

NOTA IMPORTANTE:

La entidad sólo puede hacer uso de esta norma para si misma, por lo que este documento NO puede ser reproducido, ni almacenado, ni transmitido, en forma electrónica, fotocopia, grabación o cualquier otra tecnología, fuera de su propio marco.

ININ/ Oficina Nacional de Normalización

NORMA CUBANA

NC

OIML R 111-1: 2007
(Publicada por la OIML en 2004)

**PESAS DE CLASES E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃, Y M₃ —
PARTE 1: REQUISITOS METROLÓGICOS Y TÉCNICOS
(OIML R 111-1:2004, IDT)**

**Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃, and M₃ - Part 1:
Metrological and technical requirements**

ICS: 17.100

1. Edición Noviembre 2007
REPRODUCCIÓN PROHIBIDA

Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 Vedado, Ciudad de La Habana. Cuba. Teléfono: 830-0835 Fax: (537) 836-8048; Correo electrónico: nc@ncnorma.cu; Sitio Web: www.nc.cubaindustria.cu



Cuban National Bureau of Standards

Prefacio

La Oficina Nacional de Normalización (NC), es el Organismo Nacional de Normalización de la República de Cuba y representa al país ante las organizaciones internacionales y regionales de normalización.

La elaboración de las Normas Cubanas y otros documentos normativos relacionados se realiza generalmente a través de los Comités Técnicos de Normalización. Su aprobación es competencia de la Oficina Nacional de Normalización y se basa en las evidencias del consenso.

Esta Norma Cubana:

- Ha sido elaborada por el Comité Técnico de Normalización NC/CTN 2 de Metrología integrado por representantes de las siguientes entidades:
 - Ministerio de la Industria Alimenticia.
 - Ministerio del Azúcar
 - Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias
 - Ministerio de la Industria Sideromecánica
 - Ministerio de Comercio Exterior
 - Instituto Superior Politécnico “José A. Echeverría”
 - Oficina Territorial de Normalización de Villa Clara
 - Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología
 - Oficina Nacional de Normalización.

- Es una adopción idéntica de la Recomendación Internacional OIML R 111-1:2004 de igual título.

© NC, 2007

Todos los derechos reservados. A menos que se especifique, ninguna parte de esta publicación podrá ser reproducida o utilizada en alguna forma o por medios electrónicos o mecánicos, incluyendo las fotocopias, fotografías y microfilmes, sin el permiso escrito previo de:

Oficina Nacional de Normalización (NC)

Calle E No. 261, Vedado, Ciudad de La Habana, Habana 4, Cuba.

Impreso en Cuba.

**RECOMENDACIÓN
INTERNACIONAL**

OIML R 111-1

Edición 2004 (E)

Pesas de clases E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ y M₃

Parte 1: Requisitos metroológicos y técnicos

Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃

Part 1: Metrological and technical requirements

OIML R 111-1 Edición 2004 (E)



ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL
DE METROLOGÍA LEGAL

INTERNATIONAL ORGANIZATION
OF LEGAL METROLOGY

Índice

| | |
|--|-----------|
| <i>Prefacio</i> | 3 |
| Generalidades | 4 |
| 1 Alcance | 4 |
| 2 Términos y definiciones..... | 5 |
| 3 Símbolos | 8 |
| 4 Unidades y valores nominales de las pesas | 11 |
| Requisitos metrológicos | 11 |
| 5 Errores máximos permisibles en la verificación | 11 |
| Requisitos técnicos | 13 |
| 6 Forma | 13 |
| 7 Construcción | 14 |
| 8 Material | 15 |
| 9 Magnetismo | 16 |
| 10 Densidad | 17 |
| 11 Requisitos de la superficie | 18 |
| 12 Ajuste | 19 |
| 13 Marcas descriptivas..... | 20 |
| 14 Presentación | 21 |
| Controles metrológicos | 22 |
| 15 Controles metrológicos | 22 |
| 16 Marcas de control | 23 |
| Anexo A Ejemplos de diferentes formas y dimensiones | 25 |
| Anexo B Procedimientos para ensayos de pesas | 28 |
| B.1 Introducción | 28 |
| B.2 Secuencia de los ensayos..... | 28 |
| B.3 Revisión de documentos e inspección visual | 28 |
| B.4 Limpieza de las pesas | 29 |
| B.5 Rugosidad superficial | 30 |
| B.6 Magnetismo | 33 |
| B.7 Densidad | 42 |
| B.8 Asignación de una clase OIML R 111 a pesas en uso o especiales | 60 |
| Anexo C Calibración de una pesa o de un juego de pesas | 61 |
| C.1 Alcance | 61 |
| C.2 Requisitos generales | 61 |
| C.3 Esquemas de pesadas | 62 |
| C.4 Ciclos de pesadas | 63 |
| C.5 Análisis de datos | 65 |
| C.6 Cálculos de la incertidumbre | 66 |
| Anexo D Control estadístico | 71 |
| D.1 Patrón de comprobación..... | 71 |
| D.2 Precisión de la balanza | 72 |
| Anexo E La fórmula CIPM y la fórmula aproximada | 74 |
| E.1 La fórmula CIPM | 74 |
| E.2 Constantes | 74 |
| E.3 Fórmula aproximada para la densidad del aire | 76 |
| Referencias | 77 |

Prefacio

La Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) es una organización intergubernamental mundial cuyo objetivo primario es armonizar las regulaciones y los controles metroológicos que aplican los servicios nacionales de metrología y otras organizaciones competentes de sus Estados Miembros.

Las dos categorías principales de publicaciones de la OIML son:

- **Las recomendaciones internacionales (OIML R)**, que son regulaciones normalizadas que establecen las características metroológicas requeridas de ciertos instrumentos de medición y que especifican los métodos y equipos que deben emplearse para verificar su conformidad con las regulaciones; los Estados Miembros de la OIML implementarán estas Recomendaciones en la mayor extensión que sea posible;
- **Los documentos internacionales (OIML D)**, que son de naturaleza informativa y tienen la intención de mejorar la calidad de los servicios metroológicos.

Los proyectos de Recomendaciones y Documentos de la OIML los desarrollan comités o subcomités técnicos formados por los Estados Miembros. Ciertas instituciones internacionales y regionales también participan mediante consultas.

Entre la OIML y ciertas instituciones, como la ISO y el IEC, se

establecen acuerdos cooperativos con el objetivo de evitar requisitos contradictorios; por consiguiente, los fabricantes y los usuarios de instrumentos de medición, los laboratorios de ensayos, etc., pueden aplicar las publicaciones de OIML simultáneamente con las de otras instituciones.

Las Recomendaciones Internacionales y los Documentos Internacionales se publican en francés (F) e inglés (I) y se revisan periódicamente.

Esta publicación OIML R 111-1, Edición 2004 (E) fue desarrollada por TC 9/SC 3 Pesas y aprobada directamente por la Conferencia Internacional de Metrología Legal en 2004.

Las Publicaciones de la OIML pueden descargarse del sitio web de la OIML en forma de archivos PDF. Para obtener información adicional sobre las Publicaciones de la OIML, sírvase dirigirse a la oficina central de la Organización:

Bureau International de Métrologie Légale
11, rue Turgot - 75009 París - Francia

Teléfono: 33 (0)1 48 78 12 82
Fax: 33 (0)1 42 82 17 27
E-mail: biml@oiml.org
Internet: www.oiml.org

Pesas de clases E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} y M_3

Generalidades

1 ALCANCE

1.1 Esta Recomendación contiene requisitos técnicos (por ej., las características físicas principales) y metrológicos que se aplican a las pesas que se utilizan:

- Como patrones para la verificación de instrumentos de pesar;
- Como patrones para la verificación o la calibración de pesas de una clase de exactitud inferior;
- Con instrumentos de pesar.

1.2 Aplicación

Esta Recomendación se aplica a las pesas con valores nominales de masa desde 1 mg hasta 5 000 kg en las clases de exactitud E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} y M_3 .

1.3 Clase de exactitud mínima de las pesas

La clase de exactitud de las pesas utilizadas como patrones para la verificación de pesas o de instrumentos de pesar debe estar en conformidad con los requisitos de las Recomendaciones pertinentes de la OIML.

1.3.1 Las clases OIML de las pesas se definen como sigue:

Clase E_1 : Pesas destinadas a asegurar la trazabilidad entre los patrones nacionales de masa (con valores derivados del Prototipo Internacional del kilogramo) y pesas de clase E_2 e inferiores. Las pesas y juegos de pesas de clase E_1 deben acompañarse de un certificado de calibración (ver 15.2.2.1).

Clase E_2 : Pesas destinadas al uso en la verificación o en la calibración de pesas de clase F_1 y al uso con instrumentos de pesar de la clase de exactitud especial I. Las pesas y los juegos de pesas de clase E_2 deben acompañarse de un certificado de calibración (ver 15.2.2.2). Estas pueden utilizarse como pesas de clase E_1 si cumplen los requisitos de rugosidad superficial, susceptibilidad magnética y magnetización de la clase de pesas E_1 , y si su certificado de calibración contiene los datos apropiados que se especifican en 15.2.2.1.

Clase F_1 : Pesas destinadas al uso en la verificación o en la calibración de pesas de clase F_2 y al uso con instrumentos de pesar de la clase de exactitud especial I y de la clase de alta exactitud II.

Clase F_2 : Pesas destinadas al uso en la verificación o en la calibración de pesas de clase M_1 y posiblemente de pesas de clase M_2 . Comprende también las pesas destinadas al uso en transacciones comerciales importantes (por ej., de metales finos y piedras preciosas) en instrumentos de pesar de la clase de alta exactitud II.

Clase M_1 : Pesas destinadas al uso en la verificación o en la calibración de pesas de clase M_2 , y para el uso con instrumentos de pesar de la clase de exactitud media III.

Clase M_2 : Pesas destinadas al uso en la verificación o en la calibración de pesas de clase M_3 , y para el uso en transacciones comerciales generales y con instrumentos de pesar de la clase de exactitud media III.

Clase M_3 : Pesas destinadas al uso con instrumentos de pesar de la clase de exactitud media III y de la clase de exactitud ordinaria IIII.

Clases M_{1-2} y M_{2-3} : Pesas desde 50 kg hasta 5 000 kg de menor exactitud destinadas al uso con instrumentos de pesar de la clase de exactitud media III.

Nota: El error de una pesa utilizada para la verificación de un instrumento de pesar no debe exceder 1/3 del error máximo permisible del instrumento. Estos valores se listan en la sección 3.7.1 de OIML R 76 *Instrumentos de pesar no automáticos* (1992).

2 TERMINOLOGÍA

La terminología utilizada en esta Recomendación está en conformidad con el Vocabulario Internacional de Términos Básicos y Generales en Metrología (edición de 1993) [1] y el Vocabulario Internacional de Términos en Metrología Legal (edición 2000) [2]. Además, a los fines de esta Recomendación, se aplican las siguientes definiciones.

2.1 Clase de exactitud

Designación que se aplica a una pesa o a un juego de pesas que cumple ciertos requisitos metrológicos cuyo objetivo es mantener los valores de masa dentro de límites especificados.

2.2 Balanza

Instrumento que indica la masa aparente, y que es sensible a las fuerzas siguientes:

| | |
|--|---|
| $F_g = m \times g$ | Gravedad. |
| $F_b = V \times \rho_a \times g = \frac{m}{\rho} \rho_a \times g$ | Empuje del aire, igual al peso de la masa de aire desplazada. |
| $F_s = \mu_0 \iiint_V (M + \chi H) \frac{\partial H}{\partial z} dV$ | Componente vertical de la interacción magnética entre la pesa y la balanza y/o el medio ambiente. |

H y M son vectores; z es la coordenada cartesiana vertical.

Si los efectos magnéticos son despreciables, es decir, si la magnetización remanente (M) y la susceptibilidad magnética (χ) de la pesa son suficientemente pequeñas, y la balanza se ha calibrado con pesas de referencia de masa bien conocida, la balanza puede utilizarse para indicar la masa convencional m_c de un cuerpo en condiciones convencionalmente seleccionadas.

2.3 Calibración

Conjunto de operaciones que establece, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de cantidades indicadas por un instrumento de medición o por un sistema de medición, o entre los valores representados por una medición de un material medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes materializados por los patrones.

Nota 1: El resultado de una calibración permite asignar valores de las magnitudes que se miden a las indicaciones, o determinar correcciones aplicables a las indicaciones.

Nota 2: Una calibración puede también determinar otras propiedades metrológicas, tales como el efecto de las magnitudes influyentes.

Nota 3: El resultado de una calibración puede registrarse en un documento, a veces llamado certificado de calibración o informe de calibración.

2.3.1 Certificado (o informe) de calibración

Certificado emitido exclusivamente por laboratorios autorizados o acreditados que registrar los resultados de una calibración.

2.4 Certificado de conformidad

Documento emitido por el órgano nacional responsable dando fé de que una pesa o conjunto de pesas identificado, o muestras del mismo, está en conformidad con los requisitos pertinentes de esta Recomendación (ver el Sistema de Certificados de la OIML para Instrumentos de Medición).

2.5 Patrón de comprobación

Patrón que se utiliza en un proceso de control estadístico para proporcionar una “comprobación” que asegure que los patrones, los procesos de medición y los resultados están dentro de límites estadísticos aceptables.

2.6 Comparación

Método de medición basado en la comparación del valor de una cantidad a medir con un valor conocido de la misma cantidad.

2.7 Masa convencional (también llamada valor convencional de masa)

Es el valor convencional del resultado de la pesada en aire, en conformidad con el documento OIML D 28 *Valor convencional del resultado de una pesada en aire* [3]. La masa convencional de una pesa a la temperatura de referencia (t_{ref}) de 20 °C es la masa de una pesa de referencia de densidad (ρ_{ref}) 8 000 kg m⁻³ que la equilibra en aire de densidad de referencia (ρ_0) de 1,2 kg m⁻³.

2.8 Densidad de un cuerpo

La masa dividida por el volumen, según la formula $\rho = \frac{m}{V}$.

2.9 Magnetismo

Efecto que genera una fuerza atractiva o repulsiva.

2.9.1 Momento magnético dipolar (m_d)

Parámetro de un dipolo magnético. La fuerza del campo magnético generado por un dipolo, así como la fuerza entre el dipolo y una muestra magnetizada, son proporcionales a este momento dipolar. La fuerza entre el dipolo y una muestra que una tiene susceptibilidad magnética es proporcional al cuadrado del momento dipolar.

2.9.2 Fuerza del campo magnético (H)

Intensidad magnética local, generada por un material magnético tal como un imán permanente o por un circuito eléctrico.

2.9.3 Fuerza magnética ($F_1, F_2, F_a, F_b, F_{\text{max}}$ y F_z)

Fuerza producida sobre un material magnético o magnéticamente susceptible por campos magnéticos externos.

2.9.4 Permeabilidad magnética (μ)

Medida de la capacidad de un medio para modificar un campo magnético.

2.9.5 Constante magnética (permeabilidad magnética del vacío (μ_0))

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}.$$

2.9.6 Susceptibilidad magnética (volumétrica) (χ)

Medida de la capacidad de un medio para modificar un campo magnético. Se relaciona con la permeabilidad magnética (μ) por la ecuación: $\mu / \mu_0 = 1 + \chi$. La cantidad μ / μ_0 se denomina a veces permeabilidad relativa, μ_r .

2.9.7 Magnetización (remanente) (M)

Parámetro que especifica un estado magnético de cuerpos materiales tales como pesas, en ausencia de un campo magnético externo (en el caso más general, la magnetización es un vector cuya magnitud y dirección no son necesariamente constantes a través del material). La magnetización de un cuerpo genera un campo magnético no homogéneo en el espacio y de ese modo puede generar fuerzas magnéticas que actúan sobre otros materiales.

2.10 Error máximo permisible (δm o emp)

Valor máximo absoluto de la diferencia, permitida por las regulaciones nacionales, entre la masa convencional medida y el valor nominal de una pesa, determinado mediante las pesas de referencia correspondientes.

2.11 Parámetro de rugosidad o parámetro R (R_a ó R_z)

Parámetro que describe el perfil de rugosidad evaluado en una muestra. La letra R indica el tipo de perfil evaluado, en este caso R para el perfil de rugosidad. El perfil evaluado de una muestra puede ser en términos de diferentes tipos de perfiles: un perfil de rugosidad o parámetro R, un perfil primario o parámetro P, y un perfil de onda o parámetro W. [4]

2.12 Pesa de sensibilidad

Pesa que se utiliza para determinar la sensibilidad de un instrumento de pesar (ver T.4.1 en OIML R 76-1)..

2.13 Juego de pesas

Serie o grupo de pesas presentadas usualmente en una caja o estuche con un arreglo tal que permita pesar cualquier carga comprendida entre la masa de la pesa de menor valor nominal y la suma de las masas de todas las pesas de la serie, con una progresión tal que la masa de la pesa de menor valor nominal constituye el paso más pequeño de la serie. Las pesas tienen características metrológicas similares y valores nominales iguales, o diferentes, teniendo en cuenta el apartado 4.3 de esta Recomendación, y pertenecen a la misma clase de exactitud.

2.14 Temperatura (t)

En grados Celsius, se relaciona con la escala de temperatura termodinámica absoluta, llamada escala Kelvin, por la ecuación $t = T - 273.15$ K.

2.15 Ensayo

Operación técnica que consiste en la determinación de una o más características o del rendimiento de un determinado producto, material, equipo, organismo, fenómeno físico, proceso o servicio en conformidad con un procedimiento especificado. (Basado en: 13.1. ISO/IEC Guía 2:1996 Vocabulario General de Normalización y Actividades Relacionadas)[5]

2.16 Calibrando (m_c)

Una pesa que se somete a calibración de acuerdo con esta Recomendación.

2.17 Modelo

Modelo definido al que se conforma una pesa o un juego de pesas.

2.17.1 Evaluación de modelo

Examen y comprobación sistemáticos de un modelo de pesas o de un juego de pesas contra los requisitos documentados en esta Recomendación, cuyos resultados se exponen en un informe de ensayo.

2.17.2 Aprobación de modelo

Proceso que consiste en la toma de una decisión por un organismo responsable, basada en la revisión de un informe de ensayo de una evaluación de modelo, para un modelo de pesas o de juego de pesas y en criterios profesionales, de que el modelo está en conformidad con los requisitos obligatorios de esta Recomendación a los efectos legales.

2.18 Verificación

Conjunto de todas las operaciones realizadas por un órgano del servicio nacional de metrología legal (o por otra organización legalmente autorizada) con el objetivo de verificar y confirmar que la pesa satisface totalmente los requisitos de las regulaciones que rigen la verificación. La verificación incluye el examen y la imposición de un sello. (Adaptado de VIML 2.4 y 2.13).

2.18.1 Verificación inicial

Conjunto de ensayos y exámenes visuales que se realizan antes de que el equipo o la pesa se ponga en servicio para determinar si una pesa o un juego de pesas ha sido fabricado para reproducir un modelo dado y si es conforme a ese modelo y a las regulaciones, y si sus características metrológicas están dentro de los límites requeridos para la verificación inicial de las copias de ese tipo. Si las pesas o el juego de pesas cumplen con todos los requisitos de los ensayos y exámenes, se les da carácter legal mediante su aceptación, lo que se indica mediante la imposición de un sello y/o la emisión de un certificado de verificación. (Adaptado de OIML D 20 *Initial and subsequent verification of measuring instruments and processes* (1988) (Verificación inicial y posteriores de los instrumentos y procesos de medición).

2.18.2 Verificación posterior o inspección en servicio

Conjunto de ensayos y exámenes visuales, también realizados por un funcionario del servicio de metrología legal (inspector), para comprobar si las pesas o el juego de pesas que ha estado en servicio durante algún tiempo desde la verificación anterior es todavía conforme o ha vuelto a ser conforme con las regulaciones y si mantiene sus características metrológicas dentro de los límites requeridos. Si las pesas o el juego de pesas dan resultados satisfactorios en todos los ensayos y exámenes, su carácter legal es confirmado o reestablecido por su aceptación mediante la imposición de un sello y/o la emisión de un certificado de verificación. Cuando se aplica una técnica de muestreo para verificar una población de pesas, todos los elementos de la población se consideran verificados.

2.19 Pesa

Medida material de masa, regulada tomando en consideración sus características físicas y metrológicas: forma, dimensiones, material, calidad de la superficie, valor nominal, densidad, propiedades magnéticas y error máximo permisible.

2.20 Peso de un cuerpo (F_g)

Fuerza gravitatoria con la cual el cuerpo es atraído por la tierra. La palabra peso denota una cantidad de la misma naturaleza que una fuerza: el peso de un cuerpo es el producto de su masa por la aceleración debida a la gravedad.

3 SÍMBOLOS

| Símbolo | Unidad | Definición |
|-----------|-------------|--|
| A | m^2 | Área. |
| B | T | Inducción magnética en el medio. |
| B_E | T | Lectura del gaussímetro del campo magnético ambiental en ausencia de la pesa. |
| B_0 | T | Inducción magnética en el vacío. |
| C | – | Factor de corrección por el empuje del aire. |
| C_a | – | Factor de corrección por el empuje del aire con la densidad de éste durante el ciclo de pesada en aire. |
| C_{al} | – | Factor de corrección por el empuje del aire con la densidad de éste durante el ciclo de pesada en líquido. |
| C_s | – | Factor de corrección por el empuje del aire con la densidad de la pesa de sensibilidad. |
| D | kg | Diferencia de las lecturas de la balanza entre los valores mínimo y máximo de la prueba de excentricidad. |
| d | kg | Intervalo de la escala. |
| F_1 | N | Fuerza promedio calculada utilizando el promedio de la variación de masa obtenida en el comparador de masas para el primer juego de lecturas. |
| F_2 | N | Fuerza promedio calculada utilizando el promedio de la variación de masa obtenida en el comparador de masas para el segundo juego de lecturas. |
| F_a | N | Fuerza promedio utilizada para el cálculo de la susceptibilidad magnética. |
| F_b | N | Fuerza promedio utilizada para el cálculo de la magnetización. |
| F_g | N | Fuerza gravitatoria. |
| F_{max} | N | Fuerza máxima para el cálculo de la susceptibilidad magnética. |
| F_Z | N | Fuerza magnética entre el comparador de masa y una pesa en la dirección vertical o de la coordenada cartesiana z |
| g | $m\ s^{-2}$ | Aceleración gravitatoria. |
| h | mm o m | Altura. |
| H | $A\ m^{-1}$ | Intensidad del campo magnético. |
| H_{EZ} | $A\ m^{-1}$ | Componente vertical de la intensidad del campo magnético de la tierra. |
| hr | % | Humedad relativa. |

| Símbolo | Unidad | Definición |
|-------------------------|----------------------|---|
| ΔI | kg | Diferencia de indicaciones de la balanza, donde $\Delta I = I_t - I_r$ |
| ΔI_a | kg | Diferencia de indicaciones de la balanza en aire, donde $\Delta I_a = I_{ta} - I_{ra}$ |
| ΔI_l | kg | Diferencia de indicaciones de la balanza en líquido, donde $\Delta I_l = I_{tl} - I_{rl}$ |
| ΔI_s | kg | Cambio en indicación de la balanza debido a la pesa de sensibilidad. |
| I | kg | Indicación de los instrumentos de pesar (en divisiones de la escala). |
| I_a | – | Factor de corrección geométrica [6]. |
| I_b | – | Factor de corrección geométrica [6]. |
| I_{dl} | - | Indicación de la balanza por la diferencia del líquido desplazado. |
| I_l | - | Indicación de la balanza para el recipiente y el líquido contenido. |
| I_{l+t} | - | Indicación de la balanza para el recipiente que contiene el líquido y la pesa. |
| I_{ta} | - | Indicación de la balanza para el calibrando en aire (después de efectuar la tara). |
| I_{tl} | - | Indicación de la balanza para el calibrando en líquido (después de efectuar la tara). |
| J | – | Subíndice para el número de calibrandos o el número de series de mediciones. |
| K | – | Factor de cobertura, típicamente 2 ó 3 (Guía para la expresión de la incertidumbre en las mediciones (GUM) (1995)) [7]. |
| m | kg | Masa de un cuerpo rígido (pesa). |
| M | A m ⁻¹ | Magnetización remanente (ver también $\mu_0 M$). |
| M_v | kg mol ⁻¹ | Masa molar del agua (ecuación E.1). |
| M_a | kg mol ⁻¹ | Masa molar del aire seco. |
| m_c | kg | Masa convencional de la pesa . |
| m_{cr} | kg | Masa convencional de la pesa de referencia. |
| m_{ct} | kg | Masa convencional del calibrando. |
| $\overline{\Delta m_c}$ | – | Promedio de las diferencias de pesada observadas entre el calibrando y la pesa de referencia y la densidad de la pesa de referencia ρ_{ref} . ver 10.2.1 |
| m_d | A m ² | Momento magnético (de los imanes utilizados en el susceptómetro). |
| m_0 | kg | Masa, valor nominal de la pesa (por ej., 1 kg). |
| m_r | kg | Masa de la pesa de referencia para comparaciones con el calibrando, ambas en aire o ambas sumergidas en líquido. |
| m_{ra} | kg | Masa de la pesa de referencia para comparaciones con el calibrando, ambas en aire. |
| m_{rl} | kg | Masa de una combinación de pesas de referencia para comparaciones con el calibrando, los patrones en aire, el calibrando en líquido. |
| m_s | kg | Masa de la pesa de sensibilidad. |
| m_t | kg | Masa del calibrando. |
| m_{wa} | kg | Masa de la pesa en aire. |
| m_{wl} | kg | Masa de la pesa en líquido. |
| Δm | kg | Diferencia de masa, usualmente entre el calibrando y la pesa de referencia. |
| $\overline{\Delta m}$ | kg | Valor promedio de una serie de mediciones que comprende varios ciclos de pesadas idénticos o un número de series que tienen aproximadamente la misma desviación estándar. |
| Δm_c | kg | Diferencia de masa convencional. |
| n | - | Subíndice para el número de secuencias de mediciones. |
| p | Pa o hPa | Presión. |
| p_{sv} | Pa | Presión de saturación del vapor en el aire húmedo. |
| R | J/(mol K) | Constante molar de los gases. |
| R_a | µm | Altura media del perfil de rugosidad (parámetro R) (ver la cláusula 11). |

| Símbolo | Unidad | Definición |
|----------------------|--------------------|---|
| R_z | μm | Altura máxima del perfil de rugosidad (parámetro R) (ver la cláusula 11). |
| r | – | Subíndice de la pesa de referencia. |
| s | kg | Desviación estándar. |
| s | – | Subíndice de la pesa de sensibilidad. |
| T | K | Temperatura termodinámica según la Escala Internacional de Temperatura 1990 (ITS-90). |
| t | – | Subíndice del calibrando. |
| t | $^{\circ}\text{C}$ | Temperatura en grados Celsius, donde $t = T - 273.15$ K. |
| t_{ref} | $^{\circ}\text{C}$ | Temperatura de referencia. |
| U | kg | Incertidumbre, incertidumbre expandida. |
| u | kg | Incertidumbre, incertidumbre estándar. |
| $u(m_r)$ | kg | Incertidumbre de la pesa de referencia. |
| u_b | kg | Incertidumbre de la corrección por el empuje del aire. |
| u_{ba} | kg | Incertidumbre debida a la balanza. |
| $u_{ba}(\Delta m_c)$ | kg | Incertidumbre estándar combinada de la balanza. |
| u_c | kg | Incertidumbre estándar combinada. |
| u_d | kg | Incertidumbre debida a la resolución del indicador de una balanza digital. |
| u_E | kg | Incertidumbre debida a la excentricidad. |
| u_{inst} | kg | Incertidumbre debida a la inestabilidad de la pesa de referencia. |
| u_{ma} | kg | Incertidumbre debida al magnetismo. |
| u_s | kg | Incertidumbre debida a la sensibilidad de la balanza. |
| u_w | kg | Incertidumbre debida al proceso de pesar. |
| V | M^3 | Volumen de un cuerpo sólido (pesa). |
| V_{ri} | m^3 | Volumen de la i -ésima pesa de referencia de una combinación de pesas. |
| x_v | – | Fracción molar del vapor de agua. |
| Z | – | Factor de compresibilidad. |
| Z_1 | mm | Distancia desde la parte superior de la pesa hasta el centro del imán (Figura B.1). |
| Z_0 | mm | Distancia desde el centro del imán hasta la parte inferior de la pesa (Figura B.1). |
| ρ_a | kg m^{-3} | Densidad del aire húmedo. |
| ρ_0 | kg m^{-3} | Densidad del aire como valor de referencia igual a 1.2 kg m^{-3} . |
| ρ_r | kg m^{-3} | Densidad de una pesa de referencia con masa m_r . |
| ρ_{ra} | kg m^{-3} | Densidad de una pesa de referencia con masa m_{ra} . |
| ρ_{ref} | kg m^{-3} | Densidad de referencia (es decir, $8\,000 \text{ kg m}^{-3}$). |
| ρ_{rl} | kg m^{-3} | Densidad de una pesa de referencia con masa m_{rl} . |
| ρ_s | kg m^{-3} | Densidad de la pesa de sensibilidad. |
| ρ_t | kg m^{-3} | Densidad del calibrando. |
| ρ_x | kg m^{-3} | Densidad de la aleación (x). |
| ρ_y | kg m^{-3} | Densidad de la aleación (y). |
| $\delta m/m_0$ | – | Error relativo máximo permisible en las pesas. |
| μ | N A^{-2} | Permeabilidad magnética. |
| μ_r | – | Permeabilidad magnética relativa (μ/μ_0). |
| μ_0 | N A^{-2} | Constante magnética (permeabilidad magnética del vacío), $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$. |
| $\mu_0 M$ | T | Polarización magnética. |
| χ | – | Susceptibilidad magnética (volumétrica). |

4 UNIDADES Y VALORES NOMINALES DE LAS PESAS

4.1 Unidades

Las unidades que se utilizan son:

- Para la masa, el miligramo (mg), el gramo (g) y el kilogramo (kg);
- Para la densidad, el kilogramo por metro cúbico (kg m^{-3}).

4.2 Valores nominales

Los valores nominales de la masa de las pesas y de los juegos de pesas deben ser iguales a 1×10^n kg, 2×10^n kg o 5×10^n kg, donde “n” representa un número entero positivo, negativo o cero.

4.3 Secuencia de pesas

4.3.1 Un juego de pesas puede consistir de distintas secuencias de valores nominales. Si un juego de pesas está compuesto por varias secuencias de pesas, se deben utilizar las siguientes secuencias individuales:

$(1; 1; 2; 5) \times 10^n$ kg;
 $(1; 1; 1; 2; 5) \times 10^n$ kg;
 $(1; 2; 2; 5) \times 10^n$ kg; o
 $(1; 1; 2; 2; 5) \times 10^n$ kg

donde “n” representa un número entero positivo, negativo o cero.

4.3.2 Un juego de pesas puede comprender también múltiples pesas, todas con el mismo valor nominal (por ej., 10 piezas o miembros del juego, cada una de las piezas o de los miembros con valor (la masa no es una medida de capacidad y además no es la idea que se quiere expresar) nominal de 5×10^n kg).

Requisitos metrológicos

5 ERRORES MÁXIMOS PERMISIBLES EN LA VERIFICACIÓN

5.1 Errores máximos permisibles en la verificación inicial y posteriores; y en la inspección en servicio

5.1.1 Los errores máximos permisibles en la verificación inicial de pesas individuales se dan en la Tabla 1 y se refieren a la masa convencional.

5.1.2 Los errores máximos permisibles en la verificación posterior y en la verificación en servicio se dejan a discreción de cada estado. Sin embargo, si los errores máximos permisibles son mayores que los indicados en la Tabla 1, la pesa no podrá declararse como perteneciente a la clase OIML correspondiente.

5.2 Incertidumbre expandida

Para cada pesa, la incertidumbre expandida de la masa convencional U para $k = 2$ deberá ser como máximo igual a 1/3 del error máximo permisible dado en la Tabla 1.

$$U \leq 1/3 \delta m \quad (5.2-1)$$

5.3 Masa convencional

5.3.1 Para cada pesa, la masa convencional m_c (determinada con una incertidumbre expandida U en conformidad con 5.2) no deberá diferir del valor nominal de la pesa, m_0 , en una cantidad mayor que el error máximo permisible, δm , menos la incertidumbre expandida:

$$m_0 - (\delta m - U) \leq m_c \leq m_0 + (\delta m - U) \quad (5.3-1)$$

5.3.2 Para las pesas de clases E_1 y E_2 , que se acompañan siempre de certificados que contienen los datos apropiados (especificados en 15.2.1), el usuario deberá considerar la desviación del valor nominal, $m_c - m_0$.

Tabla 1. Errores máximos permisibles de las pesas ($\pm \delta m$ en mg)

| Valor nominal* | Clase E ₁ | Clase E ₂ | Clase F ₁ | Clase F ₂ | Clase M ₁ | Clase M _{1,2} | Clase M ₂ | Clase M _{2,3} | Clase M ₃ |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| 5 000 kg | | | 25 000 | 80 000 | 250 000 | 500 000 | 800 000 | 1 600 000 | 2 500 000 |
| 2 000 kg | | | 10 000 | 30 000 | 100 000 | 200 000 | 300 000 | 600 000 | 1 000 000 |
| 1 000 kg | | 1 600 | 5 000 | 16 000 | 50 000 | 100 000 | 160 000 | 300 000 | 500 000 |
| 500 kg | | 800 | 2 500 | 8 000 | 25 000 | 50 000 | 80 000 | 160 000 | 250 000 |
| 200 kg | | 300 | 1 000 | 3 000 | 10 000 | 20 000 | 30 000 | 60 000 | 100 000 |
| 100 kg | | 160 | 500 | 1 600 | 5 000 | 10 000 | 16 000 | 30 000 | 50 000 |
| 50 kg | 25 | 80 | 250 | 800 | 2 500 | 5 000 | 8 000 | 16 000 | 25 000 |
| 20 kg | 10 | 30 | 100 | 300 | 1 000 | | 3 000 | | 10 000 |
| 10 kg | 5.0 | 16 | 50 | 160 | 500 | | 1 600 | | 5 000 |
| 5 kg | 2.5 | 8.0 | 25 | 80 | 250 | | 800 | | 2 500 |
| 2 kg | 1.0 | 3.0 | 10 | 30 | 100 | | 300 | | 1 000 |
| 1 kg | 0.5 | 1.6 | 5.0 | 16 | 50 | | 160 | | 500 |
| 500 g | 0.25 | 0.8 | 2.5 | 8.0 | 25 | | 80 | | 250 |
| 200 g | 0.10 | 0.3 | 1.0 | 3.0 | 10 | | 30 | | 100 |
| 100 g | 0.05 | 0.16 | 0.5 | 1.6 | 5.0 | | 16 | | 50 |
| 50 g | 0.03 | 0.10 | 0.3 | 1.0 | 3.0 | | 10 | | 30 |
| 20 g | 0.025 | 0.08 | 0.25 | 0.8 | 2.5 | | 8.0 | | 25 |
| 10 g | 0.020 | 0.06 | 0.20 | 0.6 | 2.0 | | 6.0 | | 20 |
| 5 g | 0.016 | 0.05 | 0.16 | 0.5 | 1.6 | | 5.0 | | 16 |
| 2 g | 0.012 | 0.04 | 0.12 | 0.4 | 1.2 | | 4.0 | | 12 |
| 1 g | 0.010 | 0.03 | 0.10 | 0.3 | 1.0 | | 3.0 | | 10 |
| 500 mg | 0.008 | 0.025 | 0.08 | 0.25 | 0.8 | | 2.5 | | |
| 200 mg | 0.006 | 0.020 | 0.06 | 0.20 | 0.6 | | 2.0 | | |
| 100 mg | 0.005 | 0.016 | 0.05 | 0.16 | 0.5 | | 1.6 | | |
| 50 mg | 0.004 | 0.012 | 0.04 | 0.12 | 0.4 | | | | |
| 20 mg | 0.003 | 0.010 | 0.03 | 0.10 | 0.3 | | | | |
| 10 mg | 0.003 | 0.008 | 0.025 | 0.08 | 0.25 | | | | |
| 5 mg | 0.003 | 0.006 | 0.020 | 0.06 | 0.20 | | | | |
| 2 mg | 0.003 | 0.006 | 0.020 | 0.06 | 0.20 | | | | |
| 1 mg | 0.003 | 0.006 | 0.020 | 0.06 | 0.20 | | | | |

* Los valores nominales de pesas que aparecen en la Tabla 1 especifican la menor y la mayor pesa permitidas en las distintas clases de pesas estipuladas por R 111, y los errores máximos permisibles y las denominaciones no deben extrapolarse a valores superiores ni inferiores. Por ejemplo, el menor valor nominal de una pesa comprendida en la clase M₂ es 100 mg, mientras el mayor es 5 000 kg. Una pesa de 50 mg no debe aceptarse como una pesa correspondiente a la clase M₂ estipulada por R 111, y en lugar de ello debe satisfacer los errores máximos permisibles y otros requisitos de la clase M₁ (por ej., la forma o las marcas) para esa clase de pesa. De otro modo, no se podrá afirmar que la pesa cumple los requisitos de R 111.

Requisitos técnicos

6 FORMA

6.1 Generalidades

6.1.1 Las pesas deben tener una forma geométrica simple para facilitar su fabricación, no deben tener aristas afiladas ni vértices agudos para evitar su deterioro, ni huecos pronunciados para evitar depósitos (por ej., de polvo) sobre su superficie.

6.1.2 Las pesas de un mismo juego de pesas deben tener la misma forma, excepto para las pesas de 1 g o menores.

6.2 Pesas de 1 g o menores

6.2.1 Las pesas menores de 1 g deben ser láminas planas poligonales o alambres, con las formas descritas en la Tabla 2, que faciliten su manipulación.

6.2.2 Las pesas de 1 g pueden ser láminas planas poligonales o alambres (ver 6.3.1). La forma de las pesas no marcadas con su valor nominal deberá conformarse a los valores dados en la Tabla 2.

Tabla 2. Formas de las pesas de 1 g o menores

| Valores nominales | Láminas poligonales | Alambres | | |
|----------------------|---------------------|-----------|-------|-------------|
| 5, 50, 500 mg | Pentágono | Pentágono | } o { | 5 segmentos |
| 2, 20, 200 mg | Cuadrado | Cuadrado | | 2 segmentos |
| 1, 10, 100, 1 000 mg | Triángulo | Triángulo | | 1 segmento |

6.2.3 Un juego de pesas puede comprender más de una secuencia de formas, diferentes de una secuencia a la otra. En una serie de secuencias, sin embargo, no se deberá insertar una secuencia de pesas de una forma diferente entre dos secuencias de pesas que tienen la misma forma.

6.3 Pesas desde 1 g hasta 50 kg

6.3.1 Una pesa de 1 g puede tener la forma de las pesas que son múltiplos de 1 g o la forma de las pesas que son submúltiplos de 1 g.

6.3.2 Las pesas de valores nominales desde 1 g hasta 50 kg pueden tener las dimensiones externas que se muestran en las Figuras y Tablas del Anexo A.

6.3.2.1 Estas pesas pueden tener también un cuerpo cilíndrico o ligeramente cónico (ver el ejemplo que aparece en la Figura A.1). La altura del cuerpo deberá ser entre 3/4 y 5/4 de su diámetro medio.

6.3.2.2 Estas pesas pueden también estar provistas con una cabeza que tenga una altura entre 0,5 y 1 veces el diámetro medio del cuerpo.

6.3.3 Además de las formas anteriores (6.3.2), las pesas desde 5 kg hasta 50 kg pueden tener diferentes formas adecuadas a los respectivos métodos de su manipulación. En lugar de una cabeza, pueden tener dispositivos de manipulación rígidos que forman parte del cuerpo de la pesa, tales como ejes, mangos, ganchos, agujeros, etc.

6.3.4 Las pesas de clases M con valores nominales desde 5 kg hasta 50 kg pueden tener también la forma de paralelepípedos rectangulares con aristas redondeadas y un mango rígido. Ejemplos típicos de dimensiones para estas pesas se muestran en las Figuras A.2 y A.3.

6.4 Pesas de 50 kg o mayores

6.4.1 Las pesas de 50 kg o mayores pueden tener formas cilíndricas, rectangulares u otras formas adecuadas. La forma deberá ser adecuada para la seguridad de su almacenaje y manipulación.

6.4.2 Las pesas de 50 kg o mayores pueden confeccionarse con dispositivos de manipulación rígidos, tales como ejes, mangos, ganchos, agujeros, etc.

6.4.3 Las pesas de clases M que están diseñadas para deslizarse sobre un piso plano y liso (o sobre rieles), deben estar equipadas con surcos o pistas de rodamiento de área limitada.

7 CONSTRUCCIÓN

7.1 Pesas de clases E

7.1.1 Pesas de clases E desde 1 mg hasta 50 kg

Las pesas de clases E desde 1 mg hasta 50 kg deben ser sólidas, monolíticas (constar de una sola pieza de material) y no tener ninguna cavidad abierta a la atmósfera.

7.1.2 Pesas de clase E₂ mayores de 50 kg

7.1.2.1 Las pesas de clase E₂ mayores de 50 kg pueden tener una cavidad de ajuste. El volumen de esta cavidad no deberá exceder de 1/1000 del volumen total de la pesa. La cavidad debe ser sellable y hermética al agua y al aire (por ej., por medio de una junta). Un tapón roscado con una ranura para destornillador o un dispositivo de manipulación tal como una perilla, un mango, un agujero, etc., se utilizarán para cerrar la cavidad de ajuste. El material del tapón deberá ser el mismo del cuerpo de la pesa y deberá cumplir los requisitos de la superficie de la clase E₂.

7.1.2.2 Después del ajuste inicial, aproximadamente 1/2 del volumen total de la cavidad de ajuste deberá estar vacío.

7.2 Pesas de clases F

Las pesas de clases F pueden constar de una o más piezas fabricadas de un mismo material.

7.2.1 Pesas de clases F desde 1 g hasta 50 kg

7.2.1.1 Las pesas de clases F desde 1 g hasta 50 kg pueden tener una cavidad de ajuste. El volumen de esta cavidad no deberá exceder de 1/4 del volumen total de la pesa. La cavidad se cierra por medio de una cabeza o cualquier otro dispositivo adecuado.

7.2.1.2 Después del ajuste inicial, aproximadamente 1/2 del volumen total de la cavidad de ajuste deberá estar vacío.

7.2.2 Pesas de clases F mayores de 50 kg

Las pesas de clases F mayores de 50 kg pueden constar también de una caja ensamblada de varias piezas, cerrada, soldada y hermética al aire y al agua. El contenido de la caja puede consistir en un material diferente al de la caja y deberá cumplir los requisitos de propiedades magnéticas de las clases F₁ y F₂. Las paredes de la caja deben ser suficientemente rígidas para que no puedan ocurrir deformaciones producidas por cambios en la presión de aire ambiental, manipulación, choques, etc. La razón entre la masa y el volumen deben cumplir los requisitos de densidad estipulados en la Tabla 5.

7.2.2.1 Las pesas de clases F mayores de 50 kg pueden tener una cavidad de ajuste. El volumen de esta cavidad no deberá exceder de 1/20 del volumen total de la pesa. La cavidad de ajuste deberá ser sellable y hermética al agua y al aire (por ej., por medio de una junta). Un tapón roscado con una ranura para destornillador o un dispositivo de manipulación tal como una perilla, un mango, un agujero, etc., se utilizará para cerrar la cavidad.

7.2.2.2 Después del ajuste inicial, aproximadamente 1/2 del volumen total de la cavidad de ajuste deberá estar vacío.

7.3 Pesas de clases M

7.3.1 Pesas de clases M₁, M₂ y M₃ desde 1 g hasta 50 kg

7.3.1.1 Las pesas de clases M₁, M₂ y M₃ desde 1 g hasta 10 g deben ser sólidas, sin cavidad de ajuste. En las pesas de clases M₁, M₂ y M₃ desde 20 g hasta 50 g, la cavidad de ajuste es opcional. Las pesas de clases M₁, M₂ y M₃ desde 100 g hasta 50 kg deben tener una cavidad de ajuste. Sin embargo, la cavidad de ajuste es opcional para las pesas de clases M₁ y M₂ desde 20 g hasta 200 g si están confeccionadas de acero inoxidable. La cavidad de ajuste deberá estar diseñada de un modo tal que evite la acumulación de materia extraña o suciedad, para permitir el cierre seguro de la cavidad y la apertura de ésta para ajustes adicionales. El volumen de la cavidad de ajuste no deberá ser mayor que 1/4 del volumen total de la pesa.

7.3.1.2 Después del ajuste inicial, aproximadamente 1/2 del volumen total de la cavidad de ajuste deberá estar vacío.

7.3.2 Las pesas de clases M₁, M₂ y M₃ desde 100 g hasta 50 kg de tipo cilíndrico (ver la Figura A.1) deben tener una cavidad de ajuste coaxial con el eje vertical de la pesa, que se abra sobre la cara superior de la cabeza y que incluya un ensanchamiento del diámetro a la entrada. La cavidad debe cerrarse con un tapón roscado provisto con una ranura para destornillador (ver la Figura A.1, variante 1) o por un disco provisto con un agujero central de manipulación (ver la Figura A.1, variante 3). El tapón o disco deberá estar confeccionado de latón o de otro material metálico apropiado y deberá sellarse con un tapón de plomo o de un material similar insertado en un surco circular interior provisto en la porción ensanchada del diámetro.

7.3.3 Las pesas de clases M₁, M₂ y M₃ desde 5 kg hasta 50 kg con la forma de un paralelepípedo rectangular deben tener una cavidad de ajuste formada por el interior del mango tubular, o, si el mango es sólido, la cavidad de ajuste deberá estar fundida dentro de uno de los laterales de la pesa, y abrirse por el costado o por la cara superior de la pesa (véanse las Figuras A.2 y A.3).

7.3.3.1 Si la cavidad de ajuste está situada en el mango tubular (ver la Figura A.2), la cavidad deberá cerrarse por un tapón roscado con una ranura para destornillador o por un disco provisto con un agujero central de manipulación. El tapón o disco deberá estar confeccionado de latón o de otro material metálico apropiado y deberá sellarse por un tapón de plomo (o de otro material similar) insertado en un surco circular interior o en la rosca del tubo.

7.3.3.2 Si la cavidad de ajuste está fundida dentro de uno de los laterales y se abre sobre el costado o la cara superior de este (ver la Figura A.3), la cavidad deberá cerrarse por una placa de acero suave o de otro material apropiado, sellada por un tapón de plomo o de otro material similar insertado en un alojamiento que tenga una sección cónica.

7.3.4 Pesas de clases M de 50 kg o mayores

Estas pesas no deben tener ninguna cavidad que pueda dar lugar a una acumulación rápida de polvo o suciedad.

7.3.4.1 Las pesas deben incluir una o más cavidades de ajuste. El volumen total de todas las cavidades de ajuste no deberá ser mayor que 1/10 del volumen total de la pesa. Las cavidades deben ser sellables y herméticas al agua y al aire (por ej., por medio de una junta). Las cavidades deben sellarse utilizando un tapón roscado con una ranura para destornillador o un dispositivo de manipulación (por ej., una perilla o un mango).

7.3.4.2 Después del ajuste inicial, por lo menos 1/3 del volumen total de la cavidad de ajuste deberá estar vacío.

8 MATERIAL

8.1 Generalidades

Las pesas deben ser resistentes a la corrosión. La calidad del material deberá ser tal que cualquier cambio en la masa de las pesas sea insignificante en relación con los errores máximos permitidos en su clase de exactitud (ver Tabla 1) en condiciones normales de uso para el objetivo al cual están destinadas.

8.2 Pesas de clases E₁ y E₂

8.2.1 Para las pesas de 1 g, o mayores, la dureza de estedal material y su resistencia al desgaste deben ser similares o mejores a las del acero inoxidable austenítico.

8.3 Pesas de clases F

La superficie de las pesas de clases F de 1 g o mayores puede tratarse con un recubrimiento metálico adecuado con el fin de mejorar su resistencia a la corrosión y su dureza.

8.3.1 Para las pesas de clases F de 1 g o mayores, la dureza y la fragilidad de los materiales empleados en su fabricación deben ser por lo menos tan buenas como las del latón estirado laminado.

8.3.2 Para las pesas de clases F de 50 kg o mayores, la dureza y la fragilidad de los materiales empleados para confeccionar la totalidad del cuerpo o las superficies externas deben ser iguales o aun mejores que las del acero inoxidable.

8.4 Pesas de clases M₁, M₂ y M₃ de 50 kg o menores

La superficie de las pesas de 1 g o mayores puede tratarse con un recubrimiento adecuado con el fin de mejorar su resistencia a la corrosión o su dureza.

8.4.1 Las pesas de clases M menores de 1 g deben estar confeccionadas de un material que sea suficientemente resistente a la corrosión y a la oxidación.

8.4.2 Las pesas cilíndricas de clase M₁ menores de 5 kg y las pesas de clases M₂ y M₃ menores de 100 g deben estar confeccionadas de latón o de un material cuya dureza y resistencia a la corrosión sean similares a las del latón o aun mejores. Otras pesas cilíndricas de las clases M₁, M₂ y M₃ de 50 kg o menores deben estar confeccionadas de hierro gris fundido o de otro material cuya fragilidad y resistencia a la corrosión sean similares o mejores que las del hierro gris fundido.

8.4.3 Las pesas con forma de paralelepípedo rectangular desde 5 kg hasta 50 kg deben estar confeccionadas de un material que tenga una resistencia a la corrosión que sea por lo menos igual a la del hierro gris fundido. Su fragilidad no deberá exceder a la del hierro gris fundido..

8.4.4 Los mangos de las pesas con forma de paralelepípedo rectangular deben estar confeccionados de tubo de acero sin costuras o deben ser de hierro fundido, integrales con el cuerpo de la pesa.

8.5 Pesas de clases M mayores de 50 kg

8.5.1 La superficie de las pesas puede tratarse con un recubrimiento adecuado con el fin de mejorar su resistencia a la corrosión. Este recubrimiento deberá resistir los choques y condiciones ambientales de exteriores.

8.5.2 Las pesas deben estar confeccionadas con uno o más materiales que tengan una resistencia a la corrosión igual a la del hierro gris fundido o aun mejor.

8.5.3 El material deberá ser de tal dureza y tenacidad que resista las cargas y los choques que ocurren en las condiciones normales de uso.

8.5.4 Los mangos de las pesas con forma de paralelepípedo rectangular deben estar confeccionados de tubo de acero sin costuras o deben ser hierro fundido, integrales con el cuerpo de la pesa.

9 MAGNETISMO

9.1 Límites de la polarización

La magnetización, M , expresada en términos de polarización, $\mu_0 M$, no deberá exceder los valores dados en la tabla 3.

Tabla 3 Polarización máxima $\mu_0 M$, (μT)

| Clases de pesas | E ₁ | E ₂ | F ₁ | F ₂ | M ₁ | M ₁₋₂ | M ₂ | M ₂₋₃ | M ₃ |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| Polarización máxima, $\mu_0 M$, (μT) | 2.5 | 8 | 25 | 80 | 250 | 500 | 800 | 1 600 | 2 500 |

9.2 Límites de la susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética de una pesa no debe exceder los valores dados en la tabla 4.

Tabla 4 Susceptibilidad máxima, χ

| Clase de pesas | E_1 | E_2 | F1 | F ₂ |
|--|-------|-------|-----|----------------|
| $m \leq 1 \text{ g}$ | 0.25 | 0.9 | 10 | - |
| $2 \text{ g} \leq m \leq 10 \text{ g}$ | 0.06 | 0.18 | 0.7 | 4 |
| $20 \text{ g} \leq m$ | 0.02 | 0.07 | 0.2 | 0.8 |

9.3 Si los valores de todas las mediciones locales de magnetización y susceptibilidad son inferiores a estos límites, entonces se puede asumir que las componentes de la incertidumbre debidos al magnetismo de la pesa son insignificantes. Los valores máximos de la magnetización remanente y de la susceptibilidad magnética que se dan en las tablas 3 y 4 son tales que, en presencia de los campos magnéticos y de los gradientes de campo magnético que posiblemente estén presentes en los platillos de la balanza, ellos producen un cambio de la masa convencional de menos de 1/10 del error máximo permisible del calibrando [8] [9].

10 DENSIDAD

10.1 Generalidades

La densidad de los materiales que se utilizan para la fabricación de las pesas se especifica en la tabla 5 y debe ser tal que una desviación de 10 % de la densidad del aire especificada (1.2 kg m^{-3}) no produzca un error que exceda de un cuarto del valor absoluto del error máximo permisible dado en la tabla 1.

Tabla 5 Límites mínimos y máximos de la densidad (ρ_{\min} , ρ_{\max})

| Valor nominal | ρ_{\min} , ρ_{\max} (10^3 kg m^{-3}) | | | | | | | |
|----------------------|---|-------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| | Clase de pesas (para la clase M ₃ no se especifica ningún valor) | | | | | | | |
| | E_1 | E_2 | F ₁ | F ₂ | M ₁ | M ₁₋₂ | M ₂ | M ₂₋₃ |
| $\geq 100 \text{ g}$ | 7.934 – 8.067 | 7.81 – 8.21 | 7.39 – 8.73 | 6.4 – 10.7 | ≥ 4.4 | > 3.0 | ≥ 2.3 | ≥ 1.5 |
| 50 g | 7.92 – 8.08 | 7.74 – 8.28 | 7.27 – 8.89 | 6.0 – 12.0 | ≥ 4.0 | | | |
| 20 g | 7.84 – 8.17 | 7.50 – 8.57 | 6.6 – 10.1 | 4.8 – 24.0 | ≥ 2.6 | | | |
| 10 g | 7.74 – 8.28 | 7.27 – 8.89 | 6.0 – 12.0 | ≥ 4.0 | ≥ 2.0 | | | |
| 5 g | 7.62 – 8.42 | 6.9 – 9.6 | 5.3 – 16.0 | ≥ 3.0 | | | | |
| 2 g | 7.27 – 8.89 | 6.0 – 12.0 | ≥ 4.0 | ≥ 2.0 | | | | |
| 1 g | 6.9 – 9.6 | 5.3 – 16.0 | ≥ 3.0 | | | | | |
| 500 mg | 6.3 – 10.9 | ≥ 4.4 | ≥ 2.2 | | | | | |
| 200 mg | 5.3 – 16.0 | ≥ 3.0 | | | | | | |
| 100 mg | ≥ 4.4 | | | | | | | |
| 50 mg | ≥ 3.4 | | | | | | | |
| 20 mg | ≥ 2.3 | | | | | | | |

Nota 1: Regla relativa a la densidad de las pesas. Sea $\delta m/m_0$ el valor del error relativo máximo permisible de las pesas. La densidad ρ de la pesa debe satisfacer las siguientes condiciones:

$$8\,000\text{ kg m}^{-3} \times \frac{1}{1+10^5\left(\frac{\delta m/m_0}{6}\right)} \leq \rho \leq 8\,000\text{ kg m}^{-3} \times \frac{1}{1-10^5\left(\frac{\delta m/m_0}{6}\right)} \quad \text{if } \delta m/m_0 < 6 \times 10^{-5} \quad (10.1-1)$$

$$8\,000\text{ kg m}^{-3} \times \frac{1}{1+10^5\left(\frac{\delta m/m_0}{6}\right)} \leq \rho \quad \text{if } \delta m/m_0 \geq 6 \times 10^{-5} \quad (10.1-2)$$

Nota 2: Independientemente de los requisitos relativos a la densidad de las pesas, es deseable obtener, particularmente para pesas de referencia o de un alto valor nominal, una densidad de $8\,000\text{ kg m}^{-3}$. Por ejemplo, se puede utilizar un cuerpo de hierro fundido que tenga incorporada una cavidad especial en la cual se puede fundir un núcleo de plomo, con una masa de aproximadamente el 30 % de la masa nominal total del patrón.

10.2 Correcciones por la desviación de la densidad del aire

10.2.1 Si la densidad del aire ρ_a se desvía de $\rho_0 = 1.2\text{ kg m}^{-3}$ en más de $\pm 10\%$ y la densidad del calibrando ρ_t se desvía de la densidad de la pesa de referencia ρ_r , la masa convencional puede corregirse por el término C como sigue:

$$m_{ct} = m_{cr} (1 + C) + \overline{\Delta m_c} \quad (10.2-1)$$

con:
$$C = (\rho_a - \rho_0) \left[\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_r} \right] \quad (10.2-2)$$

donde:

$\overline{\Delta m_c}$ es el promedio de las diferencias de pesada observada entre el calibrando y la pesa de referencia;

ρ_r es la densidad de la pesa de referencia; y

m_{ct} y m_{cr} son las masas convencionales del calibrando y de la pesa de referencia, respectivamente.

10.2.2 Pesas utilizadas para la calibración y la verificación de balanzas

La altitud y los cambios correspondientes en la densidad del aire pueden afectar el error de las mediciones cuando se utiliza la masa convencional de las pesas; por consiguiente, se debe utilizar la corrección por el empuje del aire, tomada de 10.2.1, la cual requiere el conocimiento de la densidad de la pesa. Si se utilizan pesas de clases E a una altura superior a 330 m, se debe especificar la densidad de las pesas junto con su incertidumbre asociada. Para las pesas de clase F₁, lo mismo es cierto por encima de 800 m. De otro modo, el fabricante debe tomar en consideración la reducción del efecto del empuje del aire a una mayor altitud cuando se especifica la clase de pesas para patrones en función de la masa convencional.

11 CONDICIONES DE LA SUPERFICIE

11.1 Generalidades

En las condiciones normales de uso, las cualidades de la superficie deben ser tales que cualquier alteración de la masa de las pesas sea insignificante con respecto al error máximo permisible.

11.1.1 La superficie de las pesas (incluyendo la base y las aristas) debe ser lisa y las aristas deben estar redondeadas.

11.1.2 La superficie de las pesas de clases E y F no debe ser porosa y debe presentar una apariencia lustrosa cuando se examina visualmente. Un examen visual puede ser suficiente excepto en caso de duda o disputa. En este caso, se deben utilizar los valores dados en la tabla 6. La rugosidad superficial máxima permitida para las pesas mayores de 50 kg será el doble de los valores especificados en la tabla 6.

Tabla 6 Valores máximos de la rugosidad superficial

| Clase | E ₁ | E ₂ | F ₁ | F ₂ |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| R _z (μm) | 0.5 | 1 | 2 | 5 |
| R _a (μm) | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 1 |

11.1.3 La superficie de las pesas cilíndricas de las clases M1, M2 y M3 desde 1 g hasta 50 kg debe ser lisa y no debe ser porosa cuando se examina visualmente. El acabado de las pesas fundidas de las clases M₁, M₂ y M₃ desde 100 g hasta 50 kg y todas las pesas de clases M mayores de 50 kg debe ser similar al de la fundición de hierro gris cuidadosamente fundida en un molde de arena fina. Esto se logra con la aplicación de métodos apropiados de protección de la superficie.

12 AJUSTE

Una pesa de un valor nominal dado debe ajustarse de un modo tal que la masa convencional del resultado de pesar esta pesa en aire sea igual al valor nominal dado, dentro de los límites de los errores máximos permisibles fijados para la clase de exactitud a la cual pertenece la pesa. Se deben aplicar los requisitos de incertidumbre estipulados en 5.3.1.

12.1 Pesas de clases E

Las pesas debe ajustarse por abrasión, esmerilado o cualquier otro método apropiado. Se deben cumplir los requisitos de la superficie al final del proceso. Las pesas mayores de 50 kg con cavidad de ajuste pueden ajustarse con el mismo material del cual se confeccionaron.

12.2 Pesas de clases F

Las pesas sólidas deben ajustarse por abrasión, esmerilado o por cualquier otro método apropiado que no altere la superficie. Las pesas con cavidad de ajuste deben ajustarse con el mismo material del cual se confeccionaron o con acero inoxidable, latón, estaño, molibdeno o tungsteno.

12.3 Pesas de clases M

12.3.1 Las pesas en forma de láminas planas o alambre desde 1 mg hasta 1 g deben ajustarse por corte, abrasión o esmerilado.

12.3.2 Las pesas cilíndricas que no tienen cavidades deben ajustarse por esmerilado.

12.3.3 Las pesas que tienen cavidad de ajuste deben ajustarse añadiendo o quitando material metálico denso, tal como granalla de plomo. Si no puede eliminarse más material, se pueden ajustar por esmerilado.

12.4 Condiciones de referencia

Las condiciones de referencia aplicables al ajuste de pesas patrones son como sigue:

- Densidad de referencia estándar: 8 000 kg m⁻³;
- Densidad del aire ambiental: 1.2 kg m⁻³; y
- Equilibrio en aire a 20 °C, sin corrección por el empuje del aire.

13 MARCADO

13.1 Generalidades

Con excepción de las pesas de clases E y de las pesas de 1 g descritas en 6.2.2, las pesas de 1 g y sus múltiplos deben marcarse claramente para indicar su valor nominal, a condición de que la calidad y la estabilidad de la superficie de la pesa no se afecten por las marcas ni por el proceso aplicado para marcar la pesa.

13.1.1 Los cifras que indican los valores nominales de la masa de las pesas deben representar:

- kilogramo, para masas de 1 kg y superiores; o
- gramo, para masas desde 1 g hasta 500 g.

13.1.2 Las pesas duplicadas o triplicadas en un juego deben distinguirse claramente por uno o dos asteriscos o puntos situados sobre el centro de la superficie, excepto las pesas de alambre, las cuales deben distinguirse por uno o dos dobleces.

13.2 Pesas de clases E

En el caso de las pesas de clases E, la clase se indica sobre la cubierta del estuche (ver 14.1). Las pesas de clases E no deben marcarse a menos que las marcas sean necesarias para distinguir dos pesas de clases E entre sí y a condición de que la calidad y la estabilidad de la superficie de la pesa no se afecten por las marcas ni por el proceso aplicado para marcarlas. Los números máximos de marcas de usuario se dan en la tabla 7.

Las pesas de clase E₂ puede llevar un punto excéntrico sobre la superficie superior para distinguirlas de las pesas de clase E₁.

13.3 Pesas de clases F

Las pesas de 1 g o mayores deben llevar, bruñida o grabada, la indicación de su valor nominal expresado de acuerdo con 13.1 (no seguida por el nombre o símbolo de la unidad).

13.3.1 Las pesas de clase F₁ no deben llevar ninguna referencia de clase.

13.3.2 Las pesas de clase F₂ de 1 g o mayores deben llevar la referencia de clase en la forma de una letra “F” junto a la indicación de su valor nominal.

13.4 Pesas de clases M₁, M₂ y M₃

13.4.1 Las pesas rectangulares desde 5 kg hasta 5 000 kg deben llevar el valor nominal de la pesa, seguido por el símbolo “kg” en hueco o en relieve sobre el cuerpo de la pesa, como se muestra en las Figuras A.2 y A.3.

13.4.2 Las pesas cilíndricas desde 1 g hasta 5 000 kg deben indicar el valor nominal de la pesa, seguido por el símbolo “g” o “kg”, en impresión hueca o en relieve sobre la cabeza, como se muestra en la Figura A.1. En las pesas cilíndricas desde 500 g hasta 5 000 kg la indicación puede reproducirse sobre la superficie cilíndrica del cuerpo de la pesa.

13.4.3 Las pesas de clase M₁ deben llevar el signo “M₁” o “M”, en impresión hueca o en relieve, junto con la indicación del valor nominal en la posición que se muestra en las Figuras A.2 y A.3. Las pesas M₁ de forma rectangular pueden llevar la marca del fabricante en impresión hueca o en relieve sobre la porción central de las pesas, como se muestra las en Figuras A.2 y A.3.

13.4.4 Las pesas rectangulares de la clase M_2 deben llevar una indicación del valor nominal, y pueden llevar también el signo “ M_2 ” en impresión hueca o en relieve como se muestra en las Figuras A.2 y A.3.

13.4.5 Las pesas rectangulares de la clase M_3 deben llevar el signo “ M_3 ” o “X”, en impresión hueca o en relieve, junto con la indicación del valor nominal en la posición que se muestra en las Figuras A.2 y A.3.

13.4.6 Las pesas de clases M_2 y M_3 (excepto las pesas de alambre) pueden llevar la marca del fabricante en impresión hueca o en relieve:

- Sobre la porción central de las pesas rectangulares;
- Sobre la cara superior de la cabeza de las pesas cilíndricas; o
- Sobre la cara superior del cilindro, en el caso de las pesas cilíndricas de la clase M_3 provistas con un mango, como se muestra en las Figuras A.1, A.2 y A.3.

13.4.7 Pesas de clase M_3 de 50 kg o mayores

La pesa debe llevar el valor nominal en cifras seguido por el símbolo de la unidad.

13.5 Pesas de clases M_{1-2} y M_{2-3}

Las pesas de clase M_{1-2} deben llevar el signo “ M_{1-2} ” y las de la clase M_{2-3} debe llevar el signo “ M_{2-3} ” en impresión hueca o en relieve, junto con el valor nominal seguido por el símbolo “kg”. Las pesas de clases M_{1-2} y M_{2-3} pueden llevar la marca del fabricante en impresión hueca o en relieve sobre la cara superior de la superficie con un tamaño similar al que se muestra en las Figuras A.1, A.2 ó A.3 para otras pesas de clases M.

13.6 Marcas del usuario

Una buena práctica de usuario es identificar claramente las pesas individuales, ya que esto ayuda a vincular cada pesa a su certificado de calibración o documento de verificación. Los valores máximos aceptables de las marcas de usuario se dan en la tabla 7.

Tabla 7 Número máximo de marcas de usuario

| Clase | Valor nominal | Altura de las letras | Número máximo de signos, cifras o letras |
|--|----------------------|-----------------------------|---|
| E, F, M_1 y M_2 | < 1 g | 1 mm | 2 |
| E_1 | ≥ 1 g | 2 mm | 3 |
| E_2 | ≥ 1 g | 3 mm | 5 |
| F_1 hasta M_2 | 1 g hasta 100 g | 3 mm | 5 |
| F_1 hasta M_2 | 200 g hasta 10 kg | 5 mm | 5 |
| F_1 hasta M_2 | ≥ 20 kg | 7 mm | 5 |

Las marcas de usuario consistirán en signos, números o letras tales que no haya lugar para confusión con ninguna indicación del valor nominal ni la clase.

14 PRESENTACIÓN

14.1 Generalidades

Con excepción de las pesas de clases M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} y M_3 , las pesas deben presentarse de acuerdo con los siguientes requisitos.

14.1.1 La tapa del estuche que contiene las pesas debe marcarse para indicar sus clase en la forma “ E_1 ”, “ E_2 ”, “ F_1 ”, “ F_2 ” o “ M_1 ”.

14.1.2 Las pesas pertenecientes a un mismo juego deben ser de la misma clase de exactitud.

14.2 Clases de pesas E y F

14.2.1 Las pesas individuales y los juegos de pesas deben estar protegidos contra deterioro o daños causados por choques o vibraciones. Deben conservarse en estuches confeccionados de madera, plástico o de cualquier otro material adecuado, con cavidades individuales.

14.2.2 Los medios de manipulación de las pesas de clases E y F deben ser de una construcción tal que no ocasionen rasguños ni alteraciones en la superficie de la pesa.

14.3 Pesas de clase M₁

14.3.1 Las pesas cilíndricas de la clase M₁ hasta 500 g inclusive (individuales o en juegos) deben contenerse en un estuche que tenga cavidades individuales.

14.3.2 Las pesas con forma de lámina fina o de alambre estarán contenidas en estuches que tengan cavidades individuales; el estuche debe llevar la referencia a la clase (M₁) sobre la cubierta.


Controles metrológicos

15 SOMETIMIENTO A LOS CONTROLES METROLÓGICOS

En un país donde las pesas están sometidas a los controles metrológicos del estado, estos controles pueden, en dependencia de la legislación nacional, comprender uno o más de los siguientes: aprobación de modelo, calibración, recalibración, verificación, verificación inicial y verificación posterior. La tabla 8 ofrece una guía para determinar cuáles ensayos deben realizarse durante cada etapa de la evaluación.

Tabla 8 Guía para determinar los ensayos requeridos para la aprobación de modelo y los ensayos recomendados para la verificación inicial y las verificaciones posteriores

| Prueba | Densidad ρ | | | Rugosidad superficial | | | Susceptibilidad magnética χ | | | Magnetización remanente M | | | Masa convencional m_0 | | |
|-----------|--------------------|---|---|--------------------------|---|---|--|---|---|-----------------------------------|---|---|-------------------------------|---|---|
| | E | F | M | E | F | M | E | F | M | E | F | M | E | F | M |
| TA | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| IV | ✓+ | | | V | V | V | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| SV | | | | V | V | V | | | | * | * | * | ✓ | ✓ | ✓ |

- Leyenda:
- TA Aprobación de un modelo.
 - IV Verificación inicial que se realiza cuando la pesa se pone en servicio por primera vez.
 - SV Verificación posterior o periódica.
 -  Ensayo no aplicable.
 - V Inspección visual solamente.
 - ✓ Ensayo requerido.
 - * En caso de duda, la magnetización remanente de una pesa puede probarse durante una verificación posterior.
 - + Se aplica solamente a la clase E₁, no a la E₂.

15.1 Aprobación de modelo

15.1.1 Cada fabricante o representante autorizado puede presentar un modelo o tipo de pesas propuestas para su fabricación al organismo responsable de comprobar que el modelo o tipo está en conformidad con los requisitos reglamentarios. Los procedimientos obligatorios para efectuar los ensayos se dan en los Anexos B y C de esta Recomendación. Para la aprobación del modelo es obligatorio utilizar el registro de ensayo R 111-2. La tabla 8 indica los ensayos obligatorios para la aprobación de modelo.

15.1.2 Un modelo o tipo aprobado no debe modificarse sin una autorización especial una vez que se ha recibido la aprobación del modelo (ver OIML B 3 *OIML Sistema de Certificación para los Instrumentos de Medición*).

15.2 Calibración y verificación

La calibración y la verificación de las pesas o de los juegos de pesas debe ser una responsabilidad del organismo nacional responsable o del usuario en dependencia de la legislación nacional y del uso al cual están destinadas las pesas. Los certificados de calibración y verificación deben ser emitidos solamente por laboratorios autorizados o acreditados. Se deberá mantener la trazabilidad a patrones nacionales o internacionales.

15.2.1 Certificados de calibración y verificación

El certificado de calibración o verificación debe establecer como mínimo: la masa convencional de cada pesa, m_c , una indicación de si la pesa ha sido ajustada antes de la calibración, su incertidumbre expandida U , y el valor del factor de cobertura k .

15.2.2 Las pesas de clases E deben acompañarse de un certificado de calibración.

15.2.2.1 El certificado de las pesas de clase E_1 debe indicar como mínimo los valores de la masa convencional m_c , de la incertidumbre expandida U y del factor de cobertura k , así como la densidad o el volumen de cada pesa. Además, el certificado debe indicar si la densidad o el volumen fueron medidos o estimados.

15.2.2.2 El certificado de las pesas de clase E_2 debe establecer, como mínimo, la siguiente información:

- a) Los valores de la masa convencional m_c de cada pesa, la incertidumbre expandida U y el factor de cobertura k ; o
- b) La información requerida en los certificados de calibración de las pesas de clase E_1 (en las condiciones estipuladas en 1.3.1.a).

15.3 Recalibración, verificación inicial y verificaciones posteriores

15.3.1 La tabla 8 indica los ensayos recomendados para la verificación inicial y las verificaciones posteriores. Las categorías de las pesas que se someten a calibración o verificación inicial deben también someterse a recalibración o verificación posterior, lo que hace posible verificar si han mantenido sus propiedades metrológicas. Si al momento de la recalibración o verificación posterior se encuentran pesas defectuosas, éstas deben desecharse o reajustarse.

15.3.2 En la verificación posterior, como mínimo, las pesas deben inspeccionarse visualmente para determinar las condiciones del diseño y de la superficie y para revisar la masa contra su certificado y contra el Certificado de Conformidad OIML.

16 MARCAS DE CONTROL

16.1 Generalidades

Las pesas con un certificado de calibración no requieren marcas de control.

16.2 Pesas de clases E

16.2.1 Se pueden fijar marcas de control al estuche.

16.2.2 Las autoridades metrológicas (por ej., los servicios o laboratorios de calibración acreditados) deben emitir un certificado de calibración por cada pesa o juego de pesas.

16.3 Pesas de clases F

16.3.1 Pesas de clase F₁

Si las pesas están sometidas a controles metrológicos, las marcas de estos controles deben fijarse sobre el estuche que contiene las pesas.

16.3.2 Pesas de clase F₂

En el caso de las pesas cilíndricas F₂ sometidas a controles metrológicos, las marcas de control apropiadas deben colocarse en el sello de la cavidad de ajuste. En el caso de las pesas que no tienen cavidad de ajuste, las marcas de control deben fijarse a su base o al estuche que contiene las pesas.

16.4 Pesas de clases M

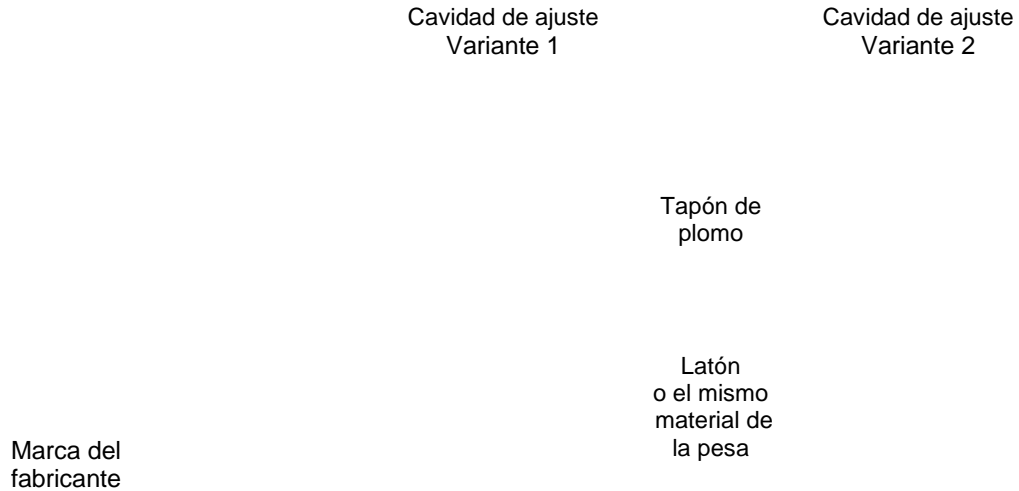
16.4.1 En el caso de las pesas de clases M₁, M₂ y M₃ sometidas a controles metrológicos, las marcas de control apropiadas deben colocarse en el sello de la cavidad de ajuste. En el caso de las pesas que no tienen cavidad de ajuste, las marcas de control deben fijarse a su base.

16.4.2 En el caso de las pesas de chapa fina y alambre de la clase M₁ sometidas a controles metrológicos, se deben fijar marcas de control apropiadas al estuche.

Anexo A

Ejemplos de diferentes formas y dimensiones

Figura A.1 Ejemplos de pesas cilíndricas



Anexo A. Ejemplos de diferentes formas y dimensiones
A.1 Tabla de dimensiones (en milímetros)

| Valor nominal | D ₁ | D ₂ | D ₃ | H | R ₁ | R ₂ | R ₃ | o | a ₁ | a ₂ | b _⊙ | c | d | e | f | g | h | l | m | n | q | t |
|---------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|------|-------------------------|----------------|----------------|-----|------|-----|-----|----|----|-----|----|-----|-----------|---|
| 1g | 6 | 5,5 | 3 | DEPENDENCIA DEL MATERIAL | 0,9 | 0,5 | 0,5 | 1 | } Sin cavidad de ajuste | | | | | | | | | | | | | |
| 2 g | 6 | 5,5 | 3 | | 0,9 | 0,5 | 0,5 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 g | 8 | 7 | 4,5 | | 1,25 | 0,7 | 0,5 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 g | 10 | 9 | 6 | | 1,5 | 0,8 | 0,5 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 g | 13 | 11,5 | 7,5 | | 1,8 | 1 | 0,5 | 1,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 g | 18 | 16 | 10 | | 2,5 | 1,5 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 g | 13 | 11,5 | 7,5 | 1,8 | 1 | 0,5 | 1,5 | 3,5 | 3 | 18 | 5,5 | 2,5 | 6,5 | 1,5 | 1 | 9 | 5 | 1 | 5 | 1 | M4 x 0,5 | |
| 50 g | 18 | 16 | 10 | 2,5 | 1,5 | 1 | 2 | 5,5 | 4,5 | 25 | 7,5 | 3,5 | 9 | 2 | 1 | 10 | 5 | 1,5 | 7 | 1,5 | M6 x 0,5 | |
| 100 g | 22 | 20 | 13 | 3,5 | 2 | 1 | 2 | 5,5 | 4,5 | 30 | 7,5 | 3,5 | 9 | 2 | 1 | 10 | 5 | 1,5 | 7 | 1,5 | M6 x 0,5 | |
| 200 g | 28 | 25 | 16 | 4 | 2,25 | 1,5 | 3,2 | 6,9 | 7 | 40 | 10,5 | 4,5 | 12 | 2,5 | 1,5 | 15 | 8 | 2 | 10 | 2 | M8 x 1 | |
| 500 g | 38 | 34 | 22 | 5,5 | 3 | 1,5 | 3,2 | 6,9 | 7 | 50 | 10,5 | 4,5 | 12 | 2,5 | 1,5 | 15 | 8 | 2 | 10 | 2 | M8 x 1 | |
| 1kg | 48 | 43 | 27 | 7 | 4 | 2 | 5 | 12,4 | 12 | 65 | 18,5 | 7 | 20 | 4 | 2,5 | 20 | 13 | 3 | 18 | 3 | M14 x 1,5 | |
| 2 kg | 60 | 54 | 36 | 9 | 5 | 2 | 5 | 12,4 | 12 | 80 | 18,5 | 7 | 20 | 4 | 2,5 | 20 | 13 | 3 | 18 | 3 | M14 x 1,5 | |
| 5 kg | 80 | 72 | 46 | 12 | 6,5 | 2 | 10 | 18,4 | 18 | 120 | 24,5 | 8 | 26,5 | 4 | 2,5 | 35 | 18 | 4 | 24 | 3 | M20 x 1,5 | |
| 10 kg | 100 | 90 | 58 | 15 | 8,5 | 3 | 10 | 18,4 | 18 | 160 | 24,5 | 8 | 26,5 | 4 | 2,5 | 35 | 18 | 4 | 24 | 3 | M20 x 1,5 | |
| 20 kg | 128 | 112 | 74 | 18 | 11 | 3 | 10 | 18,4 | 18 | 160 | 24,5 | 8 | 26,5 | 4 | 2,5 | 35 | 18 | 4 | 24 | 3 | M20 x 1,5 | |

Figura A.2 Ejemplos de pesas en forma de barra rectangular (Modelo 1)

Tapón de plomo

Variante 1
Cavidad de ajuste

Variante 2
Cavidad de ajuste

Variante 3
Cavidad de ajuste

Todas las aristas redondeadas

Marca del fabricante
Nota: Las marcas pueden situarse sobre la superficie superior o sobre el costado de la pesa

Mango tubular

Tabla de dimensiones (en milímetros)

| Valor nominal | A ₁ | A ₂ | B ₁ | B ₂ | H | a | b | c | d ₁ | d ₂ | e | f | g | h | l | m | n | o | r | s | t | u |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|----|----|----|----------------|----------------|---|----|---|-----|-----|---|----|----|----|------|---------|----|
| 5 kg | 150 | 152 | 75 | 77 | 84 | 36 | 30 | 6 | 12 | 19 | 1 | 14 | 2 | 66 | 145 | 5 | 16 | 12 | 5 | 16,5 | M16x1,5 | 18 |
| 10 kg | 190 | 193 | 95 | 97 | 109 | 46 | 38 | 8 | 12 | 25 | 1 | 14 | 2 | 84 | 185 | 5 | 16 | 16 | 6 | 16,5 | M16x1,5 | 18 |
| 20 kg | 230 | 234 | 115 | 117 | 139 | 61 | 52 | 12 | 24 | 29 | 2 | 21 | 3 | 109 | 220 | 8 | 27 | 20 | 8 | 27,5 | M27x1,5 | 30 |
| 50 kg | 310 | 314 | 155 | 157 | 192 | 83 | 74 | 16 | 24 | 40 | 2 | 21 | 3 | 152 | 300 | 8 | 27 | 25 | 10 | 27,5 | M27x1,5 | 30 |

Las dimensiones A y A' así como B y B' pueden invertirse recíprocamente

Figura A.3 Ejemplos de pesas en forma de barra rectangular (Modelo 2)

Cavidad de
ajusteTodas las aristas
redondeadasTapón de
plomo

Marca del fabricante

Nota: Las marcas pueden situarse sobre la superficie superior
o sobre el costado de la pesaPequeña lámina de
acero suaveNota: La cavidad de ajuste se muestra
aquí sobre la superficie superior. La
cavidad de ajuste también puede estar
situada sobre el costado de la pesa.

Tabla de dimensiones (en milímetros)

| Valor nominal | A ₁ | A ₂ | B ₁ | B ₂ | H | a | b | c | d | h | m | n | o | p | r |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|
| 5 kg | 150 | 152 | 75 | 77 | 84 | 36 | 30 | 6 | 19 | 66 | 16 | 13 | 12 | 55 | 5 |
| 10 kg | 190 | 193 | 95 | 97 | 109 | 46 | 38 | 8 | 25 | 84 | 35 | 25 | 16 | 70 | 6 |
| 20 kg | 230 | 234 | 115 | 117 | 139 | 61 | 52 | 12 | 29 | 109 | 50 | 30 | 20 | 95 | 8 |
| 50 kg | 310 | 314 | 155 | 157 | 192 | 83 | 74 | 16 | 40 | 152 | 70 | 40 | 25 | 148 | 10 |

Las dimensiones A y A' así como B y B' pueden invertirse recíprocamente.

Las dimensiones interiores m, n, p de las cavidades de ajuste se dan solamente como indicación.

Anexo B

Procedimientos para los ensayos de las pesas (Obligatorio)

B.1 Introducción

Este Anexo presenta métodos aceptados para determinar propiedades seleccionadas de las pesas. Estos métodos se aplican a pesas individuales y a juegos de pesas.

B.1.1 Los informes de los ensayos deben indicar claramente el método por el cual se realizó cada ensayo. Los métodos contenidos en este Anexo pueden citarse por sus respectivos números de sección. Si se utilizan otros métodos, su validez debe fundamentarse con documentos.

B.1.2 El término “masa convencional” se utiliza a través de todo este documento, excepto en la sección de la densidad, donde se utiliza el término “masa real” (ver 2.6).

B.2 Secuencia de los ensayos

Las evaluaciones preliminares y los ensayos se realizan en el siguiente orden (en lo que corresponda):

- a) Revisión de documentos e inspección visual según la lista de revisión (ver R 111-2 *Reporte de ensayo*);
- b) Limpieza de las pesas (B.4);
- c) Rugosidad superficial (B.5);
- d) Magnetismo (B.6);
- e) Densidad (B.7);
Nota: Es necesario repetir la limpieza después de medir la densidad si el líquido utilizado para esta determinación no es agua (otros líquidos que se utilizan típicamente [por ej., los compuestos fluorocarbonados] dejan un residuo que debe ser eliminado mediante una limpieza con un solvente tal como alcohol).
- f) Medición de la masa convencional (Anexo C).

B.3 Revisión de documentos e inspección visual

B.3.1 Examen administrativo

Revisar, en conformidad con 15.1, la documentación presentada, incluyendo fotografías necesarias, dibujos, especificaciones técnicas pertinentes, etc., para determinar si la documentación es adecuada y correcta.

B.3.2 Comparar la construcción con la documentación

Examinar la apariencia física de la pesa y el estuche de las pesas para comprobar su conformidad con la documentación (según los párrafos 6, 7, 8, 14 y 15.1 de esta Recomendación).

B.3.3 Examen inicial

B.3.3.1 Características metrológicas

Anotar las características metrológicas en conformidad con R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*.

B.3.3.2 Marcas (en conformidad con los párrafos 13 y 16 de esta Recomendación).

Revisar las marcas en conformidad con R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*.

B.4 Limpieza de las pesas

B.4.1 Es importante limpiar las pesas antes de realizar cualquier medición porque el proceso de limpieza puede provocar una variación de la masa de la pesa. La limpieza no debe eliminar cantidades significativas de material de la pesa. Las pesas deben manipularse y conservarse de un modo tal que permanezcan limpias. Antes de la calibración se debe eliminar el polvo y cualquier partícula extraña que esté presente en las pesas. Se debe tener sumo cuidado de no variar las propiedades de la superficie de la pesa (por ej., no causar rasguños a la pesa).

Si una pesa contiene cantidades significativas de suciedad que no se pueden eliminar por los métodos citados anteriormente, la pesa o una parte de ella puede lavarse con alcohol limpio, agua destilada u otro solvente. Las pesas que tienen cavidades internas no deben normalmente sumergirse en el solvente para evitar la posibilidad de que el líquido penetre en la abertura. Si hubiere necesidad de monitorear la estabilidad de una pesa en uso, la masa de la pesa puede determinarse antes de la limpieza.

B.4.2 Después de limpiar las pesas con solventes, las mismas deben estabilizarse durante los tiempos que se indican en la Tabla B.1.

Tabla B.1 Tiempo de estabilización después de la limpieza

| Clase de pesas | E ₁ | E ₂ | F ₁ | F ₂ hasta M ₃ |
|---|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|
| Después de la limpieza con alcohol | 7–10 días | 3–6 días | 1–2 días | 1 hora |
| Después de la limpieza con agua destilada | 4–6 días | 2–3 días | 1 día | 1 hora |

B.4.3 Estabilización térmica

Antes de efectuar cualquier ensayo, las pesas deben aclimatarse a las condiciones ambientales del laboratorio. En particular, las pesas de clases E₁, E₂ y F₁ deben alcanzar una temperatura próxima a la del área de pesar.

B.4.3.1 Los tiempos mínimos obligatorios requeridos para la estabilización de la temperatura (en dependencia del tamaño de la pesa, la clase de la pesa y la diferencia entre la temperatura inicial de las pesas y la temperatura ambiental del laboratorio) se muestran en la Tabla B.2. A modo de guía práctica, se recomienda un tiempo de espera de 24 horas.

Tabla B.2 [11] Tiempo de estabilización térmica en horas

| ΔT^* | Valor nominal | Clase E1 | Calas E2 | Clase F1 | Clase F2 |
|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| ± 20 °C | 1 000, 2 000, 5 000 kg | - | - | 79 | 5 |
| | 100, 200, 500 kg | - | 70 | 33 | 4 |
| | 10, 20, 50 kg | 45 | 27 | 12 | 3 |
| | 1, 2, 5 kg | 18 | 12 | 6 | 2 |
| | 100, 200, 500 g | 8 | 5 | 3 | 1 |
| | 10, 20, 50 g | 2 | 2 | 1 | 1 |
| | < 10 | | 1 | | 0.5 |
| ± 5 °C | 1 000, 2 000, 5 000 kg | - | - | 1 | 1 |
| | 100, 200, 500 kg | - | 40 | 2 | 1 |
| | 10, 20, 50 kg | 36 | 18 | 4 | 1 |
| | 1, 2, 5 kg | 15 | 8 | 3 | 1 |
| | 100, 200, 500 g | 6 | 4 | 2 | 0.5 |
| | 10, 20, 50 g | 2 | 1 | 1 | 0.5 |
| | < 10 g | | 0.5 | | |

| ΔT^* | Valor nominal | Clase E ₁ | Clase E ₂ | Clase F ₁ | Clase F ₂ |
|--------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| ± 2 °C | 1 000, 2 000, 5 000 kg | - | - | 1 | 0.5 |
| | 100, 200, 500 kg | - | 16 | 1 | 0.5 |
| | 10, 20, 50 kg | 27 | 10 | 1 | 0.5 |
| | 1, 2, 5 kg | 12 | 5 | 1 | 0.5 |
| | 100, 200, 500 g | 5 | 3 | 1 | 0.5 |
| | < 100 g | 2 | 1 | | 0.5 |
| ± 0.5 °C | 1 000, 2 000, 5 000 kg | - | - | - | - |
| | 100, 200, 500 kg | - | 1 | 0.5 | 0.5 |
| | 10, 20, 50 kg | 11 | 1 | 0.5 | 0.5 |
| | 1, 2, 5 kg | 7 | 1 | 0.5 | 0.5 |
| | 100, 200, 500 g | 3 | 1 | 0.5 | 0.5 |
| | < 100 g | 1 | 0.5 | | |

* ΔT = Diferencia inicial entre la temperatura de la pesa y la temperatura del laboratorio.

B.5 Rugosidad superficial

B.5.1 Introducción

La estabilidad de la masa de una pesa depende en alto grado de la estructura superficial de la pesa. Se considera que una pesa que tiene una superficie lisa debe ser más estable que una pesa que tiene una superficie rugosa, si las demás condiciones son iguales. Es importante que la superficie de la pesa esté limpia en el momento de evaluar su rugosidad superficial.

B.5.1.1 En el caso de las pesas nuevas que no tienen rasguños visibles, la rugosidad superficial puede cuantificarse de un modo bien definido. En caso de que la superficie tenga muchos rasguños, esto resulta más difícil. En la metrología dimensional, la rugosidad superficial se distingue claramente de los defectos superficiales, tales como los rasguños. Sin embargo, los rasguños acumulan suciedad si la pesa se expone a ésta, por consiguiente, la cantidad de rasguños debe evaluarse en paralelo con la rugosidad de la parte no arañada de la superficie. La evaluación de la rugosidad superficial se aplica solamente a las pesas de clases E y F de valor nominal mayor que, o igual a 1 g.

B.5.2 Evaluación general

La evaluación de la rugosidad de una pesa se realiza primeramente por inspección visual. Sin embargo, en el caso de las pesas de clases E y F, la evaluación debe realizarse también con una muestra patrón de rugosidad o espécimen de comparación (CS), utilizando un instrumento de contacto (rugosímetro o perfilómetro) (SI) u otro instrumento convencional.

Advertencia: El uso de un instrumento de contacto puede dañar o arañar la superficie de la pesa.

La rugosidad de una superficie puede caracterizarse por diversos parámetros de rugosidad. Cada parámetro describe una característica particular de la superficie que es importante para una función específica de la superficie.

B.5.2.1 Especimen de comparación (método CS)

Si no se necesita el valor de la rugosidad superficial, sino solamente que esta sea conforme con cierta especificación, la superficie puede compararse visualmente con un espécimen de comparación de rugosidad. Dicho espécimen consiste en un conjunto ordenado de secciones de superficies de rugosidad especificada creciente. El espécimen se considera certificado si ha sido calibrado por un laboratorio acreditado y está acompañado de un certificado. La certificación debe incluir el parámetro de rugosidad R_z o R_a . La superficie del espécimen de comparación debe tener una huella similar y debe haber sido producida por

métodos de maquinado similares a los empleados para producir la superficie de las pesas. Como las pesas tienen superficies planas así como cilíndricas, es necesario utilizar dos juegos de especímenes, uno con superficies planas y otro con superficies cilíndricas.

B.5.2.2 Instrumento de contacto (método SI)

Un instrumento de contacto convencionalmente mide rugosidad superficial. Con este instrumento, un palpador afilado se desliza muy suavemente a lo largo de una línea sobre la superficie, y el movimiento vertical del palpador se registra como una función de la posición a lo largo de la línea. De este modo se registra un perfil de la superficie.

Advertencia: El uso del instrumento de contacto puede dañar o arañar la superficie de la pesa.

B.5.2.3 Otros instrumentos

Además de los instrumentos tradicionales, también existen otros instrumentos para medir la rugosidad, por ejemplo, mediante la medición de la dispersión de la luz [12].

B.5.3 Procedimientos para el ensayo

B.5.3.1 Inspección visual (pesas de clases E, F y M)

B.5.3.1.1 Equipamiento

- a) Un local bien iluminado;
- b) Guantes de laboratorio;
- c) Paños sin hilachas.

B.5.3.1.2 Procedimiento de medición

B.5.3.1.2.1 Pesas nuevas

- a) Para todas las clases, inspeccionar visualmente la superficie de la pesa:
 - 1) Anotar la presencia de “picaduras” o abolladuras en su superficie, o arañazos profundos;
 - 2) Las superficies deben ser lisas (ver 11.1.1);
 - 3) Las aristas deben estar redondeadas;
 - 4) En el caso de las pesas comprendidas entre 1 g y 10 kg, la superficie de la pesa no debe ser porosa.
- b) Para las pesas de clases E y F, inspeccionar visualmente la superficie de la pesa:
 - 1) Las superficies no deben ser porosas (ver 11.1.2);
 - 2) Las superficies deben ser lustrosas.
- c) En el caso de las pesas cilíndricas de las clases M comprendidas entre 1 g y 50 kg, la superficie de la pesa debe ser lisa y no porosa.
- d) En el caso de las pesas rectangulares de las clases M (5 kg, 10 kg, 20 kg y 50 kg), el acabado de la superficie debe ser como el de la fundición de hierro gris (11.1.3).
- e) En el caso de las pesas de clase M₃ de 50 kg o mayores, la superficie puede estar recubierta con materiales apropiados para proporcionar protección contra la corrosión mediante la impermeabilización de la superficie. Este recubrimiento debe ser resistente a los choques y a las condiciones atmosféricas (8.5.1).

B.5.3.1.2.2 Pesas en uso

Además de lo estipulado en B.5.3.1.2.1, inspeccione la superficie de la pesa para determinar huellas del uso de la manera siguiente.

Inspeccione visualmente la superficie de la pesa. Las pesas en uso tienen normalmente arañazos, particularmente en la superficie del fondo:

- 1) Si el número y la profundidad de los arañazos es compatible con la estabilidad adecuada de la pesa, ésta puede ser aceptada;
- 2) Durante la evaluación de la rugosidad superficial, no se deben tomar en consideración los arañazos individuales ni otros defectos; o
- 3) Si los arañazos son demasiado numerosos para evaluar la rugosidad superficial, no se debe aceptar la pesa.

B.5.3.1.3 Información de los resultados

Los resultados de la evaluación se informan en el formulario R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*, indicando “inspección visual” como el método de evaluación.

B.5.3.2 Espécimen de comparación de rugosidad (método CS) (pesas de clases E y F)

La rugosidad de la superficie puede compararse visualmente contra especímenes de comparación de rugosidad.

B.5.3.2.1 Base material

- a) Un espécimen de comparación de rugosidad, certificado y limpio (ver B.5.2.1);
- b) Un local bien iluminado;
- c) Guantes de laboratorio;
- d) Paños sin hilachas.

B.5.3.2.2 Procedimiento de medición

- a) Limpiar la superficie del espécimen de comparación con un paño limpio y sin hilachas humedecido in alcohol. Si la superficie de la pesa no parece estar limpia, debe limpiarse también.
Nota: La limpieza puede cambiar significativamente la masa de la pesa. Ver B.4 para la limpieza de las pesas.
- b) Sostenga la pesa contra una sección del espécimen de comparación, manteniendo paralelos los huellas de ambas superficies.
- c) Observe simultáneamente ambas superficies desde distintos ángulos.
- d) Estime si la rugosidad de la pesa parece ser menor o mayor que una de las secciones del espécimen de comparación de rugosidad.
- e) Repita este procedimiento con diferentes muestras del espécimen de comparación y determine el límite superior.

B.5.3.2.3 Información de los resultados

Registre los valores de R_a y R_z que se asemejen más al calibrando utilizando los formularios mostrados en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*, indicando “CS” como método de evaluación. Si la evaluación visual indica claramente que la rugosidad R_a o R_z , de la superficie de la pesa es menor que el valor máximo especificado en 11.1.2, no es necesario efectuar más mediciones de la rugosidad. Si hay duda, se deberá medir la rugosidad R_a o R_z utilizando un instrumento de contacto.

B.5.3.3 Medición de la rugosidad utilizando instrumentos de estilo (método SI) (clases E y F)

Esta sección se aplica solamente a pesas en las cuales el cumplimiento del requisito de rugosidad superficial no puede evaluarse de un modo seguro por el examen visual. Antes de su utilización, el instrumento de estilo debe calibrarse apropiadamente utilizando especímenes de calibración certificados en conformidad con ISO 5436 [13]. Se pueden utilizar otros instrumentos solamente si se ha documentado la trazabilidad a la unidad de longitud.

B.5.3.3.1 Base material

- a) Instrumento de estilo según la definición estipulada en ISO 3274 [14];
- b) Guantes de laboratorio.

B.5.3.3.2 Procedimiento de medición (en conformidad con ISO 4288 [15])

- a) Hacer al menos 6 mediciones:
 - 1) Dos sobre la superficie plana superior; y
 - 2) Cuatro sobre la superficie cilíndrica.
- b) No incluir arañazos ni otros defectos superficiales en los perfiles trazados.
- c) Todos los valores medidos de la rugosidad superficial, R_z o R_a , deben ser menores que los valores máximos especificados en la Tabla 6 en 11.1.2.

B.5.3.3.3 Información de los resultados

Registre los valores de R_a y R_z utilizando los formularios mostrados en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*, indicando “SI” como método de evaluación.

B.6 Magnetismo

B.6.1 Introducción

Las fuerzas magnéticas pueden afectar adversamente al proceso de pesar, puesto que, sin una investigación sistemática, estas fuerzas espurias no pueden distinguirse de las fuerzas de gravitación en la determinación de la masa. Las fuerzas magnéticas pueden surgir de la interacción mutua de dos patrones de masa, así como entre un patrón de masa, el comparador de masa que se está utilizando para la pesada, y otros objetos magnéticos situados en las proximidades.

B.6.1.1 Consideraciones generales

Las propiedades magnéticas (magnetización remanente y susceptibilidad) de los patrones de masa deben determinarse antes de la calibración de la masa (Anexo C) para asegurar que las interacciones magnéticas sean insignificantes. Una pesa que no cumpla con las exigencias establecidas para los parámetros magnéticos no debe calibrarse.

B.6.1.1.1 No es necesario medir las propiedades magnéticas de las pesas confeccionadas de aluminio, ya que se conoce que ellas son no magnéticas y tienen una susceptibilidad magnética χ mucho menor que 0.01. Adicionalmente, en los casos de las pesas pequeñas (< 2 g) y de las clases de exactitud inferiores (F_1 e inferiores, < 20 g), es suficiente referirse a la especificación del fabricante acerca de las propiedades magnéticas del material utilizado para confeccionar las pesas (ver B.6.3).

B.6.1.1.2 Muchas pesas de clases M se confeccionan de hierro fundido o de aleaciones simples de acero. Por consiguiente, las pesas de clases M tienen, con más frecuencia que las pesas de clases E y F, grandes errores relativos debidos a la interacción magnética entre la pesa y el instrumento de pesar. Todos los metales tienen alguna susceptibilidad magnética. Sin embargo, las aleaciones que contienen impurezas magnéticas tienen una mayor susceptibilidad y pueden magnetizarse.

Nota: Las fuerzas magnéticas de los costados de las pesas también deben considerarse, aunque esta edición de R 111 no trata acerca de ellas.

B.6.1.2 Comentario general sobre los procedimientos de ensayo

Las secciones B.6.2 hasta B.6.6 describen dos métodos aceptados para determinar la magnetización de las pesas (B.6.2 y B.6.4) y cuatro métodos aceptados para determinar la susceptibilidad magnética (B.6.3, B.6.4, B.6.5, B.6.6), incluyendo formulas para calcular la magnetización y la susceptibilidad magnética. Los límites de la magnetización remanente y de la susceptibilidad magnética se dan en 9.1 y 9.2. Los métodos recomendados para las distintas clases de exactitud y masas nominales se muestran en las Tablas B.3(a), B.3(b) y B.3(c). También se pueden utilizar métodos alternativos a condición de que su validez se fundamente en una documentación apropiada, la cual deberá adjuntarse al informe de del ensayo.

Nota: Una caracterización completa de la magnetización de las pesas es técnicamente impracticable. Los métodos presentados aquí se basan en aproximaciones de utilidad demostrada. En casos donde los distintos métodos presentados aquí den resultados inconsistentes, el orden de preferencia es: B.6.4, B.6.2 (sensor Hall), B.6.2 (magnetómetro Fluxgate o de saturación en lo adelante fluxgate).

B.6.2 Método para determinar la magnetización remanente empleando un gaussímetro

La magnetización remanente de una pesa puede estimarse a partir de la medición del campo magnético adyacente a la pesa empleando un gaussímetro. Este método puede utilizarse con todas las clases de exactitud que se listan en la Tabla B.3 (c).

B.6.2.1 Consideraciones generales

- a) El local donde se realiza el ensayo debe revisarse para determinar la dirección del campo magnético ambiental con un gaussímetro antes de comenzar un ensayo. El ensayo de calibración debe efectuarse en un área libre de objetos ferromagnéticos. El operador no debe portar ni usar objetos confeccionados con materiales ferrosos.
- b) Medir el campo magnético debido a la pesa utilizando, por ejemplo, un sensor Hall (instrumento preferido) o un fluxgate. No se debe utilizar el fluxgate para las pesas menores de 100 g. Alinear la sonda de un modo tal que su eje sensible esté en una posición perpendicular a la superficie de la pesa.
- c) La medición debe tomarse en la dirección en la cual la inducción magnética ambiental captada por la sonda se aproxima a cero.
- d) Alternativamente, el valor de la inducción ambiental debe substraerse de la inducción medida cuando la pesa está presente.

B.6.2.2 Equipamiento

- a) Gaussímetro, tal como un sensor Hall o un fluxgate;
- b) Herramientas para la manipulación de las pesas (por ej., guantes de laboratorio, paños sin hilachas, pinzas de laboratorio); y
- c) Un local bien iluminado.

B.6.2.3 Procedimiento de medición

- a) Poner el medidor a cero.
- b) Colocar la sonda sobre una superficie no magnética.
- c) Tomar una lectura del campo magnético manteniendo la sonda con una orientación particular. Este valor es una medida del campo magnético ambiental. Esta lectura se substrará de cada una de las lecturas que se tomen posteriormente en la pesa o en su proximidad.
- d) Colocar la pesa sobre el sensor mientras se mantiene la orientación de la sonda. El centro del fondo de la pesa debe colocarse sobre el sensor. Comprobar la homogeneidad de la magnetización moviendo la pesa desde el centro hasta el borde del fondo y observando los cambios en la lectura. Si ésta no disminuye gradualmente, la pesa puede estar magnetizada de un modo no homogéneo.
- e) Si la pesa está magnetizada de un modo homogéneo, se pueden realizar mediciones en el centro del fondo, cerca a la superficie de la pesa, sin hacer contacto y en conformidad con las especificaciones del gaussímetro.

Nota: Para algunas sondas, tal como el fluxgate, el sensor está localizado a cierta distancia del extremo de la sonda [16]. Usualmente esto da como resultado valores del campo de fuerzas inferiores a los que se obtienen con un sensor Hall colocado tan cerca de la pesa como sea posible. Si la pesa está magnetizada de un modo no homogéneo, se deben realizar mediciones a lo largo del eje central de la pesa a una distancia de la superficie de por lo menos la mitad del diámetro de una pesa cilíndrica o de por lo menos la mitad de la mayor dimensión de una pesa rectangular. Las lecturas de la sonda deben corregirse utilizando la fórmula que se da más abajo.

- f) Tomar lectura de la indicación (que puede ser en mT). Registrarla en μT .
- g) Invertir la pesa para medir la parte superior (solamente para las pesas con la parte superior plana), y repetir los pasos d–f anteriores.
- h) Corregir la lectura de la sonda y estimar la polarización, $\mu_0 M$, por la ecuación siguiente:

$$\mu_0 M = \frac{2B}{\frac{d+h}{\sqrt{R^2+(d+h)^2}} - \frac{d}{\sqrt{R^2+d^2}}} - f(B_E) \quad (\text{B.6.2-1})$$

con: $f(B_E) = 5.4 B_E$ para las pesas de clases M (B.6.2-2)

y: $f(B_E) = \frac{\chi}{1+0.23\chi} B_E$ para las pesas de clases E y F (B.6.2-3)

donde: B = Lectura del gaussímetro con la pesa presente (habiendo substraido el campo ambiental, ver c);
 B_E = Lectura del gaussímetro del campo magnético ambiental en ausencia de la pesa;
 d = Distancia entre el centro del sensor (insertado dentro de la sonda) y la superficie de la pesa;
 h = Altura de la pesa;
 R = Radio de una pesa cilíndrica o, en el caso de una pesa rectangular, el radio de un círculo que tiene la misma área que el plano medido de la pesa.

Nota: B y BE pueden, en algunos casos, tener distintos signos.

- i) El equipamiento utilizado y la distancia deben anotarse en todos los casos en el *Formulario de reporte de ensayo*

B.6.2.4 Incertidumbre

Estos dispositivos se calibran con una incertidumbre en correspondencia con el requisito de que la magnetización puede determinarse con un límite de incertidumbre que sea menor que un tercio del límite de error dado en la Tabla 3. Este procedimiento da como resultado una incertidumbre expandida U ($k = 2$) de la magnetización de aproximadamente el 30 % (incluyendo la incertidumbre de la calibración del gaussímetro). Sin embargo, las simplificaciones de este método no permiten tener en cuenta esta incertidumbre. Por consiguiente, la magnetización determinada de este modo, aunque útil, es un valor convencional.

B.6.2.5 Registro de los resultados

Registrar los resultados de las mediciones utilizando los formularios que aparecen en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*

B.6.3 Especificación del material

La medición de la susceptibilidad magnética puede realizarse aplicando el procedimiento B.6.4 a una pieza de ensayo tomada de una pieza del metal utilizado para fabricar la pesa. En este caso, la incertidumbre expandida U ($k = 2$) de la medición debe aumentarse en 20 % para tomar en consideración las posibles variaciones de este parámetro en la pieza de metal. Sin embargo, todas las pesas terminadas deben cumplir los requisitos estipulados en la Tabla 3. Debido a los efectos de saturación en las mediciones de la susceptibilidad magnética, el campo magnético aplicado a la pesa debe ser suficientemente pequeño ($< 4 \text{ kA m}^{-1}$ para aleaciones de acero típicas).

B.6.3.1 Las pesas fabricadas de aluminio tienen una susceptibilidad magnética $\chi \ll 0.01$.

B.6.3.2 En el caso de las pesas pequeñas menores de 2 g, el usuario debe remitirse a la especificación del fabricante de las propiedades magnéticas del material utilizado para su fabricación.

B.6.3.3 En el caso de las pesas de clases F menores de 20 g, el usuario debe remitirse a la especificación del fabricante de las propiedades magnéticas del material utilizado en su fabricación.

B.6.4 Susceptibilidad magnética y magnetización remanente, método del susceptómetro

B.6.4.1 Principios del ensayo

Este método puede utilizarse para determinar tanto la susceptibilidad magnética como la magnetización remanente de pesas débilmente magnetizadas mediante la medición de la fuerza ejercida sobre un patrón de masa situado en el gradiente del campo magnético de un fuerte imán permanente [ver la Figura B.1].

Este método es aplicable solamente a pesas en las cuales la susceptibilidad magnética $\chi < 1$. El método del susceptómetro no se recomienda para las pesas de piezas múltiples. Para utilizar este método el operador debe estar familiarizado con la referencia [6]. En una configuración típica, el susceptómetro tiene un volumen de medición de extensión limitada (aproximadamente 10 cm^3) sobre la mesa, junto a y verticalmente por encima del imán. En el caso de las pesas de más de 2 kg, la medición debe efectuarse en el centro de la base de la pesa (si se considera necesario medir la magnetización remanente en varios sitios a lo largo de la base, utilice un gaussímetro en lugar de un susceptómetro). Normalmente la pesa debe estar en posición vertical. Para la medición de las propiedades magnéticas de los costados o de la parte superior se requieren métodos más elaborados [6].

B.6.4.2 Consideraciones generales

Existe un riesgo significativo de que el procedimiento pueda causar magnetización remanente del calibrando si éste se expone a un campo magnético demasiado alto ($> 2 \text{ kA m}^{-1}$ para una aleación de acero típica de la clase E_1). Se recomienda, por ejemplo, que las mediciones de las pesas de clase E_1 se realicen primero a una distancia Z_0 , de aproximadamente 20 mm entre la altura media del imán y la base de la pesa (ver la Figura B.1). Entonces, disminuir solamente Z_0 si la susceptibilidad de la muestra es demasiado pequeña para producir una señal satisfactoria [6]. Precauciones adicionales pueden ser necesarias cuando se ensayan pesas de más alta susceptibilidad (ver B.6.4.5 c).

B.6.4.3 Equipamiento

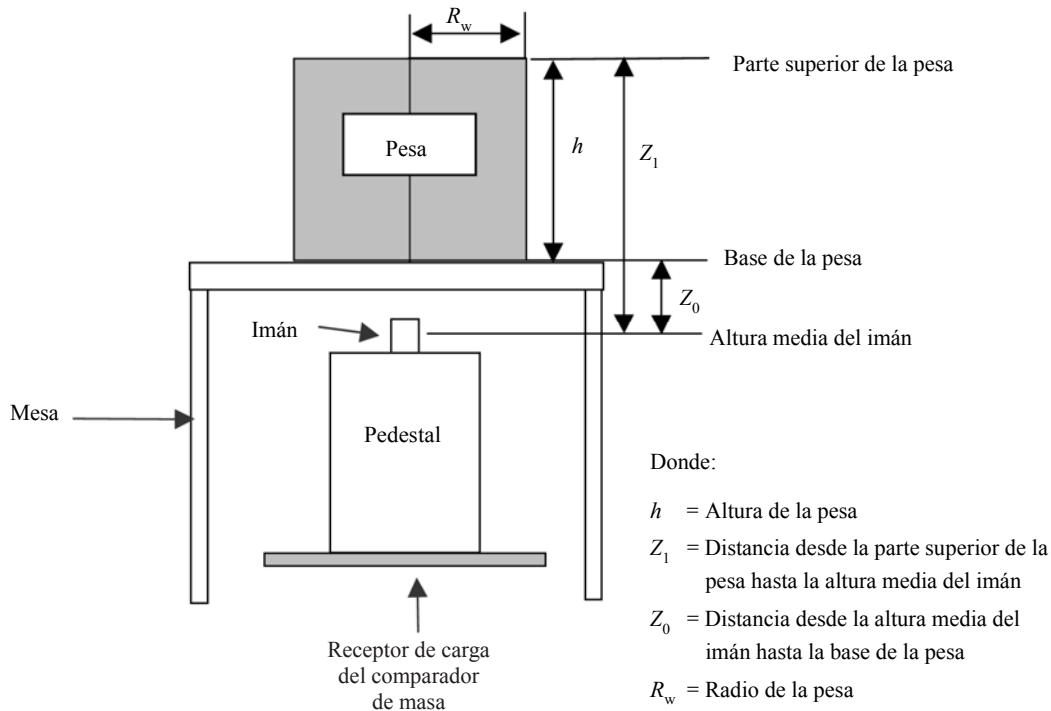
- a) Un instrumento de pesar con un intervalo de escala no mayor de $10 \mu\text{g}$;
- b) Una mesa no magnética para colocar la pesa encima de ella;

- c) Un cilindro para colocar los imanes sobre el mismo;
- d) Imanes cilíndricos con momento magnético m_d del orden de 0.1 A m^2 (este momento es típico de los imanes de samario-cobalto o neodimio-hierro-boro de un volumen de unos 100 mm^3) [6].

B.6.4.4 Ilustración de la configuración

La altura del imán debe idealmente ser igual a 0.87 veces su diámetro [6], aunque una razón entre la altura y el diámetro igual a 1 es aceptable. Z_0 es la distancia desde la altura media del imán hasta la base de la pesa.

Figura B.1 Instalación para determinar la susceptibilidad magnética y la magnetización, método del susceptómetro.



B.6.4.5 Procedimiento de medición

Estas mediciones deben realizarse en un área libre de grandes objetos ferrosos. El operador no debe portar ni usar objetos ferrosos.

- a) Medir los diferentes parámetros (Z_0 , R_w , h), ver la ilustración de la configuración, Figura B.1, ver también [6] para la medición de Z_0 .
- b) El valor de la aceleración debida a la gravedad g debe conocerse con un error del 1 %.
- c) Colocar el imán con su polo norte apuntando hacia abajo (el polo norte de un imán cilíndrico es el extremo que repele el polo norte de la aguja de una brújula). Se requiere el momento dipolar m_d .

El imán produce un campo máximo en la superficie superior de la mesa de:

$$H = \frac{m_d}{2\pi \times Z_0^3} \quad (B.6.4-1)$$

donde H se expresa en unidades de A m^{-1} , para m_d en A m^2 y Z_0 en m.

Es importante que inicialmente H no exceda de 2000 A m^{-1} cuando se miden pesas de clase E_1 , de 800 A m^{-1} al medir pesas de clase E_2 , ó de 200 A m^{-1} al ensayar pesas de otras clases. El campo H puede aumentarse solamente si la señal del susceptómetro es demasiado débil. En este caso, el campo H se incrementa reduciendo la altura Z_0 .

- d) Poner el instrumento a cero.
- e) Colocar la pesa sobre la mesa de un modo tal que su eje coincida con el eje vertical del imán, y tomar una lectura. Girar la pesa alrededor de su eje vertical repetidamente con ángulos crecientes y tomar las lecturas en cada posición. Para los siguientes procedimientos, girar la pesa hasta el ángulo con el cual la lectura muestra la máxima desviación de cero.
- f) Colocar la pesa sobre la mesa, normalmente tres veces, directamente encima del imán. Comprobar que la pesa está centrada.
- 1) Registrar el momento en que se coloca la carga, el momento en que se toma una lectura y el momento en que se retira la carga.
 - 2) Calcular Δm_1 a partir de las 3 lecturas. Normalmente Δm_1 es negativo, lo que indica que el imán es atraído ligeramente por la pesa.
 - 3) La fuerza F_1 se determina por la fórmula $F_1 = -\Delta m_1 \times g$ (B.6.4-2)
- g) La medición debe repetirse con el imán girado con su parte superior hacia abajo.
- 1) La distancia Z_0 debe mantenerse constante.
 - 2) Poner el instrumento a cero.
 - 3) Colocar de nuevo la pesa sobre la mesa, normalmente tres veces, directamente encima de los imanes. Comprobar que la pesa está centrada.
 - 4) Registrar la hora en que se coloca la carga, la hora en que se toma una lectura y la hora en que se retira la carga.
 - 5) Calcular Δm_2 a partir de las 3 lecturas. Normalmente Δm_2 es negativo, pero puede ser significativamente diferente de Δm_1 .
 - 6) La fuerza F_2 se determina por la ecuación $F_2 = -\Delta m_2 \times g$ (B.6.4-3)
- h) Repetir los pasos d–g anteriores.

B.6.4.6 Cálculos

Calcular la susceptibilidad magnética χ y la magnetización remanente M_z de la pesa insertando los diversos parámetros en las ecuaciones dadas más abajo. Asumir que la susceptibilidad del aire es siempre insignificante.

B.6.4.6.1 Si se miden F_1 y F_2 , la expresión para calcular la **susceptibilidad magnética** será la siguiente:

$$\chi = \frac{F_a}{I_a \times F_{\max} - 0.4F_a} \quad (B.6.4-4)$$

donde: $F_{\max} = \frac{3\mu_0}{64\pi} \times \frac{m_d^2}{Z_0^4}$ (B.6.4-5)

$$F_a = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad (B.6.4-6)$$

y para la polarización magnética será:

$$\mu_0 M_z = \frac{F_b}{\frac{m_d}{Z_0} \times \frac{1}{4\pi} \times I_b} - \frac{\chi}{1 + 0.23\chi} B_{\text{ext}} \quad (B.6.4-7)$$

donde: $F_b = \frac{F_1 - F_2}{2}$ (B.6.4-8)

B_{EZ} es la componente vertical de la inducción magnética ambiental en el laboratorio. Usualmente se puede tomar B_{EZ} como la componente vertical de la inducción magnética de la tierra en el local del laboratorio; en este caso se tiene $-48\mu\text{T} < B_{EZ} < 60\mu\text{T}$, en dependencia de la latitud. La magnitud de B_{EZ} es nula en el ecuador de la tierra, y máxima en los polos. El signo de B_{EZ} es positivo en el hemisferio norte y negativo en el hemisferio sur.

B.6.4.6.2 Los factores de corrección geométrica I_a , I_b en las ecuaciones anteriores vienen dados, respectivamente, por:

$$I_a = 1 - \left[\frac{Z_0}{Z_1} \right]^4 - \frac{1 + \left(\frac{R_w}{Z_0} \right)^2}{\left[1 + \left(\frac{R_w}{Z_0} \right)^2 \right]^3} + \left[\frac{Z_0}{Z_1} \right]^4 \times \frac{1 + \left(\frac{R_w}{Z_1} \right)^2}{\left[1 + \left(\frac{R_w}{Z_1} \right)^2 \right]^3} \quad (\text{B.6.4-9})$$

y

$$I_b = 2\pi \frac{\left[\frac{\left(\frac{R_w}{Z_0} \right)^2}{\left(1 + \left(\frac{R_w}{Z_0} \right)^2 \right)^{3/2}} - \frac{\left(\frac{R_w}{Z_0} \right)^2 \left(\frac{Z_1}{Z_0} \right)^3}{\left(1 + \left(\frac{R_w}{Z_1/Z_0} \right)^2 \right)^{3/2}} \right]}{\quad} \quad (\text{B.6.4-10})$$

Para más información acerca de I_a , I_b ver [6]. La susceptibilidad del aire puede despreciarse para todos los fines prácticos.

B.6.4.6.3 Las fórmulas dadas anteriormente son para una pesa cilíndrica. Si la pesa no tiene la forma de un cilindro perfecto, puede ser necesario aplicar correcciones adicionales o considerar una mayor incertidumbre. Por ejemplo, se necesitan cálculos adicionales para tener en cuenta una base empotrada, una perilla, etc. como se detalla en [6]. Las correcciones para estos efectos de forma son mayores para las masas menores (2 g), en las que pueden ascender a alrededor de 10 %.

B.6.4.7 Incertidumbre

Este procedimiento da como resultado una incertidumbre para la susceptibilidad magnética que se sitúa en el rango de 10 % hasta 20 %. La incertidumbre asociada con este método es mayor para pesas pequeñas [17, 18, 40].

B.6.4.8 Registro de los resultados

Registrar los resultados de la medición utilizando los formularios que aparecen en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*

B.6.5 Susceptibilidad magnética, método de atracción

B.6.5.1 Principios del ensayo

La cantidad que se mide por este método es la permeabilidad magnética relativa, determinada al comparar la fuerza magnética ejercida por un imán permanente sobre el patrón de masa con la misma fuerza que sobre el patrón de permeabilidad (ver la Figura B.2). La susceptibilidad magnética χ se calcula utilizando la ecuación para la relación entre la permeabilidad magnética relativa y la susceptibilidad magnética ($\mu_r = 1 + \chi$).

Este método puede aplicarse a las pesas de 20 g o mayores, y a las pesas de clases desde E₂ hasta F₂ [18 y 19] (ver también la Tabla B.3(b)). Normalmente, los instrumentos disponibles para este método pueden aplicarse solamente para determinar la permeabilidad magnética en el rango $1.01 \leq \mu_r \leq 2.5$ ($0.01 \leq \chi \leq 1.5$).

B.6.5.2 Consideraciones generales

Una desventaja de este método es que los instrumentos disponibles son difíciles de calibrar.

Advertencia Existe también el riesgo de que el procedimiento cause magnetización remanente del calibrando.

El imán es atraído a la pesa o al material de referencia en dependencia de cuál de ellos tiene la mayor permeabilidad magnética.

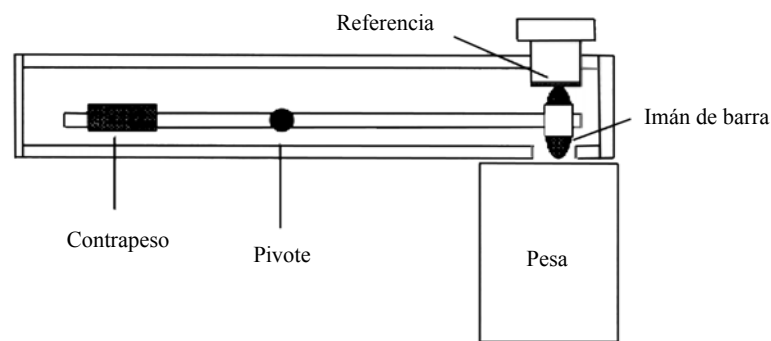
B.6.5.3 Equipamiento

- Un imán balanceado sobre un pivote con una contrapesa (Figura B.2);
- Un material de referencia de permeabilidad magnética conocida;
- Herramientas para la manipulación las pesas (por ej., guantes de laboratorio, paños sin hilachas, pinzas de laboratorio);
- Un local bien iluminado.

B.6.5.4 Ilustración de la configuración

La Figura B.2 ofrece una ilustración de la configuración. Normalmente el instrumento incluye un juego de insertos (materiales de referencia) que pueden utilizarse.

Figure B.2 Configuración para determinar la susceptibilidad magnética, método de atracción



B.6.5.5 Procedimiento de medición

- Insertar en el instrumento un material de referencia adecuado con permeabilidad magnética relativa conocida.
- Instalar el instrumento en una posición estable con el imán apuntando hacia abajo.
- Mover la pesa hacia el instrumento (imán de barra con el material de referencia conocido) hasta que aquella toque el instrumento.
- Retirar entonces la pesa muy suavemente del instrumento.
- Si el imán es atraído por la pesa, entonces la permeabilidad relativa de la pesa es más alta que la del material de referencia.
- Este ensayo debe realizarse en diferentes puntos sobre la parte superior y el fondo de la pesa.

Con el fin de proporcionar trazabilidad a estas determinaciones de susceptibilidad, el procedimiento debe repetirse con mediciones sobre una muestra de susceptibilidad conocida (por ej., determinada por el susceptómetro en B.6.4).

B.6.5.6 Incertidumbre

El instrumento tiene una incertidumbre asociada de permeabilidad de aproximadamente 0.3 % (30 % de la susceptibilidad) a la permeabilidad más baja ($\mu_r = 1.01$) y 8 % (13 % de la susceptibilidad) a la permeabilidad más alta ($\mu_r = 2.5$). El procedimiento de medición puede tener incertidumbres mayores.[19]

B.6.5.7 Registro de los resultados

Registrar los resultados de las mediciones utilizando los formularios que se muestran en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*

B.6.6 Susceptibilidad magnética, método fluxgate

B.6.6.1 Principios del ensayo

Este método determina la permeabilidad magnética relativa de un objeto mediante el uso de un fluxgate con una sonda de permeabilidad que contiene un imán permanente colocado junto al objeto [20].

Advertencia: Existe el riesgo de que este procedimiento pueda causar magnetización remanente del calibrando.

B.6.6.2 Consideraciones Generales

Normalmente, los instrumentos disponibles para este método pueden utilizarse para determinar la permeabilidad magnética en el rango $1.0001 \leq \mu_r \leq 2.00$ ($0.0001 \leq \chi \leq 1.00$). Para proporcionar trazabilidad en estas determinaciones, el procedimiento debe repetirse con mediciones sobre una muestra de susceptibilidad conocida (por ej., un material de referencia apropiado certificado por un laboratorio acreditado).

B.6.6.3 Equipamiento

- Un fluxgate con una sonda de permeabilidad que contiene un imán permanente;
- Un material de referencia de permeabilidad magnética conocida;
- Herramientas para la manipulación de las pesas (por ej., guantes de laboratorio, paños sin hilachas, pinzas de laboratorio);
- Un local bien iluminado.

B.6.6.4 Procedimiento de medición

El usuario debe remitirse a las especificaciones del fabricante.

B.6.6.5 Incertidumbre

El instrumento tiene una incertidumbre de la permeabilidad asociada de aproximadamente 0.2 % (desde 40 % hasta 4 % en susceptibilidad) en el rango $1.005 \leq \mu_r \leq 1.05$ ($0.005 \leq \chi \leq 0.05$) [20]. El usuario debe remitirse a las especificaciones del fabricante.

B.6.6.6 Registro de los resultados

Registrar los resultados de las mediciones utilizando los formularios que aparecen en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*

B.6.7 Métodos recomendados para determinar la magnetización y susceptibilidad por clase de pesa y tamaño de pesa

B.6.7.1 Las mediciones se realizan sobre pesas terminadas.

B.6.7.2 El gaussímetro (B.6.2) puede utilizarse para determinar la magnetización para todas las clases de exactitud, el sensor Hall para valores nominales ≥ 1 g, y el fluxgate para valores nominales ≥ 100 g.

B.6.7.3 Las Tablas B.3(a), (b), y (c) ofrecen los procedimientos recomendados para las distintas clases de pesas.

Tabla B.3(a) Magnetización remanente, método del susceptómetro (B.6.4)

| Tamaño de la pesa | Clase |
|-----------------------------|---|
| ≥ 20 g | Pesas E ₁ , E ₂ , F ₁ y F ₂ sin cavidad de ajuste |
| $2 \text{ g} \leq m < 20$ g | E ₁ , E ₂ y F ₁ |
| ≤ 2 g | E ₁ y E ₂ |

Tabla B.3(b) Susceptibilidad

| Tamaño de la pesa | Clase E ₁ | Clase E ₂ | Clase F ₁ | Clase F ₂ |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 5 000 kg | | | | |
| 2 000 kg | | | | |
| 1 000 kg | | | | |
| 500 kg | | | | |
| 200 kg | | | | |
| 100 kg | | | | |
| 50 kg | | | | |
| 20 kg | | | | |
| 10 kg | | | | |
| 5 kg | | | | |
| 2 kg | | | | |
| 1 kg | | | | |
| 500 g | | | | |
| 200 g | | | | |
| 100 g | | | | |
| 50 g | | | | |
| 20 g | | | | |
| 10 g | | | | |
| 5 g | S | F | F | F |
| 2 kg | | | | |
| 1 kg | | | | |
| 500 g | | | | |
| 200 g | | | | |
| 100 g | | | | |
| 50 g | S | S | A | A |
| 20 g | | | | |
| 10 g | | | | |
| 5 g | | | | |
| 2 g | | | | |
| 1 g | | | | |
| 500 mg | Sp | Sp | Sp | Sp |
| 200 mg | | | | |
| 100 mg | | | | |
| 50 mg | | | | |
| 20 mg | | | | |
| 10 mg | | | | |
| 5 mg | | | | |
| 2 mg | | | | |
| 1 mg | | | | |

Sp Especificación del material (B.6.3)

S Susceptómetro para pesas sin cavidad de ajuste (B.6.4)

A Método de atracción (B.6.5)

F Fluxgate + imán permanente (B.6.6)

S* Los métodos F y A son preferibles para las pesas de clase E₂ desde 100 kg hasta 1 000 kg. Esto se debe a que el esfuerzo requerido para construir un dispositivo apropiado y realizar las mediciones con el susceptómetro excede sus beneficios en comparación con los métodos F y A para las pesas de clase E₂ desde 100 kg hasta 1 000 kg. El método del susceptómetro no se recomienda para las pesas de piezas múltiplex.

Tabla B.3(c) Magnetización remanente, gaussímetro (B.6.2)

| Tamaño de la pesa | Clase de exactitud |
|---|--|
| ≥ 1 g (sensor Hall) ≥ 100 g (Fluxgate) | E ₁ , E ₂ , F ₁ , F ₂ , M ₁ , M ₁₋₂ , M ₂ , M ₂₋₃ , M ₃ |

B.7 Densidad

B.7.1 Introducción

La Tabla 5 da los límites de densidad para las pesas. A continuación se exponen seis métodos aceptados para la determinación de la densidad de las pesas. Métodos alternativos, por ejemplo, la pesada con una balanza sumergida en un compuesto fluorocarbonado líquido [21], o utilizando un medidor acústico de volumen [22, 23], pueden utilizarse si su validez se fundamenta en documentación apropiada, la que debe adjuntarse al *Formulario de reporte de ensayo*. Los métodos de ensayo A, B, C y D utilizan agua u otro líquido adecuado como densidad de referencia. Los métodos E y F son apropiados para las pesas de clases de exactitud inferiores, o si la inmersión en un líquido es inaceptable. La Tabla B.4 es un resumen de los métodos que se utilizan para determinar la densidad. La Tabla B.8 (al final de B.7) da el método recomendado para la determinación de la densidad por clase.

Tabla B.4 Métodos para determinar la densidad

| Método | Descripción |
|----------|--|
| A | Este método es el más exacto. Es una técnica hidrostática que compara el calibrando con una pesa de referencia, ambas en aire y en un líquido de densidad conocida. |
| B | Este método es más rápido y más adecuado. Pesada de la pesa en agua y verificación de que la indicación de la balanza está dentro de valores límites tabulados, o cálculo de la densidad a partir de la indicación de la balanza y la masa real conocida del calibrando. |
| C | Determinaciones separadas de la masa y del volumen del calibrando. El volumen se determina a partir del incremento de la lectura de la balanza cuando la pesa está suspendida dentro de un baño de agua colocado sobre un platillo de la balanza. |
| D | Esta técnica es adecuada para las pesas > 1 kg. Consiste en pesar un recipiente de capacidad volumétrica bien definida, lleno de líquido, con la pesa dentro y fuera del mismo. |
| E | Esta técnica es apropiada para las pesas con cavidades que no deben ser sumergidas en agua. Calculando el volumen a partir de las dimensiones de la pesa. |
| F | Estimación de la densidad basada en la composición conocida de la aleación de la cual se ha confeccionado la pesa. |

B.7.1.1 La verificación de los límites de la densidad debe tomar en consideración la incertidumbre inherentemente vinculada al método utilizado. La Tabla B.5 da un estimado general de la incertidumbre asociada a cada método. Para cada pesa, la incertidumbre expandida U (para $k = 2$) de la densidad debe estar dentro de los límites:

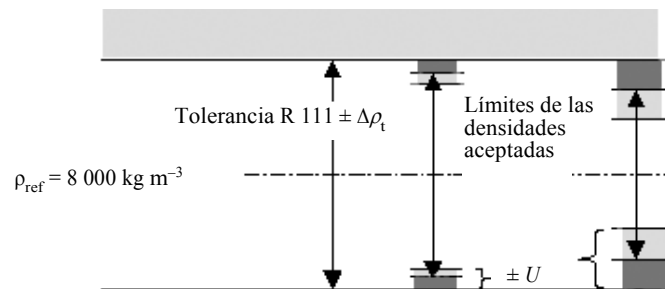
$$\rho_{\min} + U \leq \rho \leq \rho_{\max} - U \quad (B.7.1-1)$$

Sin embargo, si la incertidumbre de la determinación de la densidad puede mantenerse baja, es posible aceptar un rango más extenso de los resultados para la verificación, como se ilustra en la Figura B.3. Con un trabajo muy cuidadoso se pueden lograr incertidumbres más bajas.

Tabla B.5 Incertidumbres estimadas típicas U (para k = 2) por método y tamaño de la pesa (en kg m⁻³)

| Método | 50 kg | 1 kg | 1 g |
|--------|---------------|------|-----|
| A1 | - | 1.5 | 60 |
| A2/A3 | - | 3 | 60 |
| B1 | 5 | 5 | 60 |
| B2 | 20 | 20 | 60 |
| C | 10 | 10 | 100 |
| D | 5 | 10 | - |
| E | 30 | 40 | 600 |
| F | 130 hasta 600 | | |

Figura B.3 Tolerancia de la densidad y límites de la verificación debidos a la incertidumbre de las mediciones



B.7.2 Consideraciones generales

B.7.2.1 Temperatura de referencia

La temperatura de referencia para la determinación de la densidad es 20 °C. Si la medición se realiza a una temperatura diferente (otras temperaturas de laboratorio estándares son 23 °C ó 27 °C), la densidad debe recalcularse para 20 °C utilizando el coeficiente de expansión volumétrica γ del material. Si γ no se conoce explícitamente, para las pesas de acero inoxidable se recomienda utilizar el valor $\gamma = 50 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

$$\rho(t_{\text{ref}}) = \rho(t_{\text{moss}}) \times [1 + \gamma(t_{\text{moss}} - t_{\text{ref}})] \quad (\text{B.7.2-1})$$

Incertidumbre de la medición:

$$u^2(\rho(t_{\text{ref}})) = u^2(\rho(t_{\text{moss}})) \left[\frac{\rho(t_{\text{ref}})}{\rho(t_{\text{moss}})} \right]^2 + u^2(\gamma) \rho^2(t_{\text{moss}}) (t_{\text{moss}} - t_{\text{ref}})^2 + u^2(t_{\text{moss}}) \rho^2(t_{\text{moss}}) \gamma^2 \quad (\text{B.7.2-2})$$

B.7.2.2 Requisitos de verificación para pesas pequeñas

La densidad de las pesas pequeñas, para las cuales la Tabla 5 no da los valores límites, no necesita revisión. La densidad de las pesas con una masa menor de 1 g debe asumirse según el método F (ver más abajo) con referencia a la información del fabricante acerca del material del cual se han confeccionado las pesas.

B.7.2.3 Líquido de inmersión

El líquido de inmersión no debe tener efecto sobre las pesas. Es preferible utilizar agua destilada y desaireada, puesto que su densidad es una función bien conocida de la temperatura [24] [25]¹ y su pureza es fácil de controlar [26]². Las ecuaciones de esta sección asumen un valor constante de la densidad del líquido. Para cálculos manuales realizados con una calculadora de bolsillo, la Tabla B.6 lista algunos valores de densidad para el agua. La densidad del aire puede calcularse utilizando la fórmula de aproximación (E.3-1).

Tabla B.6 Densidad del agua

| t_1 [°C] | ρ_1 [kg m ⁻³] | $\Delta\rho_1/\Delta t_1$ [kg m ⁻³ °C ⁻¹] |
|---------------|-----------------------------------|---|
| 18.0 | 998.593 | |
| 18.5 | 998.499 | - 0.190 |
| 19.0 | 998.402 | |
| 19.5 | 998.303 | - 0.201 |
| 20.0 | 998.201 | |
| 20.5 | 998.096 | - 0.212 |
| 21.0 | 997.989 | |
| 21.5 | 997.879 | - 0.222 |
| 22.0 | 997.767 | |
| 22.5 | 997.652 | - 0.232 |
| 23.0 | 997.535 | |
| 23.5 | 997.415 | - 0.242 |
| 24.0 | 997.293 | |

B.7.2.4 Penetración del agua en la cavidad de ajuste

Las pesas que contienen una cavidad de ajuste no debe sumergirse en agua, porque este líquido puede entrar en la cavidad durante la medición. Esto afectaría tanto la densidad como la masa de la pesa, y afectaría la estabilidad de la masa. Para las pesas que tienen una cavidad, la determinación geométrica del volumen es la primera elección. Si, sin embargo, es posible eliminar toda el agua posteriormente, se debe realizar la pesada hidrostática de la pesa que tiene una cavidad abierta, eliminando cuidadosamente el aire retenido.

B.7.2.5 Eliminación del aire

Para lograr mediciones exactas en agua, es muy importante eliminar las burbujas de aire de la pesa y del soporte de la pesa. Esto es cierto también para las paredes del baño de líquido en los métodos C y D, especialmente si se trata de pequeñas pesas³. Una manera práctica de reducir el riesgo de la presencia de burbujas de aire es desairear el agua y la pesa en el agua aplicando una presión subatmosférica al compartimiento del recipiente durante 10 ó 15 minutos⁴.

B.7.2.6 El soporte de la pesa y el alambre de suspensión

La colocación de la pesa sobre el soporte sumergido en agua puede accidentalmente causar daños a la pesa y al baño (de vidrio). Es ventajoso sumergir la pesa y el soporte de la pesa juntos. Las burbujas de aire,

¹ Una pesa que no ha sido limpiada antes de la medición puede mostrar un valor de peso más bajo después de la inmersión en agua pura y la estabilización posterior.

² También se pueden utilizar otros líquidos cuyas respectivas densidades sean bien conocidas y estables. Es esencial, para obtener pequeñas incertidumbres de medición, trabajar en condiciones de temperatura bien conocidas y constantes. Esto es aun más importante si se utiliza un líquido con un coeficiente de expansión térmica más alto que el del agua.

³ Por ejemplo, en el caso de una pesa de 20 mg, un cambio en la lectura de la balanza de 20 µg puede causar una diferencia en densidad de 80 kg m⁻³.

⁴ La densidad del aire saturado con agua es alrededor de 0.0025 kg m⁻³ más baja que la del agua totalmente desaireada.

sin embargo, pueden detectarse más fácilmente si el soporte de la pesa y la pesa se sumergen por separado. Se debe utilizar un soporte que pueda evitar la caída de la pesa. Si se requiere una baja incertidumbre de medición, el alambre de suspensión debe ser fino, estar limpio y atravesar la interfaz aire-agua en ángulo recto.⁵

B.7.2.7 Masa o masa convencional

En las formulas que se dan más abajo, se puede tomar la masa como masa convencional y viceversa, porque al considerar la incertidumbre obtenida y requerida para la densidad de una pesa, la diferencia entre los valores de su masa y de su masa convencional no es importante. Por la misma razón, se puede tomar el valor nominal para la masa o la masa convencional de una pesa, a condición de que se pueda asumir que su masa convencional cumple el correspondiente error máximo permisible dado en la tabla 1.

B.7.2.8 Secado de la pesa

Al retirar la pesa del baño de agua, la mayor parte del agua se desliza inmediatamente de la superficie de la pesa. Las gotas remanentes deben eliminarse con un paño fino. Para su estabilización, la pesa puede colocarse debajo de una cubierta adecuada (un vaso de precipitados boca abajo sobre espaciadores para permitir la ventilación).

B.7.3 Medición de un fragmento de material

La medición de la densidad puede realizarse sobre fragmento tomado del metal utilizado para la fabricación de la pesa. La pieza se toma de un sitio tan próximo a la pesa como sea posible y debe tener el volumen y la forma adecuados para la medición de su densidad. La rugosidad de la pieza debe ser la misma o menor que la rugosidad de la pesa. Se asume que la densidad de la pesa es igual a la densidad de la pieza. La incertidumbre estándar de este valor se obtiene combinando un componente de la incertidumbre relativa estándar, igual a 5×10^{-1} , con la incertidumbre estándar de la densidad de la pieza.

B.7.4 Método A (comparación hidrostática)

Este método puede realizarse de tres maneras diferentes:

Método A1 (dos pesas de referencia diferentes pesadas en aire):

Comparación entre el calibrando y la pesa de referencia en aire y comparación entre el calibrando en líquido y una segunda pesa de referencia en aire;

Método A2 (pesas de referencia pesadas en aire y en líquido):

Comparación entre el calibrando y la pesa de referencia en aire y comparación entre el calibrando y la pesa de referencia (la misma o una diferente), ambos en líquido; o

Método A3 (pesada directa):

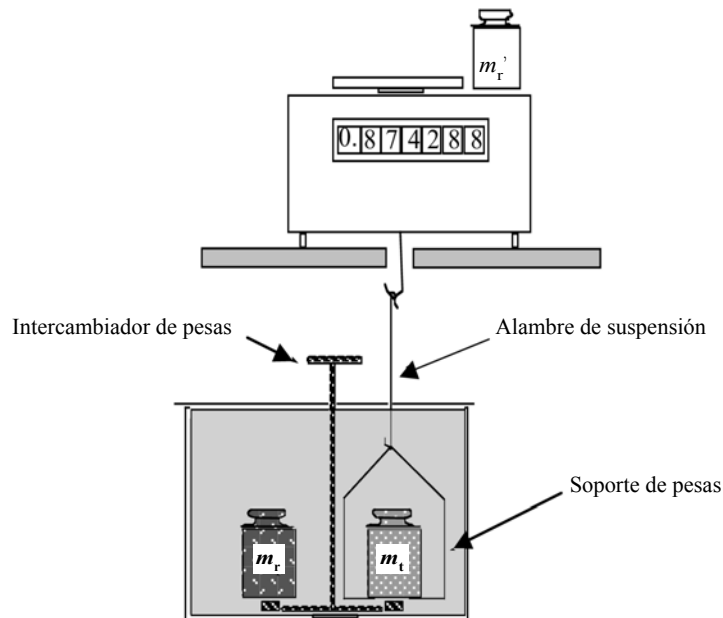
Pesada del calibrando en aire y en líquido utilizando la indicación de la balanza en lugar de la masa de la pesa de referencia.

B.7.4.1 Equipamiento.

- a) Balanza(s) de laboratorio de suficiente capacidad y alta resolución (resolución relativa típica: 2×10^{-6}), equipada para pesar una carga suspendida debajo de la balanza;
- b) Baño de agua capaz de efectuar el control termostático a $20 \text{ °C} \pm 0.2 \text{ °C}$;
- c) Alambres de suspensión y soportes de pesas para los diferentes tamaños de pesas;
- d) Mecanismo para cargar y descargar el soporte de la pesa en el agua;
- e) Patrones de masa de densidad conocida;
- f) Herramientas para la manipulación de las pesas (por ej., guantes de laboratorio, paños sin hilachas, pinzas de laboratorio);
- g) Un local bien iluminado.

⁵ Uno de los métodos de comparación tiene en cuenta que el soporte y la parte sumergida del alambre de suspensión desplazan agua. Además, ese método compensa la fuerza adicional debida a la formación de un menisco en la interfaz aire-agua, lo cual no se refleja en las ecuaciones siguientes. Un diámetro de alambre ϕ de 0.1 a 0.3 mm para pesas hasta de 2 kg es adecuado en la mayoría de los casos.

Figura B.4 Ilustración del método A



B.7.4.2 Método A1 (dos pesas de referencia diferentes pesadas en aire)

B.7.4.2.1 Procedimiento de medición

Determinar la densidad del líquido ρ_l y la densidad del aire ρ_a al momento de la medición:

- a) Primera pesada (el calibrando en aire):
 - 1) Pesar el calibrando (m_{ta}) en aire (de densidad ρ_a);
 - 2) Registrar la indicación (I_{ta});
 - 3) Retirar cuidadosamente la pesa (m_{ta}).
- b) Segunda pesada (pesa de referencia en aire):
 - 1) Pesar la pesa de referencia (m_{ra}) en aire (de densidad ρ_a);
 - 2) Registrar la indicación (I_{ra});
 - 3) Retirar cuidadosamente la pesa (m_{ra}).
- c) Tercera pesada (el calibrando en líquido):
 - 1) Pesar el calibrando (m_{tl}) en el líquido (de densidad ρ_l);
 - 2) Registrar la indicación (I_{tl});
 - 3) Retirar cuidadosamente la pesa (m_{tl}).
- d) Cuarta pesada (segunda pesa de referencia en aire):
 - 1) Pesar la pesa de referencia (m_{rl}) en aire (de densidad ρ_{al});
 - 2) Registrar la indicación (I_{rl});
 - 3) Retirar cuidadosamente la pesa (m_{rl}).

La segunda pesa de referencia (m_{rl}) es usualmente una combinación de pesas para la cual la indicación de la balanza se aproxima a la indicación de la balanza para la pesa sumergida.

B.7.4.2.2 Cálculos

El símbolo m_{rl} representa la masa total de la combinación, y ρ_{rl} representa la densidad efectiva. La densidad efectiva se calcula por:

$$\rho_{rl} = \sum m_{rit} / \sum V_{rit} \quad (B.7.4-1)$$

donde V_{rit} son los volúmenes de las pesas. La densidad del calibrando ρ_t se calcula por::

$$\rho_t = \frac{\rho_l (C_a m_{ra} + \Delta m_{wa}) - \rho_a (C_{al} m_{rl} + \Delta m_{wl})}{C_a m_{ra} + \Delta m_{wa} - C_{al} m_{rl} - \Delta m_{wl}} \quad (B.7.4-2)$$

$$\text{con: } C_a = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{ra}} \quad (B.7.4-3)$$

$$C_{al} = 1 - \frac{\rho_{al}}{\rho_{rl}} \quad (B.7.4-4)$$

$$\Delta m_{wa} = (I_{ra} - I_{ra}) C_s \quad (B.7.4-5)$$

$$\Delta m_{wl} = (I_{rl} - I_{rl}) C_s \quad (B.7.4-6)$$

$$C_s = 1 - \frac{\rho_{as}}{\rho_a} \quad (B.7.4-7)$$

El símbolo ρ_s representa la densidad de la pesa de sensibilidad, y ρ_{as} representa la densidad del aire al momento de la calibración de la balanza.

Incertidumbre relativa:

$$\left(\frac{u(\rho_t)}{\rho_t} \right)^2 = \left(c(\rho_a) \frac{u(\rho_a)}{\rho_a} \right)^2 + \left(c(\rho_{al}) \frac{u(\rho_{al})}{\rho_{al}} \right)^2 + \left(\frac{u(\rho_l)}{\rho_l} \right)^2 + \left(c(\rho_{ra}) \frac{u(\rho_{ra})}{\rho_{ra}} \right)^2 + \left(c(\rho_{rl}) \frac{u(\rho_{rl})}{\rho_{rl}} \right)^2 + c^2(m_r) \left[2 \left(\frac{u(m_r)}{m_r} \right)^2 + \left(\frac{u(\Delta m_{wa})}{m_{ra}} \right)^2 + \left(\frac{u(\Delta m_{wl})}{m_{rl}} \right)^2 + \left(\frac{u(m_{cap})}{m_{rl}} \right)^2 \right] \quad (B.7.4-8)$$

$$\text{con: } c(\rho_a) = -\frac{\rho_a}{\rho_t} \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho_{ra}} \right) \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho_l} \right) \quad (\text{casi siempre despreciable}) \quad (B.7.4-9)$$

$$c(\rho_{al}) = \frac{\rho_{al}}{\rho_l \rho_{rl}} (\rho_l - \rho_t) \quad (B.7.4-10)$$

$$c(\rho_{ra}) = \frac{\rho_a}{\rho_l \rho_{ra}} (\rho_t - \rho_l) \quad (B.7.4-11)$$

$$c(\rho_{rl}) = -c(\rho_{al}) = \frac{\rho_{al}}{\rho_l \rho_{rl}} (\rho_t - \rho_l) \quad (B.7.4-12)$$

$$|c(m_r)| = \frac{(\rho_t - \rho_l)}{\rho_l} \quad (B.7.4-13)$$

$$\frac{u(m_r)}{m_r} = \frac{1}{2} \left(\frac{u(m_{ra})}{m_{ra}} + \frac{u(m_{rl})}{m_{rl}} \right) \quad (B.7.4-14)$$

Se asume que las masas y densidades de las pesas de referencia están correlacionadas entre sí.

$u(m_{cap})$ es la incertidumbre debida al efecto de la tensión superficial sobre el alambre de suspensión (con un alambre que tiene un diámetro de 1 mm, el efecto máximo puede ser 23 mg; si el diámetro del alambre es 0.1 mm, el efecto puede ser 2.3 mg).

Cerca de 20 °C, la incertidumbre de la densidad del agua se relaciona aproximadamente con la incertidumbre de su temperatura t_1 en °C (temperatura del agua) como sigue:

$$\left(\frac{u(\rho_l)}{\rho_l} \right)^2 = \left(-4.1 \times 10^{-3} \frac{u(t_1)}{t_1} \right)^2 \quad (B.7.4-15)$$

Se pueden lograr incertidumbres tan bajas como 0.05 kg m⁻¹ con la ecuación (B.7.4-2).

En la mayoría de los casos, los factores de corrección por el empuje del aire C_a , C_{al} y C_s no difieren significativamente unos de otros y se les puede asignar el valor de la unidad, simplificándose de ese modo la ecuación (B.7.4-2) como sigue:

$$\rho_t = \frac{\rho_l (m_{ra} + \Delta m_{wa}) - \rho_a (m_{rl} + \Delta m_{wl})}{m_{ra} + \Delta m_{wa} - m_{rl} - \Delta m_{wl}} \quad (B.7.4-16)$$

Incertidumbre relativa:

$$\left(\frac{u(\rho_t)}{\rho_t} \right)^2 = \left(c(\rho_a) \frac{u(\rho_a)}{\rho_a} \right)^2 + \left(\frac{u(\rho_l)}{\rho_l} \right)^2 + c^2(m_r) \left[\left(2 \frac{u(m_r)}{m_r} \right)^2 + \left(\frac{u(\Delta m_{wa})}{m_{ra}} \right)^2 + \left(\frac{u(\Delta m_{wl})}{m_{rl}} \right)^2 + \left(\frac{u(m_{comp})}{m_{rl}} \right)^2 + u_c^2 \right] \quad (B.7.4-17)$$

con: $\frac{u(m_r)}{m_r} = \frac{1}{2} \left(\frac{u(m_{ra})}{m_{ra}} + \frac{u(m_{rl})}{m_{rl}} \right)$ (B.7.4-18) $c(\rho_a) = \frac{\rho_a}{\rho_t} \left(\frac{\rho_t}{\rho_l} - 1 \right)$ (B.7.4-19)

$|c(m_r)| = \frac{(\rho_t - \rho_l)}{\rho_l}$ (B.7.4-20) $u_c = \left(\frac{\rho_t}{\rho_l} - 1 \right) \left(\frac{\rho_a}{\rho_{ra}} - \frac{\rho_{al}}{\rho_{rl}} \right)$ (B.7.4-21)

Es posible lograr incertidumbres tan bajas como 0.2 kg m^{-3} con la ecuación (B.7.4-16).

B.7.4.3 Método A2 (pesas de referencia pesadas en el aire y en el líquido)

B.7.4.3.1 Procedimiento de medición

El mismo que se indica en B.7.4.2.1, excepto en lo siguiente:

- d) Cuarta pesada (pesa de referencia en líquido):
- 1) Pesar la pesa de referencia (m_{rl}) en el líquido;
 - 2) Registrar la indicación (I_{rl});
 - 3) Retirar cuidadosamente la pesa (m_{rl}).

La pesa de referencia (m_{rl}) puede ser una segunda pesa de referencia o la misma que se utilizó en aire (m_{ra}).

B.7.4.3.2 Cálculos

La densidad del calibrando ρ_t se calcula entonces por la ecuación (B.7.4-22) o por la ecuación (B.7.4-31).

- i) Cuando la misma pesa de referencia se utiliza para las mediciones en aire y líquido, $m_{ra} = m_{rl} = m_r$ y $\rho_{ra} = \rho_{rl} = \rho_r$, entonces:

$$\rho_t = \frac{\rho_l (C_a m_r + \Delta m_{wa}) - \rho_a (C_l m_r + \Delta m_{wl})}{m_r \frac{\rho_l - \rho_a}{\rho_r} + \Delta m_{wa} - \Delta m_{wl}} \quad (B.7.4-22)$$

con: $C_a = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}$ (B.7.4-23) $C_l = 1 - \frac{\rho_l}{\rho_r}$ (B.7.4-24)

Δm_{wa} y Δm_{wl} se definen como en la ecuación (B.7.4-2).

Incertidumbre relativa:

$$\left(\frac{u(\rho_t)}{\rho_t} \right)^2 = \left(c(\rho_a) \frac{u(\rho_a)}{\rho_a} \right)^2 + \left(c(\rho_l) \frac{u(\rho_l)}{\rho_l} \right)^2 + \left(\frac{u(\rho_r)}{\rho_r} \right)^2 + \left(c(m_r) \frac{u(m_r)}{m_r} \right)^2 + \left(c(\Delta m_{wa}) \frac{u(\Delta m_{wa})}{m_{ra}} \right)^2 + \left(c(\Delta m_{wl}) \frac{u(\Delta m_{wl})}{m_{ra}} \right)^2 + \left(c(\Delta m_{wl}) \frac{u(m_{comp})}{m_{ra}} \right)^2 \quad (B.7.4-25)$$

con: $c(\rho_a) = \frac{\rho_a}{\rho_t} \left(\frac{\rho_t}{\rho_l} - \frac{\rho_r}{\rho_l} \right)$ (casi siempre insignificante) (B.7.4-26)

$$c(\rho_t) = \frac{1}{\rho_t} (\rho_t (1 + \Delta m_{wa} / m_r) - \rho_t) \quad (\text{casi siempre despreciable}) \quad (B.7.4-27)$$

$$c(m_r) = \frac{\rho_t - \rho_l}{\rho_t} \quad (B.7.4-28) \quad c(\Delta m_{wa}) = \frac{\rho_t}{\rho_l} \left(\frac{\rho_l - \rho_t}{\rho_t} \right) \quad (B.7.4-29)$$

$$c(\Delta m_{wl}) = \frac{\rho_t}{\rho_l} \quad (B.7.4-30)$$

Se pueden lograr incertidumbres tan bajas como 0.1 kg m^{-3} utilizando la ecuación (B.7.4-22).

- ii) Cuando se utilizan diferentes pesas de referencia para mediciones en aire y líquido, $m_{ra} \neq m_{rl}$ y $\rho_{ra} \neq \rho_{rl}$, entonces:

$$\rho_t = \frac{\rho_l (C_a m_{ra} + \Delta m_{wa}) - \rho_a (C_l m_{rl} + \Delta m_{wl})}{C_a m_{ra} + \Delta m_{wa} - C_l m_{rl} - \Delta m_{wl}} \quad (B.7.4-31)$$

$$\text{con:} \quad C_a = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{ra}} \quad (B.7.4-32) \quad C_l = 1 - \frac{\rho_l}{\rho_{rl}} \quad (B.7.4-33)$$

Incertidumbre relativa:

$$\left(\frac{u(\rho_t)}{\rho_t} \right)^2 = \left(c(\rho_t) \frac{u(\rho_t)}{\rho_t} \right)^2 + \left(c(\rho_l) \frac{u(\rho_l)}{\rho_l} \right)^2 + \left(c(\rho_a) \frac{u(\rho_a)}{\rho_a} \right)^2 + \left(c(\rho_{rl}) \frac{u(\rho_{rl})}{\rho_{rl}} \right)^2 + c^2(m_r) \left[2 \frac{u(m_r)}{m_r} + \left(\frac{u(\Delta m_{wa})}{m_{ra}} \right)^2 \right] + \left(c(\Delta m_{wl}) \frac{u(\Delta m_{wl})}{m_{rl}} \right)^2 + \left(c(\Delta m_{wa}) \frac{u(m_{cap})}{m_{ra}} \right)^2 \quad (B.7.4-34)$$

$$\text{con:} \quad \frac{u(m_r)}{m_r} = \frac{1}{2} \left(\frac{u(m_{ra})}{m_{ra}} + \frac{u(m_{rl})}{m_{rl}} \right) \quad (B.7.4-35)$$

$$c(\rho_a) = \frac{\rho_a}{\rho_t} \left[1 - \frac{\rho_{rl}}{\rho_{ra} \rho_l} (\rho_{ra} - \rho_t + \rho_l) \right] \quad (\text{casi siempre despreciable}) \quad (B.7.4-36)$$

$$c(\rho_l) = \frac{1}{\rho_t} (\rho_{rl} - \rho_t) \quad (\text{casi siempre despreciable}) \quad (B.7.4-37)$$

$$c(\rho_{ra}) = \frac{\rho_d \rho_a}{\rho_l \rho_{ra} \rho_t} (\rho_l - \rho_t) \quad (B.7.4-38) \quad c(\rho_{rl}) = \frac{\rho_t}{\rho_{rl}} \quad (B.7.4-39)$$

$$c(m_r) = \frac{\rho_{rl}}{\rho_l} \frac{\rho_l - \rho_t}{\rho_t} \quad (B.7.4-40) \quad c(\Delta m_{wl}) = \frac{\rho_{rl}}{\rho_l} \quad (B.7.4-41)$$

Se asume que las masas de las pesas de referencia están correlacionadas. Para $u(m_{cap})$ ver B.7.4.2.2.

Con la ecuación (B.7.4-31) se pueden lograr incertidumbres tan bajas como 0.1 kg m^{-3} .

B.7.4.4 Método A3 (pesada directa)

En lugar de utilizar una técnica de comparación, el procedimiento puede simplificarse mediante la lectura directa de la indicación de la balanza.

B.7.4.4.1 Procedimiento de medición

El mismo utilizado en B.7.4.2.1, excepto en que se omiten los procedimientos b) y d).

B.7.4.4.2 Cálculos

La ecuación correspondiente que gobierna esta situación es:

$$\rho_t = \frac{I_{ta} \times \rho_l - I_{tl} \times \rho_a}{I_{ta} - I_{tl}} \quad (B.7.4-42)$$

El requisito para esta simplificación es una balanza bien calibrada. I_{ta} e I_{tl} son los valores indicados por la balanza para el calibrando en aire (subíndice “a”) y en líquido (subíndice “l”) respectivamente, después que se ha tarado la balanza sin la pesa sobre el platillo ni sobre el soporte sumergido.

Incertidumbre relativa:

$$\left(\frac{u(\rho_t)}{\rho_t}\right)^2 = \left(\frac{u(\rho_l)}{\rho_l}\right)^2 + \left(c(\rho_a) \frac{u(\rho_a)}{\rho_a}\right)^2 + \left(c(I_{ta}) \frac{u(I_{ta})}{I_{ta}}\right)^2 + \left(c(I_{tl}) \frac{u(I_{tl})}{I_{tl}}\right)^2 + \left(c(I_{tl}) \frac{u(m_{ref})}{I_{tl}}\right)^2 + u_C^2 \quad (B.7.4-43)$$

con:

$$c(\rho_a) = \rho_a \frac{\rho_t - \rho_l}{\rho_t \rho_l} \quad (B.7.4-44) \quad c(I_{ta}) = \frac{\rho_l - \rho_t}{\rho_l} \quad (B.7.4-45)$$

$$c(I_{tl}) = \frac{\rho_t - \rho_l}{\rho_l} \quad (B.7.4-46) \quad u_C = \left(\frac{\rho_t}{\rho_l} - 1\right) \frac{\rho_a - \rho_l}{\rho_{ref}} \quad (B.7.4-47)$$

Con la ecuación (B.7.4-42) se pueden lograr incertidumbres tan bajas como 0.2 kg m^{-3} .

B.7.5 Método B (verificación de la densidad)

B.7.5.1 Principios

El método B es una forma simplificada de la técnica hidrostática e implica solamente la pesada en líquido. El calibrando se suspende de un alambre fino de tenacidad suficiente en agua de densidad ρ_l . El indicador de la balanza indica un valor de masa I_{tl} .

Este método puede realizarse de dos maneras diferentes:

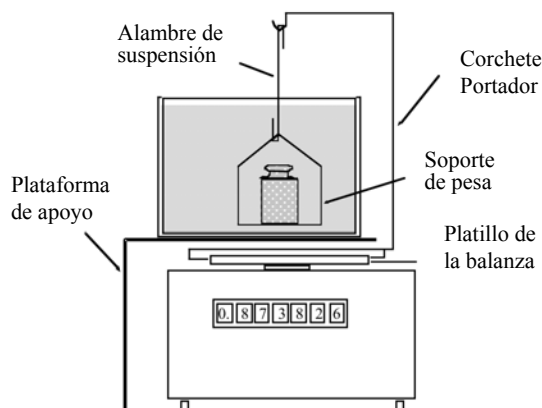
Método B1: Cálculo de la densidad utilizando la ecuación (B.7.5-1) y la ecuación de la incertidumbre asociada (B.7.5-2) (obligatorio para la clase E₁).

Método B2: Verificación de que la densidad está dentro de un rango prescrito. Los valores limitantes para la indicación de la balanza (R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*) se calculan sobre los límites mínimos y máximos para la densidad que se dan en la Tabla 5 de esta Recomendación. Se toma en cuenta una incertidumbre de medición estimada del método de determinación de la densidad, en dependencia del tamaño de la pesa. Como medida adicional de seguridad, los límites mínimos se basan en una temperatura del agua asumida de 24 °C, y los límites máximos se basan en una temperatura asumida de 18 °C.

B.7.5.2 Equipamiento

- Balanza(s) de laboratorio de rango adecuado. Se recomienda una resolución relativa de 10^{-6} con un nivel de repetibilidad correspondiente;
- Baño de líquido de temperatura estable en el rango de 18 °C a 24 °C. Si la balanza está equipada para pesar debajo de la ella, se la puede elevar sobre un soporte encima del baño (ver la Figura B.4) o el baño se puede colocar sobre una plataforma de apoyo como se muestra en la Figura B.5;
- Soporte, que puede fijarse al platillo de la balanza;
- Soporte(s) de pesa(s) de diferente(s) tamaño(s) con alambre(s) de suspensión apropiado(s);
- Pesas de referencia para la calibración de la balanza;
- Herramientas para la manipulación de las pesas (por ej., guantes de laboratorio, paños sin hilachas, pinzas de laboratorio).

Figure B.5 Ilustración del método B



B.7.5.3 Procedimiento de medición

- Sumergir la pesa (o juego de pesas) en un baño de agua destilada a una temperatura entre 18 °C y 24 °C. El baño puede colocarse sobre una plataforma de apoyo según se muestra en la Figura B.5.
- Fijar el soporte al receptor de carga de la balanza y suspender el soporte de la pesa del primero mediante un alambre de suspensión fino de tenacidad suficiente, de manera que el soporte de la pesa esté completamente sumergido. La interfaz agua-aire en el alambre de suspensión debe estar bien definida.
- Tarar la balanza para leer cero⁶.
- Eliminar las burbujas de aire de la pesa y colocarla sobre el soporte.
- No mover el alambre de suspensión, para evitar que se rompa el menisco en la superficie del agua.
- Cuando el sistema se haya estabilizado, leer y registrar la indicación de la balanza, I_H .
- Utilizando pinzas, colocar de nuevo el calibrando en su posición inicial.
- Registrar las condiciones ambientales del laboratorio (temperatura del aire, presión y humedad) y la temperatura del líquido.

B.7.5.4 Resultados

B.7.5.4.1 Método B1

Cálculo de la densidad utilizando la masa nominal m_0 de la pesa. La densidad se calcula según la ecuación:

$$\rho_t = \frac{\rho_l m_t}{m_t - I_H \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{ref}}\right)} \quad (B.7.5-1)$$

Incertidumbre de la medición del Método B1:

$$\left(\frac{u(\rho_t)}{\rho_t}\right)^2 = \left(\frac{u(\rho_l)}{\rho_l}\right)^2 + \left(c(\rho_a) \frac{u(\rho_a)}{\rho_a}\right)^2 + \left(c(I_H) \frac{u(I_H)}{I_H}\right)^2 + \left(c(m_t) \frac{u(m_t)}{m_t}\right)^2 + \left(c(I_H) \frac{u(m_{ref})}{I_H}\right)^2 \quad (B.7.5-2)$$

⁶ Nota: Si la balanza no tiene la función tara, I_H es la diferencia entre la segunda pesada y la primera.

$$\text{con: } c(m_t) = \frac{m_t(\rho_l - \rho_t)}{\rho_t(m_t - I_u)} \quad (B.7.5-3) \quad c(\rho_a) = \frac{\rho_a I_u}{\rho_{ref}(I_u - m_t)} \quad (B.7.5-4)$$

$$c(I_u) = \frac{I_u}{m_t - I_u} \quad (B.7.5-5)$$

La variable $u(m_{\text{cap}})$ es la incertidumbre debida a la tensión superficial sobre el alambre de suspensión (ver también B.7.4.2.2).

La incertidumbre de la medición del método B1 es típicamente $\pm 5 \text{ kg m}^{-3}$ o mejor para las pesas mayores, y hasta $\pm 60 \text{ kg m}^{-3}$ para las pesas de 1 g, en dependencia del tamaño de la pesa y del cuidado que se tenga en su manipulación. La incertidumbre de la medición aumenta a medida que el tamaño de la pesa disminuye.

B.7.5.4.2 Método B2

La densidad ρ_t de la pesa se verifica comparando el valor de I_{tl} con dos valores límites $I_{tl(\text{min})}$ y $I_{tl(\text{max})}$ para el correspondiente tamaño de pesa. Estos valores límites están tabulados en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo* para las clases de pesas E₁ hasta F₁.

B.7.5.5 Registro de los resultados

Registrar los resultados de las mediciones utilizando los formularios que aparecen en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*, Verificación de la densidad – Método B y Valores límites de la densidad.

B.7.6 Método C (Determinación del volumen por la pesada del líquido desplazado)

Este método no es práctico para las pesas de menos de 1 g.

B.7.6.1 Principios

Este método puede realizarse de dos maneras:

- 1) La masa del calibrando es desconocida; o
- 2) La masa del calibrando es conocida.

B.7.6.2 Consideraciones Generales

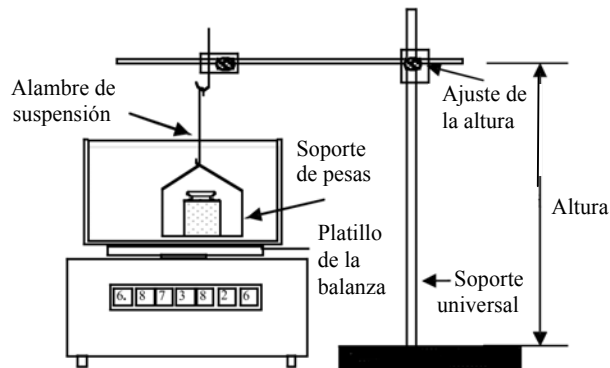
En lugar de medir la fuerza de empuje que actúa sobre la pesa sumergida en agua, es posible determinar el volumen de líquido desplazado por la pesa sumergida. Si se conoce la masa del calibrando m_s , se puede calcular su densidad.

B.7.6.3 Equipamiento

- a) Balanza(s) de laboratorio con capacidad(es) en el rango de 200 g a 100 kg con resolución relativa de 10^{-5} ó mejor y correspondiente repetibilidad;
- b) Baño(s) de líquido de tamaño(s) adecuado(s);
- c) Soporte con ajuste de la altura para sostener las pesas colgando en el agua;
- d) Alambre(s) de suspensión y soporte(s) de pesas de tamaño(s) adecuado(s);
- e) Herramientas para la manipulación de las pesas (por ej., guantes de laboratorio, paños sin hilachas, pinzas de laboratorio);
- f) Un local bien iluminado.

B.7.6.4 Procedimiento de medición

Figura B.6 Ilustración del método C



- Colocar un recipiente con agua sobre el platillo de la balanza.
- Suspender el soporte de la pesa y el alambre de suspensión de un soporte universal separado.
- Tarar la balanza, si esta función está disponible. Si no lo está, leer la indicación I_1 .
- Elevar el soporte por encima de la superficie del agua, colocar la pesa sobre el soporte y sumergirla de nuevo.
- Ajustar la altura de un modo tal que el alambre de suspensión atraviese la interfaz aire-agua a la misma altura anterior.
- Leer la indicación I_{dl} (o I_2 si la balanza no tiene la función de tara, $I_{dl} = I_2 - I_1$).
- Registrar las condiciones ambientales del laboratorio, temperatura, presión y humedad del aire, y la temperatura del líquido.
- Determinar la densidad del aire en el laboratorio ρ_a y la densidad del baño de agua, ρ_l utilizando la ecuación (E.3-1) y la Tabla B.6.

La masa de agua desplazada $V_t \rho_l$ se indica por el valor de la pesa I_{dl} . Si es necesario, extrapolar para la evaporación durante el tiempo transcurrido desde la última tara.⁷

B.7.6.5 Cálculos

La diferencia I_{dl} entre las dos lecturas es igual a la cantidad de líquido desplazado pesado en aire. Si se conoce la masa del calibrando m_t , los valores I_{dl} y m_t se introducen en la ecuación (B.7.6-1) para calcular la densidad ρ_t del calibrando.

$$\rho_t = \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_l}\right) m_t \times \rho_l}{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{ref}}\right) \times I_{dl}} \quad (B.7.6-1)$$

Si m_t no se conoce todavía, entonces el calibrando se pesa sobre una balanza, y el valor indicado I_{ta} en aire se utiliza junto con I_{dl} en la ecuación (B.7.6-2) para calcular la densidad ρ_t .

$$\rho_t = \rho_a + (\rho_l - \rho_a) \frac{I_{ta}}{I_{dl}} \quad (B.7.6-2)$$

⁷ Tomar lecturas varias veces para estimar la razón de evaporación con el tiempo y corregir por la diferencia de tiempo entre la tara y la lectura. Observe que no sería práctico repetir el método C, ya que la pesa se secaría antes de sumergirla de nuevo en agua.

B.7.6.6 Incertidumbre de la medición del método C

Para la ecuación (B.7.6-1):

(B.7.6-3)

$$u^2(\rho_t) = c^2(\rho_a)u^2(\rho_a) + c^2(\rho_l)u^2(\rho_l) + c^2(m_t)u^2(m_t) + c^2(I_{dl})u^2(I_{dl}) + c^2(I_{dl})u^2_{cap}$$

con:

$$c(\rho_a) = \frac{\rho_t}{\rho_{ref}} - \frac{m_t}{I_{dl}} \quad (B.7.6-4) \quad c(\rho_l) = \frac{m_t}{I_{dl}} \quad (B.7.6-5)$$

$$c(m_t) = \frac{\rho_l}{I_{dl}} \quad (B.7.6-6) \quad c(I_{dl}) = \frac{m_t \rho_l}{I_{dl}^2} \quad (B.7.6-7)$$

Para la ecuación (B.7.6-2):

$$u^2(\rho_t) = c^2(\rho_a)u^2(\rho_a) + c^2(\rho_l)u^2(\rho_l) + c^2(I_{ta})u^2(I_{ta}) + c^2(I_{dl})u^2(I_{dl}) + c^2(I_{dl})u^2_{cap} \quad (B.7.6-8)$$

con:

$$c(\rho_a) = 1 - \frac{I_{ta}}{I_{dl}} \quad (B.7.6-9) \quad c(\rho_l) = \frac{I_{ta}}{I_{dl}} \quad (B.7.6-10)$$

$$c(I_{ta}) = \frac{\rho_l}{I_{dl}} \quad (B.7.6-11) \quad c(I_{dl}) = -\frac{I_{ta} \rho_l}{I_{dl}^2} \quad (B.7.6-12)$$

Dentro del rango de $1 \text{ g} \leq m_t \leq 1 \text{ kg}$, la incertidumbre de la medición es $\pm 100 \text{ kg m}^{-3}$ a $\pm 10 \text{ kg m}^{-3}$, en dependencia del tamaño de las pesas y del cuidado que se tenga en su manipulación. Antes de comparar el valor calculado de la densidad ρ_t con los límites mínimo y máximo de la densidad mostrados en la tabla 5, el valor de ρ_t debe expandirse con la incertidumbre esperada a partir de este método o con un margen de incertidumbre estimado.

B.7.6.7 Registro de los resultados

Registrar los resultados de las mediciones utilizando los formularios que aparecen en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*, Determinación de la densidad – Método C.

B.7.7 Método D (Determinación de del líquido desplazado en un recipiente de volumen constante)**B.7.7.1 Principio**

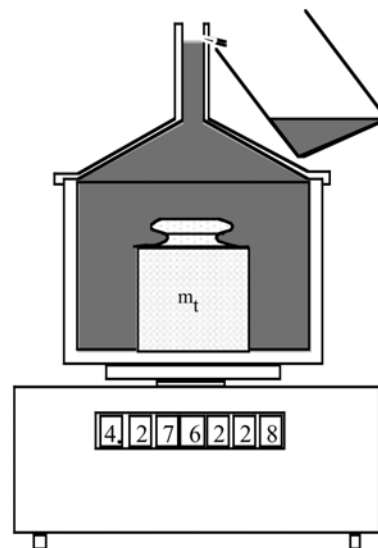
Las pesas grandes son difíciles de manipular en la pesada hidrostática. Una manera alternativa para determinar sus volúmenes es pesando el líquido que ellas desplazan, de un modo indirecto, utilizando un recipiente de volumen constante ajustable.

B.7.7.1.1 El recipiente se llena con agua hasta un nivel bien definido y se pesa dos veces, una vez con la pesa y la otra vez sin la pesa dentro del agua. Las indicaciones correspondientes de la balanza son I_{1+t} y I_1 . El cuello del recipiente no debe ser mayor de 1 cm, el agua debe mantenerse a una temperatura uniforme y estable de $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$. Se debe tener cuidado de que el volumen de la pesa no sea demasiado pequeño en proporción a la capacidad del recipiente, que el sello del recipiente no tenga fugas, y que no haya aire atrapado. Dada una densidad constante del líquido ρ_l , la densidad de la pesa ρ_t se calcula a partir de la diferencia ($I_{1+t} - I_1$) según la ecuación (B.7.7-1), que es análoga a la ecuación (B.7.5-1).

$$\rho_t = \frac{m_0 \rho_l}{m_0 - (I_{1+t} - I_1) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{ref}} \right)} \quad (B.7.7-1)$$

B.7.7.2 Equipamiento

- Balanza(s) de laboratorio con capacidad(es) en el rango de 5 kg a 100 kg y resolución relativa de 10^{-6} ó mejor;
- Recipiente(s) transparente(s) de diseño adecuado con nivel de llenado controlable con precisión;
- Herramientas para la manipulación de las pesas (por ej., guantes de laboratorio, paños sin hilachas, pinzas de laboratorio); y
- Un local bien iluminado.

B.7.7.3 Procedimiento de medición**Figura B.6 Ilustración del método D**

- Colocar la pesa en el recipiente y llenarlo cuidadosamente con agua hasta un nivel bien definido (por ejemplo, hasta que fluya sobre un rebosadero).
- Pesar el recipiente con la pesa y el líquido.
- Tomar lectura de la indicación I_{I+t} y registrarla.
- Retirar la pesa y añadir agua a la misma temperatura hasta el mismo nivel. No es necesario conocer el volumen si la temperatura del agua se mantiene constante.
- Pesar el recipiente que contiene el líquido.
- Tomar lectura de la indicación I_I y registrarla.
- La diferencia entre la lecturas ($I_{I+t} - I_I$) se debe a la masa de la pesa menos la masa del agua desplazada.⁸
- Registrar las condiciones ambientales del laboratorio (temperatura, presión y humedad del aire) y la temperatura del líquido.
- Determinar la densidad del aire del laboratorio ρ_a y densidad del baño de agua ρ_1 utilizando la ecuación (E.3-1) y la Tabla B.6.

⁸ Si se repite el método D no es necesario secar la pesa antes de sumergirla de nuevo.

B.7.7.4 Incertidumbre de la medición del método D

$$\left(\frac{u(\rho_t)}{\rho_t}\right)^2 = \left(c(\rho_s)\frac{u(\rho_s)}{\rho_s}\right)^2 + \left(c(m_t)\frac{u(m_t)}{m_t}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_l)}{\rho_l}\right)^2 + 2(c_I u_I)^2 + (c_I u_w)^2 \quad (B.7.7-2)$$

con:

$$c(\rho_s) = \frac{\rho_s \rho_t (I_{t+1} - I_1)}{\rho_{ref} \rho_l m_t} \quad (B.7.7-3) \quad c(m_t) = \frac{\rho_t - \rho_l}{\rho_l} \quad (B.7.7-4) \quad c_I = \frac{\rho_t}{m_t \rho_l} \quad (B.7.7-5)$$

La variable u_w es la contribución a la incertidumbre debida a los dos niveles de agua (con la pesa y sin ella).

La incertidumbre de este método es del orden de $\pm 15 \text{ kg m}^{-3}$ o mejor para una pesa de 1 kg, pero se reduce para pesas mayores a condición de que el cuello del recipiente sea muy estrecho, que el agua se mantenga a una temperatura uniforme y estable dentro de $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, que el volumen de la pesa no sea demasiado pequeño en proporción a la capacidad del recipiente, que el sello del recipiente no tenga fugas, y que no haya aire atrapado.

B.7.7.5 Registro de los resultados

Registrar los resultados de las mediciones utilizando los formularios que aparecen en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*, Determinación de la densidad – Método D.

B.7.8 Método E (determinación de volumen por mediciones geométricas)**B.7.8.1 Principio**

El volumen de una pesa puede calcularse a partir de sus dimensiones empleando fórmulas apropiadas. El volumen puede dividirse en varios componentes elementales que también pueden incluir una cavidad [27]. En lo que sigue se considera que las pesas están formadas de acuerdo con la Figura A.1 (en este caso sin cavidad de ajuste, ver la Figura B.8). Las fórmulas estándares para las tres formas geométricas relativamente simples de la cabeza A, el cuello B y el cuerpo principal C se dan en [27]. En algunos casos la pesa puede tener una hendidura D en el fondo. El cálculo de las porciones de volumen es inmediato.

B.7.8.1.1 El método E hace innecesaria la inmersión de la pesa en agua, lo que es conveniente para las pesas que tienen cavidad de ajuste. Sin embargo, existe el riesgo de que se dañe la superficie durante la medición, por consiguiente, el método E no debe aplicarse a las pesas de clases E y F.

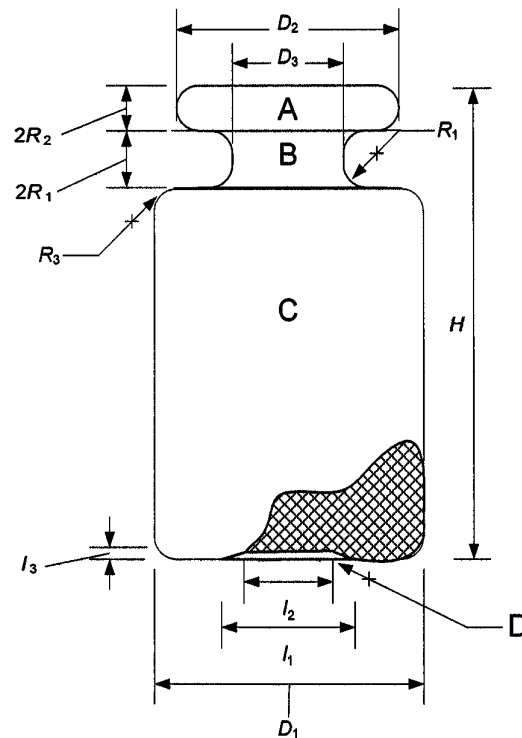
B.7.8.2 Equipamiento

- Calibradores Vernier, preferiblemente con resolución de 0.01 mm;
- Micrómetro (para pesas pequeñas);
- Galgas de radios (alternativamente se pueden utilizar los valores dados en la tabla A.1);
- Herramientas para la manipulación de las pesas (por ej., guantes de laboratorio, paños sin hilachas, pinzas de laboratorio); y
- Un local bien iluminado.

B.7.8.3 Procedimiento de medición

- Medir las alturas, los diámetros y los radios, así como las dimensiones de cualquier cavidad o indentación en conformidad con la Figura B.8.
- Calcular y sumar los volúmenes de las partes A, B, C y D en conformidad con las ecuaciones (B.7.8-1) hasta (B.7.8-5).
- Calcular la densidad a partir de la masa y el volumen.

Figura B.8 Ilustración de la determinación de volumen de una pesa cilíndrica (ver Tabla A.1)



$$V_A = 2\pi R_2 \left(\frac{D_2^2}{4} - R_2 D_2 + R_2^2 + \frac{\pi R_2 D_2}{4} - \frac{\pi R_2^2}{2} + \frac{2R_2^2}{3} \right) \quad (B.7.8-1)$$

$$V_B = \pi R_1 \left(\frac{D_3^2}{2} + 2R_1 D_3 - \frac{\pi R_1 D_3}{2} - \pi R_1^2 + \frac{10R_1^2}{3} \right) \quad (B.7.8-2)$$

$$V_C = \pi \frac{D_1^2}{4} (H - 2(R_1 + R_2)) - \pi R_3^2 \left(2D_1 - \frac{10R_3}{3} - \frac{\pi D_1}{2} + \pi R_3 \right) \quad (B.7.8-3)$$

$$V_D = \frac{1}{12} l_3 (l_1^2 + l_1 l_2 + l_2^2) \quad (B.7.8-4)$$

$$V_{\text{weight}} = V_A + V_B + V_C - V_D \quad (B.7.8-5)$$

B.7.8.4 Incertidumbre de la medición del método E

La mayor contribución a la incertidumbre se debe a la desviación de la forma real del modelo matemático. Para las pesas conformadas de acuerdo con el Anexo A, el rango de la incertidumbre está comprendido entre 30 kg m^{-3} para las pesas grandes y 600 kg m^{-3} para las pesas pequeñas. Para las pesas con cavidades u otras formas, la incertidumbre puede duplicar esos valores [25].

B.7.8.5 Registro de los resultados

Registrar los resultados de las mediciones utilizando los formularios que aparecen en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo*, Determinación de la densidad – Método E.

B.7.9 Método F (estimación basada en la composición conocida)

B.7.9.1 Principio

La mayoría de las pesas se producen a partir de un número limitado de aleaciones. El valor preciso de la densidad depende de las proporciones relativas de los constituyentes de cada aleación. Los rangos típicos de la densidad se dan en la tabla B.7.

B.7.9.2 Método F1

Si se conoce que el suministrador utiliza consistentemente la misma aleación para una clase particular de pesas, y su densidad se conoce a partir de calibraciones preliminares, entonces se debe aplicar la densidad conocida utilizando una incertidumbre de un tercio de que se da en la tabla B.7 para la misma aleación.

B.7.9.3 Método F2

Obtener del suministrador la composición de la aleación de la pesa en cuestión. Hallar el valor de la densidad en un manual físico-químico que contenga tablas de densidad en función de la concentración de los elementos en la aleación. Utilice el valor de densidad del manual y aplique el correspondiente valor de incertidumbre de la Tabla B.7. Para las pesas de clases E₂ hasta M₂ los valores de la “densidad asumida” que aparecen en la tabla B.7 que sigue son adecuados. La densidad de las pesas de clases M₃ usualmente no es de interés.

Tabla B.7 Método F2 - Lista de las aleaciones utilizadas más comúnmente para fabricar las pesas

| Aleación/material | Densidad asumida | Incertidumbre ($k = 2$) |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Platino | 21 400 kg m ⁻³ | ± 150 kg m ⁻³ |
| Níquel plata | 8 600 kg m ⁻³ | ± 170 kg m ⁻³ |
| Latón | 8 400 kg m ⁻³ | ± 170 kg m ⁻³ |
| Acero inoxidable | 7 950 kg m ⁻³ | ± 140 kg m ⁻³ |
| Acero al carbono | 7 700 kg m ⁻³ | ± 200 kg m ⁻³ |
| Hierro | 7 800 kg m ⁻³ | ± 200 kg m ⁻³ |
| Hierro fundido (blanco) | 7 700 kg m ⁻³ | ± 400 kg m ⁻³ |
| Hierro fundido (gris) | 7 100 kg m ⁻³ | ± 600 kg m ⁻³ |
| Aluminio | 2 700 kg m ⁻³ | ± 130 kg m ⁻³ |

B.7.9.4 Cálculos

B.7.9.4.1 Densidad de las pesas con una cavidad de ajuste

El ajuste de una pesa con material denso en la cavidad de ajuste puede también influir en la densidad de la pesa. Si la cantidad de aleación X (de densidad ρ_x) es x por ciento, y cantidad del material de ajuste Y (de densidad ρ_y) es y por ciento de la masa final, entonces la densidad ρ_t puede calcularse mediante la ecuación siguiente:

$$\rho_t = \frac{100}{\frac{x}{\rho_x} + \frac{y}{\rho_y}} \quad (B.7.9-1)$$

B.7.9.4.2 Densidad de una pesa compuesta

La misma ecuación puede utilizarse también para determinar la densidad resultante si la pesa está compuesta de dos constituyentes diferentes o si se utilizan dos pesas de diferentes densidades como referencia. Los metales preferidos para ajustar las pesas son el tungsteno (18 800 kg m⁻³ ± 200 kg m⁻³), el plomo (11 300 kg m⁻³ ± 150 kg m⁻³), el molibdeno (10 000 kg m⁻³ ± 150 kg m⁻³) y el estaño (7 kg m⁻³ ± 100 kg m⁻³).

B.7.9.5 Registro de los resultados

Registrar los resultados de las mediciones utilizando los formularios que aparecen en R 111-2 *Formulario de reporte de ensayo* Determinación de la densidad – Método F.

B.7.10 Métodos recomendados para determinar la densidad

Tabla B.8 Métodos recomendados para determinar la densidad de las pesas por sus clases

| Pesa | Clase E ₁ | Clase E ₂ | Clase F ₁ | Clases F ₂ , M ₁ , M ₂ |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|---|
| 5 000 kg | | | E, F | |
| 2 000 kg | | | | |
| 1 000 kg | | E, F | | |
| 500 kg | | | | |
| 200 kg | | | | |
| 100 kg | | | | |
| 50 kg | A, C, D | D, E, F | D, E, F | |
| 20 kg | | | | |
| 10 kg | | | | |
| 5 kg | A, B1*, C, D | | | |
| 2 kg | | | | |
| 1 kg | A, B*, C | B, F | B, C, F | |
| 500 g | | | | |
| 200 g | | | | |
| 100 g | | | | |
| 50 g | A, B1* | B, C, F | | |
| 20 g | | | | |
| 10 g | | | | |
| 5 g | | | | |
| 2 g | B*, F1 | F | F | |
| 1 g | | | | |
| 500 mg | F1 | | | |
| 200 mg | | | | |
| 100 mg | | | | |
| 50 mg | | | | |
| 20 mg | | | | |
| | | | | |

* Cuando se utiliza el Método B para la clase de pesas E₁, el valor de la densidad debe calcularse mediante la ecuación (B.7.5-1).

Nota 1: Usualmente la densidad no es de interés para la clase de pesas M₃.

Nota 2: La limpieza debe repetirse después de la medición de la densidad si el líquido utilizado en el sistema de determinación de la densidad no es agua (otros líquidos típicamente utilizados [por ej., los compuestos fluorocarbonados] dejan un residuo que debe eliminarse por la limpieza con un disolvente tal como alcohol).

B.8 Asignación de una clase de la OIML R 111 (2004) a pesas en uso y/o especiales

B.8.1 Alcance

Esta sección se aplica a las pesas fabricadas antes de 1994 (cuando la OIML R 111 (1994) entró en vigor) (“pesas pre 94”), y a las pesas que tienen un diseño especial o un valor nominal no estándar porque han sido confeccionadas para una aplicación única.

B.8.1.1 A las pesas “pre 94” y/o especiales se les permiten ciertas excepciones relativas a la forma y la rugosidad superficial, pero están sometidas a los lineamientos estipulados en B.8.2 y B.8.3. Se debe prestar especial consideración a las pesas en uso, particularmente cuando se dispone de una buena documentación acerca de la estabilidad de las pesas. Sin embargo, aparte de las excepciones específicas permitidas en los párrafos B.8.2 y B.8.3 que siguen, todos los demás requisitos enunciados en R 111 son aplicables también a ellas.

B.8.1.2 En esta sección, a las pesas en uso y/o especiales se les puede asignar una de las designaciones de clase comprendidas entre E_1 y M_3 . Generalmente, es suficiente clasificar una pesa solamente una vez. Cualquier recalibración posterior estará sometida a las tolerancias y condiciones que se establezcan para la respectiva clase.

B.8.2 Excepciones relativas a la rugosidad superficial

El párrafo 11.1.2 de esta Recomendación establece que:

“Un examen visual puede ser suficiente excepto en casos de duda o disputa. En tales casos se deben utilizar los valores dados en la tabla 6. La máxima rugosidad superficial permitida para las pesas mayores de 50 kg debe ser el doble de los valores especificados en la tabla 6.”

En conformidad con B.5.3.1.2.2 2), los rasguños individuales se ignoran al efectuar las mediciones de rugosidad.

En las pesas “pre 94” y/o especiales, la rugosidad debe considerarse aceptable si existe una documentación adecuada que demuestra que las masas de las pesas son estables, y si la rugosidad superficial no excede del doble del límite correspondiente dado en la tabla 6 para la respectiva clase.

B.8.3 Presentación

En las pesas “pre 94” y/o especiales, los requisitos de la cláusula 14 de esta Recomendación se cumplen si la clase está marcada sobre el estuche de las pesas. Esto se aplica a las clases E_1 , E_2 , F_1 , F_2 y M_1 . De acuerdo con 13.4.3, las pesas de clase M_1 deben marcarse con “ M_1 ” o “M”.

Anexo C

Calibración de una pesa o de un juego de pesas (Obligatoria)

C.1 Alcance

Esta sección describe dos métodos para la determinación de la masa convencional de las pesas en un juego de pesas:

- 1) El método de comparación directa; y
- 2) El método de subdivisión y multiplicación, que se aplica solamente a los juegos de pesas.

Se describen tres diferentes ciclos de pesadas, todos los cuales son formas de pesada por sustitución diseñados para (pero no exclusivamente para) las balanzas de un solo platillo.

Antes de la determinación de la masa, la densidad de las pesas debe conocerse con suficiente exactitud. Además, las condiciones ambientales y las características metrológicas de los instrumentos de pesar utilizados en la determinación de la masa deben conocerse también con suficiente exactitud. Se presentan las fórmulas para la determinación de la masa convencional y de su incertidumbre.

C.2 Requisitos generales

C.2.1 Condiciones ambientales

La calibración de las pesas debe realizarse en condiciones ambientales estables, a presión atmosférica ambiental y a temperaturas próximas a la temperatura del local de trabajo⁽¹⁾. Los valores típicos recomendados se dan en la tabla C.1.

Tabla C.1 Condiciones ambientales durante la calibración (Valores típicos recomendados para obtener resultados satisfactorios)

| Clase de pesas | Cambio de temperatura durante la calibración ⁽²⁾ |
|----------------|---|
| E ₁ | ± 0.3 °C por hora con un máximo de ± 0.5 °C en 12 horas |
| E ₂ | ± 0.7 °C por hora con un máximo de ± 1 °C en 12 horas |
| F ₁ | ± 1.5 °C por hora con un máximo de ± 2 °C en 12 horas |
| F ₂ | ± 2 °C por hora con un máximo de ± 3.5 °C en 12 horas |
| M ₁ | ± 3 °C por hora con un máximo de ± 5 °C en 12 horas |

| Clase de pesas | Rango de humedad relativa (<i>hr</i>) del aire ⁽³⁾ |
|----------------|---|
| E ₁ | 40 % a 60 % con un máximo de ± 5 % en 4 horas |
| E ₂ | 40 % a 60 % con un máximo de ± 10 % en 4 horas |
| F | 40 % a 60 % con un máximo de ± 15 % en 4 horas |

Nota 1: También es importante que la diferencia de temperatura entre las pesas y el aire dentro del comparador de masa sea lo más pequeña posible. Mantener la pesa de referencia y el calibrando dentro del comparador de masa antes de la calibración y durante la misma puede reducir esta diferencia de temperatura.

Nota 2: Este es el cambio de temperatura en el laboratorio. La estabilización térmica de las balanzas y las pesas (ver B.4.3) también requiere una estabilidad de temperatura apropiada en el laboratorio durante 24 horas antes de la calibración.

Nota 3: El límite superior es principalmente importante durante la conservación de las pesas.

C.2.1.1 Para las pesas de clases E_1 y E_2 , la temperatura debe permanecer entre 18 °C y 27 °C. Las condiciones ambientales deben permanecer dentro de las especificaciones del instrumento de pesar.

C.2.1.2 Si la densidad del aire se desvía de 1.2 kg m^{-3} en más de 10 %, se deben utilizar valores de masa en los cálculos y la masa convencional deberá calcularse a partir de la masa.

C.2.2 Instrumento de pesar

Las características metrológicas del instrumento de pesar utilizado deben ser conocidas a partir de mediciones anteriores y su resolución, linealidad, repetibilidad y excentricidad (ver C.6.4) deben ser tales que se pueda lograr la incertidumbre requerida.

C.2.3 Pesas de referencia

La pesa de referencia debe ser generalmente de una clase de exactitud más alta (ver 1.3.1) que la pesa que se va a calibrar. En la calibración de las pesas de clase E_1 , la pesa de referencia debe tener características metrológicas (propiedades magnéticas, rugosidad superficial) similares o mejores que la pesa que se va a calibrar.

C.2.3.1 Deben cumplirse 5.2 y 5.3.

C.3 Esquemas de pesadas

C.3.1 Comparación directa

Usualmente el calibrando debe calibrarse por comparación contra una o más pesas de referencia. En cada comparación, la masa nominal del calibrando y de la pesa de referencia deben ser iguales. Se puede utilizar un patrón de comprobación (ver 2.5) para monitorear el proceso de medición [28].

Nota: **Se pueden presentar problemas especiales al calibrar pesas de clases E_1 de menos de un gramo.** Esto se debe parcialmente a una incertidumbre relativamente grande de las pesas de referencia en este rango. Además, la inestabilidad de los instrumentos de pesar y una gran área superficial son factores que influyen negativamente en la incertidumbre de la medición. Por consiguiente, el método de subdivisión se recomienda con énfasis para tales pesas.

C.3.2 Subdivisión

Se puede calibrar un juego de pesas completo contra una o más pesas de referencia [29, 30, 31, 32]. Este método requiere varias pesadas dentro de cada década del juego. En estas pesadas se comparan distintas combinaciones de pesas de igual masa nominal total. Este método se utiliza principalmente para calibrar juegos de pesas de clase E_1 cuando se requiere la más alta exactitud. Si con este método se utiliza solamente una pesa de referencia, el número de ecuaciones de pesada deberá ser mayor que el número de pesas desconocidas, y se deberá realizar un cálculo de ajuste apropiado con el fin de evitar la propagación de errores. Si se utiliza más de una pesa de referencia, el número de ecuaciones puede ser igual al número de pesas desconocidas. En este caso no es necesario ajustar los cálculos. La ventaja de tales métodos consiste en el hecho de que ellos incluyen una cierta redundancia que ofrece mayor confianza en los resultados. Sin embargo, estos métodos, particularmente el ajustar los cálculos, requiere recursos matemáticos más avanzados [29, 30]. Un diseño de pesada típico para un juego de masas de 5, 2, 2*, 1, 1* ($\times 10^n \text{ g}$) se da en la referencia [30, 31]:

Tabla C.2 Diseño de pesada típico

| | | |
|--------------------|-----|---------------------|
| Pesa de referencia | vs. | $5 + 2 + 2^* + 1$ |
| Pesa de referencia | vs. | $5 + 2 + 2^* + 1^*$ |
| 5 | vs. | $2 + 2^* + 1$ |
| 5 | vs. | $2 + 2^* + 1^*$ |
| $2 + 1$ | vs. | $2^* + 1^*$ |
| $2 + 1$ | vs. | $2^* + 1^*$ |
| $2 + 1^*$ | vs. | $2^* + 1$ |
| $2 + 1^*$ | vs. | $2^* + 1$ |
| 2 | vs. | $1 + 1^*$ |
| 2 | vs. | $1 + 1^*$ |
| 2^* | vs. | $1 + 1^*$ |
| 2^* | vs. | $1 + 1^*$ |

En este ejemplo la pesa de referencia debe tener un valor nominal de $10 (\times 10^n \text{ g})$. Aquí 2^* puede ser cualquier combinación de masas que tenga un valor nominal de 2. La pesa 1^* puede ser una combinación de pesas $0.5 + 0.2 + 0.2^* + 0.1 (\times 10^n \text{ g})$, o puede ser un patrón de comprobación (ver 2.5). Algunas comparaciones se han duplicado para simplificar los cálculos. El diseño de pesada mostrado anteriormente suele aplicarse sólo si se utiliza el mismo instrumento de pesar en todas las comparaciones.

C.4 Ciclos de pesadas

Posteriormente, en C.4.1 y C.4.2, se describen procedimientos aceptados para tres ciclos de pesadas diferentes, para una sola pesada de comparación.

Nota: Se pueden utilizar otros procedimientos y ciclos de pesadas. Si, en particular, se utilizan ciclos de pesadas que no son independientes uno de otro, tales como $A_1 B_2 A_2, A_2 B_2 A_3, \dots$, la incertidumbre tiene que evaluarse mediante la consideración de los términos de covarianza, y la fórmula dada en C.6.1 deberá modificarse correspondientemente [33].

En los ciclos de pesadas, “A” representa la pesada de la pesa de referencia y “B” representa la pesada del calibrando. Los ciclos ABBA y ABA se utilizan normalmente cuando se calibran pesas de clases E y F.

El ciclo $AB_1 \dots B_n A$ se utiliza frecuentemente al calibrar pesas de clases M, pero generalmente no se recomienda para las pesas de clases E y F. Si, sin embargo, se utiliza un comparador de masa con un mecanismo automático de intercambio de pesas y si el sistema se instala dentro de una cubierta protectora, este ciclo puede aceptarse también para las calibraciones de pesas de clases E y F.

Cuando se aplica subdivisión, solamente deben emplearse ciclos ABBA o ABA. Si se utiliza más de una pesa de referencia, el ciclo de pesada puede aplicarse a cada pesa de referencia por separado. Las pesas de referencia pueden entonces compararse unas contra otras.

C.4.1 Comparación del calibrando con una pesa de referencia (recomendada para las pesas de clases E y F)

Se pueden utilizar diversos ciclos de pesadas [34]. Para dos pesas, los siguientes ciclos, muy conocidos como ABBA y ABA, son posibles. Estos ciclos eliminan la deriva lineal.

Ciclo ABBA ($r_1 t_1 t_2 r_2$): $I_{r_1 1}, I_{t_1 1}, I_{t_2 1}, I_{r_2 1}, \dots, I_{r_1 n}, I_{t_1 n}, I_{t_2 n}, I_{r_2 n}$

$$\Delta I_i = (I_{t_1 i} - I_{r_1 i} - I_{r_2 i} + I_{t_2 i})/2 \quad (C.4.1-1)$$

donde $i = 1, \dots, n$

Ciclo ABA ($r_1 t_1 r_2$): $I_{r_1 1}, I_{t_1 1}, I_{r_2 1}, \dots, I_{r_1 n}, I_{t_1 n}, I_{r_2 n}$

$$\Delta I_i = I_{t_1 i} - (I_{r_1 i} + I_{r_2 i})/2 \quad (C.4.1-2)$$

donde $i = 1, \dots, n$

En los ciclos ABBA y ABA, n es el número de secuencias. Los i valores se dan en el orden según el cual las pesas deben colocarse sobre el platillo de la balanza. Aquí los subíndices “r” y “t” denotan la pesa de referencia y el calibrando, respectivamente. ΔI_i es la diferencia de indicación de la secuencia de mediciones i .

C.4.1.1 El intervalo de tiempo entre las pesadas debe mantenerse constante.

C.4.1.2 Si es necesario determinar la sensibilidad del instrumento de pesar durante el proceso de pesada, la secuencia ABBA puede modificarse a la forma $I_r, I_t, I_{t+m_s}, I_{r+m_s}$, donde “ m_s ” es la pesa de sensibilidad.

C.4.2 Comparación de varios calibrandos de la misma masa nominal con una pesa de referencia (ciclo $AB_1 \dots B_n A$). Si se van a calibrar simultáneamente varios calibrandos $t(j)$ ($j = 1, \dots, J$) con la misma masa nominal, el ciclo de pesada ABA puede modificarse a $AB_1 \dots B_n A$ como sigue:

Ciclo $AB_1 \dots B_n A$: $I_{r_1 1}, I_{t(1) 1}, I_{t(2) 1}, \dots, I_{t(j) 1}, I_{r_2 1}, I_{r_1 2}, I_{t(j) 2}, I_{t(j-1) 2}, \dots, I_{t(1) 2}, I_{r_2 2}, \dots$

$$\{I_{r_1 i-1}, I_{t(1) i-1}, I_{t(2) i-1}, \dots, I_{t(j) i-1}, I_{r_2 i-1}, I_{r_1 i}, I_{t(j) i}, I_{t(j-1) i}, \dots, I_{t(1) i}, I_{r_2 i}\}$$

$$\Delta I_{i(j)} = I_{t(j) i} - (I_{r_1 i} + I_{r_2 i})/2 \quad (C.4.2-1)$$

donde $i = 1, \dots, n$

donde $i = 1, \dots, n$

Si la deriva de la indicación de la pesada es insignificante, es decir, menor que, o igual a un tercio de la incertidumbre requerida, no es necesario invertir el orden de los calibrandos en $AB_1 \dots B_n A$ al repetir la secuencia.

El número de pesas normalmente no debe ser mayor de 5 ($J \leq 5$).

C.4.3 Número de ciclos de pesadas

El número de ciclos de pesadas n debe basarse en la incertidumbre requerida y en la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones. El número mínimo de mediciones a realizar para las clases E_1 hasta M_3 se da en la tabla C.3.

Tabla C.3 Número mínimo de ciclos de pesadas

| Clase | E_1 | E_2 | F_1 | F_2 | M_1, M_2, M_3 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| Número mínimo de ABBA | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| Número mínimo de ABA | 5 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Número mínimo de $AB_1 \dots B_n A$ | 5 | 3 | 2 | 1 | 1 |

C.5 Análisis de los datos

C.5.1 Diferencia promedio de la masa convencional - un calibrando

Para los ciclos ABBA y ABA, la diferencia de la masa convencional Δm_c entre el calibrando y la pesa de referencia de un ciclo i es:

$$\Delta m_c = m_{ct} - m_{cr} \quad (C.5.1-1)$$

$$\Delta m_{ci} = \Delta I_i + m_{cr} C_i \quad (C.5.1-2)$$

$$\text{donde: } C_i = (\rho_a - \rho_0) \times \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_r} \right) \quad (C.5.1-3)$$

La diferencia promedio de la masa convencional para n ciclos es:

$$\overline{\Delta m_c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta m_{ci} \quad (C.5.1-4)$$

C.5.1.1 Si la densidad ρ_t ó ρ_r de una pesa no es conocida, pero el material es conocido, se debe utilizar la densidad apropiada asumida de la Tabla B.7. Si se conoce solamente que la densidad de una pesa está dentro de los límites permitidos, entonces se debe utilizar el valor $8\,000 \text{ kg m}^{-3}$.

C.5.1.2 En los casos en que se estima que la corrección por el empuje del aire es insignificante, es decir, si

$$|C_i| \leq \frac{1}{3} \frac{U}{m_0} \quad (C.5.1-5)$$

se puede omitir el término $m_0 C_i$. Sin embargo, la contribución de la incertidumbre de C puede *no* ser insignificante (ver C.6.3.1). Si solamente se dispone de un promedio o de un solo valor de la densidad del aire, la corrección por el empuje del aire $m_{cr} C$ puede aplicarse después de promediar.

C.5.2 Diferencia promedio de la masa convencional – Varios calibrandos

Si se calibran varios calibrandos según el ciclo de pesada $AB_1 \dots B_n A$, la diferencia de masa promedio para la pesa j se obtiene mediante la ecuación (C.5.1-4) al reemplazar ΔI_i por $\Delta I_{i(j)}$ en la ecuación (C.5.1-2).

C.5.3 Diferencia promedio de la masa convencional – Varias series de mediciones

Cuando hay varias (J) series de mediciones idénticas, con valores promedio $\overline{\Delta m_{cj}}$ con desviaciones estándares aproximadamente iguales, el valor promedio de todas las mediciones es:

$$\overline{\Delta m_c} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \overline{\Delta m_{cj}} \quad (C.5.3-1)$$

C.5.3.1 Usualmente se realizan varias series de mediciones solamente en la calibración de pesas de clases E, cuando es necesario investigar la reproducibilidad de las pesadas.

C.5.4 Masa convencional del calibrando

La masa convencional del calibrando puede calcularse empleando la fórmula:

$$m_{ct} = m_{cr} + \overline{\Delta m_c} \quad (C.5.4-1)$$

C.5.4.1 En la verificación, la masa convencional de la pesa de referencia no es siempre conocida. En este caso se debe utilizar su valor nominal.

C.6 Cálculos de la incertidumbre

Los cálculos de la incertidumbre se basan en la “Guía para la expresión de la incertidumbre en las mediciones” 1993(E) [7] y el correspondiente documento de la “cooperación Europea para la Acreditación” (EA) [35]. En las Referencias [28, 29, 30, 31 y 36] se aplican cálculos de la incertidumbre a comparaciones de masa. La incertidumbre se evalúa por el método de evaluación de tipo A o de tipo B. La evaluación de tipo A se basa en el análisis estadístico de una serie de mediciones, mientras que la evaluación de tipo B se basa en otros conocimientos.

C.6.1 Incertidumbre estándar del proceso de pesada u_w (Tipo A)

La incertidumbre estándar del proceso de pesada $u_w(\overline{\Delta m_c})$ es la desviación estándar de la diferencia de masa para n ciclos de mediciones:

$$u_w(\overline{\Delta m_c}) = \frac{s(\Delta m_{ci})}{\sqrt{n}} \quad (C.6.1-1)$$

donde $s(\Delta m_{ci})$ se define más abajo para las distintas clases de pesas.

C.6.1.1 Los ciclos ABBA, ABA o $AB_1 \dots B_n A$ se aplican frecuentemente a las clases F_2 , M_1 , M_2 y M_3 . Para estas clases de pesas, si la desviación estándar de las mediciones de diferencia de masa no se conoce a partir de datos históricos, se la puede estimar como:

$$s(\Delta m_c) = \frac{\max(\Delta m_{ci}) - \min(\Delta m_{ci})}{2 \times \sqrt{3}} \quad (C.6.1-2)$$

a partir de $n \geq 3$ ciclos de mediciones.

La desviación estándar puede también calcularse como se describe en C.6.1.2.

C.6.1.2 Para las pesas de clases E_1 , E_2 , F_1 , la varianza de la diferencia de masa Δm_c del proceso de pesada, $s^2(\Delta m_c)$, se estima a partir de n ciclos de mediciones por:

$$s^2(\Delta m_c) = \frac{1}{n-1} \sum_{ci}^n (\Delta m_{ci} - \overline{\Delta m_c})^2 \quad (C.6.1-3)$$

con $n-1$ grados de libertad.

C.6.1.3 Si solamente se realizan unas pocas mediciones, el estimado de $s(\Delta m_c)$ puede ser poco fidedigno. Se debe utilizar un estimado ponderado, obtenido a partir de mediciones anteriores realizadas en condiciones similares (ver D.1.2). Si esto no es posible, n no debe ser menor de 5.

C.6.1.4 Si existen J series de mediciones (donde $J > 1$), la varianza de Δm_c se calcula ponderando sobre las series J , de modo que:

$$s^2(\Delta m_c) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J s_j^2(\Delta m_{ci}) \quad (C.6.1-4)$$

con $J(n-1)$ grados de libertad (D.2).

Nota: El subíndice “ j ” se le agrega a $s_j^2(\Delta m_c)$ para diferenciar entre las desviaciones estándares de cada serie.

C.6.2 Incertidumbre de la pesa de referencia, $u(m_{cr})$ (Tipo B)

La incertidumbre estándar $u(m_{cr})$ de la masa de la pesa de referencia se calcula a partir del certificado de calibración dividiendo la incertidumbre expandida U mencionada anteriormente por el factor de cobertura k (usualmente $k = 2$) y se combina con la incertidumbre debida a la inestabilidad de la masa de la pesa de referencia $u_{inst}(m_{cr})$.

$$u(m_{cr}) = \sqrt{\left(\frac{U}{k}\right)^2 + u_{inst}^2(m_{cr})} \quad (C.6.2-1)$$

La incertidumbre debida a la inestabilidad de la pesa de referencia $u_{inst}(m_{cr})$ puede estimarse a partir de los cambios de masa observados después que se ha calibrado la pesa de referencia varias veces. Si no se dispone de valores de calibración previos, la estimación de la incertidumbre tiene que basarse en la experiencia.

C.6.2.1 Si una pesa verificada de la clase F_1 ó de una clase de exactitud inferior se utiliza como pesa de referencia y su certificado de conformidad OIML R 111 no establece su masa e incertidumbre, la incertidumbre puede estimarse a partir del error máximo permisible δm de esa clase específica:

$$u(m_{cr}) = \sqrt{\frac{\delta m^2}{3} + u_{inst}^2(m_{cr})} \quad (C.6.2-2)$$

C.6.2.2 Si una combinación de pesas de referencia se utiliza para una comparación de masa y sus covarianzas no son conocidas, se puede asumir un coeficiente de correlación de 1 [37]. Esto da lugar a una suma lineal de incertidumbres:

$$u(m_{cr}) = \sum_i u(m_{cr,i}) \quad (C.6.2-3)$$

donde $u(m_{cr,i})$ es la incertidumbre estándar de la pesa de referencia i . Este es un límite superior de la incertidumbre.

C.6.3 Incertidumbre de la corrección por el empuje del aire u_b (Tipo B)

La incertidumbre de la corrección por el empuje del aire puede calcularse mediante la ecuación (C.6.3-1) [38].

$$u_b^2 = \left[m_{cr} \frac{(\rho_r - \rho_t)}{\rho_r \rho_t} u(\rho_r) \right]^2 + [m_{cr} (\rho_r - \rho_0)]^2 \frac{u^2(\rho_t)}{\rho_t^4} + m_{cr}^2 (\rho_r - \rho_0) (\rho_r - \rho_0) - 2(\rho_{al} - \rho_0) \frac{u^2(\rho_r)}{\rho_r^4} \quad (C.6.3-1)$$

donde ρ_{al} es la densidad del aire durante la calibración (previa) de la pesa de referencia mediante el uso de una pesa de referencia de orden más alto. Cuando se utiliza la ecuación (C.6.3-1) es necesario utilizar el mismo valor para la incertidumbre de la densidad de la pesa de referencia, $u(\rho_r)$ que se utilizó para el cálculo de la incertidumbre de la calibración previa. No se puede elegir arbitrariamente una incertidumbre mayor.

C.6.3.1 Aun si la corrección por el empuje del aire es insignificante (ver C.5.1.2), la contribución a la incertidumbre del efecto del empuje del aire puede no ser despreciable y debe tomarse en consideración si $u_b \geq u_c / 3$ (ver ecuación (C.6.3-1)).

C.6.3.2 Para las clases M_1 , M_2 y M_3 , la incertidumbre debida a la corrección por el empuje del aire es despreciable y usualmente puede omitirse.

C.6.3.3 Para las clases F_1 y F_2 , es necesario conocer las densidades de las pesas con suficiente exactitud (ver Tabla 5).

C.6.3.4 Si no se mide la densidad del aire y se utiliza el promedio de la densidad del aire de la localidad, entonces la incertidumbre de la densidad del aire se estima como:

$$u(\rho_r) = \frac{0.12}{\sqrt{3}} \quad [\text{kg m}^{-3}] \quad (C.6.3-2)$$

Se puede utilizar un valor más bajo de la incertidumbre si se cuenta con datos que le sirvan de fundamento.

Al nivel del mar la densidad de aire debe asumirse como 1.2 kg m^{-3} .

C.6.3.5 Para las pesas de clases E se debe determinar la densidad de aire. Su incertidumbre se estima usualmente a partir de las incertidumbres de la temperatura, la presión y la humedad del aire. Para la clase E_1 se puede utilizar la fórmula CIPM (1981/91) [3] o una aproximación para el cálculo de la densidad del aire (ver Anexo E).

C.6.3.6 La varianza de la densidad del aire es:

$$u^2(\rho_a) = u_F^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial p} u_p \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial t} u_t \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} u_{hr} \right)^2 \quad (\text{C.6.3-3})$$

A la humedad relativa $hr = 0.5$ (50 %), una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y una presión de $101\,325 \text{ Pa}$, los siguientes valores numéricos se aplican como una aproximación:

$$u_F = [\text{incertidumbre de la fórmula utilizada}] \text{ (para la fórmula CIPM: } u_F = 10^{-4} \rho_a)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial p} = 10^{-5} \rho_a \text{ Pa}^{-1}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = -3.4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \rho_a$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} = -10^{-2} \rho_a$$

donde hr = humedad relativa, expresada como una fracción.

C.6.3.7 La densidad de la pesa de referencia ρ_r y su incertidumbre deben conocerse a partir de su certificado de calibración.

C.6.3.8 Para las pesas de clase E_2 , la densidad ρ_t no es siempre conocida, por consiguiente debe medirse o tomarse de la Tabla B.7 en B.7.9.3.

C.6.4 Incertidumbre de la balanza u_{ba} (Tipo B)

C.6.4.1 Incertidumbre debida a la calibración de las balanzas y los comparadores de masa

El método recomendado para determinar este componente es calibrar las balanzas y los comparadores de masa a intervalos de tiempo convenientes y utilizar los resultados en los cálculos de incertidumbre. Para la calibración de las pesas de clase E_1 se recomienda realizar varias mediciones en diferentes momentos para asegurar que exista suficiente información acerca de la incertidumbre al momento de la medición.

C.6.4.2 Incertidumbre debida a la sensibilidad de la balanza

Si la balanza se calibra con una pesa (o varias pesas) de sensibilidad de masa m_s de incertidumbre estándar $u(m_s)$, la contribución de la incertidumbre debida a la sensibilidad es:

$$u_s^2 = \left(\frac{\overline{\Delta m_c}}{\Delta m_c} \right)^2 \left(\frac{u^2(m_s)}{m_s^2} + \frac{u^2(\Delta I_s)}{\Delta I_s^2} \right) \quad (\text{C.6.4-1})$$

Donde: ΔI_s es el cambio en la indicación de la balanza debido a la pesa de sensibilidad;

$u(\Delta I_s)$ es la incertidumbre de ΔI_s ; y

$\overline{\Delta m_c}$ es la diferencia de masa promedio entre el calibrando y la pesa de referencia.

Si la sensibilidad no es constante con el tiempo, la temperatura y la carga, su variación debe incluirse en la incertidumbre.

C.6.4.3 Incertidumbre debida a la resolución del indicador de una balanza digital

Para una balanza digital con intervalo de escala d , la incertidumbre debida a la resolución es:

$$u_d = \left(\frac{d/2}{\sqrt{3}} \right) \times \sqrt{2} \quad (C.6.4-2)$$

El factor $\sqrt{2}$ se origina de las dos lecturas, una con la pesa de referencia y la otra con el calibrando.

C.6.4.4 Incertidumbre debida a carga excéntrica

Si se conoce que esta contribución es significativa, su magnitud debe estimarse y, si fuere necesario, su contribución debe incluirse en el balance de la incertidumbre.

C.6.4.4.1 Solución aceptable para la incertidumbre debida a la excentricidad:

$$u_E = \frac{\frac{d_1}{d_2} \times D}{2 \times \sqrt{3}} \quad (C.6.4-3)$$

Donde: D es la diferencia entre los valores máximo y mínimo tomados de la prueba de excentricidad realizada en conformidad con OIML R 76-2;

d_1 es la distancia estimada entre los centros de las pesas; y

d_2 es la distancia desde el centro del receptor de carga hasta uno de los bordes.

En la mayoría de los casos la contribución de la incertidumbre u_E está ya cubierta por la incertidumbre u_w del proceso de pesada (ver 6.1) y puede despreciarse.

C.6.4.4.2 Cuando se utilizan balanzas con un mecanismo automático para el intercambio de las pesas, la diferencia de indicación ΔI entre dos pesas puede ser diferente cuando se intercambian las posiciones: $\Delta I_1 \neq \Delta I_2$. Esto se puede interpretar como un error de excentricidad, y la incertidumbre correspondiente debe estimarse utilizando la ecuación (C.6.4-4). Esta contribución a la incertidumbre es aplicable si se la conoce a partir de mediciones de intercambio anteriores con pesas del mismo valor nominal. Si el intercambio se realiza durante un procedimiento de calibración, se debe tomar el promedio de las dos diferencias de indicación como resultado de la pesada y u_E puede despreciarse.

$$u_E = \frac{|\Delta I_1 - \Delta I_2|}{2} \quad (C.6.4-4)$$

Nota: La ecuación (C.6.4-4) se basa en los mismos fundamentos matemáticos de la ecuación (15) y en la Nota 6 de OIML D 28.

C.6.4.5 Incertidumbre debida al magnetismo, u_{ma}

Si una pesa tiene una alta susceptibilidad magnética y/o está magnetizada, la interacción magnética puede frecuentemente reducirse colocando un cuerpo no magnético entre la pesa y el receptor de carga. Si las pesas satisfacen los requisitos de esta Recomendación, se puede asumir que la incertidumbre debida al magnetismo u_{ma} es nula.

C.6.4.6 Incertidumbre estándar combinada de la balanza u_b

Los componentes de la incertidumbre se suman cuadráticamente como sigue:

$$u_b = \sqrt{u_s^2 + u_d^2 + u_E^2 + u_{ma}^2} \quad (C.6.4-5)$$

C.6.5 Incertidumbre expandida $U(m_c)$

La incertidumbre estándar combinada de la masa convencional del calibrando viene dada por:

$$u_c(m_c) = \sqrt{u_w^2(\Delta m_c) + u^2(m_{ref}) + u_b^2 + u_{ma}^2} \quad (C.6.5-1)$$

Si no se aplica la corrección por el empuje del aire $m_{cr}C$ (C.5.1.2), una contribución correspondiente al empuje del aire deberá añadirse a la incertidumbre combinada además de u_b (ver ecuación (15) y Nota 6 en [3]):

$$u_c(m_{ct}) = \sqrt{u_w^2(\Delta m_c) + u^2(m_{cr}) + u_b^2 + (m_{cr}C)^2 + u_{ba}^2} \quad (C.6.5-2)$$

La incertidumbre expandida U de la masa convencional del calibrando es como sigue

$$U(m_{ct}) = k u_c(m_{ct}) \quad (C.6.5-3)$$

C.6.5.1 Usualmente se debe utilizar el factor de cobertura $k = 2$. Sin embargo, si no se conoce una desviación estándar ponderada del proceso de pesada y el número de mediciones no puede aumentarse razonablemente hasta 10 (como en el caso de pesas muy grandes y procedimientos de pesada muy largos), y la incertidumbre $u_w(\Delta m)$ es el componente dominante en el análisis de incertidumbre, es decir, $u_w(\Delta m) > u_c(m_t) / 2$, entonces el factor de cobertura k debe calcularse a partir de la distribución t asumiendo un nivel de confianza de 95.5 % y los grados de libertad efectivos v_{eff} (calculados mediante la fórmula Welch-Satterthwaite [35]). El factor de cobertura k para distintos grados de libertad efectivos v_{eff} se da en la tabla C.4 más abajo. Si se puede asumir que los estimados de incertidumbre del tipo B son conservadores con grados de libertad infinitos, la fórmula toma la siguiente forma:

$$v_{\text{eff}} = (n-1) \times \frac{u_c^4(m_{ct})}{u_w^4(\Delta m_c)} \quad (C.6.5-4)$$

Para más detalles ver [8].

Tabla C.4 Factor de cobertura k para distintos grados de libertad v_{eff} efectivos

| | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| v_{eff} | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 20 | ∞ |
| k | 13.97 | 4.53 | 3.31 | 2.87 | 2.65 | 2.52 | 2.37 | 2.28 | 2.13 | 2.00 |

Anexo D

Control estadístico (informativo)

D.1 Patrón de comprobación

D.1.1 Un patrón de comprobación es usualmente una pesa del mismo tipo y masa nominal del calibrando que se incluye en el diseño de pesada como una pesa ‘desconocida’. El procedimiento de control funciona mejor con los esquemas de pesadas en los cuales el patrón de comprobación puede incorporarse fácilmente al diseño como una pesa desconocida. Por ejemplo, para calibrandos de las denominaciones de 5, 2, 2, 1, se incluiría un patrón de comprobación de denominación “1” en el diseño de pesada, de manera que las pesas a calibrar serían 5, 2, 2, 1, 1. Para pesas de 1 kilogramo que se calibran contra dos kilogramos de referencia en un diseño 1, 1, 1, 1, el patrón de comprobación (ver 2.5) puede ser la diferencia entre ambos kilogramos de referencia.

D.1.2 La finalidad del patrón de comprobación consiste en asegurar la bondad de las calibraciones individuales. Para este objetivo se requiere una serie histórica de valores del patrón de comprobación. El valor aceptado de la diferencia de masa \bar{m}_{diff} del patrón de comprobación (usualmente un promedio) se calcula a partir de datos históricos y se basa en un número de mediciones entre 10 y 15 como mínimo. El valor del patrón de comprobación para cualquier nueva calibración m_{diff} se revisa para comprobar su conformidad con el valor aceptado empleando una técnica de control estadístico. La prueba se basa en el estadístico t :

$$t = \frac{|m_{diff} - \bar{m}_{diff}|}{S} \quad (D.1.2-1)$$

Donde: S es la desviación estándar de n valores históricos de la diferencia de masa, la cual se estima con $v = n - 1$ grados de libertad por:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_{diff,i} - \bar{m}_{diff})^2} \quad (D.1.2-2)$$

Se considera que el proceso de calibración está dentro de los parámetros de control si:

$$t \leq \text{valor crítico de la distribución } t \text{ de Student con } v \text{ grados de libertad.}$$

D.1.3 La tabla D.1 muestra valores críticos, que dependen de los grados de libertad de S , para una prueba de dos colas al nivel de significación $\alpha = 0.05$. Si los grados de libertad son grandes (> 15), es aceptable utilizar el factor 2 en lugar del valor crítico tomado de la tabla. Si la calibración está fuera de control según la prueba t , entonces se deberá investigar y rectificar la causa antes de informar los resultados de la calibración. Esta prueba es poderosa para anomalías puntuales o corrimientos abruptos de la media del proceso, incluyendo cambios en el valor de la pesa de referencia del orden de dos o más desviaciones estándares. No es efectiva en los casos de pequeños cambios del orden desde media a una desviación estándar, ni contra derivas graduales.

D.1.4 El valor aceptado del patrón de comprobación se actualiza en la medida que se acumulan datos. Se pueden emplear distintos métodos, pero siempre es necesario graficar y examinar los datos para detectar deriva o cambios. Se considera que el valor del patrón de comprobación ha variado desde su “antiguo” valor \bar{m}_{diff} hasta un “nuevo” valor \bar{m}'_{diff} basado en las 10 ó 15 mediciones más recientes si se cumple la desigualdad:

$$t = \frac{|\bar{m}_{diff} - \bar{m}'_{diff}|}{\sqrt{\frac{S_{old}^2}{J} - \frac{S_{new}^2}{K}}} > t_{\alpha/2}(v) \quad (D.1.4-1)$$

Donde J y K son los números de “antiguas” mediciones y de “nuevas” mediciones, respectivamente, y $v = J + K - 2$.

D.2 Precisión de la balanza

La precisión de la balanza puede monitorearse utilizando una técnica de control estadístico. La desviación estándar residual de un diseño de pesada o una desviación estándar de mediciones repetidas de una sola pesa constituye la base para la prueba. Como en el caso anterior, la prueba se basa en una historia pasada de desviaciones estándares en la misma balanza. Si se tienen m desviaciones estándares s_1, \dots, s_m de datos históricos, la desviación estándar ponderada:

$$s_p = \sqrt{\frac{1}{m} \sum s_i^2} \quad (D.2-1)$$

es el mejor estimado de la desviación estándar de la balanza. La ecuación mostrada anteriormente asume que las desviaciones estándares individuales tienen ν grados de libertad, y en este caso la desviación estándar ponderada tiene $m \nu$ grados de libertad. Para cada nuevo diseño o serie de mediciones, la desviación estándar residual s_{new} , puede probarse contra el valor ponderado. La prueba estadística es:

$$F = \frac{s_{\text{new}}^2}{s_p^2} \quad (D.2-2)$$

D.2.1 Normalmente sólo se examina la degradación de la precisión. La precisión de la balanza se considera que está bajo control si:

$$F \leq \text{valor crítico de la distribución } F$$

con ν grados de libertad para s_{new} y $m \nu$ grados de libertad para s_p . Los valores críticos de F para la prueba de una cola con el nivel de significación $\alpha = 0.05$ se listan en la tabla D.2. Si se concluye que la desviación estándar se ha degradado, se deberá investigar y rectificar la causa.

Tabla D.1 Valores críticos de la distribución t de Student para pruebas de dos colas con $\alpha = 0.05$

Nota : ν = grados de libertad

| ν | Valor crítico | ν | Valor crítico | ν | Valor crítico | ν | Valor crítico | ν | Valor crítico |
|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|
| 1 | 12.706 | 11 | 2.201 | 21 | 2.080 | 31 | 2.040 | 41 | 2.020 |
| 2 | 4.303 | 12 | 2.179 | 22 | 2.074 | 32 | 2.037 | 42 | 2.018 |
| 3 | 3.182 | 13 | 2.160 | 23 | 2.069 | 33 | 2.035 | 43 | 2.017 |
| 4 | 2.776 | 14 | 2.145 | 24 | 2.064 | 34 | 2.032 | 44 | 2.015 |
| 5 | 2.571 | 15 | 2.131 | 25 | 2.060 | 35 | 2.030 | 45 | 2.014 |
| 6 | 2.447 | 16 | 2.120 | 26 | 2.056 | 36 | 2.028 | 46 | 2.013 |
| 7 | 2.365 | 17 | 2.110 | 27 | 2.052 | 37 | 2.026 | 47 | 2.012 |
| 8 | 2.306 | 18 | 2.101 | 28 | 2.048 | 38 | 2.024 | 48 | 2.011 |
| 9 | 2.262 | 19 | 2.093 | 29 | 2.045 | 39 | 2.023 | 49 | 2.010 |
| 1 | 2.228 | 20 | 2.086 | 30 | 2.042 | 40 | 2.021 | 50 | 2.009 |

Tabla D.2 Valores críticos de la distribución F para pruebas de una cola en las que s_{new} (ν grados de libertad) no exceda de $s_p(m, \nu, \nu)$ con un nivel de significación de $\alpha = 0.05$

| $F(\alpha, \nu, \nu \cdot m)$ $\alpha = 0.05$ | ν | | | | | | | | | |
|--|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| m | | | | | | | | | | |
| 1 | 161.448 | 19.000 | 9.277 | 6.388 | 5.050 | 4.284 | 3.787 | 3.438 | 3.179 | 2.978 |
| 2 | 18.513 | 6.944 | 4.757 | 3.838 | 3.326 | 2.996 | 2.764 | 2.591 | 2.456 | 2.348 |
| 3 | 10.128 | 5.143 | 3.863 | 3.259 | 2.901 | 2.661 | 2.488 | 2.355 | 2.250 | 2.165 |
| 4 | 7.709 | 4.459 | 3.490 | 3.007 | 2.711 | 2.508 | 2.359 | 2.244 | 2.153 | 2.077 |
| 5 | 6.608 | 4.103 | 3.287 | 2.866 | 2.603 | 2.421 | 2.285 | 2.180 | 2.096 | 2.026 |
| 6 | 5.987 | 3.885 | 3.160 | 2.776 | 2.534 | 2.364 | 2.237 | 2.138 | 2.059 | 1.993 |
| 7 | 5.591 | 3.739 | 3.072 | 2.714 | 2.485 | 2.324 | 2.203 | 2.109 | 2.032 | 1.969 |
| 8 | 5.318 | 3.634 | 3.009 | 2.668 | 2.449 | 2.295 | 2.178 | 2.087 | 2.013 | 1.951 |
| 9 | 5.117 | 3.555 | 2.960 | 2.634 | 2.422 | 2.272 | 2.159 | 2.070 | 1.998 | 1.938 |
| 10 | 4.965 | 3.493 | 2.922 | 2.606 | 2.400 | 2.254 | 2.143 | 2.056 | 1.986 | 1.927 |
| 11 | 4.844 | 3.443 | 2.892 | 2.584 | 2.383 | 2.239 | 2.131 | 2.045 | 1.976 | 1.918 |
| 12 | 4.747 | 3.403 | 2.866 | 2.565 | 2.368 | 2.227 | 2.121 | 2.036 | 1.968 | 1.910 |
| 13 | 4.667 | 3.369 | 2.845 | 2.550 | 2.356 | 2.217 | 2.112 | 2.029 | 1.961 | 1.904 |
| 14 | 4.600 | 3.340 | 2.827 | 2.537 | 2.346 | 2.209 | 2.104 | 2.022 | 1.955 | 1.899 |
| 15 | 4.543 | 3.316 | 2.812 | 2.525 | 2.337 | 2.201 | 2.098 | 2.016 | 1.950 | 1.894 |
| 16 | 4.494 | 3.295 | 2.798 | 2.515 | 2.329 | 2.195 | 2.092 | 2.011 | 1.945 | 1.890 |
| 17 | 4.451 | 3.276 | 2.786 | 2.507 | 2.322 | 2.189 | 2.087 | 2.007 | 1.942 | 1.887 |
| 18 | 4.414 | 3.259 | 2.776 | 2.499 | 2.316 | 2.184 | 2.083 | 2.003 | 1.938 | 1.884 |
| 19 | 4.381 | 3.245 | 2.766 | 2.492 | 2.310 | 2.179 | 2.079 | 2.000 | 1.935 | 1.881 |
| 20 | 4.351 | 3.232 | 2.758 | 2.486 | 2.305 | 2.175 | 2.076 | 1.997 | 1.932 | 1.878 |
| 30 | 4.171 | 3.150 | 2.706 | 2.447 | 2.274 | 2.149 | 2.053 | 1.977 | 1.915 | 1.862 |
| 40 | 4.085 | 3.111 | 2.680 | 2.428 | 2.259 | 2.136 | 2.042 | 1.967 | 1.906 | 1.854 |
| 50 | 4.034 | 3.087 | 2.665 | 2.417 | 2.250 | 2.129 | 2.036 | 1.962 | 1.901 | 1.850 |
| 60 | 4.001 | 3.072 | 2.655 | 2.409 | 2.244 | 2.124 | 2.031 | 1.958 | 1.897 | 1.846 |
| 70 | 3.978 | 3.061 | 2.648 | 2.404 | 2.240 | 2.120 | 2.028 | 1.955 | 1.895 | 1.844 |
| 80 | 3.960 | 3.053 | 2.642 | 2.400 | 2.237 | 2.117 | 2.026 | 1.953 | 1.893 | 1.843 |
| 90 | 3.947 | 3.046 | 2.638 | 2.397 | 2.234 | 2.115 | 2.024 | 1.951 | 1.891 | 1.841 |
| 100 | 3.936 | 3.041 | 2.635 | 2.394 | 2.232 | 2.114 | 2.023 | 1.950 | 1.890 | 1.840 |
| ∞ | 3.841 | 2.996 | 2.605 | 2.372 | 2.214 | 2.099 | 2.010 | 1.938 | 1.880 | 1.831 |

Anexo E

La fórmula CIPM y una fórmula de aproximación (informativo)

E.1 La fórmula CIPM

En 1981, el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) [39] recomendó que la siguiente ecuación se utilice para determinar ρ_a , la densidad del aire húmedo:

$$\rho_a = \frac{pM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (E.1-1)$$

Donde: p = presión;
 M_a = masa molar del aire seco;
 Z = compresibilidad;
 R = constante molar de los gases;
 T = temperatura termodinámica según ITS-90;
 x_v = fracción molar del vapor de agua; y
 M_v = masa molar del agua.

Esta fórmula se conoce como la ecuación CIPM-81. Desde su publicación en 1981 se han efectuado varios cambios en los valores recomendados de sus constantes. La fórmula se conoce ahora como la “ecuación 1981/91 para la determinación de la densidad del aire húmedo” o simplemente la “ecuación 1981/91”. Después de la reunión de 1991, el Comité Consultivo para Masa (CCM) enmendó varias de las constantes de la fórmula.

E.2 Las constantes

E.2.1 Masa molar del aire seco M_a

La masa molar del aire seco M_a , puede calcularse a partir de x_{CO_2} (la fracción molar del dióxido de carbono) en la ecuación siguiente:

$$M_a = [28.9635 + 12.011 (x_{CO_2} - 0.0004)] \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1} \quad (E.2.1-1)$$

Tabla E.1 Valor recomendado de M_a/R para $x_{CO_2} = 0.0004$

| Constante | Valor recomendado 1991 | Unidades |
|-----------|------------------------|------------------------------|
| M_a/R | 3.483 49 | $10^{-3} \text{ kg KJ}^{-1}$ |

E.2.2 Fracción molar del vapor de agua, x_v

La fracción molar del vapor de agua x_v , que es una función de la humedad relativa hr , la temperatura del punto de rocío t_r , un factor de corrección f y la presión de vapor de saturación en el aire húmedo p_{sv} viene dada por la siguiente expresión:

$$x_v = (hr) f(p, t) \frac{p_w(t)}{p} = f(p, t_r) \frac{p_w(t_r)}{p} \quad (E.2.2-1)$$

Donde: hr = humedad relativa expresada como una fracción;
 p = presión;
 t = temperatura en grados Celsius;
 $p_{sv}(t)$ = presión de vapor de saturación del aire húmedo; y
 t_r = temperatura del punto de rocío.

E.2.2.1 La presión de vapor de saturación en el aire húmedo p_{sv} , puede calcularse como sigue:

$$p_w = 1 \text{ Pa} \times \exp(AT^2 + BT + C + D/T) \quad (E.2.2-2)$$

Donde A , B , C , D son los parámetros constantes de la presión del vapor en la saturación. Los valores recomendados son los siguientes:

Tabla E.2 Valores recomendados para las constantes A , B , C , D

| Constante | Valor recomendado 1991 | Unidades |
|-----------|------------------------|--------------------------|
| A | 1.237 884 7 | 10^{-5} K^{-2} |
| B | - 1.912 131 6 | 10^{-2} K^{-1} |
| C | 33.937 110 47 | |
| D | - 6.343 164 5 | 10^3 K |

E.2.2.2 Factor de intensidad f

El factor de corrección f es una función de tres constantes (α , β , γ) y de la temperatura t en grados Celsius. Este factor puede calcularse como sigue:

$$f = \alpha + \beta p + \gamma t^2 \quad (E.2.2-3)$$

Tabla E.3 Valores recomendados para las constantes α , β , γ

| Constante | Valor recomendado 1991 | Unidades |
|-----------|------------------------|---------------------------|
| α | 1.000 62 | |
| β | 3.14 | 10^{-8} Pa^{-1} |
| γ | 5.6 | 10^{-7} K^{-2} |

E.2.3 El factor de compresibilidad Z

El factor de compresibilidad Z puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$Z = 1 - \frac{p}{T} [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t) \kappa_v + (c_0 + c_1 t) \kappa_v^2] + \frac{p^2}{T^2} (d + e \kappa_v^2) \quad (E.2.3-1)$$

Tabla E.4 Valores recomendados para las constantes a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 , c_0 , c_1 , d , e

| Constante | Valor recomendado 1991 | Unidades |
|-----------|------------------------|---|
| a_0 | 1.581 23 | 10^{-6} KPa^{-1} |
| a_1 | - 2.933 1 | 10^{-8} Pa^{-1} |
| a_2 | 1.104 3 | $10^{-10} \text{ K}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ |
| b_0 | 5.707 | 10^{-6} KPa^{-1} |
| b_1 | - 2.051 | 10^{-8} Pa^{-1} |
| c_0 | 1.989 8 | 10^{-4} KPa^{-1} |
| c_1 | - 2.376 | 10^{-6} Pa^{-1} |
| d | 1.83 | $10^{-11} \text{ K}^2 \text{ Pa}^{-2}$ |
| e | - 0.765 | $10^{-8} \text{ K}^2 \text{ Pa}^{-2}$ |

E.3 Fórmula aproximada para la densidad del aire

La fórmula más exacta para la densidad del aire es la fórmula CIPM (1981/91) [39].

También se puede utilizar una fórmula aproximada:

$$\rho_a = \frac{0.34848 p - 0.009 (hr) \times \exp(0.061 t)}{273.15 + t} \quad (E.3-1)$$

Donde: la densidad del aire ρ_a se obtiene en kg m^{-3} ;
la presión p viene dada en mbar o hPa;
la humedad relativa h , se expresa como un porcentaje; y
la temperatura t en $^{\circ}\text{C}$.

La ecuación (E.3-1) tiene una incertidumbre relativa de 2×10^{-4} en el rango $900 \text{ hPa} < p < 1100 \text{ hPa}$, $10^{\circ}\text{C} < t < 30^{\circ}\text{C}$ y $hr < 80\%$.

Para la clase de pesas E_1 , la densidad del aire debe determinarse siempre sobre la base de las mediciones correspondientes. Sin embargo, la siguiente ecuación de aproximación es una manera de estimar la densidad del aire en laboratorios que no tienen los medios necesarios para determinar la densidad del aire en el lugar. La altura por encima del nivel del mar es siempre conocida. Por consiguiente, si no se mide la densidad del aire, ésta debe calcularse como un valor medio para el lugar del laboratorio de la forma siguiente:

$$\rho_a = \rho_0 \times \exp\left(\frac{-\rho_0 g h}{p_0}\right) \quad (E.3-2)$$

Donde: $p_0 = 101\,325 \text{ Pa}$;
 $\rho_0 = 1.2 \text{ kg m}^{-3}$;
 $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$; y
 h = altura por encima del nivel del mar, expresada en metros.

Referencias

- [1] *International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM)* (1993), ISO
- [2] *International vocabulary of terms in legal metrology (VIML)* (2000), OIML
- [3] OIML D 28 *Conventional value of the result of weighing in air* (2004) (D 28 was previously published as OIML R 33)
- [4] ISO 4287:1997 Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions, and surface texture parameters
- [5] ISO/IEC Guide 2:1996 Standardization and related activities - General vocabulary
- [6] Davis, R. S., "Determining the magnetic properties of 1 kg mass standards" J. Res. National Institute of Standards and Technology (USA), 100, 209-25, May-June 1995; Errata, 109, 303, March-April 2004
- [7] *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, first edition, 1993, corrected and reprinted 1995, ISO
- [8] Myklebust T, Källgren H, Lau P, Nielsen L and Riski K, "Testing of weights: Part 3 - Magnetism and convection", *OIML Bulletin XXXVIII* (1997), pp. 5-10
- [9] Gläser, M., "Magnetic interactions between weights and weighing instruments." *Meas. Sci. Technol.* 12 (2001), pp. 709-715
- [10] ISO 261:1998 – ISO general-purpose metric screw threads – General plan
- [11] Gläser, M., "Change of the apparent mass of weights arising from temperature differences," *Metrologia* 36 (1999), pp. 183–197
- [12] Jean M. Bennett and Lars Mattsson, "Introduction to Surface Roughness and Scattering" Optical Society of America (1989)
- [13] ISO 5436:1985, *Calibration specimens - Stylus instruments - Types, calibration and use of specimens*. (Ed. 1; 20 p; K)
- [14] ISO 3274:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments (Ed. 2; 13 p; G). ISO 3274:1996/Cor 1:1998 (Ed. 1; 1 p; *)
- [15] ISO 4288:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture (Ed. 2; 8 p; D). ISO 4288:1996/Cor 1:1998 (Ed. 1; 1 p; *)
- [16] Myklebust, T., "Methods to determine magnetic properties of weights and magnetic field and field gradients of weights." National Measurement Service, Norway (1995)
- [17] Myklebust, T. 1997 "Intercomparison: Measurement of the volume magnetic susceptibility and magnetization of two cylindrical (kg) weights. EUROMET project 324", Justervesenet (NO)
- [18] Myklebust, T. and Davis, R.S., "Comparison between JV and BIPM to determine the volume susceptibility of one 20 g weight and two 1 g weights", Justervesenet (1996)
- [19] Myklebust, T. and Börjesson, L., "Comparison of two instruments based on the attracting method." National Measurement Service, Norway (1995)
- [20] Ueki, M., Nezu, Y. and Ooiwa, A., "New facility for weight calibration service", Proceedings of the 14th IMEKO World Congress and Bulletin of NRLM vol. 46, No 4, pp. 223–228 (1997)
- [21] Schoonover, R.M. and Davis, R.S., "Quick and Accurate Density Determination of Laboratory Weights". (Proceedings. 8th Conference. IMEKO Technical Committee TC3 on Measurement of Force and Mass, Krakow, Poland. September 9-10, 1980) (Paper in "Weighing Technology," pp. 1123–1127, (Druk, Zakład Poligraficzny Wydawnictwa SIGMA, Warsaw, Poland (1980)

- [22] Kobata, T., Ueki, M., Nezu, Y., Ooiwa, A. and Ishii, Y., "Characterization of an Acoustic Volumeter for Measuring the Volume of Weights", Proceedings of 15th IMEKO World Congress (1999)
- [23] Ueki, M., Kobata, T., Mizushima, S., Nezu, Y., Ooiwa, A. and Ishii, Y., "Application of an Acoustic Volumeter to Standard Weights", Proceedings of 15th IMEKO World Congress (1999)
- [24] Bettin, H., Spieweck, F., "Die Dichte des Wassers als Funktion der Temperatur nach Einführung der Internationalen Temperaturskala von 1990", PTB-Mitt. 1003/90, pp. 195–196
- [25] Tanaka, M., Girard, G., Davis, R., Peuto, A., Bignell, N., [NMIJ, BIPM, IMGC, NML], "Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports", Metrologia, 2001, 38, n°4, pp. 301–309
- [26] Gorski, W., Toth, H.G., "Destilliertes Wasser als Dichtereferenzmaterial - Die elektrische Leitfähigkeit als Kriterium seiner Güte" - PTB-Mitt. 98 5/88, pp. 324–325
- [27] Lau, P., "Weight Volume and Centre of Gravity", SP-AR to be published. (Secretariat is updating this reference (9/6/02))
- [28] Croarkin, C., "An Extended Error Model for Comparison Calibration", Metrologia 26, 107 (1989)
- [29] Schwartz, R. "Guide to mass determination with high accuracy" PTB-Bericht MA-40, Braunschweig, (1995). See also Kochsiek, M., Gläser, M., "Comprehensive Mass Metrology", Wiley, New York, Sec.3.4, "Mass determination with balances" (Roman Schwartz) (2000)
- [30] Chapman, G.D., "Orthogonal designs for calibrating kilogram submultiples", NRCC25819. 27 April 1995, National Research Council Canada, Canada
- [31] Morris, E.C., "Decade Design for Weighings of Non-uniform Variance", Metrologia 29, 373 (1992)
- [32] Cameron, J.M., Croarkin, M.C., and Raybold, R. C.R., "Designs for the calibration of standards of mass", NBS TN 952 (1977)
- [33] Gläser, M., "Cycles of comparison measurements, uncertainties and efficiencies", Meas. Sci. Technol 11 (2000), pp. 20–24
- [34] Sutton, C.M. and Clarkson, M.T., "A general approach to comparisons in the presence of drift" Metrologia 30, 487 (1993/94)
- [35] Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, EA-4/02 (1999)
- [36] Bich, W., Cox, M.G., and Harris, P.M., "Uncertainty modelling in mass comparisons", Metrologia 30, 495 (1993/4)
- [37] Bich, W., "Covariances and restraints in mass metrology", Metrologia 27, 111 (1990)
- [38] Gläser, M., "Covariances in the determination of conventional mass." Metrologia 37, 249–251 (2000)
- [39] Davis, R.S., "Equation for the determination of the density of moist air" (1981/91), Metrologia 29, 67 (1992). Giacomo, P., "Equation for the determination of the density of moist air" (1981), Metrologia 18, 33 (1982)
- [40] Chung, J.W., Ryu, K.S., Davis, R.S. "Uncertainty analysis of the BIPM susceptometer", Metrologia 38 (2001), pp. 535-541