

ERROS DA INDICAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE PESAGEM NÃO AUTOMÁTICOS DEVIDO A ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE

Marco Aurélio Diniz Maciel¹

¹Instituto de Pesos e Medidas do Estado do Paraná

E-mail: marcomaciel@ipem.pr.gov.br

Resumo

Todos os instrumentos de pesagem que não utilizam o princípio de alavancas para a determinação da massa de objetos colocados sobre seus pratos ou plataformas são afetados pela aceleração devido a gravidade local (g_{ϕ}). O erro relativo da indicação destes instrumentos é proporcional às variações no valor da aceleração da gravidade g ; as variações de g por grau de latitude e os valores acumulados desta variação estão tabulados, para latitudes entre 0° a 35° , na tabela 2. Pequenas variações no valor de g por grau de latitude (e , por conseguinte, o erro devido a este fator) depende do valor da latitude em si e, sem dúvida, da altitude.

Um erro igual a um terço do erro máximo permitido (emp) na carga máxima de instrumentos de pesagem pode ser considerado como um erro significativo, e, tem sido observado que todas as classes de instrumentos de pesagem são afetadas por variações de g ; até balanças da classe IIII apresentam erros de dois intervalos de verificação quando transportadas na direção norte-sul, por exemplo, de uma extremidade de 5° de latitude a outra de 35° . Erros significativos aparecem quando balanças são transportadas para locais que variam $0,5^{\circ}$ em latitudes próximas de 35° . Uma pequena mudança no valor de g causa um grande erro na indicação para permitir que instrumentos de pesagem das classes I e II sejam transportados em qualquer distância razoável na direção norte-sul sem que sejam tomados alguns cuidados na calibração destes instrumentos.

Também, será apresentado neste artigo o erro na indicação de instrumentos de pesagem devido as variações no valor de g causado pela altitude: uma balança da classe I quando sujeita a uma diferença na altura de apenas 7,5 m, apresentará um erro igual ao seu emp .

Considerando estes fatores sugerimos que a verificação inicial ou um ajuste, de acordo com especificações do fabricante, seja executado no local de instalação da balança, sem necessidade de obliteração do selo de verificação fixado por autoridade metrológica competente.

1- INTRODUÇÃO

1.1- MASSA E PESO

É importante distinguirmos cuidadosamente a diferença entre massa e peso. A massa é uma propriedade invariante de um corpo, é a medida da quantidade de matéria nele contida, sendo diretamente relacionada com o número e tipo de átomos que compõe o objeto. Todo material possui massa, e a massa não varia com a posição, movimento, aceleração ou forma do corpo a menos que matéria seja adicionada ou removida.

Lamentavelmente, os sentidos humanos não podem detectar massa, embora nós somos sensíveis a força resultante da massa de objetos. Esta força pode ser evidenciada de duas maneiras, pela tendência de um corpo em resistir a mudanças no movimento: a massa inercial ou pela atração entre corpos: massa gravitacional.

É cientificamente demonstrado que as massas gravitacional e inercial são equivalentes. Todos os objetos que possuem massa são atraídos por outros. A Terra é atraída pelo Sol. Isto faz com que a Terra permaneça em órbita em torno do Sol. Analogamente, todos corpos na superfície da Terra são atraídos pelo centro da Terra. Esta força é igual a massa do objeto multiplicada pela aceleração devido a gravidade no local. O peso do objeto varia de local para local na Terra, pois, na superfície da Terra, a aceleração da gravidade aumenta continuamente do equador (latitude 0°) para quaisquer dos polos (latitude 90°).

A atração entre objetos e a Terra fornece o modo mais comum de medição de massa, por intermédio da pesagem. É frequentemente considerado que massa e peso são sinônimos, mas ainda que seus valores sejam, ocasionalmente, dados na mesma unidade, o quilograma, eles não são iguais. No Sistema Internacional de Unidades (SI), enquanto a massa é medida em quilograma kg, o peso é uma força cuja intensidade é medida em Newton (N). Desde a 1ª Conferência de Pesos e Medidas em 1889, a unidade de massa tem sido definida como a massa de um protótipo do quilograma internacional, o qual é mantido no Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) em Sèvres, na França. O protótipo é um cilindro de 39 mm de altura e diâmetro de 39 mm feito de uma liga contendo 90% de platina e 10% de irídio com uma densidade de, aproximadamente, 21,5 g/cm³.

Fisicamente, é incorreto afirmar que o peso de um corpo é 10 kg. Podemos referir-nos à massa de 10 kg, cujo peso é 10.g Newtons, e o valor exato deste peso

depende do valor de g no local (menos os efeitos da densidade do ar). Assim, um corpo de massa igual a 10 kg em um local em que $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, tem peso cuja intensidade é 98 Newtons.

Pesagem nos dá uma maneira conveniente para medir massa, porém devemos sempre lembrar que na pesagem medimos o peso (ou força) e não a sua massa. Assim para evitar confusão é melhor falarmos em medição de massa (ao invés de peso) e de utilizar pesos, balanças ou sistema de medição para determiná-la.

2- INFLUÊNCIA DA ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE NA INDICAÇÃO DE BALANÇAS

Balanças de braços iguais, balanças de dois pratos ou de equilíbrio automático ou semi-automático que, utilizam o princípio de alavancas, para a determinação de massa empregam o método da comparação entre a massa de um objeto a ser calibrado e um padrão de massa conhecida, não são afetadas pela aceleração da gravidade ou sua variação.

Porém, balanças de mola, células de carga, balanças eletrônicas que utilizam o princípio da compensação de forças eletromagnéticas ou mudanças na indutância, capacitância ou frequência, o resultado da medição é diretamente proporcional à força gravitacional atuante no corpo a ser pesado. Nestes instrumentos a influência da aceleração da gravidade local não pode ser ignorada, e devem ser ajustados e calibrados no local de instalação, principalmente para os instrumentos que possuem 10.000 ou mais intervalos de divisão. Nos instrumentos, que utilizam células de carga, empregados no comércio a varejo possuindo 1000 ou menos intervalos de divisão, geralmente, são desprezados os efeitos da aceleração da gravidade, desde que a diferença em latitude da distância entre o local de ajuste e aquele de uso não exceda 1.000 km.

Considerando uma balança que tenha sido ajustada e calibrada para dar uma indicação correta P em um local onde $g = g_{\phi 1}$, quando um objeto de massa M é colocado sobre o seu prato.

Assim,

$$P = M \cdot g_{\phi 1} \tag{1}$$

Se, entretanto, a mesma balança é transportada e utilizada em um local onde $g = g_{\varphi 2}$, a ação da gravidade g sobre a balança muda, e também a indicação da balança, apesar da carga ser a mesma. Para a indicação da balança ser a mesma é necessário que a massa seja $M - \Delta m$, então

$$P = (M - \Delta m) \cdot g_{\varphi 2} \quad (2)$$

Eliminando P nas equações (1) e (2) tem-se:

$$\Delta m = M \cdot (g_{\varphi 2} - g_{\varphi 1}) / g_{\varphi 2} \quad (3)$$

Δm é o erro na indicação devido à mudança no valor de g , o qual pode ser positivo ou negativo dependendo do sinal de $(g_{\varphi 2} - g_{\varphi 1})$. O erro relativo (isto é, o erro dividido pela carga) é:

$$E_g = \Delta m / M = (g_{\varphi 2} - g_{\varphi 1}) / g_{\varphi 2} \quad (4)$$

Como exemplo, utilizando uma balança classe III com as seguintes características:

Capacidade máxima $\Rightarrow 100$ kg

Intervalo de verificação $\Rightarrow e = d = 10$ g

Número de divisões $\Rightarrow n = 10.000$

Se a balança foi calibrada no Rio de Janeiro cuja aceleração da gravidade $g_{\varphi 1}$ é $9,787917$ m/s² e utilizada em Porto Alegre onde $g_{\varphi 2} = 9,793050$ m/s² o erro na indicação causado pela aceleração da gravidade será:

$$\Delta m = m \cdot (9,793050 - 9,787917) / 9,787917 = + m \cdot 0,000524$$

Consequentemente, Δm é $0,000524$ kg para cada quilograma de carga.

Assim, para várias cargas de teste, teremos:

$$M = 10 \text{ kg}; \Delta m = 0,000524 \cdot 10 \text{ kg} = 5,24 \text{ g}$$

$$M = 50 \text{ kg}; \Delta m = 0,000524 \cdot 50 \text{ kg} = 26,22 \text{ g}$$

$$M = 100 \text{ kg}; \Delta m = 0,000524 \cdot 100 \text{ kg} = 52,44 \text{ g}$$

O que significa que, na carga máxima da balança, o erro devido a aceleração da gravidade é o dobro do erro máximo permitido (emp) em verificação periódica.

3- MUDANÇA NO VALOR DE g DEVIDO A LATITUDE

O valor de g_{φ} (em m/s²) em um local de latitude φ° , de acordo com a fórmula de Cassinis, válida para um elipsoide de revolução é dado pela equação (5), abaixo:

$$g_{\varphi} = g_e \cdot \{1 + 0,005322 \cdot \text{sen}^2(\varphi) - 0,000059 \cdot \text{sen}^2(2 \cdot \varphi)\} \quad (5)$$

onde $g_e = 9,780318$, o valor de g na linha do equador; e

φ = latitude.

Utilizando a equação acima, são calculados os valores de g_φ para latitudes de 0 a 35° em intervalos de 1°. O incremento $(g_\varphi - g_{\varphi-1}) / g_\varphi$ para cada altitude e seus valores acumulados são apresentados na tabela 2. Estes valores são úteis para países como Brasil, África do Sul, demais países do sul da África e Austrália que estão situados entre as latitudes 0 – 35° S e países como a Índia, Indonésia e parte da China que estão situados entre as latitudes 0 – 35° N.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE executa levantamentos gravimétricos em conjunto com universidades e institutos de pesquisa para determinação dos valores da aceleração da gravidade em todo o território nacional. Estes valores, para algumas localidades são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Aceleração da gravidade em algumas localidades do Brasil.

Localidade	Latitude °	Altitude (m)	g (kg/m ²)
Belém	-1°27'21"	11	9,780194
Fortaleza	-3°43'02"	21	9,780680
Brasília	-15°46'47"	1172	9,780884
Belo Horizonte	-19°55'15"	850	9,783686
Rio de Janeiro	-22°54'10"	2	9,787917
São Paulo	-23°32'05"	760	9,786366
Curitiba	-25°25'40"	935	9,787635
Porto Alegre	-30°01'59"	4	9,793050

Tabela 2 – Valores de g para latitude de 0° a 35°, em relação ao nível do mar

Latitude ° Lat	Gravidade m/s²	Incremento por ° Lat	Incremento Acumulado
0	9,780318		
1	9,780333	1,607E-06	1,607E-06
2	9,780381	4,821E-06	6,429E-06
3	9,780459	8,029E-06	1,445E-05
4	9,780569	1,122E-05	2,568E-05
5	9,780710	1,441E-05	4,009E-05
6	9,780882	1,757E-05	5,767E-05
7	9,781085	2,072E-05	7,840E-05
8	9,781318	2,384E-05	1,022E-04
9	9,781581	2,693E-05	1,291E-04
10	9,781875	2,999E-05	1,591E-04
11	9,782198	3,301E-05	1,922E-04
12	9,782550	3,600E-05	2,282E-04
13	9,782931	3,894E-05	2,671E-04
14	9,783340	4,183E-05	3,089E-04
15	9,783777	4,467E-05	3,536E-04
16	9,784242	4,746E-05	4,011E-04
17	9,784733	5,019E-05	4,513E-04
18	9,785250	5,285E-05	5,041E-04
19	9,785793	5,546E-05	5,596E-04
20	9,786360	5,800E-05	6,176E-04
21	9,786952	6,046E-05	6,780E-04
22	9,787567	6,286E-05	7,409E-04
23	9,788205	6,517E-05	8,061E-04
24	9,788865	6,741E-05	8,735E-04
25	9,789546	6,957E-05	9,431E-04
26	9,790248	7,164E-05	1,014E-03
27	9,790969	7,362E-05	1,088E-03
28	9,791708	7,552E-05	1,163E-03
29	9,792465	7,732E-05	1,241E-03
30	9,793239	7,903E-05	1,320E-03
31	9,794029	8,064E-05	1,400E-03
32	9,794834	8,216E-05	1,483E-03
33	9,795653	8,358E-05	1,566E-03
34	9,796484	8,489E-05	1,651E-03
35	9,797328	8,610E-05	1,737E-03

3.2 MUDANÇA NO VALOR DE g DEVIDO A ALTITUDE

Em um local P situado a h metros acima do nível médio do mar, g_h é expresso como:

$$g_h = G \cdot M_t / (R + h)^2 = (G \cdot M_t / R^2) \cdot [1 - 2h/R] = g_e \cdot [1 - 2h/R] \quad (6)$$

A partir da equação (6) é demonstrado por [Júnior et al., 1978] que a aceleração da gravidade em um local situado a uma altura h acima do nível médio do mar é dado por:

$$g_h = g_e \cdot [1 - 2h/R + 3h/4R] = g_e \cdot [1 - 5h/4R] \quad (7)$$

Considerando o raio médio da Terra R como sendo igual a 6.378.136 m [Resnick e Halliday, 1976], a variação no valor de g devido a altitude é:

$$-g_e \cdot 5h/4R \approx -2 \cdot 10^{-7} \cdot h \quad (8)$$

Então a variação de g devido a altitude é, aproximadamente:

$$-2 \cdot 10^{-7} \cdot h \quad (\text{em metros})$$

4- ERRO MÁXIMO PERMITIDO EM BALANÇAS NÃO AUTOMÁTICAS

De acordo com a Resolução OIML R 76 [OIML, 2006] e a Portaria INMETRO nº 236/94 todos os instrumentos de pesagem não automáticos utilizados em atividades econômicas são classificados em quatro classes de exatidão baseadas no valor de divisão de verificação e e no número de valores de divisão de verificação n ($n_i = \text{carga máxima}_i / e_i$). O emp em verificação inicial depende da carga aplicada segundo a tabela 3.

Tabela 3– emp em função da carga m aplicada na balança, expressas em valores de divisão de verificação e .

Emp	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IIII
$\pm 0,5 e$	$0 \leq n \leq 50.000$	$0 \leq n \leq 5.000$	$0 \leq n \leq 500$	$0 \leq n \leq 50$
$\pm 1,0 e$	$50.000 < n \leq 200.000$	$5.000 < n \leq 20.000$	$500 < n \leq 2.000$	$50 < n \leq 200$
$\pm 1,5 e$	$200.000 < n$	$20.000 < n \leq 100.000$	$2.000 < n \leq 10.000$	$200 < n \leq 1.000$

O emp percentual, isto é, o emp dividido pela carga máxima em cada valor mudança de faixa, é dado a seguir na tabela 4

Tabela 4– emp para cada faixa de balança.

Faixas	1º faixa	2º faixa	3º faixa
Classe IIII	1 em 10^2	2 em 10^3	1,5 em 10^3
Classe III	1 em 10^3	2 em 10^4	1,5 em 10^4
Classe II	1 em 10^4	2 em 10^5	1,5 em 10^5
Classe I	1 em 10^5	2 em 10^6	1,5 em 10^6

O emp percentual na carga máxima é calculado supondo que cada balança tem um valor máximo de intervalo de verificação permitido de acordo com a classe do instrumento de pesagem.

A Organização Internacional de Metrologia Legal - OIML recomenda que o erro tolerável em pesos padrão para verificação metrológica [6] não deve ser maior que 1/3 do emp para a balança. Seguindo este princípio, E_g , o erro devido a mudança no valor da aceleração da gravidade, para ser considerado como significativo deveria ser 1/3 do emp para a balança em questão. Da tabela 4, o emp percentual é mínimo na carga máxima. Assim, se o erro relativo E_g devido a mudança no valor de g é aceitável na carga máxima, então E_g será aceitável para todas as outras cargas. Além disso E_g , baseado em (4) é igual ao incremento de g por grau de latitude; o incremento no valor de g que pode causar um erro significativo em balanças de diferentes Classes é mostrado na tabela 5:

Tabela 5– Erro causado por incremento de grau de latitude.

5 em 10^7	Para balanças Classe I
5 em 10^6	Para balanças Classe II
5 em 10^5	Para balanças Classe III
5 em 10^4	Para balanças Classe IIII

Então, em termos absoluto, isto significa um erro igual a metade do valor de divisão de verificação na carga máxima.

5- ERROS DEVIDO À LATITUDE

Para efeito de discussão da variação admissível no valor de g é suposto que cada instrumento de medição tem o número máximo de divisão de verificação permitido para a classe que ele pertence.

Nota-se da tabela 2 que quando uma balança das classes I ou II é transportada de um local para outro diferindo 1° na latitude, o erro na carga máxima varia de 24-85 valores de divisão de verificação e para instrumentos da classe I e 2-8 para instrumentos da classe II. Portanto isto evidencia que a calibração ou verificação de instrumentos da classe I e II deve ser realizado no local de uso da balança. O Brasil está situado entre as latitudes 5° N e 35° S.

6- ERRO DEVIDO À ALTITUDE

A mudança na altitude h (em metros) que causará um erro significativo em várias classes da balança – como calculado da equação (13) – é mostrado na tabela 6:

Tabela 6 – Altitude mínima que causa erro significativo

Classe de Balança	Altitude h (m)
Classe IIII	2.500
Classe III	250
Classe II	25
Classe I	2,5

Os valores acima mostram que um instrumento Classe III não é normalmente afetado por apenas uma mudança de altitude. Porém, uma balança Classe III considerada como correta em Paranaguá (latitude 25° S - altitude 6 m) quando transportada para Curitiba (mesma latitude – altitude 935 m), na carga máxima, indicará um erro igual ao valor de duas divisões de verificação, maior do que o erro máximo permitido (emp).

Uma balança classe II não pode ser movida do térreo para o topo de um prédio de oito andares sem causar um erro extra de meio valor de divisão na carga máxima.

Analogamente, um erro significativo ocorrerá em uma balança classe I se a mesma for movida de um andar para o próximo do mesmo prédio.

Transportando uma balança de um local para outro, poderá haver uma mudança na indicação por duas razões:

1ª) uma diminuição no valor da aceleração da gravidade causará a indicação do decréscimo na indicação da balança, e

2ª) uma diminuição na densidade do ar provocará um aumento da indicação.

Porém, os erros devido a esses fatores não são iguais, então eles não compensarão um ao outro. Kochsiek e Wunsche [1998] relataram que o efeito do ar ambiente é quase uma ordem de grandeza menor do que a mudança no valor de g .

Balanças eletrônicas de todas as classes são afetadas pelo transporte para diversos lugares por causa da latitude e altitude. Erros iguais ou superiores a um terço ($1/3$) do erro máximo permitido, na carga máxima da balança, podem ocorrer nos seguintes deslocamentos da direção norte-sul:

Balanças da classe I: 0,01° na latitude, equivalente a um deslocamento de 110 metros.

Balanças da classe II: 0,1° equivalente a um deslocamento de 10 km em locais próximos de 11° de latitude.

Balanças da classe III: 1° equivalente a 100 km em locais entre as latitudes 17 – 34°.

Balanças da classe III são menos afetadas por mudanças na latitude. Por exemplo, uma balança fabricada em São Paulo (23° de latitude) pode ser transportada para locais situados entre Brasília (15° de latitude) e Porto Alegre (30° de latitude) sem ocorrer qualquer erro significativo na indicação em razão da alteração no valor da aceleração da gravidade.

Para balanças da classe III, embora a altura de prédios possa ser ignorada, mudanças na altitude devido à topografia devem ser levadas em conta. Balanças da classe II podem apresentar erros por causa de mudanças na altura maiores que 25 m, e balanças da classe I são mais suscetíveis a mudanças na altura, uma variação de 2,5 m pode causar um erro significativo nestas balanças.

7- CONCLUSÃO

Assim, é evidente que a recomendação de que balanças devem ser calibradas ou verificadas no local de utilização deve ser obedecida em todos os casos.

A legislação metrológica brasileira isenta de verificação as balanças novas no primeiro ano de instalação. Considerando esses fatores sugerimos que a verificação inicial ou um ajuste, de acordo com especificações do fabricante, seja executado no local de instalação da balança, sem a necessidade de obliteração do selo de verificação fixado pela autoridade metrológica competente.

8- REFERÊNCIAS

Resnick, R.; Halliday, D., 1976, Física, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., vol.1-2, pp. 447 – 456, Rio de Janeiro, RJ.

Júnior, Francisco Ramalho et al., 1978, Os Fundamentos da Física, Ed. Moderna, vol. 1 pp. 387, São Paulo SP.

Guide to the Measurement of Mass and Weight, 1997, Institute of Measurement and Control, pp. 10, London, UK.

OIML R 76, 2006, Nonautomatic Weighing Instruments.

Kochsiek, M., Wunsche, W., 1998, The Testing of Weighing Machines Dependent on the Acceleration Due Gravity, OIML Bulletin, vol. 80, pp. 10-17.

OIML R111-1, 2004, Weights of Classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2 e M2-3 e M3.

Gupta, S., Krishnamoorthy, P., 1998, Dependence of Electronic Weighing instruments on the Value of Acceleration Due to Gravity, OIML Bulletin, vol. 39, pp. 13-20.