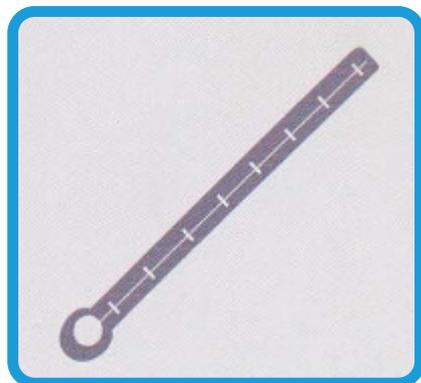
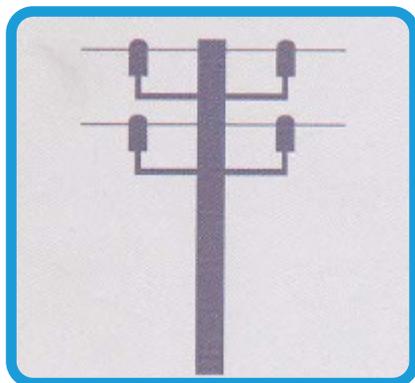
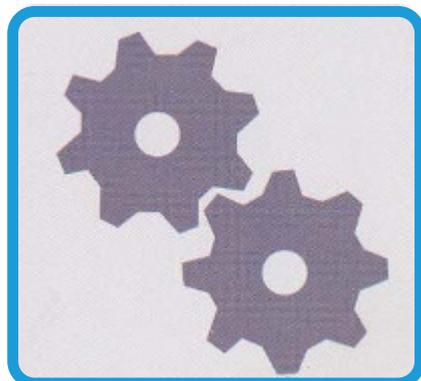
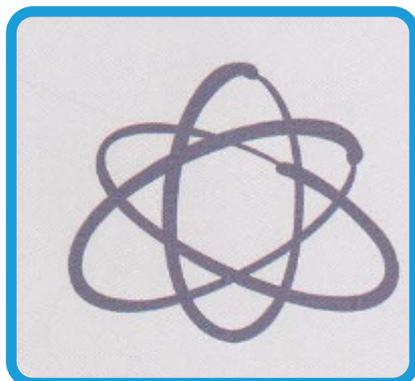
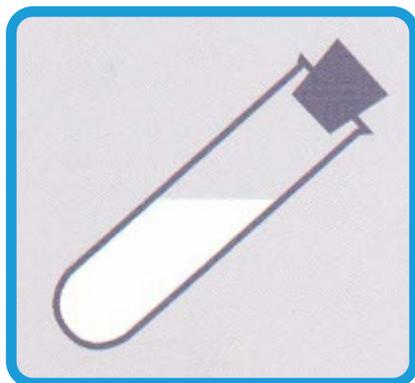
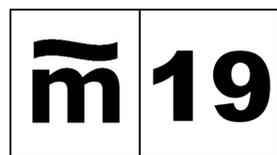


Metrología



PROCEDIMIENTO ME-002 PARA LA
CALIBRACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS
DE MEDIDA DE FUERZA



PROCEDIMIENTO ME002

CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE FUERZA

La presente edición de este procedimiento se emite exclusivamente en formato digital y puede descargarse gratuitamente de nuestra página web (www.cem.es).

El procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, respecto a la edición digital anterior.

Los procedimientos editados por el CEM presentan modelos de calibración, en línea con documentos clave universales como son el Sistema Internacional de unidades (SI), el Vocabulario internacional de metrología (VIM) o la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM). Como modelos que son, los usuarios de los mismos pueden, bajo su responsabilidad, modificarlos para adecuarlos a sus necesidades específicas (instrumentación, condiciones ambientales, etc.). En tal caso, siempre deberá primar el sentido crítico y la ética profesional.

El CEM no acepta ninguna responsabilidad derivada de la interpretación y/o uso de este procedimiento.

El CEM no mantiene correspondencia sobre el contenido de los procedimientos.

ÍNDICE

| | Página |
|---|--------|
| 1. OBJETO..... | 3 |
| 2. ALCANCE | 3 |
| 3. DEFINICIONES | 3 |
| 4. GENERALIDADES | 4 |
| 5. DESCRIPCIÓN | 5 |
| 5.1. Equipos materiales | 5 |
| 5.2. Operaciones previas | 7 |
| 5.3. Proceso de calibración | 10 |
| 5.4. Toma y tratamiento de datos | 11 |
| 6. RESULTADOS | 14 |
| 6.1. Cálculo de incertidumbres..... | 14 |
| 6.2. Interpretación de resultados..... | 17 |
| 7. REFERENCIAS | 19 |
| 7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración | 19 |
| 7.2. Otros documentos para consulta | 19 |
| 8. ANEXOS..... | 20 |

1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto describir un método para la calibración y clasificación de los instrumentos de medida de fuerza, lo establecido en la norma UNE-EN ISO 376 [6].

2. ALCANCE

El procedimiento descrito en este documento, que cumple en cuanto a la clasificación del instrumento con lo establecido en la norma UNE-EN ISO 376 [6], es de aplicación para aquellos instrumentos de medida de fuerza que se basan en métodos indirectos, utilizando como magnitud física de medida, la deformación elástica de un elemento sensor o una magnitud proporcional a ésta. La medida de la deformación del elemento sensor (elemento de carga) se puede realizar por medios mecánicos, eléctricos, ópticos u otros.

La calibración y clasificación de los instrumentos de medida de fuerza objeto de este procedimiento puede ser realizada con fuerzas de referencia aplicadas en sentido de compresión o de tracción en función del diseño del referido instrumento.

3. DEFINICIONES

Aparte de las definiciones generales recogidas en la referencia [3] se contempla las siguientes:

Instrumento de medida de fuerza: [4]

El instrumento de medida de fuerza se define como el conjunto que comprende desde el transductor de fuerza hasta el dispositivo indicador (incluido los cables de conexión eléctrica, los dispositivos de sujeción y aplicación de carga, etc).

El indicador puede estar integrado en el mismo instrumento, caso de los anillos mecánicos que incorporan un comparador de reloj, o separado del transductor, caso de los instrumentos eléctricos que suelen disponer de un puente de medida electrónico externo al propio sensor de fuerza.

Deformación: [4]

Se define como la diferencia entre la lectura bajo fuerza y la lectura sin fuerza.

Sistemas de generación de fuerza: Máquinas de fuerza [2, adaptado]

Las máquinas de fuerza de calibración son sistemas utilizados para generar fuerzas de valores conocidos que permiten calibrar transductores de fuerza, y en general evaluar las características de los instrumentos de medida de fuerza.

Existen cuatro tipos básicos de máquinas de fuerza de calibración, cuyo uso depende del orden de magnitud y de la exactitud con que se desee generar la fuerza:

Máquinas de fuerza de carga directa

Su principio de funcionamiento está basado en la acción directa de las masas en el campo gravitatorio.

Máquinas de fuerza de amplificación mecánica

Su principio de funcionamiento está basado en la amplificación de la acción de las masas en el campo gravitatorio, a través de sistemas de palancas mecánicas.

Máquinas de fuerza de amplificación hidráulica

Su principio de funcionamiento está basado en la amplificación de la acción de las masas en el campo gravitatorio, a través de sistemas pistón - cilindro.

Máquinas de fuerza por comparación

Su principio consiste en comparar el instrumento de medida de fuerza a calibrar, con un instrumento de medida de fuerza de referencia, compuesto por un transductor de referencia o una columna formada por un juego de transductores de referencia (3, 6, 9), situados en paralelo y un dispositivo indicador de referencia.

4. GENERALIDADES

La calibración de los instrumentos de medida de fuerza objeto de este procedimiento consiste fundamentalmente en aplicar al elemento de carga del transductor, fuerzas conocidas con exactitud y anotar las indicaciones del sistema de medida de la deformación.

Un instrumento de medida de fuerza está formado fundamentalmente por un dispositivo sensor (transductor de fuerza) y un dispositivo indicador (indicador electrónico, comparador de reloj,...).

La simbología utilizada en este procedimiento es la siguiente:

| | | |
|----------------|---|---|
| F_N | N | Alcance máximo del campo de medida |
| F_f | N | Alcance máximo del transductor |
| i | u | Indicación ¹⁾ leída en el dispositivo indicador bajo carga creciente |
| i^p | u | Indicación ¹⁾ leída en el dispositivo indicador bajo carga decreciente |
| i_0 | u | Indicación ¹⁾ leída en el dispositivo indicador antes de la aplicación de la fuerza |
| i_f | u | Indicación ¹⁾ leída en el dispositivo indicador después de la supresión de la fuerza |
| X | u | Deformación del instrumento de medida de fuerza |
| \bar{X} | u | Media de las deformaciones |
| \bar{X}_r | u | Deformación media con rotación |
| \bar{X}_{wr} | u | Deformación media sin rotación |
| X_{max} | u | Deformación máxima |
| X_{min} | u | Deformación mínima |
| X_a | u | Valor ajustado de la deformación |
| X_{i0} | u | Deformación antes de la aplicación de la carga, en la serie i |
| X_{if} | u | Deformación después de la supresión de la carga, en la serie i |
| X_N | u | Deformación correspondiente a la capacidad máxima de la escala |

| | | |
|------------|-------------------------|--|
| b | % | Error relativo de reproducibilidad con rotación |
| b' | % | Error relativo de repetibilidad sin rotación |
| f_0 | % | Error relativo de cero |
| f_c | % | Error relativo de interpolación |
| v | % | Error relativo de reversibilidad |
| c | % | Error relativo de fluencia (creep) |
| r | u | Resolución del indicador |
| S | u/N | Sensibilidad |
| S_k | u/N | Sensibilidad local, en la carga k |
| F | N | Fuerza generada por la máquina patrón |
| F_k | N | Fuerza generada por la máquina patrón, en la carga k |
| K | $^{\circ}\text{C}^{-1}$ | Coficiente de temperatura del instrumento |
| ΔT | $^{\circ}\text{C}$ | Intervalo de temperatura de calibración |
| w_1 | | Incertidumbre típica relativa asociada a la fuerza de calibración aplicada |
| w_2 | | Incertidumbre típica relativa asociada a la reproducibilidad |
| w_3 | | Incertidumbre típica relativa asociada a la repetibilidad |
| w_4 | | Incertidumbre típica relativa asociada a la resolución del indicador |
| w_5 | | Incertidumbre típica relativa asociada a la fluencia |
| w_6 | | Incertidumbre típica relativa asociada a la deriva en la salida del cero |
| w_7 | | Incertidumbre típica relativa asociada a la temperatura de instrumento |
| w_8 | | Incertidumbre típica relativa asociada a la interpolación |
| U | u | Incertidumbre expandida de la máquina de calibración de fuerza |
| W_{mcf} | % | Incertidumbre relativa expandida de la máquina de calibración de fuerza |
| W | % | Incertidumbre relativa expandida de la calibración |

¹⁾ Indicación leída correspondiente a la deformación

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para la calibración de los instrumentos de medida de fuerza se utilizarán los siguientes equipos y materiales auxiliares:

5.1.1 Sistema de generación de fuerzas de referencia (máquinas de calibración de fuerza) con valores de incertidumbre relativa expandida, en función de la clase del instrumento de medida de fuerza a calibrar, menores o iguales a:

0,01 % clase 00 (UNE-EN ISO 376)

0,02 % clase 0,5 (UNE-EN ISO 376)

0,05 % clase 1 (UNE-EN ISO 376)

0,10 % clase 2 (UNE-EN ISO 376)

Para el cumplimiento de este requisito, se recomienda que la máquina de fuerza de calibración esté diseñada y construida teniendo en cuenta al menos los siguientes principios:

- La estructura de la máquina ha de ser rígida, no produciéndose deformaciones que pudieran desvirtuar la fuerza de calibración a aplicar al instrumento de medida de fuerza a calibrar.
- La máquina de fuerza de calibración ha de generar fuerzas con la estabilidad necesaria para la toma de medidas y permitir a su vez la repetición de dicha fuerza de calibración tantas veces como fuese necesario tanto en sentido de fuerzas crecientes como decrecientes.
- El diseño de la máquina de fuerza de calibración permitirá la introducción de la fuerza de calibración de una forma axial, siendo mínimas las componentes parásitas (fuerzas transversales, momentos flectores, momentos torsores).

5.1.2. Dispositivo indicador de medida

En el caso de una medida eléctrica y que no se incorpore un dispositivo indicador de medida, el laboratorio de calibración utilizará uno de su propiedad, compatible con la exactitud y clase esperada del instrumento de medida de fuerza a calibrar, sin necesidad de recalibrar el instrumento de medida de fuerza si se cumplen las siguientes condiciones:

- Los indicadores original y de sustitución tienen certificados de calibración a patrones nacionales.
- Las unidades y la fuente de excitación del indicador de sustitución deben ser las mismas y del mismo tipo.
- La incertidumbre de cada indicador no debe influir de forma significativa en la incertidumbre del conjunto.

5.1.3 Transductores patrones de referencia (caso de calibración con máquinas de fuerza por comparación).

Se recomienda utilizar transductores de referencia con el mismo alcance máximo que el alcance máximo del instrumento de medida de fuerza a calibrar. Si no fuese esto posible, al menos se debe tener calibrado el transductor de referencia para la fuerza nominal del instrumento de medida de fuerza a calibrar.

5.1.4 Dispositivo medidor de temperatura

Para la determinación de las condiciones ambientales, se recomienda utilizar un termómetro con resolución de indicación de al menos 0,01°C y una incertidumbre de 1 °C ($k=2$).

5.1.5 Adaptadores, bases de apoyo y anclajes necesarios para la correcta aplicación axial de la fuerza de referencia. Siempre que sea factible, se recomienda la utilización de útiles de aplicación normalizados en la norma UNE-EN ISO 376, anexo A.

5.2. Operaciones previas

- 5.2.1 Para calibrar un instrumento de medida de fuerza y poder emitir su certificado, éste debe estar perfectamente identificado a nivel de todos sus posibles componentes (indicador, transductor de fuerza, cable, etc.), presentando al menos los datos de marca y/o modelo y nº de serie de una forma permanente.

Es recomendable que además se indique en el instrumento su alcance máximo.

En el caso de que el instrumento de medida de fuerza objeto de la calibración no disponga de los referidos datos de identificación, se debe proceder a la identificación del mismo de la mejor forma posible (ej.: mediante etiqueta adhesiva anti-transferible) de forma que no surja duda alguna en cuanto a la correspondencia entre el instrumento calibrado y el certificado de calibración emitido.

- 5.2.2 La calibración debe ser realizada en una sala metrológicamente acondicionada a temperatura estable y comprendida entre 18°C y 28°C permitiéndose una variación máxima de $\pm 1^\circ\text{C}$, durante la realización de la misma.

- 5.2.3 El instrumento de medida de fuerza objeto de la calibración debe haber sido ubicado en la sala de calibración junto con los patrones de fuerza durante el tiempo suficiente para estabilizar su temperatura a la de la sala (Se recomienda al menos 24 horas).

En el caso de los instrumentos eléctricos, éstos deben estar conectados a la corriente eléctrica durante al menos 30 minutos antes del inicio de la calibración.

- 5.2.4 Se procederá a limpiar adecuadamente las caras del transductor y sus útiles de aplicación de carga antes de su instalación en el sistema de generación de fuerza, utilizando paños o gamuzas no abrasivas y soluciones disolventes inocuas si fuese necesario. Las manos del operario se deben proteger con guantes (ej. de cuero) durante la manipulación del instrumento de medida de fuerza con objeto de evitar la introducción de gradientes térmicos que pudieran afectar a la calidad de la medida.

- 5.2.5 Instalar el instrumento de medida de fuerza a calibrar en la máquina de fuerza de calibración y antes de iniciar la calibración propiamente dicha, llevar a cabo:

5.2.5.1 Un estudio visual de la idoneidad y buen estado de los elementos auxiliares a emplear, así como del propio instrumento de medida de fuerza.

5.2.5.2 Comprobar el cumplimiento de los siguientes requisitos:

- Resolución del dispositivo indicador: (indicador sometido a calibración)

Escala analógica:

El grosor de los trazos de la graduación de la escala debe ser uniforme y el ancho del indicador debe ser aproximadamente igual al ancho de un trazo de la graduación.

La resolución del dispositivo indicador se debe obtener a partir de la relación entre la anchura del indicador y la distancia entre los centros de dos graduaciones adyacentes de la escala (longitud de una división); las relaciones recomendadas son 1/2, 1/5 ó 1/10. Se necesita un espacio superior o igual a 1,25 mm para la estimación de un décimo de división de escala.

Escala digital:

La resolución se considera como un incremento de la última cifra que puede variar sobre el indicador numérico (digital), siempre que la indicación no fluctúe más de un incremento cuando el instrumento no está cargado.

Cuando las lecturas fluctúen más del valor previamente calculado de la resolución (con el instrumento no cargado), la resolución se considera igual a la mitad del intervalo de la fluctuación.

La resolución se debe expresar en unidades de fuerza.

Nota : Esta conversión se realiza utilizando como referencia el alcance máximo.

- Fuerza mínima:

Con objeto de que los efectos de interacción entre la máquina de fuerza y el instrumento de medida de fuerza sean aceptables, se establece una fuerza mínima a aplicar sobre el referido instrumento de medida de fuerza.

La fuerza mínima aplicada a un instrumento de medida de fuerza debe satisfacer las dos condiciones siguientes:

a) La fuerza mínima debe ser superior o igual a:

- 4000*r para la clase 00 (UNE-EN ISO 376)
- 2000*r para la clase 0,5 (UNE-EN ISO 376)
- 1000*r para la clase 1 (UNE-EN ISO 376)
- 500*r para la clase 2 (UNE-EN ISO 376)

b) La fuerza mínima debe ser superior o igual a 0,02 F_f

5.2.5.3 Si no se conoce el comportamiento del instrumento a calibrar se recomienda asegurarse que dicho instrumento es apto para ser calibrado con los medios del laboratorio. Para ello se pueden realizar los ensayos preliminares que se describen a continuación (véase la referencia 6):

- Ensayo de sobrecarga.

El instrumento de medida de fuerza se somete cuatro veces seguidas a una sobrecarga que debe sobrepasar la fuerza máxima como mínimo un 8% y como máximo un 12%.

La sobrecarga se debe mantener durante un tiempo comprendido entre 1 minuto y 1,5 minutos

- Verificación relativa a la aplicación de la fuerza.

Hay que asegurarse de que:

- El sistema de acoplamiento del instrumento de medida de fuerza permita una aplicación axial de la carga en el caso de utilización del instrumento en tracción;
- No hay interacción entre el transductor de fuerza y su apoyo sobre la máquina de calibración, en el caso de utilización del instrumento en compresión. Para este caso se puede utilizar el siguiente procedimiento descrito en la norma UNE-EN ISO 376, anexo B:

- ◇ Someter al instrumento bajo ensayo a dos cargas, una la de alcance máximo y otra la de su alcance mínimo, utilizando como base cojinetes de carga cilíndricos con superficies de apoyo planas, cónicas-cóncavas y cónicas-convexas.

El material, la dureza y conicidad de los cojinetes recomendada por la norma UNE-EN ISO 376 es:

acero

400 HV 30 - 650 HV 30

$(0,1 \pm 0,01)\%$ del radio

- ◇ Los ensayos se repiten de forma que tengamos tres series de aplicaciones de fuerza (Max, Min) para cada uno de los tres cojinetes descritos.
- ◇ Para que no exista interacción significativa entre la máquina de fuerza de calibración y el instrumento de medida de fuerza a calibrar, se debe cumplir que las diferencias máximas obtenidas entre las indicaciones utilizando cojinetes planos y cónicos-convexos así como planos y cónicos-cóncavos sea menor que los siguientes valores:

| Clase | Diferencia máxima admisible en % | |
|-------|----------------------------------|--------------------|
| | a la fuerza máxima | a la fuerza mínima |
| 00 | 0,05 | 0,1 |
| 0,5 | 0,1 | 0,2 |
| 1 | 0,2 | 0,4 |
| 2 | 0,4 | 0,8 |

En el caso de que el instrumento de medida de fuerza cumpla la exigencia anteriormente mencionada para la fuerza máxima pero no para la fuerza mínima, debe determinarse para qué fuerza mínima cumple la exigencia.

- Ensayo bajo tensión eléctrica variable.

Para los instrumentos de medida de fuerza que necesitan una fuente de alimentación eléctrica, comprobar que una variación de $\pm 10\%$ de la tensión nominal de la red no tiene un efecto significativo. Esta verificación se puede realizar bien con la ayuda de un simulador del transductor de fuerza, o bien por otro método apropiado.

5.3. Proceso de calibración

Se seguirá básicamente el siguiente proceso tanto para calibraciones en tracción como en compresión:

- a) Tomar el valor de indicación de cero antes de someter al instrumento a fuerza alguna.
- b) Realizar tres precargas con valores de fuerzas iguales o cercanos al alcance máximo del transductor. La duración de cada precarga estará comprendida entre 1 minuto y 1,5 minutos y los intervalos de espera entre ellas serán de 3 minutos. No será necesaria la toma de medida en estas precargas.
- c) Después de transcurridos 3 minutos desde la descarga de la última precarga tomar el valor de temperatura en el entorno de la máquina de fuerza y el valor de cero del instrumento de medida de fuerza.
- d) A continuación, realizar dos series de carga para fuerzas monótonamente crecientes con al menos 8 valores de fuerzas de calibración distribuidas uniformemente en el campo de medida a calibrar. El intervalo de tiempo entre las aplicaciones de fuerzas consecutivas debe ser lo más uniforme posible. El instrumento de medida de fuerza durante estas dos series estará situado en la misma posición de referencia angular (0°) en la máquina de fuerza de calibración.

Entre la ejecución de cada serie de carga, se dejará transcurrir un intervalo de tiempo de tres minutos.

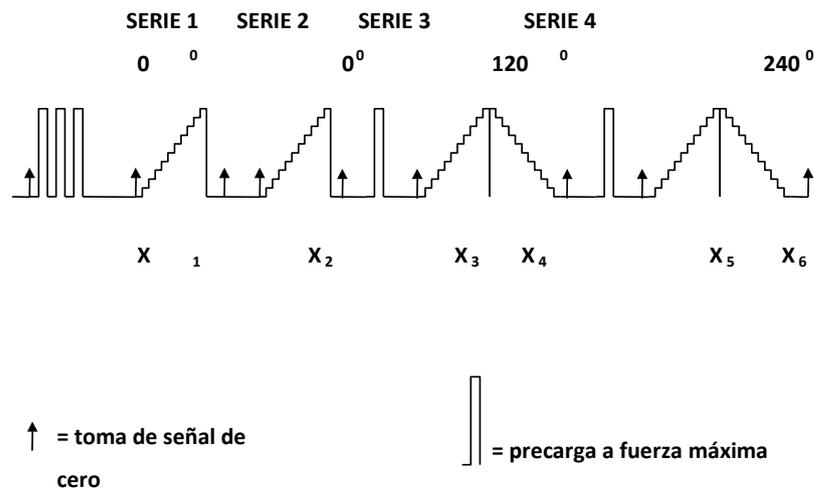
- e) Se registrarán los valores de fuerza de referencia, las indicaciones del dispositivo indicador para carga nula al inicio y al final de la serie de carga, así como para los diferentes escalones de fuerza ensayados, teniendo la precaución de que la medida de fuerza no debe ser realizada nunca antes de transcurridos 30 segundos desde el comienzo de la modificación de la fuerza correspondiente en la máquina de fuerza de calibración.
- f) Se tomarán los valores de temperatura tanto al inicio como al final de cada una de estas series.
- g) A continuación se realizarán otras dos series de carga para fuerzas monótonamente creciente y decrecientes variando la posición del instrumento de medida de fuerza respecto a su eje en posiciones uniformemente repartidas sobre 360° , es decir a 120° y 240° de la posición inicial. Si estas posiciones no fuesen posibles debido a imposibilidades geométricas o a la ubicación del transductor en la máquina de fuerza, se podrá rotar dicho instrumento de medida de fuerza a las posiciones angulares de 180° y 360° .

En cada una de estas series se ensayarán los mismos valores de fuerza de referencia que en las dos series anteriores en sentido monótonamente creciente y en sentido monótonamente decreciente hasta carga nula.

Antes del inicio de cada una de estas series, se efectuará una precarga de valor de fuerza igual o cercano al alcance máximo del transductor, con una duración comprendida entre 1 minuto y 1,5 minutos y un intervalo de espera antes del inicio de la serie propiamente de 3 minutos. No será necesaria la toma de medida en las precargas.

En el caso de instrumentos de medida de fuerza de tipo mecánicos con piezas móviles, entre las series 2 y 3, el instrumento de medida de fuerza se retirará de la máquina de fuerza y se desmontará, volviéndose posteriormente a su montaje y ubicación en la máquina de fuerza de calibración.

- h) Se registrarán los valores de fuerza de referencia, las indicaciones del dispositivo indicador para carga nula al inicio y al final de las series de carga, así como para los diferentes escalones de fuerza ensayados, teniendo la precaución de que la medida de fuerza no debe ser realizada nunca antes de transcurridos 30 segundos desde el comienzo de la modificación de la fuerza correspondiente en la máquina de fuerza.
- i) Se tomarán los valores de temperatura tanto al inicio como al final de cada una de estas series.



5.4. Toma y tratamiento de datos

La toma de datos se podrá realizar de forma manual o mediante ordenador y un bus de comunicación (RS232, IEEE,...), que controle al indicador. En este último caso, se deberá validar el programa informático utilizado antes de realizar la calibración, y se conservarán los ficheros de datos primarios que permitan reconstruir la calibración realizada.

A partir de los datos registrados en los diferentes pasos establecidos en el apartado anterior, se calcularán los valores de los siguientes parámetros que caracterizarán la calibración y servirán de base para la clasificación del instrumento de medida de fuerza según UNE-EN ISO 376, (véase la tabla 1)

- Error relativo de cero, f_0

El error relativo de cero se calcula para cada serie con ayuda de la ecuación:

$$f_0 = \frac{X_{0f}}{X_N} \times 100$$

$$X_{0f} = i_f - i_0$$

X_N = deformación correspondiente al alcance máximo

X_{0f} = deformación correspondiente sin carga

i_0 = indicación leída en el dispositivo indicador antes de la aplicación de la carga para el valor de carga nula.

i_f = indicación leída en el dispositivo indicador después de la aplicación de la carga, para el valor de carga nula.

- Error relativo de reproducibilidad y repetibilidad, b, b'

Sin rotación, b'

Se calcula para cada valor de fuerza ensayada, utilizando las medidas de las dos series X_1 y X_2 en las que el instrumento de medida de fuerza no ha sido cambiado de posición, con ayuda de la ecuación:

$$b' = \frac{|X_2 - X_1|}{X_{wr}} \times 100$$

$$\overline{X_{wr}} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

X_1 = deformación en la primera serie.

X_2 = deformación en la segunda serie.

$\overline{X_{wr}}$ = valor medio de las deformaciones sin rotación.

Con rotación, b

Se obtiene para cada valor de fuerza ensayado, usando las medidas de las series X_1, X_3 y X_5 , series a $0^\circ, 120^\circ$ y 240° de giro del instrumento de medida de fuerza, con ayuda de la ecuación:

$$b = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\bar{X}_r} \times 100$$

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}$$

X_{\max} = deformación máxima en las tres series.

X_{\min} = deformación mínima en las tres series.

X_1 = deformación en la primera serie

X_3 = deformación para las cargas crecientes de la tercera serie

X_5 = deformación para las cargas crecientes de la cuarta serie

\bar{X}_r = valor medio de las deformaciones con rotación.

- Error relativo de reversibilidad, ν

El error relativo de reversibilidad se determina, para cada una de las fuerzas de calibración mediante la diferencia entre los valores encontrados en el sentido creciente y en el sentido decreciente con ayuda de la ecuación:

$$\nu = \left| \frac{X_4 - X_3}{X_3} \right| \times \frac{100}{2} + \left| \frac{X_6 - X_5}{X_5} \right| \times \frac{100}{2}$$

X_3 = deformación para las cargas crecientes de la tercera serie

X_4 = deformación para las cargas decrecientes de la tercera serie

X_5 = deformación para las cargas crecientes de la cuarta serie

X_6 = deformación para las cargas decrecientes de la cuarta serie

- Error relativo de interpolación, f_c .

Se calcula el polinomio de interpolación, por ejemplo por el método de los mínimos cuadrados (ajuste lineal, cuadrático o cúbico), utilizando los valores de \bar{X}_r obtenidos, y los valores de fuerza de referencia aplicados durante la calibración, para obtener una ecuación de la forma:

$$X_a = f(F),$$

Nota: La curva de interpolación no se hará pasar por fuerza nula.

El error relativo de interpolación se determina para cada una de las fuerzas de calibración con la ayuda de la ecuación siguiente:

$$f_c = \frac{\overline{X_r} - X_a}{X_a} \cdot 100$$

$\overline{X_r}$ = valor medio de las deformaciones con rotación.

X_a = valor de la deformación calculado haciendo uso de una ecuación de regresión de primero, segundo o tercer grado, que proporciona el valor de deformación en función de la fuerza de calibración.

En los instrumentos de medida de fuerza mecánicos que disponen de un comparador para la medida de la deformación, no se recomienda la utilización del polinomio de interpolación. Sin embargo, puede utilizarse la interpolación con la condición de que las características del comparador hayan sido determinadas previamente y que su error periódico sea despreciable respecto al error de interpolación del instrumento de medida de fuerza.

- Error relativo de fluencia (creep), c .

Se calcula la diferencia de las indicaciones tomadas a los 30 s (i_{30}) y a los 300 s (i_{300}) después de la aplicación o retirada de la fuerza de calibración máxima y se expresa esta diferencia como porcentaje de la deflexión máxima.

$$c = \left| \frac{i_{300} - i_{30}}{X_N} \right| \times 100$$

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbre

Para la estimación y cálculo de las incertidumbres se aplican los criterios establecidos en el Anexo C de la norma UNE-EN ISO 376 [1]

Para los instrumentos clasificados por interpolación, la incertidumbre de calibración es la incertidumbre en el valor de fuerza calculado de la ecuación de interpolación, solamente para fuerza crecientes.

Para los instrumentos clasificados para fuerzas específicas la incertidumbre de clasificación es la incertidumbre de la fuerza correspondiente a cualquier deformación igual a una de las deformaciones medias obtenidas durante la calibración para fuerzas crecientes.

Para cada fuerza de calibración, se calcula de las lecturas obtenidas durante la calibración una incertidumbre típica relativa combinada w_c .

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2} \quad \text{y} \quad W = k \times w_c$$

donde:

w_1 = incertidumbre típica relativa asociada a la fuerza de calibración aplicada

w_2 = incertidumbre típica relativa asociada a la reproducibilidad

w_3 = incertidumbre típica relativa asociada a la repetibilidad

w_4 = incertidumbre típica relativa asociada a la resolución del indicador

w_5 = incertidumbre típica relativa asociada a la fluencia

w_6 = incertidumbre típica relativa asociada a la deriva en la salida del cero

w_7 = incertidumbre típica relativa asociada a la temperatura de instrumento

w_8 = incertidumbre típica relativa asociada a la interpolación

- Incertidumbre de fuerza de calibración, w_1

w_1 es la incertidumbre típica relativa asociada a las fuerzas aplicadas por la máquina de calibración. Esta será igual a la CMC de la máquina, expresada en términos relativos, dividido por el valor de k especificado (probablemente igual a 2).

- Incertidumbre de reproducibilidad, w_2

w_2 es, en cada escalón de fuerza aplicada, la desviación típica de la deformación creciente media obtenida durante la calibración, expresada como un valor relativo.

$$w_2 = \frac{1}{|\bar{X}_r|} \times \sqrt{\frac{1}{6} \times \sum_{i=1,3,5} (X_i - \bar{X}_r)^2}$$

donde X_i son deformaciones obtenidas en series crecientes 1, 3, y 5, y \bar{X}_r es el valor medio de estos tres valores.

- Incertidumbre de repetibilidad, w_3

w_3 es, en cada escalón de fuerza aplicada, la contribución debida a la repetibilidad de la deformación medida en una sola orientación, expresada como valor relativo. Se calcula de

$$w_3 = \frac{b'}{100 \times \sqrt{3}}$$

donde b' es el error relativo de repetibilidad del instrumento.

- Incertidumbre de resolución, w_4

Cada valor de deformación es calculado como la diferencia entre dos lecturas (la lectura en la fuerza aplicada restada de la lectura en una fuerza cero). Por lo tanto, la resolución del indicador debe ser incluida dos veces como dos distribuciones rectangulares. Esto es equivalente a una distribución triangular y debe ser expresada en cada escalón de fuerza como un valor relativo:

$$w_4 = \frac{1}{\sqrt{6}} \times \frac{r}{F}$$

- Incertidumbre de fluencia (creep), w_5

Esta componente de incertidumbre es debida a la posibilidad de que la deformación del instrumento puede ser influenciada por su historial de carga a corto plazo previo,

$$w_5 = \frac{c}{100 \times \sqrt{3}}$$

donde c es el error relativo de fluencia (creep) del instrumento.

Si el ensayo de fluencia no se realiza durante la calibración, esta contribución de incertidumbre será reemplazada por la contribución debida a la reversibilidad dividida por un factor de tres.

- Incertidumbre por la deriva del cero, w_6

Esta componente de incertidumbre es debida a la posibilidad de que la salida para carga cero del instrumento podría variar entre series de medida: las deformaciones medidas posteriormente podrían, por lo tanto, ser una función del tiempo transcurrido a fuerza cero.

Una medida de esta variación es el error de cero f_0 , así este efecto se puede estimar como,

$$w_6 = \frac{f_0}{100}$$

donde siempre se estima f_0 considerando el mayor efecto.

- Incertidumbre por temperatura, w_7

Esta contribución es debida a la variación de temperatura a lo largo de toda la calibración, junto con la incertidumbre en la medición de este intervalo de temperatura de calibración. La sensibilidad del instrumento de medida de fuerza a temperatura debe ser determinada, ya sea por ensayos o más frecuentemente, por las especificaciones del fabricante. Esta componente toma el mismo valor en cada escalón de fuerza y, expresado como un valor relativo, es igual a,

$$w_7 = K \times \frac{\Delta T}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}}$$

donde K es el coeficiente de temperatura del instrumento, en $^{\circ}\text{C}^{-1}$, y ΔT es el intervalo de temperatura de calibración, teniendo en cuenta la incertidumbre en la medición de la temperatura.

En general una valor típico para K es $0,000\ 27\ ^{\circ}\text{C}^{-1}$, pero lo ideal es obtenerlos de las especificaciones del fabricante.

- Incertidumbre por interpolación, w_8

Esta componente de incertidumbre solamente se considera para instrumentos clasificados para interpolación, ya que una ecuación por interpolación no es aplicable a instrumentos clasificados sólo para fuerzas específicas.

Se estima la componente en cada fuerza de calibración como la diferencia entre la deformación media medida, \bar{X}_r , y el valor calculado de la ecuación de interpolación, \bar{X}_a , expresado como valor relativo:

$$w_8 = \left| \frac{X_r - \bar{X}_a}{\bar{X}_r} \right|$$

- Incertidumbre típica combinada e incertidumbre expandida

De estas incertidumbres relativas típicas combinadas, obtenemos la incertidumbre expandida y se determinan los coeficientes de un ajuste por mínimos cuadrados para estos valores, que permita dar un valor de incertidumbre expandida U para cualquier fuerza dentro del intervalo de calibración.

La forma de la línea de ajuste (es decir, lineal, polinomial, exponencial) dependerá de los resultados de la calibración. Si resultaran valores que son significativamente más pequeños que los valores calculados en cualquier parte del alcance de fuerza de calibración, se debe aplicar un ajuste más conservador o debe especificarse un valor mínimo para la incertidumbre en las partes relevantes del alcance de fuerza.

6.2. Interpretación de resultados

Principio de clasificación

El campo de medida para que el instrumento de medida de fuerza sea clasificado se determina considerando cada fuerza de calibración sucesivamente, comenzando por la fuerza máxima y

disminuyendo hasta el valor mínimo de calibración. Este campo de clasificación se interrumpe en el último valor de fuerza para el cual las exigencias de calibración se satisfacen.

El rango de medida de clasificación de un instrumento de medida de fuerza debe cubrir al menos el rango del 50 % al 100 % del rango nominal.

Existen cuatro tipos de clasificación:

Caso A Instrumentos clasificados para fuerzas específicas y para cargas crecientes, los criterios que deben considerarse son:

- los errores de reproducibilidad y de repetibilidad
- el error relativo de cero
- el error relativo de fluencia (creep)

Caso B Instrumentos clasificados para fuerzas específicas y para cargas crecientes-decrecientes, los criterios que deben considerarse son:

- los errores de reproducibilidad y de repetibilidad
- el error relativo de cero
- el error relativo de reversibilidad

Caso C Instrumentos clasificados para interpolación y para cargas crecientes, los criterios que deben considerarse son:

- los errores de reproducibilidad y de repetibilidad
- el error relativo de cero
- el error relativo de fluencia (creep)
- el error relativo de interpolación

Caso D Instrumentos clasificados para interpolación y para cargas crecientes-decrecientes, los criterios que deben considerarse son:

- los errores de reproducibilidad y de repetibilidad
- el error relativo de cero
- el error relativo de reversibilidad
- el error relativo de interpolación

De los resultados de las medidas efectuadas, calculamos los valores de los diferentes errores detallados en el punto 5.4 de este procedimiento, que caracterizan al instrumento de medida de fuerza y posibilita su clasificación según la norma UNE-EN ISO 376, véase la tabla 1 que a continuación se adjunta:

Tabla 1

| Clase | Error relativo del instrumento de medida de fuerza, % | | | | | Fuerza de calibración | Resultado de medida |
|-------|---|-------|------------------|-------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | de reproducibilidad repetibilidad | | de interpolación | de cero | de reversibilidad | Incertidumbre (W_{mcf}) | Incert.calibra. min -máx. |
| | b | b' | f_c | f_0 | v | % | % |
| 00 | 0,05 | 0,025 | $\pm 0,025$ | $\pm 0,012$ | 0,07 | 0,01 | $W_{mcf} - 0,06$ |
| 0,5 | 0,10 | 0,05 | $\pm 0,05$ | $\pm 0,025$ | 0,15 | 0,02 | 0,06 - 0,12 |
| 1 | 0,20 | 0,10 | $\pm 0,10$ | $\pm 0,05$ | 0,30 | 0,05 | 0,12 - 0,24 |
| 2 | 0,40 | 0,20 | $\pm 0,20$ | $\pm 0,10$ | 0,50 | 0,10 | 0,24 - 0,45 |

El instrumento de medida de fuerza puede ser clasificado bien para cargas específicas o bien para interpolación. Para el caso de cargas específicas no se tendrá en cuenta el valor del error de interpolación.

El campo de clasificación del instrumento debe cubrir al menos del 50 % al 100 % de F_N .

7. REFERENCIAS

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

Manual de funcionamiento del instrumento de medida de fuerza.

Manual de funcionamiento de la máquina de calibración de fuerza.

7.2. Otras referencias para consulta

- [1] Expresión de la incertidumbre de medida: 2008 (3ª edición en Esp 2009) Septiembre 2008 JCGM 100:2008 GUM 1995 con ligeras correcciones.
- [2] EURAMET cg-4. "Uncertainty of Force Measurements".
- [3] Vocabulario Internacional de Metrología VIM, 3ª edición 2012 (español).
- [4] UNE-EN ISO 376. Calibración de los instrumentos de medida de fuerza utilizados para la verificación de las máquinas de ensayo uniaxial.

8. ANEXOS

Ejemplo numérico de aplicación del procedimiento descrito

Calibración a compresión de un instrumento de medida de fuerza de valor nominal 100 kN, compuesto por un transductor eléctrico extensométrico con salida nominal a fondo de escala de -3 mV/V y un indicador eléctrico con resolución de 0,000 01 mV/V. La calibración se realiza de acuerdo a la opción D de la referencia [1].

La incertidumbre relativa expandida ($k=2$) del sistema de generación de fuerza ha sido estimada en 0,002 % F .

Las medidas se han realizado a la temperatura de $20,5^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. el coeficiente de temperatura considerado es $K=0,000\ 27\ ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Las medidas obtenidas en el transcurso de la calibración se dan en la tabla B.1.

Tabla B.1

| Indicación a fuerza nula | 0,001271 mV/V | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| indicaciones en mV/V | | | | | | |
| Serie de medidas - Posiciones angulares | | | | | | |
| Fuerza de referencia (kN) | $X_1 - 0^{\circ}$ | $X_2 - 0^{\circ}$ | $X_3 - 120^{\circ}$ | $X_4 - 120^{\circ}$ | $X_5 - 240^{\circ}$ | $X_6 - 240^{\circ}$ |
| 0 | 0,18094 | 0,18068 | 0,18039 | 0,18022 | 0,1802 | 0,18007 |
| 10 | -0,11896 | -0,11922 | -0,11951 | -0,12006 | -0,1197 | -0,12019 |
| 20 | -0,41896 | -0,41923 | -0,41953 | -0,42042 | -0,41971 | -0,42054 |
| 30 | -0,71909 | -0,71933 | -0,71963 | -0,72079 | -0,71982 | -0,72091 |
| 40 | -1,01929 | -1,01954 | -1,01982 | -1,02113 | -1,02001 | -1,02124 |
| 50 | -1,31956 | -1,31981 | -1,3201 | -1,32146 | -1,32029 | -1,32156 |
| 60 | -1,61996 | -1,6202 | -1,62047 | -1,62175 | -1,62066 | -1,62185 |
| 70 | -1,92048 | -1,9207 | -1,92096 | -1,92206 | -1,92113 | -1,92215 |
| 80 | -2,22112 | -2,22132 | -2,22156 | -2,22233 | -2,22172 | -2,22244 |
| 90 | -2,52182 | -2,52199 | -2,5222 | -2,52263 | -2,52235 | -2,52272 |
| 100 | -2,82268 | -2,82274 | -2,82287 | -2,82287 | -2,82296 | -2,82296 |
| 0 | 0,18057 | 0,18041 | --- | --- | --- | --- |

Las indicaciones recogidas en la tabla B.1 permiten calcular las deformaciones como la diferencia entre la lectura bajo fuerza y la lectura sin fuerza inicial para cada una de las series. Ejemplo: para X_1 , $F=10$ kN; deformación = $-0,118\ 96\ \text{mV/V} - (-0,180\ 94\ \text{mV/V}) = -0,299\ 90\ \text{mV/V}$

Tomando los valores de las deformaciones, se calculan las medias con rotación (\overline{X}_r) y los diferentes errores descritos en el procedimiento (véase tablas B.2 y B.3).

Tabla B.2

| Fuerza de referencia F en (kN) | Media con rotación \overline{X}_r (mV/V) | Error relativo de reproducibilidad con rotación b (%) | Error relativo de repetibilidad sin rotación b' (%) | Error relativo de interpolación f_c (%) | Error relativo de reversibilidad v (%) |
|--|--|--|--|--|---|
| 100 | -0,299 900 | 0,0000 | 0,0000 | -0,0027 | 0,1734 |
| 200 | -0,599 910 | 0,0033 | 0,0017 | 0,0005 | 0,1434 |
| 300 | -0,900 023 | 0,0011 | 0,0022 | 0,0017 | 0,1250 |
| 400 | -1,200 217 | 0,0017 | 0,0008 | 0,0008 | 0,1058 |
| 500 | -1,500 493 | 0,0007 | 0,0007 | -0,0007 | 0,0876 |
| 600 | -1,800 873 | 0,0022 | 0,0011 | -0,0012 | 0,0686 |
| 700 | -2,101 367 | 0,0043 | 0,0019 | -0,0006 | 0,0504 |
| 800 | -2,401 977 | 0,0058 | 0,0025 | 0,0010 | 0,0310 |
| 900 | -2,702 633 | 0,0078 | 0,0033 | 0,0007 | 0,0148 |
| 1000 | -3,003 347 | 0,0153 | 0,0067 | -0,0005 | --- |

Tabla B.3

| Serie | X_1 | X_2 | $X_3 - X_4$ | $X_5 - X_6$ |
|-----------|--------|--------|-------------|-------------|
| f_0 (%) | 0,0123 | 0,0090 | 0,0057 | 0,0043 |

Para obtener el error de interpolación (f_c), se necesita previamente haber calculado la curva de interpolación, tomando como valores de referencia las parejas de puntos (F, \overline{X}_r) y utilizando el método de los mínimos cuadrados. En este ejemplo se determina un polinomio de 3^{er} orden:

$$X_a = A + B \cdot F + C \cdot F^2 + D \cdot F^3$$

donde

$$A = 3,77\ 493 \times 10^{-10}; B = -5,300\ 89 \times 10^{-7};$$

$$C = -0,029\ 984\ 263; D = -1,288\ 89 \times 10^{-5}$$

A continuación se procede a la evaluación de la incertidumbre de calibración para cada fuerza ensayada, utilizando como magnitudes de entrada los errores anteriormente calculados, la resolución del instrumento de medida de fuerza, así como la incertidumbre relativa expandida de la máquina de calibración de fuerza utilizada.

La resolución del instrumento en unidades de fuerza se obtiene como:

$$r = 0,000\ 01 \frac{\text{mV}}{\text{V}} \times \frac{100\ \text{kN}}{3 \frac{\text{mV}}{\text{V}}} = 0,000\ 33\ \text{kN}$$

La incertidumbre expandida obtenida se expresa de acuerdo a esta curva

$$U(k=2) = A + B \cdot F + C \cdot F^2 + D \cdot F^3 + E \cdot F^4$$

donde

$$A = 2,181\ 02 \times 10^{-3}; B = 4,783\ 98 \times 10^{-4};$$

$$C = 3,770\ 63 \times 10^{-6}; D = -1,720\ 81 \times 10^{-7}$$

$$E = 1,118\ 22 \times 10^{-9}$$

A continuación se procede a clasificar el instrumento de medida de fuerza, comparando los errores obtenidos y la incertidumbre de la máquina de calibración con los valores máximos estipulados para cada clase en la tabla 1 del punto 6.2 del procedimiento, según se refleja en la tabla B.4.

Tabla B.4

| Clase | Desde F /kN |
|-------|---------------|
| 0.5 | 20 |
| 1 | 10 |
| 2 | 10 |

Metrología

NIPO: 113-19-006-0