

O efeito do empuxo na pesagem

The buoyancy effect on weighing

Marcelo Tadao Saita¹, Gregory Müller Taccola¹, Manuel Antonio Pires Castanho¹

¹ Instituto de pesquisas Tecnológicas

E-mail: marcelots@ipt.br; gregory@ipt.br; manet@ipt.br

Resumo: O efeito do empuxo na pesagem pode introduzir erros maiores que 1000 ppm para amostras com densidade abaixo de 1000 kg/m³ e até 100 ppm para amostras com densidade acima de 5000 kg/m³. O presente trabalho, com base nas normas e recomendações nacionais e internacionais, apresenta um método para corrigir o efeito do empuxo na pesagem e sua respectiva incerteza. Também são apresentados os conceitos de massa convencional, ajuste e suas respectivas relações com o empuxo.

Palavras-chave: Empuxo, Pesagem, Massa, Incerteza.

Abstract: The buoyancy effect on weighing might introduce errors greater than 1000 ppm for samples with a density below 1000 kg/m³ and up to 100 ppm for samples with a density above 5000 kg/m³. The present work, based on national and international standards and recommendations, presents a method to correct the buoyancy effect on weighing and its respective uncertainty. The concept of conventional mass and adjustment are also presented with their respective relationship with the buoyancy effect.

Keywords: Buoyancy, Weighing, Mass, Uncertainty.

1. INTRODUÇÃO

A medição de massa é necessária em diversos campos da indústria, comércio e serviços, principalmente nas áreas da química, medicina, meio ambiente e pesquisa. A determinação da massa de uma amostra pode ser realizada por comparação a um peso padrão ou indiretamente pela indicação de um instrumento de pesagem não automático de auto indicação [1] (daqui por diante denominado de “balança”).

A balança fornece uma indicação em resposta a uma força aplicada em seu receptor e os resultados são expressos em unidades de massa. O valor indicado pela balança é afetado principalmente pela gravidade local e as densidades da amostra e do ar circundante [1].

As balanças são amplamente utilizadas em pesagens pela alta precisão e facilidade de operação, assim como todo instrumento de medição, precisam estar devidamente calibradas para garantir a rastreabilidade dos resultados. No

entanto, as pesagens estão sujeitas ao efeito do empuxo que influencia o ajuste da balança e os resultados das medições e deve ser levado em consideração.

2. EFEITO DO EMPUXO

Todo o corpo imerso em um fluido está sujeito a uma força de empuxo cuja intensidade é proporcional à massa deslocada do fluido. A força do empuxo possui mesma direção que a força peso, mas sentido oposto.

A força exercida por uma amostra de massa (m) e densidade (ρ) pesada sob um ar de densidade (ρ_a), considerando o efeito do empuxo, é descrita pela equação 1 abaixo [1, 2].

$$F = m \cdot g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right) \quad (1)$$

Onde g é o valor da aceleração da gravidade no local de instalação da balança.

Como a força exercida pela amostra ao receptor da balança sofre uma redução devido o efeito do empuxo, a indicação da balança não reflete perfeitamente a massa da amostra (dependendo da incerteza relativa que se pretende para a pesagem). Este fenômeno fica evidenciado nos exemplos a seguir, onde duas amostras de densidades diferentes são pesadas:

- Duas amostras de mesma massa podem exercer forças diferentes na balança e, portanto a balança indicaria valores diferentes para amostras de mesma massa.
- Duas amostras de massas diferentes podem exercer forças iguais na e, portanto a balança indicaria valores iguais para amostras de massas diferentes.

3. DENSIDADE DO AR DURANTE A MEDIÇÃO

Para efetuar corretamente a correção do empuxo, a densidade do ar durante a medição deve ser conhecida. A densidade do ar e sua respectiva

incerteza padrão podem ser calculadas pelas equações (2) e (3) a seguir [1, 2]:

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot p - 0,009 \cdot hr \cdot e^{(0,061t)}}{273,15+t} \quad (2)$$

$$u^2_{(\rho_a)} = (\rho_a \cdot 2 \cdot 10^{-4})^2 + \left(\frac{0,34848}{273,15+t} \cdot u_{(p)}\right)^2 +$$

$$\left(\frac{-0,009 \cdot e^{(0,061t)}}{273,15+t} \cdot u_{(hr)}\right)^2 +$$

$$\left[\frac{(-0,009 \cdot hr \cdot [0,061 \cdot e^{(0,061t)}]) \cdot (273,15+t)}{(273,15+t)^2} -$$

$$\frac{0,34848 \cdot p - 0,009 \cdot hr \cdot e^{(0,061t)}}{(273,15+t)^2} \cdot u_{(t)}\right]^2 \quad (3)$$

Onde p é a pressão atmosférica, hr a umidade relativa do ar e t a temperatura ambiente.

4. MASSA CONVENCIONAL

Com o intuito de minimizar os efeitos das condições ambientais na medição de massa, a Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML) difundiu o conceito de massa convencional, de modo que uma pesagem executada em condições ambientais específicas não necessite de correções relacionadas ao empuxo [2, 3].

A massa convencional, para um peso a 20 °C de massa (m) densidade (ρ) é a massa do peso de referência (m_c) de densidade $\rho_c = 8000 \text{ kg/m}^3$ que o equilibra no ar de densidade $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ a esta mesma temperatura [2-4].

$$m_c \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_c}\right) = m \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \quad (4)$$

5. AJUSTE DE BALANÇAS

O ajuste de balanças, muitas vezes designado como “calibração interna ou externa”, é realizado por meio de um peso padrão (interno ou externo) de massa convencional conhecida, de forma que os efeitos da gravidade local e do empuxo sobre o peso de ajuste sejam incluídos no fator de ajuste.

A indicação de uma balança após o ajuste (W) é descrita pela equação (5) abaixo [1, 5]:

$$W = m \cdot \frac{g}{g_{cal}} \cdot \frac{\left(\frac{1-\rho_0}{\rho_{cal}}\right)}{\left(\frac{1-\rho_0}{\rho_c}\right)} \cdot \frac{\left(\frac{1-\rho_a}{\rho}\right)}{\left(\frac{1-\rho_a}{\rho_{cal}}\right)} \quad (5)$$

Onde g_{cal} é a aceleração da gravidade durante o ajuste, ρ_{cal} é a densidade do peso utilizado para realizar o ajuste e $\rho_{a\ cal}$ a densidade do ar durante o ajuste.

Caso a balança não seja movimentada e as condições ambientais não variem após o ajuste, as seguintes aproximações são válidas [1, 5]:

$$g_{cal} \cong g; \rho_{a\ cal} \cong \rho_a$$

O ajuste deve ser realizado com pesos padrão ajustados a valores de massa convencional. Pesos padrão conforme os requisitos da OIML R111-1, possuem valores de densidade preferencialmente próximos de 8000 kg/m³ [2]. Neste caso a seguinte aproximação é válida [1, 5]:

$$\rho_{cal} \cong \rho_c$$

Com as considerações acima a equação (5) torna-se a equação (6) [1, 5]:

$$W = m \cdot \frac{\left(\frac{1-\rho_a}{\rho}\right)}{\left(\frac{1-\rho_a}{\rho_c}\right)} \quad (6)$$

5.1. CORREÇÕES DAS INDICAÇÕES

A indicação da balança é uma estimativa do valor de massa convencional da amostra [1]. Um valor

mais preciso da massa convencional da amostra pode ser obtido pela equação (8), também é possível derivar o valor de massa real da amostra por meio da equação (7) [1, 5].

$$m = W \cdot \left[1 + \rho_a \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c}\right)\right] \quad (7)$$

$$m_c = W \cdot \left[1 + (\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c}\right)\right] \quad (8)$$

As incertezas relativas associadas às equações (7) e (8) podem ser estimadas pelas equações (9) e (10) respectivamente [1]:

$$\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 = u^2(\rho_a) \cdot \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c}\right)^2 + \rho_a^2 \cdot \frac{u^2(\rho)}{\rho^4} \quad (9)$$

$$\left(\frac{u(m_c)}{m_c}\right)^2 = u^2(\rho_a) \cdot \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c}\right)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 \cdot \frac{u^2(\rho)}{\rho^4} \quad (10)$$

Onde $u(\rho_a)$ é a incerteza padrão da densidade do ar e $u(\rho)$ a incerteza padrão da densidade da amostra.

5.2. ANÁLISE DAS CORREÇÕES

O gráfico 1 mostra os valores das correções em função da densidade da amostra para a densidade do ar igual a 1,0 kg/m³, 1,2 kg/m³ e 1,4 kg/m³ enquanto o gráfico 2 mostra as componentes da incerteza da correção, considerando as incertezas da densidade do ar e da amostra iguais a 1%.

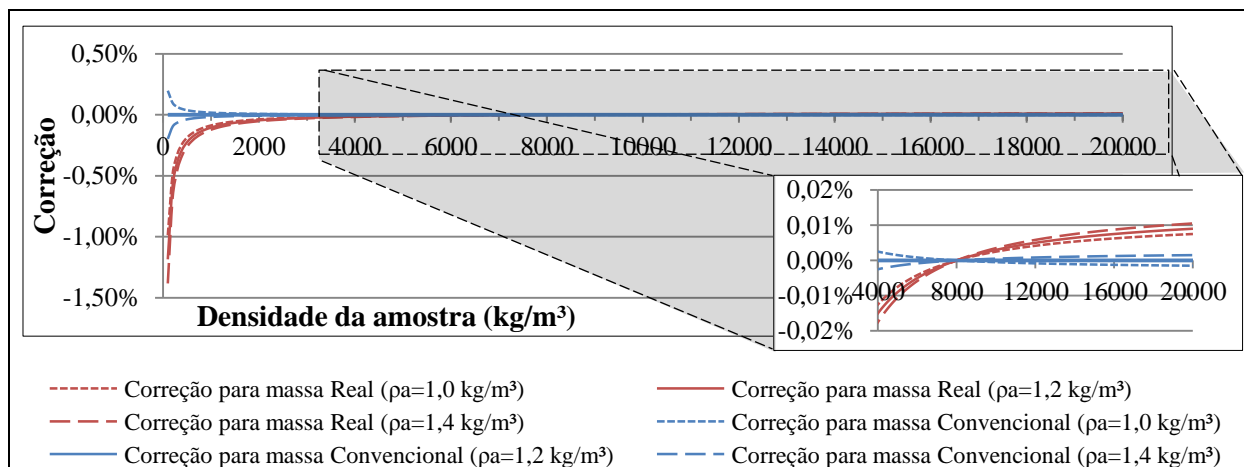


Gráfico 1. Correções.

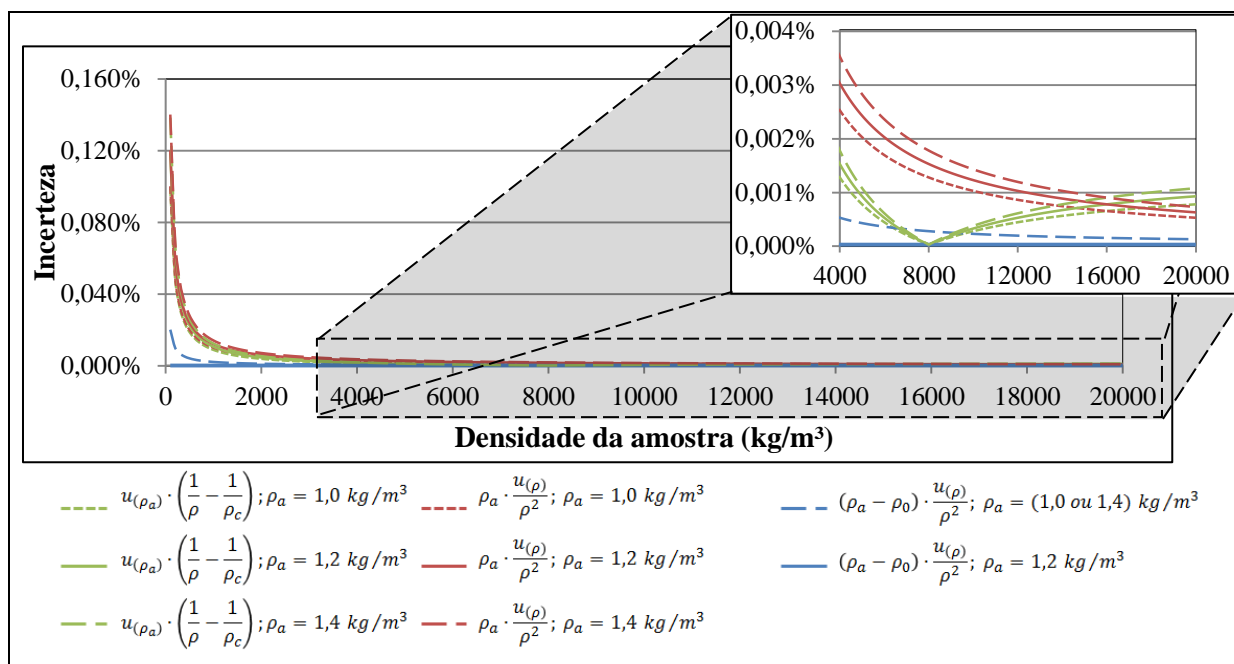


Gráfico 2. Incerteza relativa das correções.

6. CONCLUSÕES

A equação (6) mostra que o ajuste das balanças minimiza o efeito do empuxo sob as medições. Quanto menor a diferença entre a densidade da amostra e o valor convencional (8000 kg/m³), menor será a diferença entre a indicação da balança e a massa real (ou convencional) da amostra, além disso, se a pesagem for realizada sob um ar de densidade 1,2 kg/m³ a indicação da balança será igual à massa convencional da amostra, independente de sua densidade.

Vale ressaltar que estas conclusões são válidas apenas se a densidade do ar e a aceleração da gravidade durante o ajuste forem iguais às no momento da medição. Além disso, o ajuste deve ser realizado com pesos padrão em conformidade com os requisitos da OIML R111-1 e devem ter classe compatível com a balança [2].

7. REFERÊNCIAS

[1] European Association of National Metrology Institutes. EURAMET/cg-18/v.02. Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments. Braunschweig: EURAMET; 2009.

[2] International Organization of Legal Metrology. OIML R 111-1:2004. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3: Part 1: Metrological and technical requirements. Paris: OIML; 2004.

[3] International Organization of Legal Metrology. OIML D 28:2004. Conventional value of the result of weighing in air. Paris: OIML; 2004.

[4] Brasil. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Portaria nº 233, de 22 de Dezembro de 1994. Aprovação do Regulamento Técnico referente à fabricação e utilização de pesos padrão. Diário Oficial da União de 02 de janeiro de 1995; Seção 1. p 68-72.

[5] Reichmuth, A. Measuring mass and force with a balance. Mettler Toledo, 1999.

Disponível em:

https://www.mt.com/dam/mt_ext_files/Editorial/Generic/6/Weigh_Uncertain_Number5_0x0003d6750003db670009174c_files/measure_mass_force.pdf [Acesso em 27 de julho de 2017]