

Recomendações para Garantia da Qualidade dos Resultados de Pesagens de Balanças

Maciel, M. A. D¹

¹Instituto de Pesos e Medidas do Estado do Paraná

Introdução

O futuro apresenta-se hoje com uma diversidade de desafios e oportunidades associados ao desenvolvimento científico e tecnológico com elevado impacto na sociedade. Há uma expectativa de novos materiais, produtos e serviços cuja segurança e qualidade devem ser asseguradas, o que implica um papel decisivo para o setor que envolve medições, inspeção e certificação. Calibração e manutenção regulares, juntamente com verificações periódicas em serviço, são requisitos-chave para alcançar resultados de pesagem confiáveis. De fato “quando se efetua uma medição, com instrumentos calibrados por laboratórios de calibração devidamente acreditados e detentores de padrões próprios, rastreados a padrões de referência, nacionais ou internacionais, do Sistema Internacional de Unidades, e à qual se atribui uma incerteza de medição, utilizando procedimentos normalizados e lastreados em um sistema da qualidade implantado, podemos confiar nos resultados das medições e estaremos em condições para prestar um serviço à sociedade civil em seus aspectos tecnológicos e legais. Entretanto, se nos limitarmos a efetuar medições sem nos preocuparmos com os aspectos acima citados, não podemos confiar nos resultados obtidos, e podemos estar pondo em sério risco os usuários desses resultados”.

Este artigo descreve algumas recomendações para calibração de balanças eletrônicas, mas podem ser aplicadas a quase todos dispositivos de pesagem. Inclui as etapas de pré-calibração, a calibração propriamente dita, a avaliação de incertezas de medição e a emissão de relatório de resultados. [1]

1. Visão geral da calibração de uma balança

As balanças são calibradas para estabelecer a exatidão com os quais podem ser usados para medir massa e para confirmar que elas atendem às especificações do fabricante. Os principais parâmetros determinados em uma calibração de balança são:

- a) Repetibilidade de leitura;
- b) Excentricidade;
- c) Linearidade da escala;
- d) Incerteza da medição.

Uma balança deve ser calibrada quando colocada em serviço pela primeira vez, após manutenção e em intervalos regulares, não maiores que três anos de diferença. Verificações regulares em serviço, como sugeridas no Guia 12 do Laboratório de Medições de Padrões da Nova Zelândia, 2018 [4], podem ser usadas para determinar o intervalo de recalibração ou para identificar qualquer degradação no desempenho da balança que justifique uma ação de manutenção ou recalibração. A calibração deve ser realizada no local de uso porque um deslocamento, mesmo em pequenas distâncias, pode alterar suas características metrológicas e, além disso, balanças eletrônicas respondem à força e, portanto, o valor indicado na balança depende do valor da aceleração da gravidade local. 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 [2].

Localidade	Latitude (°)	Altitude (m)	g (m/s ²)
Belém	1°27'21" S	11	9,780 194
Fortaleza	3°43'02" S	21	9,780 680
Brasília	15°46'47" S	1172	9,780 884
Belo Horizonte	19°55'15" S	850	9,783 686
Rio de Janeiro	22°54'10" S	2	9,787 917
São Paulo	23°32'05" S	760	9,786 366
Curitiba	25°25'40" S	935	9,787 635
Porto Alegre	30°01'59" S	4	9,793 050

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

Conforme mostrado na Tabela 1, a gravidade local no Brasil varia em 0,13% de 9,7930 m/s² em Porto Alegre até 9,7801 m/s² em Belém. Por exemplo, caso uma balança seja calibrada no Rio de Janeiro e for utilizada em Porto Alegre para pesar uma carga de 100 g, o erro na indicação causado pela aceleração da gravidade será de, aproximadamente, 52 mg, 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 [2].

Na Figura 1 é apresentada a variação dos valores da aceleração da gravidade de acordo com o modelo geoidal brasileiro no Datum SIRGAS2000 (IBGE, 2013) [3].

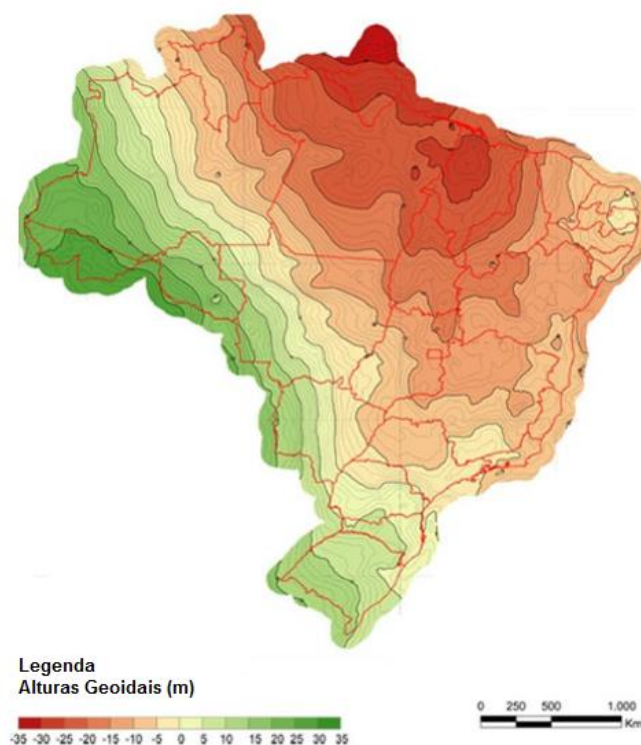


Figura 1 - Variação dos valores da aceleração da gravidade de acordo com o modelo geoidal brasileiro.

Normalmente, as calibrações de balança são realizadas por um laboratório de calibração acreditado pela Norma *ISO/IEC17025 - Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração*. Acreditação é o reconhecimento formal da competência dos Organismos de Avaliação da Conformidade (Laboratórios) para atenderem requisitos previamente definidos e realizar suas atividades com confiança. É uma ferramenta estabelecida em escala internacional para gerar confiança na atuação dos laboratórios de calibração acreditados. A Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro

(Cgcre) é o único organismo de acreditação reconhecido pelo Governo Brasileiro para acreditar Organismos de Avaliação da Conformidade [5].

2. Equipamentos e Pesos Padrão para a Calibração

As balanças são calibradas usando pesos-padrão com uma densidade de cerca de 8000 kg/m^3 . Pesos adequados são descritos em OIML R111-1 [7], que dá as características que devem ser atendidos para pesos em cada uma das nove classes (E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} e M_3). Os pesos-padrão devem ser calibrados periodicamente por um laboratório acreditado e com rastreabilidade de medição direta ou indiretamente ao SI. Além da aceleração da gravidade é desejável considerar os efeitos de empuxo do ar por meio do monitoramento das condições ambientais (temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar), outrossim, a sensibilidade de uma balança também depende da temperatura, assim, um termômetro calibrado com uma precisão de cerca de $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ deve ser usado para medir a temperatura ambiente durante a calibração.

3. Calibração de balanças - passo a passo

A sequência de etapas a seguir deve ser executada para a calibração:

3.1 Registrar as informações sobre a utilização da balança.

- a) Consultar o cliente ou o responsável pela balança a ser calibrada para ver se ele tem alguns requisitos adicionais. Normalmente uma calibração em quatro pontos em toda a faixa de pesagem (excluindo zero) é suficiente. Para balanças de dupla faixa, execute medições em pontos adicionais para a segunda faixa. Entretanto, o cliente pode desejar ter medições em outros pontos na balança.
- b) Perguntar ao cliente se ele normalmente tara a balança antes de uma pesagem (recomendado) ou não. Siga a prática do cliente para a calibração da balança.
- c) Questionar o cliente sobre o ajuste do fator de escala da balança antes do uso. A maioria das balanças tem um recurso de ajuste do fator da escala, chamado *Cal-Mode* ou função *Cal* (ou equivalente). Quando este recurso é ativado, a balança usa um peso embutido (ou pesos) para ajustar o fator de

escala da balança para ler corretamente ao pesar objetos de densidade 8.000 kg/m^3 em ar de densidade $1,2 \text{ kg/m}^3$. Algumas balanças requerem um peso externo para o ajuste do fator de escala. O ajuste do fator de escala compensa deriva da balança causada pela gravidade local e pelas variações da temperatura ambiente. Para balanças eletrônicas, o coeficiente de sensibilidade da escala para temperatura está tipicamente na faixa de $1 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ a $5 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ (ppm é partes por milhão) e seu valor é geralmente fornecido pelo fabricante. Por exemplo, se a sensibilidade à temperatura for $4 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ e a temperatura do ambiente durante a calibração variar em 5°C , portanto a leitura na balança mudará em 20 ppm ou 2 mg a 100 g que é cerca de 20 vezes a resolução de uma balança eletrônica típica de 200 g.

3.2 Preparação para a calibração da balança

- a) Antes de calibrar uma balança: verifique se a balança está em condições de ser calibrada. Inspecione sua condição e localização.
- b) Anotar qualquer situação que possa afetar seu desempenho (como correntes de ar, falta de limpeza ou uma bancada desnivelada, vibrações).
- c) Certifique-se de que a balança foi ligada por um período de tempo apropriado (pelo menos uma hora antes da calibração). Avise o cliente com antecedência.
- d) Coloque os pesos-padrão a serem usados para a calibração na câmara da balança ou perto da balança e deixe-os por tempo suficiente para atingir o equilíbrio térmico. Isso pode significar levar os pesos para as instalações do cliente no dia anterior à calibração. Consulte a Tabela B.2 da OIML R111-1 [7] para orientação sobre estabilização térmica de pesos padrão.
- e) Coloque o termômetro e o barômetro próximo à balança para medição da temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade relativa do ar, conforme mostrado da Figura 2.
- f) Registre os dados da balança na planilha ou software de calibração incluindo localização, modelo e número de série número, faixa de escala (ou faixas), resolução (para cada faixa de uma balança de faixa dupla) e

coeficiente de sensibilidade à temperatura (disponível no manual da balança).

- g) Utilizar um número de identificação único para a calibração, como um certificado ou número de trabalho, e registre-o nas planilhas ou software de calibração.



Figura 2 - Configuração para calibração de balança.

3.3 Medições nas condições de utilização da balança

- a) Se o cliente ajusta regularmente o fator de escala, então o mesmo deve ser ajustado neste momento. Não realizar nenhum outro ajuste neste estágio.
- b) Realizar uma medição de repetibilidade próximo da capacidade máxima da balança, registrando as leituras da balança por 10 carregamentos sucessivos da balança com o mesmo peso (ou grupo de pesos), retirando a carga entre cada leitura. A repetibilidade é uma medida de desempenho aleatório de curto prazo e deve ser determinada usando o mesmo procedimento utilizado para as pesagens normais. Ou seja, se o cliente normalmente tara a balança antes de cada pesagem, utilizar o mesmo método antes de cada carregamento na medição de repetibilidade. Além disso, registre cada leitura assim que a balança indicar que a leitura é estável.
- c) A repetibilidade é calculada como sendo o desvio padrão σ_R das 10 leituras da balança, conforme mostrado na equação (1):

$$\sigma_R = u_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2 / (n-1)} \quad (1)$$

Onde r_i é a i -ésima leitura da balança, $\bar{r}$ é a média das n leituras da balança e $n = 10$.

- d) O erro na leitura da balança para este carregamento é calculado como a média das leituras da balança $\bar{r}$ menos a massa conhecida do peso-padrão (ou conjunto de pesos-padrão) de seu certificado de calibração.

3.4 Ajuste ou manutenção, se necessário

Verificar se a balança está nivelada. Se o cliente ajusta regularmente o fator de escala, então ajuste-o novamente. Registre essas ações na planilha de medição.

Se alguma das medidas encontradas não atender as especificações da balança, então informe o cliente e verifique se é necessário ajuste ou manutenção da balança. O cliente pode precisar avaliar as consequências de qualquer pesagem incorreta.

- Efetuar e registrar quaisquer medições adicionais conforme solicitadas pelo cliente.
- Se necessário, com a permissão do cliente, providenciar para que a balança seja reparada e ajustada (manutenção e ajuste não fazem parte da acreditação).

Nesta etapa, toda a preparação para a calibração da balança foi concluída, quaisquer deficiências identificadas nas medições foram corrigidas e espera-se que a balança esteja de acordo com as especificações. Agora a balança encontra-se em condições de ser calibrada.

4. Medições para determinação do erro de excentricidade

O erro de excentricidade (ou erro de carga de canto) é determinado ao colocar um peso de aproximadamente um terço da capacidade da balança nas posições centro – traseira – esquerda – frente – direita – centro em sequência.

Essa sequência, que permite monitorar qualquer desvio em relação ao centro da balança, é mostrada na Figura 3 para balanças de prato circular e quadrado.

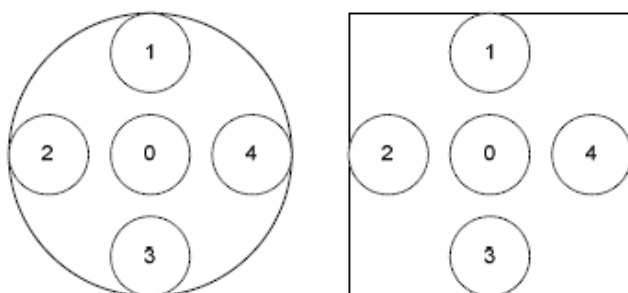


Figura 3 - Posições de pesagem e sequência de medição do erro de excentricidade para prato circular e quadrado.

Não tarar a balança antes ou durante as medições para determinação do erro de excentricidade. Use um único peso sempre que possível e posicione-o fora do centro e próximo à borda do prato da balança como mostrado na Figura 2. Para realizar a medição de erro de excentricidade deve-se executar a sequência de medições nas seis posições do prato mostradas na Figura 3 e registrar os resultados na planilha ou registro de medição conforme mostrado na Tabela 2.

Posição	Leitura (g)	Leitura – Média no centro (g)
0 (Centro)	49,999 9	-
1	49,999 9	-0,000 1
2	50,000 0	0,000 2
3	50,000 1	0,0001
4	50,000 0	0,000 0
0 (Centro)	50,000 1	-
Média das leituras no centro		50,0000
Maior erro de excentricidade		0,000 2
Valor nominal		50

Tabela 2 - Planilha para medição de erro de excentricidade.

Subtrair a média das duas leituras do centro de cada leitura fora do centro. Registrar a maior dessas diferenças, desconsiderando o sinal de menos, como

o erro de excentricidade da balança. Este erro não deve ser maior do que três vezes a resolução da balança.

5. Medições para determinação da histerese da balança

O objetivo desta medição é verificar se a leitura da balança, para um peso específico, depende de como é feito o carregamento da balança se com aumento ou diminuição da carga para atingir este valor; qualquer diferença é a histerese.

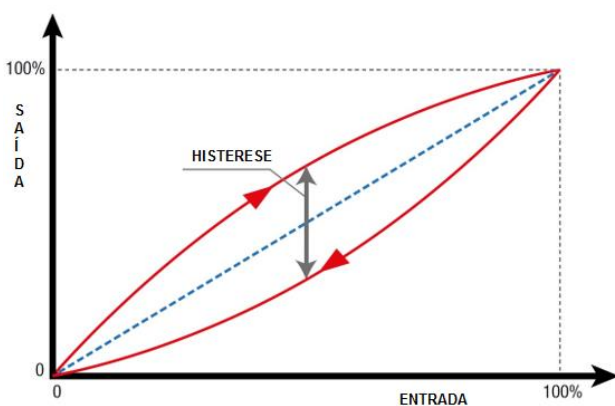


Figura 4 – Histerese

Na prática, balanças eletrônicas não exibem histerese a menos que haja um problema como sujeira na célula de pesagem. Para realizar as medições para determinação do erro de histerese deve-se seguir os passos seguintes:

Sem pesos no prato, tarar ou zerar a balança e registre a leitura como **P_{t1}**.

- Coloque um peso (ou pesos) no prato da balança para obter um valor próximo da metade da carga máxima e registre o valor **P_{h1}**.
- Sem retirar esses pesos do prato, adicione pesos adicionais até um valor próximo da carga máxima sem empilha-los e remova-os imediatamente conforme mostrado na Figura 5.
- Registre a leitura da segunda metade da escala **P_{h2}**.
- Retire todos os pesos do prato e registre a leitura como **P_{t2}**.
- Calcular a histerese de acordo com a equação (2):

$$\text{Histerese} = (P_{h2} - P_{h1}) - (P_{t2} - P_{t1}) / 3 \quad (2)$$

Se o valor encontrado for maior ou igual a resolução, a balança pode precisar de manutenção.

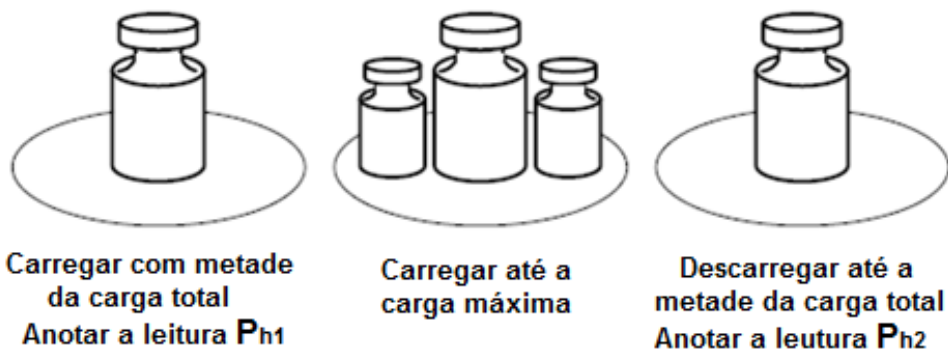


Figura 5 – Ilustração de uma medição de histerese.

6. Medições para determinação da linearidade da balança

Em uma calibração, o uso de vários pontos na faixa de medição da balança ajuda a revelar quaisquer problemas com linearidade. Erros de linearidade significam que a balança não mede com a mesma precisão em toda a faixa. Mesmo que a indicação no zero e na carga máxima estejam corretos, pode haver erros no meio do intervalo, que são chamados de erros de linearidade.

A Figura 6 é uma ilustração geral do erro de linearidade.

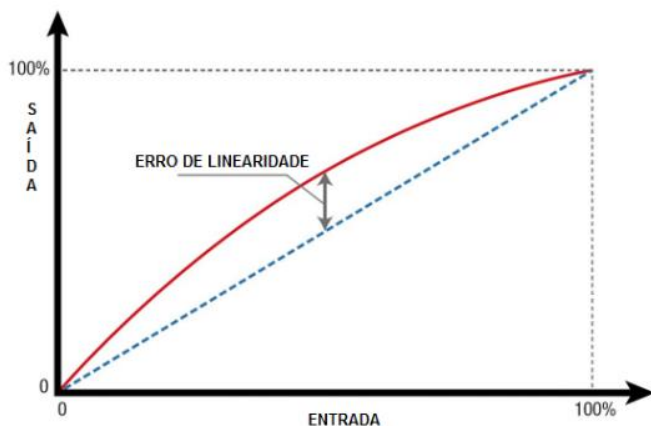


Figura 6 – Erro de linearidade de um instrumento.

Na medição da linearidade, que é a parte chave da calibração de balanças, pesos padrão com valores de massa conhecidos são utilizados para determinar o erro na leitura da balança em várias cargas diferentes. Normalmente um mínimo de cinco medições são realizadas com cargas distribuídas igualmente entre zero e a carga máxima da balança. Por exemplo, para uma balança de capacidade de 205 g, as cargas seriam 0 g, 50 g, 100 g, 150 g e 200 g.

No entanto, o cliente pode solicitar medições em cargas específicas e outras podem ser acrescentadas para melhor caracterizar as regiões onde os erros de linearidade sejam maiores.

Realize medições de linearidade da seguinte forma:

- a) Se o cliente ajusta regularmente o fator de escala, então deve ajustá-lo novamente antes da medição da linearidade.
- b) Registre a temperatura ambiente. A temperatura é medida neste momento porque a linearidade é a única medição de uma calibração de balança que é afetada pela temperatura.
- c) Registre a leitura da balança para cada carga. Centralize cada carga no prato para que o erro de excentricidade não seja significativo.
- d) Registre novamente a temperatura ambiente.
- e) Para cada carga, calcule a diferença entre a leitura da balança e o valor da massa padrão. Essa diferença é o erro de linearidade, conforme mostrado na tabela 4.

Valor Nominal	Peso Padrão (g) (1)	Leitura da balança (g) (2)	Erro de Linearidade = (2) – (1)
50	50,000 127	50,000 1	-0,000 03
100	100,000 142	100,000 1	-0,000 04
150	150,000 269	150,000 1	-0,000 27
200	200,000 179	199,999 9	-0,000 28

Tabela 4 - Tabela para medidas de linearidade.

7. Medições para determinação da repetibilidade da balança

A repetibilidade da balança é determinada utilizando o método descrito no item 3.3 c), conforme registrado na tabela 5 nos pontos selecionados para a calibração da balança.

Neste ponto, todas as medições necessárias para a calibração da balança foram registradas e os valores para excentricidade, histerese, repetibilidade, e linearidade foram calculados. O próximo passo é avaliar a incertezas de medição e melhor precisão da balança.

8. Estimativa das incertezas de medição

As influências consideradas na avaliação da incerteza de medição são resolução da balança, repetibilidade, calibração dos pesos padrão, instabilidade nos pesos padrão, erro de excentricidade e temperatura.

8.1 Incerteza devido a resolução da balança

A resolução de uma balança é o menor incremento na leitura da escala. Normalmente é 1 no último dígito exibido no visor da balança. Uma fonte de incerteza de um instrumento digital é a resolução de seu dispositivo indicador. Por exemplo, mesmo se as observações repetidas forem todas idênticas, a incerteza de medição atribuível à repetibilidade não seria zero, pois há uma faixa de sinais de entrada no instrumento, varrendo um intervalo conhecido, que forneceria a mesma indicação. Se a resolução do dispositivo indicador é d , o valor do estímulo que produz uma dada indicação pode estar situado com igual probabilidade em qualquer lugar no intervalo $X - d/2$ a $X + d/2$. O estímulo é, então, descrito, de acordo com a norma NIT-DICLA-021, rev. 10 [6], por uma distribuição de probabilidade retangular de largura d , com variância $u^2 = d^2/12$, implicando em uma incerteza-padrão de $u = 0,29d$ para qualquer indicação.

Na prática, μ_{RS} é geralmente arredondado para $\mu_{RS} = 0,5d$.

8.2 Incerteza devido a repetibilidade da balança

A incerteza padrão devido à repetibilidade é calculada de acordo com a equação 1. Para 10 medições, os graus de liberdade $n = 9$ e fator de abrangência $k = 2,26$ o qual para uma distribuição t com v_{eff} declarado, corresponde a uma probabilidade de abrangência de, aproximadamente 95% de acordo com a tabela G.2 [9]. Considera a repetibilidade do pior caso para a balança na forma de uma incerteza expandida como $2,26 \sigma_r$ ou a resolução da balança, o que for maior, conforme mostrado na Tabela 5.

Carga	50 g	100 g	150 g	200 g
1	50,000 0	100,000 2	150,000 0	200,000 2
2	50,000 2	100,000 2	150,000 1	200,000 3
3	50,000 2	100,000 2	150,000 1	200,000 1
4	50,000 2	100,000 2	150,000 1	200,000 2
5	50,000 0	100,000 0	150,000 1	200,000 0
6	50,000 1	100,000 1	150,000 2	200,000 1
7	50,000 1	100,000 1	150,000 2	200,000 2
8	50,000 1	100,000 3	150,000 2	200,000 0
9	50,000 2	100,000 2	150,000 1	200,000 0
10	50,000 2	100,000 1	150,000 0	200,000 1
Média (g) = Desvio Padrão μ_R (g) =	50,000 13 0,000 062	100,000 16 0,000 084	150,000 11 0,000 070	200,000 12 0,000 103
Repetibilidade do pior caso (g) = 0,000 233				

Tabela 5 - Análise das medições de repetibilidade.

8.3 Incerteza devido à calibração dos pesos padrão

Calcule μ_{Mcal} para cada peso-padrão (ou conjunto de pesos) usado nas medições de linearidade:

$$\mu_{Mcal} = U_{Mcal} / k \quad (3)$$

onde U_{Mcal} é a incerteza expandida do peso padrão (ou conjunto de pesos) obtida do certificado de calibração, normalmente com $k = 2,0$.

Se o carregamento for um conjunto de pesos, então a incerteza para os pesos no conjunto é simplesmente a soma das incertezas individuais de cada peso-padrão utilizado na medição do respectivo carregamento. Uma simples soma das incertezas é usado para a incerteza de calibração porque a massa os valores dos pesos provavelmente serão correlacionados (ou seja, não independente). Por exemplo, se a incerteza expandida dos padrões (do certificado de calibração) é de 7 mg para 50 g peso e 10 mg para o peso de 100 g, ambos com fator de abrangência de 2,0, então a incerteza padrão U_{Mcal} para a medição de linearidade em 150 g é:

$$\mu_{Mcal} (150 \text{ g}) = (7 \mu\text{g} / 2,0) + (10 \mu\text{g} / 2,0) = 8,5 \mu\text{g}$$

8.4 Incerteza devido à instabilidade de massa dos pesos padrão

A instabilidade de massa ou deriva temporal dos pesos padrão é importante porque muitas vezes é a principal fonte de incerteza de medição em uma calibração de balança. Ao considerar a componente da incerteza devido à instabilidade de massa, vale a pena considerar as razões para instabilidade em massa e as formas de reduzi-la.

A instabilidade de massa é causada principalmente por contaminação e/ou desgaste, então a chave para a estabilidade da massa é o armazenamento adequado e manuseio cuidadoso dos pesos padrão. Manusear os pesos com luvas limpas (couro, algodão ou nitrilo/vinil). Pegue apenas pesos da Classe M1 ou menor com as mãos. Não deixe os pesos ficarem sujos. Remover qualquer poeira com uma escova limpa e de pelo fino. Se necessário, limpe-os suavemente com um pano macio e seco ou camurça. Se os pesos ficarem inaceitavelmente sujos e você quer limpá-los, então faça com que eles sejam calibrados antes e depois da limpeza para estabelecer a perda de massa.

Armazene os pesos padrão das classes E e F, preferencialmente, em caixas ou estojos de madeira. Evite expor os pesos padrão a extremos de temperatura (a umidade irá condensar em pesos frios trazidos para um lugar mais quente e pode oxidar o tampão de chumbo da câmara de ajuste). Manter pesos longe de ímãs fortes. Desconfie de pesos de especificação desconhecidas e pesos caseiros - eles podem ser muito magnéticos [10].

Existem três opções para estimar a incerteza devido à instabilidade ou deriva temporal da massa:

Para pesos padrão com histórico de calibração conhecido utiliza-se a incerteza do certificado de calibração. Subtrai-se do erro do último certificado válido a média dos erros obtidos em todas as calibrações dos padrões divididos por raiz de 3, conforme a equação 4.

$$U_{\text{der}} = (e_p - e_{\text{média}}) / \sqrt{3} \quad (4)$$

Onde:

e_p – erro do peso padrão, em g;

$e_{média}$ – média dos erros obtidos de todos os certificados de calibração anteriores do peso padrão, em g.

A segunda opção é utilizada para padrões novos ou sem histórico de calibração conhecido conforme a equação 5:

$$U_{der} = u_p / \sqrt{3} \quad (5)$$

Onde:

u_p – incerteza do padrão fornecida pelo último certificado de calibração, em g.

A terceira opção é tratar a instabilidade da massa como um problema para gerenciar e não simplesmente como um valor de incerteza a ser calculado. Um processo para gerenciar a instabilidade de massa e a incerteza de medição seria estabelecer uma regra simples para o ΔM_{estab} que possa ser aplicada a todos os pesos padrão. Por exemplo, a regra poderia ser " ΔM_{estab} é o emp da classe imediatamente superior ao da classe do peso que está sendo utilizado. Por exemplo, o critério poderia ser " ΔM_{estab} é o emp classe E2 " se estiver sendo utilizado pesos de Classe F1.

Deve-se certificar de que cada um dos pesos padrão utilizados na calibração seja de qualidade suficiente para atender a esse requisito. A Resolução OIML R111-1 [7] descreve as diferentes classes de pesos e fornece uma tabela de erros máximos permitidos (emp) para uma faixa de valores de peso e classes. Esses emp podem ser utilizados como valores iniciais para ΔM_{estab} . Cada peso padrão deve ser calibrado com precisão e regularidade para garantir que a mudança na massa de cada peso entre as calibrações seja menor que ΔM_{estab} . Para isso, é necessário que a incerteza expandida em cada calibração de massa seja $\leq \Delta M_{estab} / 3$.

Verificações intermediárias entre calibração (ou verificações em serviço) nos pesos mais usados podem ser utilizadas para confirmar sua estabilidade, ou para identificar a necessidade de recalibração. Por exemplo, comparar um peso de 50 g com dois pesos de 20 g e um de 10 g (ou com um peso de 50 g peso de outro conjunto de peso).

A incerteza padrão devido à instabilidade de massa u_{Minst} é calculada utilizando a equação 6.

$$U_{\text{Minst}} = \Delta M_{\text{estab}} / 2 \quad (6)$$

com fator de abrangência $k = 2$.

Para um conjunto de pesos, a incerteza padrão devida à instabilidade de massa é a soma das incertezas padrão devido à instabilidade de massa para todos os pesos no grupo. Uma soma simples é usada porque as mudanças na massa ao longo do tempo podem estar correlacionadas. Por exemplo, todos os pesos podem ficar mais leves com o desgaste.

8.5 Incerteza devido ao efeito da temperatura

A incerteza devido à temperatura surge porque o coeficiente de sensibilidade da escala de uma balança depende da temperatura. A incerteza padrão u_s devido a este efeito é dado pela equação 7.:

$$u_s = \partial T \, s \, M \, \sqrt{12} = 0,29 \partial T \, s \, M \quad (7)$$

Onde:

∂T é a mudança na temperatura desde o último ajuste do fator de escala;

“s” é o coeficiente de sensibilidade da balança (dado no manual da balança);

M é o valor da massa para qual “ u_s ” é estimado.

A variação de sensibilidade é tratada como uma distribuição retangular [6].

Geralmente é possível tornar essa incerteza insignificante ajustando o fator de escala imediatamente antes das medições de linearidade (e mesmo durante estas medidas). Considere, por exemplo, uma medição de linearidade a 200 g em uma balança com desvio de sensibilidade “s” de 4 ppm/°C e uma mudança de temperatura ∂T de 0,2°C desde o último ajuste do fator de escala. Para esta medição, da equação 7:

$$u_s = 0,29 \partial T \, s \, M = 0,29 \times 0,2 \times (4/10^{-6}) \times 200 = 0,046 \text{ mg ou } 0,2 \text{ ppm da massa,}$$

que é desprezível para uma balança cuja resolução seja de 1 mg.

8.6 Incerteza devido ao erro de excentricidade

A incerteza devido ao erro de excentricidade geralmente pode tornar-se insignificante pela centralização cuidadosa dos pesos no prato. Antes de iniciar as pesagens em uma calibração de balança, particularmente as medições de

linearidade, estimar com que precisão os pesos precisam ser centralizados para manter o erro de excentricidade menor que cerca de metade da resolução. Como guia, o erro de excentricidade pode ser dimensionado pela carga e pela distância do centro do prato.

Por exemplo, suponha que o erro de excentricidade para uma balança de capacidade de 200 g é de 0,2 mg quando medido usando um peso de 50 g a uma distância de 25 mm do centro do prato.

Para que o erro de excentricidade seja menor que 0,05 mg (meia resolução) durante uma medição de linearidade a 100 g, o centro de massa do peso de 100 g deve ser menor que uma distância d do centro do prato, onde

$$d = 25\text{mm} \times \frac{50\text{g}}{0.2\text{mg}} \times \frac{0.05\text{mg}}{100\text{g}} = 3\text{mm}.$$

Em geral, isso é facilmente alcançável para pesos únicos e o erro de excentricidade será insignificante.

Mas para a medição de linearidade em 150 g, seguindo a equação acima, os pesos de 100 g e 50 g devem ser posicionados no prato como mostrado na Figura 8 para que seu centro de massa combinado esteja dentro de 2 mm do centro do prato. Se para uma situação particular que você sente que isso não é viável, considere em vez disso, medir a linearidade em 140 g e usando dois pesos de 20 g posicionados em cada lado de um 100 g peso (como na imagem central da Figura 5).

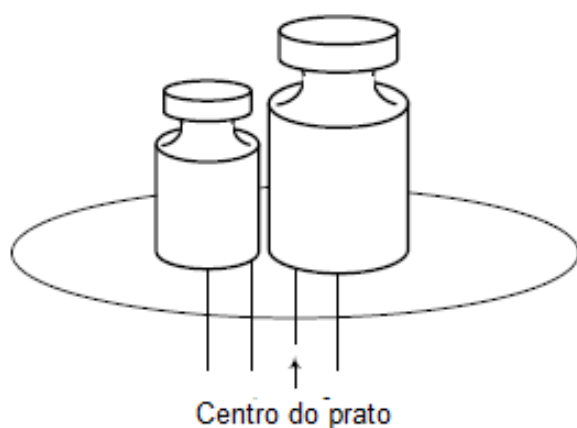


Figura 8 - Centralização de dois pesos desiguais. O peso de 50g é colocado duas vezes mais longe do centro do prato do que o peso de 100 g.

9. Incerteza combinada

A incerteza padrão em cada medição de linearidade é determinada pela combinação dos componentes incertezas padrão de resolução, repetibilidade, calibração dos pesos padrão, instabilidade de massa de os pesos padrão, temperatura e erro de excentricidade de acordo com a equação 8.

$$u_C = \sqrt{u_{RS}^2 + u_R^2 + u_{Mcal}^2 + u_{Minst}^2 + u_S^2 + u_P^2} \quad (8)$$

u_R é calculada a partir da medição de repetibilidade na carga máxima, a menos que a repetibilidade tenha sido medida na carga de linearidade de interesse, neste caso em que use aquela u_R .

Um exemplo deste cálculo é dado na Tabela 6 para uma carga de 200 g, onde u_{RS} é calculado como $\mu_{RS} = 0,5d$ com $d = 0,1$ mg, u_R é da tabela 5, u_{Mcal} é da equação 5 com $U_{Mcal} = 27\mu\text{g}$ e $k = 2,0$, u_{Minst} neste caso é do certificado de calibração de massa com $U_{Minst} = 200\mu\text{g}$ (1 parte em 10^6) e $k = 2,0$, u_S é calculado de acordo com a equação 7 e o erro de excentricidade é desprezível de acordo com o item 8.6.

Incerteza padrão	Valor (mg)	(Valor) ² / (mg) ²
μ_{RS}	0,05	0,002 50
μ_R	0,103	0,010 61
μ_{Mcal}	0,0135	0,000 18
μ_{Minst}	0,1	0,010 00
μ_S	0,046	0,002 12
μ_P	0,0	0,000 00
$\mu_c^2 = \text{soma de (valor)}^2 = 0,0254 \text{ 1 mg}^2$		
$U_c = 2,2 \cdot \mu_c = 0,351 \text{ mg}$		

Tabela 6 – Cálculo da incerteza combinada para a medição de linearidade em 200 g.

Rigorosamente, a incerteza de repetibilidade u_R inclui a incerteza de resolução u_{RS} , então um valor melhor para u_C é obtido a partir da equação 9.

$$u_C = \sqrt{\max(u_{RS}^2, u_R^2) + u_{Mcal}^2 + u_{Minst}^2 + u_S^2 + u_P^2} \quad (9)$$

onde $\max(u_{RS}^2, u_R^2)$ significa o máximo de μ_{RS}^2 ou μ_R^2 . Qualquer equação (8) ou (9) pode ser usada.

A incerteza expandida em cada medição de linearidade é $U_C = k \cdot u_C$. É suficiente usar $k = 2,2$ porque espera-se que k esteja na faixa de 2,0 a 2,26. As incertezas das componentes u_{RS} , u_{Mcal} , u_{Minst} , u_S e u_P tem um grande número de graus de liberdade (correspondentes para $k = 2,0$) enquanto u_R tem 9 graus de liberdade ($k = 2,26$). Alternativamente, um valor de k pode ser calculado através da fórmula de Welch-Satterthwaite [9].

A incerteza expandida U' relatada no certificado de calibração para cada carga será a maior desta incerteza calculada U_C e a menor incerteza de medição U_{CMC} para o laboratório que realiza a calibração de balança. Isto é

$$U' = \max.(U_C, U_{CMC}) \quad (10)$$

Laboratórios de calibração acreditados pela ISO/IEC17025 terá um escopo de acreditação especificando um CMC (Capacidade de Medição e Calibração) ou a menor incerteza de medição U_{CMC} que o laboratório é capaz de declarar em um certificado de calibração, com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Caso o Laboratório utilize mais de um método para realizar uma determinada calibração, a CMC se referirá ao método pelo qual o laboratório obtém a menor incerteza de medição. O Laboratório poderá declarar em seus certificados de calibração, incertezas de medição maiores que a sua CMC, devido às contribuições relativas às propriedades ou características do padrão ou instrumento de medição calibrado [6].

10. A CMC da calibração

A CMC é a menor incerteza de medição que pode ser alcançada para uma pesagem resultam de um único carregamento da balança.

A CMC é a incerteza expandida [5] supondo-se que a balança ainda esteja funcionando como estava quando foi calibrada. Para cada carga, é definido como

$$CMC = U' + L \quad (11)$$

onde L é o valor absoluto do erro de linearidade medido para essa carga, e U' é calculado de acordo com a equação (10).

Muitas vezes é útil saber a melhor precisão para um determinado intervalo de uma balança, por exemplo, para determinar se a balança atende aos requisitos de precisão para pesagens nessa faixa. A melhor precisão para qualquer intervalo é simplesmente a CMC calculada dentro da faixa de interesse. Por exemplo, a partir dos resultados na Tabela 7, a CMC para o intervalo de 1 g a 100 g é 0,29 mg.

Valor nominal (g)	50	100	150	200
U_c (mg)	0,220	0,247	0,311	0,351
Menor incerteza U_{CMC} (mg)	0,1	0,2	0,3	0,4
$U' = \text{maior que } U_{CMC}$ (mg)	0,220	0,247	0,311	0,400
Magnitude do erro de linearidade L (mg)	0,027	0,042	0,269	0,279
Melhor precisão $L + U'$ (mg)	0,25	0,29	0,58	0,68

Tabela 7 – Cálculo da CMC

10. Relato dos resultados em certificado de calibração

Os resultados devem ser fornecidos com exatidão, clareza, objetividade, sem ambiguidade em um relatório e devem incluir todas as informações acordadas com o cliente e necessárias para à interpretação dos resultados e todas as informações requeridas pelo método utilizado.

Um certificado deve conter, pelo menos, as seguintes informações:

- Um título (por exemplo. “Relatório de Medição” ou “Certificado de calibração”);
- Nome e endereço do laboratório;
- Local da realização das atividades do laboratório quando realizadas nas instalações de cliente;
- Identificação unívoca de forma que todos os seus componentes sejam reconhecidos como parte do relatório completo e uma clara identificação do final do certificado;
- Nome e informações de contato do cliente;
- Identificação do método utilizado;

- Uma identificação não ambígua e descrição do item, incluindo tipo de balança, capacidade máxima, número do modelo, número de série, localização, faixa(s) de escala e resolução(s).
- Data do recebimento do item de calibração;
- Data da realização da calibração;
- Data da emissão do Certificado;
- Uma declaração de que os resultados se referem somente ao item calibrado;
- Resultados com as unidades de medida;
- Identificação das pessoas que autorizam o certificado;
- Incerteza de medição do resultado da medição, apresentada na mesma unidade do mensurando ou na forma de um termo relativo ao mensurando (por exemplo, percentual);
- As condições ambientais (temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar) sob as quais a calibração foi realizada, que tenha influência sobre os resultados de medição;
- Uma declaração identificando como os resultados das medições são metrologicamente rastreáveis;
- Resultados obtidos antes e depois de qualquer ajuste ou reparo, se disponíveis;
- Quando pertinente, uma declaração de conformidade aos requisitos ou especificações;

Bibliografia

- 1- MSL Technical Guide, Calibrating balances. Version 6, April 2018.
Disponível em <https://www.measurement.govt.nz/resources/#collapse-control-1-4>
- 2- Maciel, M. A. D., Erros da indicação de instrumentos de pesagem não automáticos devido à aceleração da gravidade. Curitiba, 2019. Disponível em https://www.ipem.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/migrados/Fil_e/producao_cientifica/erro_indicacao_e_instrumentos_marco_aurelio.pdf

- 3- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Mapa do Modelo Geoidal Brasileiro no Datum SIRGAS2000 (IBGE, 2013)
Disponível em: <http://www.ibge.gov.br> .
- 4- MSL Technical Guide 12, Assuring the Quality of Weighing Results, 2018.
Disponível em https://nanopdf.com/download/assuring-the-quality-of-weighing-results_pdf
- 5- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Acreditação. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/acreditacao/cgcre>
- 6- INMETRO. Norma NIT-DICLA-021, rev. 10 – Expressão da incerteza de medição por laboratório de calibração. Duque de Caxias, 2012. Disponível em http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/Dicla/NIT/NIT-Dicla-21_08.pdf
- 7- International Recommendation OIML R-111-1, Edition 2004. Disponível em https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r111-1-e04.pdf .
- 8- Maciel, M. A. D., Recomendações para verificação intermediária de balanças. Curitiba, 2020. Disponível em https://www.ipem.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/migrados/Fil_e/producao_cientifica/marco_aurelio_diniz_macial_recomendacoes_sobre_verificacao_intermediaria_balancas.pdf
- 9- INMETRO – Guia para a expressão de incerteza de medição, GUM 2008 – Avaliação de dados de medição. 1ª Edição Brasileira. Duque de Caxias, 2012. Disponível em https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/gum_final.pdf/view
- 10- Sutton, C. M., Magnetic effects in weighing. MSL technical guide 6, 2004.
Disponível em <http://msl.irl.cri.nz/training-and-resources/technical-guides>