capacidade de Medição do Lapre/Inmetro na Faixa de 1,4 kPa a 7 MPa” - I CIMMEC, Rio de Janeiro, 2008.
- [5] COUTO, P.R.G., PARAGUASSU, L.H., SILVA, W.S., *Apostila Curso Avançado de Calibração de Balança de Pressão - Divisão de Mecânica, Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, Agosto de 2008.*
- [6] COUTO, P. R. G., PARAGUASSÚ, L.H., *Calibração de Balanças de Pressão. Nota Técnica Inmetro, 2010.*
- [7] 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, Rio de Janeiro, 2008.
- [8] ABNT ISO/IEC GUIA 43-1 (Anexo A).