



**UNSAM**  
INSTITUTO DE  
LA CALIDAD  
INDUSTRIAL



Instituto  
Nacional  
de Tecnología  
Industrial

---

**“Análisis y reducción de las magnitudes de  
influencia en máquinas primarias de fuerza  
de pesos suspendidos.”**

**Tesis de Maestría en Calidad Industrial**

Instituto de Calidad Industrial (INCALIN)

Universidad Nacional de San Martín (UNSAM)

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)

Tesista:  
**Ing. Alejandro Savarin**

Director:  
**Dr. Héctor Laiz**

Julio de 2017

---



## **AGRADECIMIENTOS**

En principio quiero agradecer a Carlo Marinari retirado recientemente del *Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica* (INRiM) de Italia, por la inspiración en estudiar el comportamiento de las máquinas de pesos suspendidos, entender su diseño y realizar las modificaciones necesarias para mejorar la calidad de la medición. Sus valiosos aportes en el uso del dinamómetro de seis componentes, la idea original respecto al uso de la articulación y los niveles de alta exactitud, los conceptos fundamentales derivados de los dispositivos de carga y mi primer contacto con el abstracto concepto de la interacción máquina-transductor.

A Andy Knott del *National Physical Laboratory* (NPL) de Inglaterra, por su apoyo en la realización de la intercomparación clave que finalmente logró posicionar nuestro equipo en el lugar que se merecía, asimismo por su ayuda respecto a los sistemas build-up y la instrumentación asociada a estos sistemas.

A Günther Haucke retirado recientemente del *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB) de Alemania, por su apoyo respecto al estudio cuantitativo de las variables puestas en juego y la aplicación de la Ruta B de la EURAMET cg-4, así como de la metodología de verificación con giros cada 45°.

También a María Nieves Medina Martín y José Ángel Robles Carbonell, ambos del Centro Español de Metrología (CEM), así como a Rafael Soares de Oliveira del *Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial* (INMETRO) de Brasil, por su colaboración y predisposición en el intercambio de información, criterios, y por su gestión, que me posibilitaron el contacto con otros científicos dedicados a este tema de la metrología de fuerza.

En el plano nacional, quiero agradecer a mis compañeros del laboratorio, fundamentalmente a Edgardo Fulco y Nicolás Malinovsky, por su constante acompañamiento en los desarrollos relacionados a esta magnitud.

Finalmente, a mi director de tesis, por todas las horas dedicadas en asesorarme, definir y redefinir los temas a tratar y como presentarlos.

*Por último, quiero dedicar este trabajo a mi familia toda, por su incondicional apoyo.*



## RESUMEN

*La fabricación de casi todos los productos industriales requiere la aplicación controlada de fuerzas. La exactitud requerida puede variar desde un pequeño porcentaje hasta unas pocas partes por millón. Siguiendo la cadena de trazabilidad se llega a la realización de la definición de las unidades de base. En el caso de la metrología de fuerza, el patrón primario es la máquina de pesos suspendidos ó “deadweight force standard machine” (DW-FSM).*

*Para definir la magnitud, se aplica la segunda ecuación de Newton, por lo cual la fuerza queda definida por una masa suspendida en la gravedad terrestre, pero afectada por la flotación en el aire de la misma. Asimismo, aparecen varios factores que afectan a la exactitud, debido a que la fuerza es una magnitud vectorial, por lo cual errores en la dirección, excentricidades y otros fenómenos afectarán al valor (módulo) de la misma, así como otros factores que puedan modificar el valor, tales como la atracción magnética entre las pesas.*

*Para comparar estas máquinas, y con ello validar la realización, se utilizan transductores de fuerza de transferencia, los cuales también pueden ser afectados en su performance por varias condiciones de medición, entre ellas la repetibilidad, la reproducibilidad, la deriva a largo plazo, etc.*

*El presente trabajo de investigación, cuyo objetivo principal era conocer las fuentes de incertidumbre y reducirlas a un valor compatible con el estado del arte, consistió en estudiar la realización de la unidad partiendo de las variables que definen el valor de fuerza, analizar todas las magnitudes de influencia y las metodologías para medir las mismas. Asimismo, se estudiaron estas magnitudes en los transductores de transferencia, de modo de lograr una buena intercomparación.*

*Se estudió el caso genérico de máquinas de pesos suspendidos, aunque los cálculos, y la experimentación fueron realizados sobre la DW-FSM de 110 kN del INTI. Fueron medidas las fuerzas laterales y los momentos flectores por medio de un dinamómetro de seis componentes, así como con otras metodologías con el mismo fin. Finalmente se realizó una intercomparación clave (codificada como CCM.F-K2.a.1), para determinar el grado de equivalencia respecto a otros institutos nacionales de metrología (INM).*

*Los resultados parciales obtenidos fueron utilizados para realizar mejoras sobre la DW-FSM mencionada, obteniéndose luego de varios ajustes un resultado final que permitió definir la capacidad de medición y calibración (CMC) en  $2 \cdot 10^{-5}$ , valor compatible con los estándares internacionales.*

*Se concluye que teniendo una DW-FSM estudiada en cuanto a las magnitudes de influencia, así como un buen conocimiento del comportamiento de los transductores de transferencia, aplicando una metodología bien definida y en condiciones ambientales estables, pueden obtenerse exactitudes en la magnitud fuerza del orden de  $2 \cdot 10^{-5}$  a  $5 \cdot 10^{-5}$ .*



## **ABSTRACT**

*The manufacture of most industrial products requires the controlled application of forces. The required accuracy can vary from a few percent to few parts per million. Following the traceability chain, it leads to the definition of base units. In the case of force metrology, the primary standard is the deadweight force standard machine (DW-FSM).*

*To define the magnitude, the second equation of Newton is applied, in which force is defined by a suspended mass in the Earth's gravity, but affected by the buoyancy of air. Several factors affect the accuracy. Because the force is a vector quantity, errors in the direction, eccentricities and other phenomena, affect the value (modulus) of it. It also appears other factors that may modify the value such as the magnetic attraction between the weights.*

*To compare these machines, and therefore validate the definition, force transfer standards are used, which can affect their performance by several measurements conditions such as repeatability, reproducibility, long term drift, etc.*

*The main objective of this work was to identify the uncertainty sources and reduce them to a compatible value with the state of art. We studied the definition of the unit based on the variables that define the value of force, analyze all influence quantities and the methodologies for measuring them. These quantities were also studied in the force transfer standards, in order to achieve a good intercomparison.*

*Generic deadweight machines were studied, although the calculations and experiments were conducted on the INTI's 110 kN DW-FSM. The side forces and bending moments were measured by using a six components dynamometer, as well as other similar methodologies. Finally a key intercomparison (coded as CCM.F-K2.a.1) was performed to determine the degree of equivalence with others national metrology institutes (NMI).*

*Partial results were used to make improvements on the DW-FSM mentioned above. After several adjustments, we obtained a final result that allowed to define a value of  $2 \cdot 10^{-5}$  as the calibration and measurement capability (CMC), which is a good value according to international standards.*

*We concluded that having a DW-FSM studied in terms of the magnitudes of influence and a good knowledge of the behavior of the transfer standards, using a well-defined methodology and an stable environment, the force magnitude can be measured with accuracies from  $2 \cdot 10^{-5}$  to  $5 \cdot 10^{-5}$ .*



## GLOSARIO

**amplificador digital:** Instrumento eléctrico-electrónico que amplifica la señal de salida de un transductor, la convierte a un valor digital y lo indica en un display.

**build-up:** Es un conjunto de 3<sup>n</sup> transductores que trabajan en simultáneo (paralelo), de modo que se suma la carga de cada transductor individual calibrado en máquinas primarias, y de este modo se puede amplificar la escala y trazarla internamente.

**caracterización:** Terminología utilizada con anterioridad a la publicación EURAMET cg/04, la misma se refiere a una metodología de obtención de trazabilidad similar a la Ruta A de dicha publicación.

**coeficiente de arrastre:** Fuerza generada sobre un cuerpo por acción de una velocidad relativa entre el cuerpo y un fluido. La misma se da en la dirección de la velocidad relativa entre ambos.

**conexión a 6 hilos:** Conexión eléctrica asociada al puente de Wheatstone donde dos cables se utilizan para alimentar al puente, dos cables más para medir la tensión en los vértices del mismo y otros dos cables para medir la señal de salida en mV.

**creep (c):** Cambio en la indicación bajo carga constante y con en el tiempo, luego de haber incrementado la carga de un valor a otro.

**deriva temporal a largo plazo:** Es la variación de la indicación, ya sea del valor en cero o a fondo de escala, de un instrumento a lo largo del tiempo. Esta lectura debe realizarse en las mismas condiciones de medición. En el caso de la variación del valor de cero se la define como “deriva del cero”, mientras que en el caso de la variación del valor a fondo de escala se la define como “deriva del span”.

**error de interpolación:** Es la diferencia entre el valor medido, obtenido del promedio de las indicaciones para cargas crecientes solamente, y el valor obtenido a través del uso del polinomio de aproximación.

**escalón de carga:** Valor nominal de carga en la cual se realizará la medición. Generalmente se establecen 10 escalones de carga, repartidos preferentemente equidistantes entre carga nula y carga máxima.

**estabilización eléctrica:** Es el tiempo necesario para que la electrónica asociada a un instrumento de medición adquiera la temperatura de trabajo y con ello la estabilidad. Asimismo, la pequeña corriente que circula por los “strain gage” genera un pequeño efecto térmico en su vecindad que requiere tiempo para estabilizarse.

**estabilización térmica:** Es el tiempo necesario para que el instrumento adquiera la temperatura del laboratorio, sobre todo la de las superficies donde este apoya. Esto se hace para que la temperatura del instrumento sea la del laboratorio y para evitar los gradientes térmicos los cuales generan tensiones parásitas internas.

**exactitud:** Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando (VIM numeral 2.13)

**factor de sensibilidad (ó coeficiente de sensibilidad):** Generalmente se definen como derivadas parciales del valor obtenido de una medición respecto a la variable a considerar. Este describe como varía la estimación de salida en función de la variación en los valores de entrada para la variable en cuestión. (GUM numeral 5.1.3)

**fondo de escala (FS):** Es el valor máximo de medición de un instrumento. También se puede definir como el valor a capacidad máxima del instrumento.

**histéresis (v):** Diferencia entre el valor obtenido en cargas decrecientes y el obtenido en cargas crecientes, para el mismo valor de fuerza generado

**homogeneidad dimensional:** La misma significa que reemplazando las unidades correspondientes se llega a la unidad buscada, sin necesidad de utilizar coeficientes de conversión.



**magnitud de influencia:** Magnitud que, en una medición directa, no afecta a la magnitud que realmente se está midiendo, pero sí afecta a la relación entre la indicación y el resultado de medida (VIM numeral 2.52).

**magnitud escalar:** Sólo están definidas por un valor aritmético, por lo cual no dependen de la dirección, sentido, etc

**magnitud vectorial:** Es una magnitud que posee un módulo ó valor, una dirección, un sentido y un punto de aplicación.

**máquina de pesos suspendidos:** Máquina de fuerza, generalmente primaria, que funciona a través de la fuerza generada por masas conocidas actuando en el campo gravitatorio y conectada únicamente del objeto a medir.

**masa convencional:** Es la que se determina tomando como densidad de aire de  $1,2 \text{ kg/m}^3$  y densidad de las masas de  $8000 \text{ kg/m}^3$ .

**nivelación geométrica:** Distintas técnicas de la geotopografía y/o geodesia para determinar diferencias de altitudes.

**no linealidad:** Es el desvío de la indicación medida, obtenido para cargas crecientes solamente, respecto de una línea recta que pasa a través de la indicación de cero y de la indicación de carga máxima.

**punto de Wheatstone:** Sistema de conexión donde las resistencias y/o inductancias se colocan en cuatro ramas formando un rombo, por dos vértices opuestos se lo alimenta con una tensión continua o alterna, y en los otros vértices opuestos se mide la señal del desbalanceo del mismo. Este sistema es muy sensible a pequeños cambios en la resistencia.

**repetibilidad (b):** Se define en términos generales como el grado de concordancia entre la indicación de un sistema de medición de fuerza para aplicaciones repetidas de una fuerza dada.

**reproducibilidad (b):** Diferencia máxima entre los valores obtenidos a partir de la medición de un transductor de fuerza en distintas posiciones angulares de montaje. Esta definición es particular para el caso de metrología de fuerza.

**sesgo negativo:** Terminología estadística la cual indica que la media y la mediano se encuentran por debajo de la moda.

**strain gage:** Galga extensométrica. Es un sensor, que mide la deformación, y se basa en el efecto piezorresistivo, que es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se les somete a ciertos esfuerzos y se deforman en dirección de los ejes mecánicos. Un esfuerzo que deforma la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica.

**temperatura A3:** Es la curva de temperatura por encima de la cual la estructura cristalina del acero pasa de Fe  $\alpha$  a Fe  $\gamma$ , este último no tiene propiedades magnéticas. Esta temperatura en acero de bajo contenido de carbono como es el caso de los aceros inoxidable, en general está comprendida entre  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $910 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los procesos de laminación en caliente se realizan en temperaturas del orden de los  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , por lo cual la deformación plástica a esa temperatura no afecta la permeabilidad magnética.

**transductor de fuerza:** Es un instrumento que contiene una serie de sistemas mecánicos y/o eléctricos que transforman una magnitud física en una señal eléctrica. En el caso del transductor de fuerza, la deformación de un material elástico es traducida a la deformación de una galga extensométrica, la cual varía su resistencia eléctrica, luego esta resistencia es traducida a un desbalanceo de un puente de Wheatstone, y con este último traducida a una señal eléctrica del tipo mV/V.



**trazabilidad:** *Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida (VIM numeral 2.41)*

**unidad de calibración de puentes:** *Instrumento eléctrico que se utiliza para darle trazabilidad a un amplificador. Puede ser de funcionamiento resistivo o inductivo. El mismo recibe la tensión de alimentación del amplificador y entrega a la salida relaciones fijas, como ser 0,2 mV/V; 0,4 mV/V, etc. En la industria del pesaje se lo denomina “simulador de celda de carga”.*

**unidades de base:** *Magnitud de un subconjunto elegido por convenio, dentro de un sistema de magnitudes dado, de tal manera que ninguna magnitud del subconjunto pueda ser expresada en función de las otras (VIM numeral 1.4)*



## ÍNDICE DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

<b>CMC</b>	<i>“Calibration and Measurement Capability” – Capacidad de Medición y Calibración</i>
<b>DW-FSM</b>	<i>“Dead-weight Force Standard Machine” – Máquina primaria de pesos suspendidos</i>
<b>E2, F1, F2, MI, etc</b>	<i>Categorías de clasificación según recomendación OIML R111-1</i>
<b>En</b>	<i>Error normalizado, según Guía para la Expresión de Incertidumbres (GUM)</i>
<b>g ó g<sub>l</sub></b>	<i>Valor de la gravedad local.</i>
<b>g<sub>n</sub></b>	<i>Valor de la gravedad normalizada. g<sub>n</sub>=9,80665 m<sup>2</sup>/s</i>
<b>GUM</b>	<i>Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. [1]</i>
<b>IGM</b>	<i>Instituto Geográfico Militar, denominación antigua del IGN</i>
<b>IGN</b>	<i>Instituto Geográfico Nacional, denominación actual del ex IGM</i>
<b>INM</b>	<i>Instituto Nacional de Metrología</i>
<b>INMETRO</b>	<i>“Instituto Nacional de Metrologia, Normalizaçao e Qualidade Industrial, Instituto Nacional de Metrología de Brasil</i>
<b>INRiM</b>	<i>“Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica”, Instituto Nacional de Metrología de Italia</i>
<b>INTI</b>	<i>Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Instituto Nacional de Metrología de Argentina</i>
<b>ISO</b>	<i>International Standards Organization.</i>
<b>k</b>	<i>Factor de cobertura según Guía para la Expresión de Incertidumbres (GUM)</i>
<b>k = 2</b>	<i>Se refiere a cuando se calcula la incertidumbre con un factor de cobertura igual a dos que asegura un nivel de confianza de aproximadamente el 95,45% cuando la distribución es normal.</i>
<b>KCRV</b>	<i>Key Comparison Reference Value. Valor de referencia de la comparación clave. Los valores obtenidos en las comparaciones se corrigen al valor de referencia obtenido en las comparaciones claves de la cual la depende.</i>
<b>mV/V</b>	<i>Unidad de indicación típica en transductores de fuerza, la relación [mV/V] indica cual es la señal leída en [mV] por cada “volt” [V] de tensión de excitación.</i>
<b>N (Newton)</b>	<i>Unidad de fuerza perteneciente al Sistema Internacional de unidades.</i>
<b>NMI</b>	<i>“National Metrology Institute” - Instituto Nacional de Metrología</i>
<b>NPL</b>	<i>“National Physical Laboratory”, Instituto Nacional de Metrología de Inglaterra</i>
<b>OIML</b>	<i>Organización Internacional de Metrología Legal.</i>



<b><i>PTB</i></b>	<i>“Physikalisch-Technische Bundesanstalt”, Instituto Nacional de Metrología de Alemania</i>
<b><i>R&amp;R</i></b>	<i>Metodología donde se evalúa la Repetibilidad y Reproducibilidad variando el operador, o condiciones de medición, de modo de obtener la sensibilidad a dicho cambio.</i>
<b><i>R<sup>2</sup></i></b>	<i>Cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. Este valor varía entre 0 y 1, valores cercanos a 1 indican buena correlación entre los valores observados y la curva de interpolación definida. En este texto se utiliza para determinar el grado de linealidad de la variable en cuestión.</i>
<b><i>U</i></b>	<i>Incertidumbre expandida (k=2)</i>
<b><i>VIM</i></b>	<i>Vocabulario Internacional de Metrología. [5]</i>
<b><i><math>\rho_a</math></i></b>	<i>Densidad del aire. Se considera como condición estandarizada <math>\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3</math></i>
<b><i><math>\rho_m</math></i></b>	<i>Densidad del material de las pesas. Se considera como condición estandarizada para el acero inoxidable <math>\rho_m = 8000 \text{ kg/m}^3</math></i>
<b><i><math>\sigma_i</math></i></b>	<i>Incertidumbre estándar debida al subíndice “i”</i>



## TABLA DE CONTENIDO

<b>GLOSARIO</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS</b>	<b>8</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO</b>	<b>10</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>11</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>13</b>
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	13
1.2. ANTECEDENTES	15
1.3. OBJETIVOS	16
1.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.5. CARÁCTER DEL PROBLEMA	18
1.6. JUSTIFICACIÓN	19
<b>2. MARCO TEÓRICO y ESTADO DEL ARTE</b>	<b>21</b>
2.1. REALIZACIÓN DE LA MAGNITUD	21
2.1.1. Magnitudes que definen la unidad	24
2.1.2. Magnitudes de influencia	29
2.1.3. Dinamómetro de seis componentes y otros sistemas de evaluación	33
2.2. PATRONES DE TRANSFERENCIA	38
2.2.1. Características metrológicas de los transductores de fuerza de alta exactitud	39
2.2.2. Dispositivos de carga utilizados	49
2.3. METODOLOGÍA E INCIDENCIA DEL OPERADOR	54
<b>3. DESARROLLO ANALÍTICO, CONCEPTUAL Y EXPERIMENTAL</b>	<b>56</b>
3.1. REALIZACIÓN DE LA MAGNITUD	56
3.1.1. Magnitudes que definen la unidad	59
3.1.2. Magnitudes de influencia	72
3.1.3. Medición con dinamómetro de seis componentes y metodología de verificación	79
3.1.4. Comparación internacional de la DW-FSM de 110 kN del INTI	100
3.2. PATRONES DE TRANSFERENCIA	105
3.2.1. Características metrológicas de los transductores de fuerza de alta exactitud	105
3.2.2. Dispositivos de carga utilizados	126
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>133</b>
4.1. DEFINICIÓN DE LA UNIDAD	133
4.2. DEFINICIÓN DE LA UNIDAD – MAGNITUDES DE INFLUENCIA	135
4.3. PATRONES DE TRANSFERENCIA – CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS	138
<b>5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>142</b>
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>145</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA</b>	<b>146</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. TOLERANCIAS DE CLASE E INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN PARA UNA PESA DE 1KG SEGÚN OIML R 111-1.....	25
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DE TRANSDUCTORES DE FUERZA DE ALTA EXACTITUD .....	40
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DE AMPLIFICADOR DIGITAL Y UNIDADES DE CALIBRACIÓN DE PUENTES .....	40
TABLA 4. DETERMINACIÓN DE LA MASA DE LAS PESAS DE LA DW-FSM DE 110 kN.....	61
TABLA 5. CORRECCIÓN DEL VALOR RAGA IGN0 POR TRASLACIÓN A LA UBICACIÓN DE LA DW-FSM DE 110 kN. ....	65
TABLA 6. COMPARACIÓN ENTRE VALORES ESTIMADOS Y MEDIDOS DE GRAVEDAD LOCAL.....	65
TABLA 7. CAMBIO EN LA ALTITUD DEL SITIO DE IMPLANTACIÓN DE LA DW-FSM DE 110 kN. ....	66
TABLA 8. CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL AIRE EN DISTINTAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS. ....	66
TABLA 9. INCERTIDUMBRE DEBIDA A LA DENSIDAD DEL AIRE EN DISTINTAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS.....	67
TABLA 10. ELECCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS A APLICAR EN FUNCIÓN DE LA INCERTIDUMBRE FINAL REQUERIDA.....	70
TABLA 11. BALANCE DE INCERTIDUMBRE PARA LA DEFINICIÓN DE LA MAGNITUD DE LA DW-FSM DE 110 kN. ....	71
TABLA 12. VALORES DE GRAVEDAD OBTENIDOS ANTES Y DESPUÉS DEL MONTAJE DE LA DW-FSM DE 2MN DEL PTB. ..	75
TABLA 13. CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DEL TRANSDUCTOR MULTICOMPONENTE GTM MKA DE 160 kN. ....	80
TABLA 14. CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DEL AMPLIFICADOR DIGITAL HBM QUANTUMX MX840 AC.....	80
TABLA 15. RESULTADOS LUEGO DE LOS AJUSTES MECÁNICOS – CARGA VERTICAL.....	86
TABLA 16. RESULTADOS LUEGO DE LOS AJUSTES MECÁNICOS – CARGAS LATERALES. ....	86
TABLA 17. RESULTADOS LUEGO DE LOS AJUSTES MECÁNICOS – MOMENTOS FLECTORES. ....	87
TABLA 18. RESULTADOS LUEGO DE LOS AJUSTES MECÁNICOS – COMPORTAMIENTO DINÁMICO VS. ESTÁTICO.....	88
TABLA 19. INCLINACIÓN CALCULADA CON EL DINAMÓMETRO DE SEIS COMPONENTES VERSUS LA MEDIDA CON NIVELES..	92
TABLA 20. MEDICIÓN DE LA INCLINACIÓN DEL MARCO DE CARGA. ....	94
TABLA 21. UTILIZACIÓN DE TRANSDUCTORES DE REFERENCIA – Z30TOP 5kN, PUNTO 2kN.....	96
TABLA 22. UTILIZACIÓN DE TRANSDUCTORES DE REFERENCIA – Z4 100kN, PUNTO 50kN. ....	97
TABLA 23. UTILIZACIÓN DE TRANSDUCTORES DE REFERENCIA – C3H 100kN, PUNTO 50kN.....	98
TABLA 24. COMPARACIÓN CLAVE – VALORES OBTENIDOS POR NPL (PILOTO) – TRANSDUCTOR GTM, PUNTO 100 kN.	103
TABLA 25. COMPARACIÓN CLAVE – VALORES OBTENIDOS POR INTI – TRANSDUCTOR GTM, PUNTO 100 kN. ....	103
TABLA 26. DESVÍOS RELATIVOS EN $[1 \cdot 10^{-5}]$ RESPECTO DEL KCRV. ....	103
TABLA 27. COMPARACIÓN CLAVE – ESTABILIDAD DE LAS CONDICIONES DE MEDICIÓN.....	104
TABLA 28. DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD TÉRMICA DEL AMPLIFICADOR HBM DMP40.....	107
TABLA 29. CURVA DE INTERPOLACIÓN SIN TÉRMINO INDEPENDIENTE. ....	117
TABLA 30. CURVA DE INTERPOLACIÓN CON TÉRMINO INDEPENDIENTE.....	117
TABLA 31. ERROR COMETIDO AL UTILIZAR LA CURVA DE INTERPOLACIÓN CUANDO LA REFERENCIA POSEE UNA TARA. ..	119



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. ESQUEMA DE MÁQUINA DE PESOS SUSPENDIDOS DE 100kN (DISEÑO INRIM 2000-2013).....	23
ILUSTRACIÓN 2. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL DINAMÓMETRO DE SEIS COMPONENTES DE 100 kN DEL INRIM.....	33
ILUSTRACIÓN 3. ESQUEMA DE VARIABLES UTILIZADAS Y SU CONVENCION DE SIGNOS.....	35
ILUSTRACIÓN 4. SISTEMA BUILD-UP DE 3 MN, COMPUESTO POR 3 TRANSDUCTORES HBM, MODELO C18 DE 1 MN.....	36
ILUSTRACIÓN 5. INDICACIONES EN UN TRANSDUCTOR DE 500kN MEDIDO EN LA DW-FSM DE 500 kN DEL NPL.....	45
ILUSTRACIÓN 6. DISPOSITIVOS DE CARGA PARA TRANSDUCTORES HBM Z30A Y Z4A, SOLICITADOS EN COMPRESION... 51	51
ILUSTRACIÓN 7. DIMENSIONES DE TRANSDUCTORES HBM Z4A – ESQUEMA.....	51
ILUSTRACIÓN 8. DIMENSIONES DE TRANSDUCTORES HBM Z4A - TABLA.....	52
ILUSTRACIÓN 9. DISPOSITIVO DE CARGA (CABEZAL PARA COMPRESION) PARA TRANSDUCTOR HBM Z4A.....	52
ILUSTRACIÓN 10. DISPOSITIVOS DE CARGA PARA TRANSDUCTORES HBM Z30A Y Z4A, SOLICITADOS EN TRACCION.....	53
ILUSTRACIÓN 11. CARACTERÍSTICAS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICION SEGUN ISO 376:11.....	55
ILUSTRACIÓN 12. MÁQUINA DE PESOS SUSPENDIDOS (DW-FSM) DE 110 kN DEL INTI.....	58
ILUSTRACIÓN 13. DW-FSM DE 110 kN. IZQ. ACOPLAMIENTO ENTRE PESAS. DER. APOYO DE LA ÚLTIMA PESA.....	58
ILUSTRACIÓN 14. DINAMÓMETRO GTM-MKA DE 160 kN, Y DEFINICION DE LOS EJES DE COORDENADAS A UTILIZAR.....	81
ILUSTRACIÓN 15. PRIMER MEDICION CON DINAMÓMETRO DE SEIS COMPONENTES – CARGAS LATERALES.....	82
ILUSTRACIÓN 16. PRIMER MEDICION CON DINAMÓMETRO DE SEIS COMPONENTES – MOMENTOS FLECTOR Y TORSOR... 83	83
ILUSTRACIÓN 17. RESULTADOS LUEGO DE LOS AJUSTES MECANICOS – CARGAS LATERALES EJE X.....	85
ILUSTRACIÓN 18. RESULTADOS LUEGO DE LOS AJUSTES MECANICOS – MOMENTO FLECTOR EJE Y.....	85
ILUSTRACIÓN 19. RESULTADOS LUEGO DE LOS AJUSTES MECANICOS – CARGAS LATERALES Y MOMENTOS FLECTORES. 87	87
ILUSTRACIÓN 20. COMPARACION DE LOS RESULTADOS ANTES Y DESPUES DE LOS AJUSTES – CARGAS LATERALES.....	88
ILUSTRACIÓN 21. COMPARACION DE LOS RESULTADOS ANTES Y DESPUES DE LOS AJUSTES – MOMENTOS FLECTORES. 89	89
ILUSTRACIÓN 22. ARTICULACION DE MUY BAJO ROZAMIENTO.....	93
ILUSTRACIÓN 23. UTILIZACION DE TRANSDUCTORES DE REFERENCIA – Z30TOP 5kN, PUNTO 2kN.....	97
ILUSTRACIÓN 24. UTILIZACION DE TRANSDUCTORES DE REFERENCIA – Z4 100kN, PUNTO 50kN.....	98
ILUSTRACIÓN 25. UTILIZACION DE TRANSDUCTORES DE REFERENCIA – C3H 100kN, PUNTO 50kN.....	99
ILUSTRACIÓN 26. COMPARACION CLAVE EN 50 kN Y 100 kN – ESQUEMA DE CARGA.....	101
ILUSTRACIÓN 27. IZQ. TRANSDUCTOR GTM KTN-D. DER. TRANSDUCTOR SENSY 2715.....	102
ILUSTRACIÓN 28. HIPOTESIS DEL COMPORTAMIENTO A CREEP.....	110
ILUSTRACIÓN 29. SECUENCIA DE CARGA PARA ESTUDIAR EL FENOMENO DE CREEP.....	111
ILUSTRACIÓN 30. ENSAYO DE CREEP – RESULTADOS OBTENIDOS EN FORMA ABSOLUTA.....	111
ILUSTRACIÓN 31. ENSAYO DE CREEP – RESULTADOS OBTENIDOS EN FORMA RELATIVA.....	112
ILUSTRACIÓN 32. OSCILACION LIBRE DE LA DW-FSM DE 110 kN EN EL ESCALON DE 100 kN.....	122
ILUSTRACIÓN 33. OSCILACION DE INDICACION EN LA FSM DE 110 kN UTILIZANDO UN DINAMÓMETRO DE SEIS EJES.....	125
ILUSTRACIÓN 34. ESQUEMA DE DISPOSITIVOS DE CARGA PARA TRANSDUCTORES QUE TRABAJAN A COMPRESION.....	126
ILUSTRACIÓN 35. CABEZAL DE CARGA. IZQ. PARA BOTON DE CARGA ESFERICO. DER. PARA BOTON DE CARGA PLANO. 127	127
ILUSTRACIÓN 36. BOTON DE CARGA PARA TRANSDUCTOR HBM Z30A DE 10 kN.....	130



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema principal que motivó la presente investigación fue generada por la relativamente baja *reproducibilidad*<sup>1</sup> que se evidenciaba en algunos de los patrones de referencia del laboratorio de fuerza del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). La baja reproducibilidad se vio como el primer factor a resolver para poder reducir el nivel de incertidumbre del equipamiento.

La baja reproducibilidad es una de las fuentes que puede incrementar considerablemente la incertidumbre en la medición. Según el numeral 2.2.1 de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM) [1] -*La palabra “incertidumbre” significa duda. Así, en su sentido más amplio, “incertidumbre de medida” significa duda sobre la validez del resultado de una medición. Como no se dispone de distintas palabras para este concepto general de incertidumbre y para las magnitudes específicas que proporcionan medidas cuantitativas del concepto, por ejemplo, la desviación típica, es necesario utilizar la palabra “incertidumbre” en estos dos sentidos diferentes.* -

Como dice la definición, hay dos significados distintos atribuidos al vocablo “incertidumbre”, uno es el valor cuantitativo que incluye toda la metodología de estimación del mismo, y el otro es el concepto de incerteza o desconocimiento de la medición que se está realizando.

Visto desde otro enfoque, estos dos significados **genera dos necesidades**: La primera es saber por qué se da esta baja reproducibilidad, o sea analizar el concepto, evidenciando las *magnitudes de influencia*<sup>2</sup> que intervienen en el asunto; y la segunda es saber cómo mejorar la reproducibilidad de modo de reducir la incertidumbre desde el punto de vista cuantitativo.

La mayoría de la bibliografía accesible se enfoca en calcular la reproducibilidad, estimando cuál es su contribución a la incertidumbre total, como por ejemplo lo hace la guía EURAMET cg-4 [2], habiendo poca información disponible acerca de las causas que generan la falta de reproducibilidad y menos aún que acciones deberían llevarse a cabo para mejorarla.

La **pregunta a investigar** surge del siguiente análisis: el laboratorio de fuerza del INTI cuenta con una *máquina de pesos suspendidos*<sup>3</sup> de la misma marca, modelo y fabricada en la misma oportunidad que el *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB). Cuando se enviaba a calibrar un transduc-

---

<sup>1</sup> Diferencia máxima entre los valores obtenidos a partir de la medición de un transductor de fuerza en distintas posiciones angulares de montaje. El concepto se profundiza en la sección 2.2.1.1

<sup>2</sup> Magnitud que, en una medición directa, no afecta a la magnitud que realmente se está midiendo, pero sí afecta a la relación entre la indicación y el resultado de medida (definición VIM numeral 2.52)

<sup>3</sup> Máquina generalmente primaria de fuerza que funciona a través de la fuerza generada por masas conocidas actuando en el campo de la gravedad y conectada únicamente del objeto a medir.



tor de fuerza perteneciente al laboratorio, se obtenía buena reproducibilidad en el equipo del PTB, y una reproducibilidad inferior en el equipo del INTI. En opinión del autor esto era debido al desconocimiento de algunas de las características de la máquina del INTI. O sea, había algo que el instituto alemán tenía y conocía mejor que el autor del presente informe. Se observaba que la *repetibilidad*<sup>4</sup> obtenida era compatible entre ambos institutos, no así la reproducibilidad que presentaba una diferencia importante. A causa de esto, surgió la siguiente **hipótesis de trabajo**: “*Debido a que la reproducibilidad en la magnitud fuerza sólo implica el giro del transductor respecto de su eje, si se parte de una máquina patrón en óptimas condiciones y el operador realiza el giro de manera adecuada, las condiciones en la reproducibilidad no son tan diferentes de las condiciones en la repetibilidad, por lo cual el valor de la reproducibilidad tendería al valor de la repetibilidad*”.

Asumida esta hipótesis, se planteó como uno de los objetivos, lograr valores de reproducibilidad acordes a los de repetibilidad, y valores de repetibilidad compatibles con el mejor nivel internacional.

Otro problema era el desconocimiento de los factores que influyen en la reproducibilidad y cuanto aportan a la incertidumbre, siendo difícil diferenciar entre los factores que se estaban subestimando o sobreestimando.

A medida que se avanzó en la investigación, tanto del análisis de bibliografía especializada como del análisis de ensayos y pruebas experimentales, fueron incorporándose conceptos que lograron importantes cambios y mejoras, sobretudo en la metodología de la medición, o sea se redujo substancialmente “*el grado de desconocimiento del mensurando*”. Asimismo, se estudiaron varios factores que inciden en la reproducibilidad y la incertidumbre en general, y que en el resto del presente informe se denominan “magnitudes de influencia”. Estas magnitudes de influencia en particular pueden separarse en cuatro categorías:

- Las que pueden ser determinadas analíticamente sin necesidad de experimentación y de este modo pueden despreciarse o sus efectos pueden ser reducidos, según sea el caso.
- Las que fueron suficientemente estudiadas por científicos en otros Institutos Nacionales de Metrología (INM), y cuyo resultado demuestra que son despreciables o que se cuenta con ecuaciones para calcularla, o de metodologías para reducirlas.
- Las que siendo o no estudiadas por otros INM requieren igualmente un análisis analítico y/o experimental particular para el sistema máquina-transductor específico del laboratorio.
- Otras que forman parte de los temas de discusión actual a nivel internacional.

Estos temas son tratados en detalles en las secciones 2 y 3.

---

<sup>4</sup> Se define en términos generales como el grado de concordancia entre la indicación de un sistema de medición de fuerza para aplicaciones repetidas de una fuerza dada.



## 1.2. ANTECEDENTES

Como se mencionó en la sección 1.1, había antecedentes de la obtención de buenas reproducibilidades por parte de otros institutos de primera línea. O sea, hay varios institutos que conocen la mayoría de los factores que inciden en la reproducibilidad y los tienen “bajo control”.

Asimismo, hay varios conceptos, criterios y metodologías que se aplican cotidianamente en mediciones de esta magnitud, que posiblemente por no estar del todo demostrados científicamente no llegaron a documentarse, formando parte de las buenas prácticas de medición de la magnitud. Se pretende con el presente informe documentar varias de estas prácticas, dando una justificación técnica en los casos que sea posible.

A nivel internacional sigue vigente una pregunta. La cual se presenta en el último párrafo de la sección 4.1 de la EURAMET cg-4 [2], la cual se transcribe a continuación:

*“La incertidumbre de medida asociada a las escalas de fuerza realizadas en los INM se asegura mediante intercomparaciones internacionales. La incertidumbre expandida relativa de medición, con la cual los valores de fuerza pueden ser generados por medio de máquinas primarias de fuerza de pesos suspendidos (DW-FSM) que varios INM declaran, son tan bajas como  $1 \times 10^{-5}$ . Sin embargo, en la práctica, cuando se utilizan diferentes máquinas primarias de fuerza de pesos suspendidos para calibrar el mismo transductor, las diferencias entre los resultados son a veces considerablemente mayores, debido a los efectos de las interacciones mecánicas. Esto resultó evidente en las comparaciones interlaboratorio en BCR y WECC, basadas en la calibración de transductores de fuerza llevadas a cabo en 1987 y 1991 respectivamente.”*

Con la lectura de lo anterior, puede verse que aún siguen sin respuesta algunas preguntas. Las propuestas que se manejan actualmente se presentan en la sección 2.



### 1.3. OBJETIVOS

- Identificar la mayor cantidad posible de factores que influyen tanto en la reproducibilidad como en la incertidumbre final de las mediciones utilizando transductores de fuerza de alta exactitud y realizadas en máquinas primarias de fuerza de pesos suspendidos (DW-FSM).
- Alcanzar valores de reproducibilidad compatibles con los valores de repetibilidad, y estos últimos comparables con los obtenidos al mejor nivel internacional.
- Presentar los factores que actualmente se encuentran cuantificados y plantear expresiones para cuantificar los demás. Si no se pueden cuantificar, plantear nuevas líneas de investigación o metodologías de medición que reduzcan sus efectos.
- Plantear propuestas en cuanto a las condiciones ambientales, la metodología, y la operación de máquinas primarias de fuerza, tendientes a mejorar la incertidumbre de medición.
- Documentar las buenas prácticas de medición que habitualmente se utilizan pero que al momento no se encuentran dentro de la bibliografía, normativa y/o publicaciones científicas.
- Proponer una guía de metodologías y tecnologías a aplicar para poder realizar la unidad de fuerza vinculada a las unidades de base, en función de la incertidumbre esperada del equipo.

### 1.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La guía EURAMET cg-4 [2] plantea dos metodologías para trazar una máquina primaria de fuerza (FSM), en su numeral 5.1 define lo siguiente:

**Trazabilidad por la ruta A:** *La máquina de calibración de fuerza obtiene su trazabilidad directamente de patrones de transferencia calibrados en máquinas patrón nacional de fuerza.*

*En el apartado 5.2 se describe el método recomendado para determinar las CMC<sup>5</sup> para máquinas con esta ruta de trazabilidad.*

**Trazabilidad por la ruta B:** *La máquina de calibración de fuerza tiene trazabilidad independiente a las unidades básicas SI de masa, longitud y tiempo<sup>6</sup>.*

*La trazabilidad se obtiene de mediciones de masa, gravedad, longitud de palanca, áreas de pistón, etc. y la incertidumbre asociada a la fuerza generada (y las CMC declaradas por el laboratorio) se calcula, como para las máquinas patrón nacional de fuerza, de las incertidumbres asociadas a estas mediciones, junto con las otras contribuciones detalladas en el apartado 4. También es necesario realizar comparaciones entre la máquina de calibración de fuerza y una máquina patrón nacional de fuerza apropiada, usando patro-*

---

<sup>5</sup> CMC: "Calibration and measurement capabilities", o sea Capacidad de Medición y Calibración.

<sup>6</sup> Se refiere a que la trazabilidad se realiza directamente a las magnitudes de base masa, longitud y tiempo, o sea es independiente de otras mediciones y/o instrumentos.



nes de transferencia de alta calidad. El procedimiento para este trabajo puede ser como el descrito en el apartado 5.2, pero se deben analizar los resultados de una manera diferente, ya que es más un ejercicio de comparación que una calibración. El análisis debe mostrar si los resultados de las dos máquinas son compatibles metrológicamente. En la referencia [4] se describe un método de evaluación e incluye determinar si los valores  $En^7$  calculados dentro de todo el intervalo de fuerza aplicada exceden o no la unidad. Si estos valores exceden la unidad, no es suficiente aumentar la CMC para reducir el valor  $En$  a un nivel aceptable, sino que el balance completo de incertidumbre asociado a la máquina de calibración de fuerza (y con el procedimiento de comparación) debe ser revisado para satisfacer al organismo nacional de acreditación.

En la presente investigación, el análisis se realizó sobre patrones primarios los cuales son trazados directamente a las *unidades de base*<sup>8</sup>. Es por ello que se siguen los lineamientos de la **Ruta B** definida en la guía mencionada. Esta metodología requiere ser demostrada experimentalmente a través de una comparación internacional, generalmente clave. Asimismo, algunas cuestiones no contempladas en la guía de referencia son presentadas y analizadas en el presente informe.

Muchas de las definiciones, y la cuantificación de varios de los factores que influyen en la incertidumbre de medida son presentados en la **Ruta A** de dicha guía, los cuales pueden suponerse en gran parte asociados a los transductores de transferencia utilizados. Asimismo, la norma ISO 376:2011 [3] analiza varios de estos factores y posee cálculos internacionalmente aceptados. Es por ello que ambas referencias fueron utilizadas durante el desarrollo de la presente investigación.

Desde el punto de vista experimental, se realizaron varias mediciones y ensayos. Las más importantes y representativas fueron:

- El estudio de las características metrológicas de la máquina de pesos suspendidos (DW-FSM) de 110 kN del INTI, a través de la medición de cargas laterales, momentos flectores y el momento torsional utilizando un dinamómetro de seis componentes. Este trabajo se realizó con un equipamiento perteneciente al Centro Nacional de Metrología (CENAM) de México; y con la colaboración del *Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica* (INRiM) de Italia.
- Las mejoras en la alineación y balanceo en la DW-FSM de 110 kN, utilizando niveles de alta exactitud, reduciendo con ello las fuerzas y momentos parásitos.
- La participación en la intercomparación clave del *Consultative Committee for Mass and Related Quantities* (CCM), codificado bajo la denominación CCM.F-K2.a.1. La misma fue pilotada por el *National Physical Laboratory* (NPL) de Inglaterra.

---

<sup>7</sup> Error normalizado según la Guía para Expresión de Incertidumbres (GUM)

<sup>8</sup> Magnitud de un subconjunto elegido por convenio, dentro de un sistema de magnitudes dado, de tal manera que ninguna magnitud del subconjunto pueda ser expresada en función de las otras (VIM numeral 1.4)



## 1.5. CARÁCTER DEL PROBLEMA

Esta investigación involucra una mezcla de características del problema que incluyen temas teóricos, prácticos, conceptuales y metodológicos. Estos en mayor o menor medida determinan los tipos de estudios realizados; los cuales incluyen:

- El estudio y aplicación de los principios fundamentales de la física.
- La recopilación de trabajos de investigación realizados por otros institutos.
- El planteo de hipótesis de trabajo, así como de buenas prácticas de medición, lo cual permitió avanzar en los estudios experimentales.
- La experimentación, con la cual se determinó cuantitativamente la incidencia de las magnitudes de influencia en transductores de fuerza de referencia, utilizando la máquina de pesos suspendidos de 110 kN del INTI.
- La optimización de metodologías de medición y calibración, basado en el estudio sistemático de las magnitudes de influencia, donde se pudo reducir tanto la reproducibilidad como la incertidumbre en general en las mediciones realizadas en el laboratorio.

Este trabajo de investigación inició con la recopilación y análisis de la información disponible. Cabe señalar como fuentes principales de información a la guía EURAMET cg-4 [2], y la *Guide to the Uncertainty of Force Measurement* [4]. Luego se realizaron una serie de análisis teóricos, ensayos y mediciones sobre la DW-FSM de 110 kN del INTI. Llegado a este nivel de entendimiento de la situación, se continuó con la medición de las fuerzas laterales, los momentos flectores y el par torsional utilizando un dinamómetro de seis componentes; con los resultados obtenidos se realizaron ajustes sobre el balanceo y alineación de las pesas. Los mismos parámetros fueron verificados con niveles de alta exactitud, realizándose algunos ajustes de menor cuantía que los anteriores. Para continuar se hicieron varias optimizaciones sobre la metodología de medición, y finalmente se participó en una intercomparación internacional clave, con la cual se demostró la capacidad de la DW-FSM de 110 kN de alcanzar una CMC de  $2 \cdot 10^{-5}$ .



## 1.6. JUSTIFICACIÓN

Desde el punto de vista nacional, la mejora en la reproducibilidad y otros factores inherentes a la exactitud de la máquina de pesos suspendidos de 110 kN trajo como consecuencia la reducción de la CMC desde un valor de  $1 \cdot 10^{-4}$  a un valor tan bajo como  $2 \cdot 10^{-5}$ .

El valor inicial relativamente alto de  $1 \cdot 10^{-4}$  en opinión del autor era debido a los siguientes factores:

- La acreditación del laboratorio por parte del *Deutscher Kalibrierdienst* (DKD) de Alemania, y como era práctica habitual en el caso de laboratorios acreditados, la utilización de la metodología de “caracterización”, actualmente denominada ruta A en la guía EURAMET cg-4, la cual realiza la trazabilidad a través de calibraciones con el consiguiente incremento de la incertidumbre a lo largo de una cadena de calibraciones sucesivas.
- Dos de los tres transductores de transferencia utilizados no alcanzaban las características metroológicas necesarias para esta tarea.
- Algunos factores asociados a la máquina en cuestión, sobretodo la falta de nivelación, y a la metodología empleada que poseía mayor cantidad escalones de carga, menor cantidad de series de medición, y menores tiempos de estabilización.

El valor actual de  $2 \cdot 10^{-5}$ , también en opinión del autor es debido a los siguientes factores:

- La incorporación del laboratorio al Acuerdo de Reconocimiento Mutuo de Patrones Nacionales de Medida y Certificados de Calibración y de Medición (CIPM-MRA), donde es habitual utilizar la ruta B de la guía EURAMET cg-4, la cual vincula la máquina directamente a las unidades de base, asegurando la misma a través de comparaciones internacionales. Esta metodología define grados de equivalencia entre máquinas primarias de distintos institutos, sin haber incremento de incertidumbre por no existir una cadena de calibraciones sucesivas.
- Uso de dos transductores de referencia de alta exactitud.
- Una metodología muy estudiada de la intercomparación llevada a cabo.
- Mejor conocimiento del equipamiento en cuestión y mejoras sobre la máquina primaria llevadas a cabo antes de la intercomparación.

Por otro lado, la norma ISO 376:11 en su tabla 2 presenta los requisitos mínimos de incertidumbre de la máquina de referencia utilizada para calibrar transductores de fuerza. La mejor clase que define esta norma es la 00, la cual requiere una máquina de referencia con una incertidumbre expandida ( $k=2$ ) menor a 0,01%. Para que otras máquinas en el país puedan calibrar transductores que cumplan con esta clase de exactitud, es necesario que las mismas se vinculen a la máquina primaria de fuerza del INTI, con lo cual esta última debería materializar valores de fuerza con una incertidumbre del orden de  $5 \cdot 10^{-5}$ .



Asimismo, la tendencia internacional, en el caso de medición en altas cargas, es la utilización de sistemas de múltiples transductores trabajando en paralelo, conocidos en inglés como build-up<sup>9</sup>. Los transductores individuales que forman parte de estos sistemas se calibran en DW-FSM. El conjunto armado forma un sistema de referencia de mayor capacidad de fuerza, el cual queda trazado indirectamente a las magnitudes de base. Para que este sistema sea viable, se requieren exactitudes máximas del orden de  $5 \cdot 10^{-5}$  en la máquina de pesos suspendidos de referencia. Esta alternativa de múltiples transductores también se está desarrollando en el INTI.

Según la referencia [4] *“La fabricación de casi todos los productos industriales requiere la aplicación controlada de fuerzas. En muchas industrias, estas fuerzas deben ser medidas para asegurar que los artículos fabricados se realizan correctamente. La exactitud de medición de la fuerza varía desde ‘un pequeño porcentaje hasta unas pocas partes por millón’. Aunque los requisitos varían, la buena práctica debe seguirse.”*

Según lo anterior, y en apoyo al desarrollo de la industria nacional, puede asegurarse que un mejor conocimiento de la medición de la magnitud fuerza y una mejor incertidumbre apunta en última instancia a una mejora en la calidad de los productos y la productividad de los procesos de producción. El conocimiento íntimo del funcionamiento de los equipos que se presentan a lo largo de la presente investigación permitirá el desarrollo de los mismos a nivel nacional en el mediano plazo.

Desde el punto de vista internacional, se pretende avanzar en el conocimiento de varias de las magnitudes de influencia que hoy se plantean cualitativamente pero no en forma cuantitativa. Asimismo, plantear algunas metodologías alternativas de verificación y corrección de las magnitudes de influencia en máquinas de pesos suspendidos, para que puedan ser aplicadas en institutos nacionales de metrología que no cuentan con equipamiento específico para tal fin.

---

<sup>9</sup> Es un conjunto de 3<sup>n</sup> transductores que trabajan en simultáneo (paralelo), de modo que se suma la carga de cada transductor individual calibrado en máquinas primarias, y de este modo se puede amplificar la escala y trazarla internamente.



## 2. MARCO TEÓRICO y ESTADO DEL ARTE

### 2.1. REALIZACIÓN DE LA MAGNITUD

Para realizar la unidad de fuerza (el newton), se inicia desde definiciones de la física, con lo cual la fuerza puede determinarse en función de la masa, la aceleración de la gravedad local y la densidad tanto del aire como de las masas. Estas magnitudes forman parte de una ecuación deducida analíticamente y por lo tanto posee *homogeneidad dimensional*<sup>10</sup>. Asimismo, podrá utilizarse los criterios de la GUM [1], para definir los factores de sensibilidad por utilización de las derivadas parciales de la ecuación que define dicha magnitud derivada.

Sin embargo, hay otras magnitudes que afectan el resultado de medición y con ello la incertidumbre, pero al no incidir en forma directa, no forman parte de esta ecuación. Estas magnitudes son consideradas como “magnitudes de influencia”, que según el VIM [5] son una “*magnitud que, en una medición directa, no afecta a la magnitud que realmente se está midiendo, pero sí afecta a la relación entre la indicación y el resultado de medida.*”

Desde otro enfoque, pero que en opinión del autor ayuda a ordenar y asimilar las ideas, es necesario indicar que la magnitud fuerza es una *magnitud vectorial*<sup>11</sup>, que partiendo de la 2<sup>da</sup> ley de Newton para sistemas de masa constante, y corregida por el principio de Arquímedes queda:

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

Ecuación 2-1

Como puede verse, la fuerza toma su carácter vectorial de la aceleración de la gravedad, debido a que el resto de las variables involucradas son *magnitudes escalares*<sup>12</sup>. La ecuación aceptada internacionalmente es del tipo escalar, por lo cual quedan varias consideraciones fuera de la definición de la magnitud. Este tema es presentado en la sección 2.1.1.

Es por ello que todas las magnitudes que fueron definidas como directas entran dentro de la ecuación escalar, por lo tanto, los factores que inciden en la parte vectorial, o sea dirección, sentido y punto de aplicación son analizadas como magnitudes de influencia. Asimismo, se agregan otras magnitudes de influencia, que afectan a la medición y que no es posible y/o conveniente que sean incluidas en la definición de la magnitud.

<sup>10</sup> La misma significa que reemplazando las unidades correspondientes se llega a la unidad buscada, sin necesidad de utilizar coeficientes de conversión.

<sup>11</sup> Es una magnitud que posee un módulo ó valor, una dirección, un sentido y un punto de aplicación.

<sup>12</sup> Sólo están definidas por un valor aritmético, por lo cual no dependen de la dirección, sentido, etc.



Dentro de este capítulo, se realiza una breve introducción teórica a cada una de estas magnitudes, y el estado del arte de la medición de cada una de ellas. Debido a que uno de los objetivos de la presente investigación es “Dar una guía de metodologías y tecnologías a aplicar en función de la incertidumbre esperada del equipo”, se plantean los siguientes tres niveles de incertidumbre a alcanzar, en función del uso previsto del equipo.

- *1<sup>er.</sup> grupo*       $5 \cdot 10^{-5} \leq U \leq 1 \cdot 10^{-4}$

Máquinas secundarias de fuerza, perteneciente a laboratorios acreditados y trazadas a máquinas primarias que pertenecen a un INM. También puede ser una máquina primaria de fuerza perteneciente a un INM.

- *2<sup>do.</sup> grupo*       $1 \cdot 10^{-5} < U \leq 2 \cdot 10^{-5}$

Máquinas primarias de fuerza, pertenecientes a un INM. Este es el nivel de incertidumbre actual en los INM de primer nivel.

- *3<sup>er.</sup> grupo*       $U \leq 1 \cdot 10^{-5}$

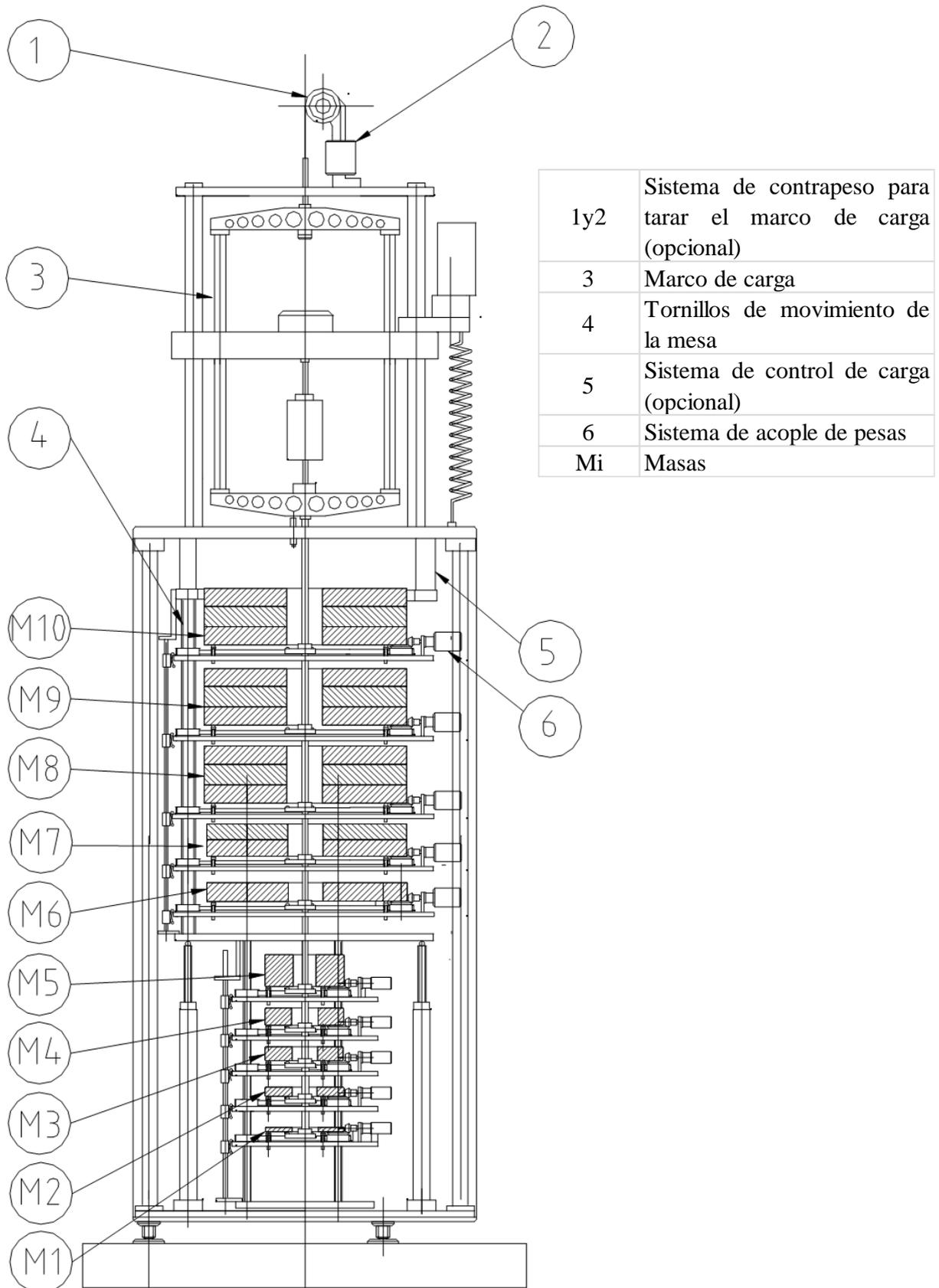
Máquinas primarias de fuerza, pertenecientes a un INM. Este es el nivel de incertidumbre que algunos institutos plantean, pero que en opinión del autor serán intercomparables recién en algunos años<sup>13</sup>.

Al inicio de la investigación la máquina de pesos suspendidos de 110 kN del INTI pertenecía al 1<sup>er.</sup> grupo, pero llegado al momento de finalizar esta investigación la misma reúne todas las condiciones para pertenecer al 2<sup>do.</sup> Grupo, en la sección 1.6 se presentó esta situación. Para poder asegurar la incertidumbre que plantea una máquina del 3<sup>er.</sup> grupo son necesarios resolver algunas cuestiones que actualmente se están investigando a nivel internacional. Estas cuestiones son planteadas en el desarrollo del presente informe.

Es por lo anterior que se presentan la variedad de métodos de medición y/o determinación necesarios. La variedad de metodologías, se plantean para poder realizar un trabajo de definición de la magnitud fuerza, en correspondencia con las incertidumbres buscadas, la sencillez de determinar dichas magnitudes y los costos asociados, estando el análisis de estos últimos fuera del alcance de la presente investigación.

---

<sup>13</sup> Si bien realizando la trazabilidad por ruta B, o sea todo lo planteado en los ítems 2.1.1 y 2.1.2, pueden alcanzarse incertidumbres del orden de  $1 \cdot 10^{-5}$ ; al momento de realizar mediciones con transductores de fuerza de alta exactitud, los desvíos relativos entre estos equipos es relativamente alta (ver ítem 4.1 de la EURAMET cg/04 [2]). Asimismo, la incertidumbre mínima obtenible para dicho transductor en este tipo de equipos llega a valores de entre  $2,5 \cdot 10^{-5}$  y  $3,5 \cdot 10^{-5}$ , siendo la relación de entre 2,5 y 3,5 respecto a la CMC declarada de la máquina. Estos valores demuestran que hay factores influyentes no contemplados en la CMC, o bien los transductores de alta exactitud aún no están en condiciones de realizar mediciones con estos niveles de incertidumbre.



**Ilustración 1. Esquema de máquina de pesos suspendidos de 100kN (diseño INRiM 2000-2013).**



### 2.1.1. Magnitudes que definen la unidad

El análisis teórico comienza con la ecuación de la segunda ley de Newton para sistemas de masa constante ( $F = m \cdot a$ ), la cual se corrige por el principio de Arquímedes. Esto es debido a que las masas que componen la máquina primaria de fuerza (FSM), están “desalojando” parte del aire de la atmósfera. La ecuación queda de la siguiente manera:

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

Ecuación 2-2

Donde las variables son las mismas que las presentadas para la ecuación 2-1. Esta ecuación es escalar y de deducción analítica, por lo cual posee homogeneidad dimensional.

La masa de una pesa puede determinarse con muy baja incertidumbre, así como el valor de la gravedad local, mientras que la densidad del aire puede ser monitoreada. La determinación de la incertidumbre, viene dada por la combinación de las variables mencionadas, que según la sección 4.1, ecuación 2 de la guía EURAMET cg-4 [2], es la siguiente:

$$\left(\frac{\sigma_F}{F}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\rho_a}{\rho_m}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{\sigma_{\rho m}}{\rho_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho a}}{\rho_a}\right)^2\right]$$

Ecuación 2-3

Las ecuaciones presentadas son las indicadas para trabajar con valores de masa real. Las ecuaciones 3 y 4 de la guía mencionada se utilizan en caso de trabajarse con el valor de *masa convencional*<sup>14</sup>.

Por esta razón, se pasa a analizar individualmente cada una de las cuatro variables presentadas.

#### 2.1.1.1 Masa. Determinación de su valor.

La medición de la masa es un tema demasiado amplio como para ser presentado en este trabajo. Estos temas son tratados en profundidad en investigaciones referentes a la metrología científica de masas. Para simplificar la exposición, tanto la exactitud, como las características de los materiales, la terminación superficial y las características geométricas, pueden ser asimiladas a la recomendación internacional OIML R 111-1 [6].

En la siguiente tabla se presentan las tolerancias requeridas y la incertidumbre máxima de calibración para una pesa de 1 kg, que como puede verse es al menos 3 veces mejor que la tolerancia de clase, la cual no sólo es una propuesta de la recomendación, sino también está dentro de las prácticas metrológicas habituales.

<sup>14</sup> Es la que se determina tomando como densidad de aire de 1,2 kg/m<sup>3</sup> y densidad de las masas de 8000 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 1. Tolerancias de clase e incertidumbre de medición para una pesa de 1kg según OIML R 111-1.**

<b>Clase</b>	<b>Tolerancia [mg] <math>1 \cdot 10^{-6}</math></b>	<b>Incertidumbre [mg] <math>1 \cdot 10^{-6}</math></b>
E1	0,5	0,15
E2	1,6	0,50
F1	5,0	1,50
F2	16,0	5,00
M1	50,0	15,00

Se eligió una pesa de 1 kg, debido a que los ‘miligramos’ de tolerancia y de incertidumbre coinciden con el valor relativo en  $1 \cdot 10^{-6}$ . Los valores varían ligeramente en función del valor de masa, aunque a los fines prácticos esto no tiene incidencia en metrología de fuerza.

Debido a que la determinación de la masa se realiza sólo una vez antes del montaje de la máquina, sin realizarse re-calibraciones posteriores, es muy importante contemplar este hecho, reduciendo al máximo el desgaste de las pesas por rozamiento y/o pérdidas de material por golpes. Asimismo, la limpieza y la posible corrosión son un factor más a tener en cuenta.

El NPL estudió el caso sobre su máquina de pesos suspendidos de 1,2 MN, y presenta el mismo en *Guide to the Uncertainty of Force Measurement* [4], donde expresa: “*Experiencias previas con masas de acero inoxidable austenítico de similar relación área a masa han indicado que la masa es probable que sea estable y mejor que 0,2 ppm en un período de 10 años. Junto a esto y estimando una tolerancia de 1,0 ppm para cambios de masa debido a desgaste, esta combinación da un desvío estándar total de 1,2 ppm para la masa.*”

#### 2.1.1.2 Gravedad local. Estimación y medición.

El valor de la gravedad varía básicamente con la ubicación geográfica y la altitud, esto se debe a que la tierra no es una esfera perfecta, incluso tampoco es un geoide, la aceleración centrípeta varía con la latitud, siendo máxima en el Ecuador, y la tierra no es homogénea superficialmente ni en composición. El valor de la gravedad también varía en forma armónica debido a la atracción gravitatoria principalmente del sol y de la luna. Una posible variación puede darse con el cambio en el nivel freático.

Es posible medir el valor de la gravedad en un punto en particular de manera absoluta con un alto grado de exactitud, luego trasladar ese valor utilizando un gravímetro como instrumento de transferencia. Este valor transferido puede lograr un valor de incertidumbre asociado de  $1 \cdot 10^{-7}$ , el cual puede llegar a variar con el tiempo un valor de  $2 \cdot 10^{-7}$ .



Es necesario realizar las mediciones en la altura de trabajo del equipo, esto es debido a que el gradiente de gravedad es de  $-3,08 \cdot 10^{-6} \text{ 1/s}^2$ , y considerando un valor de la gravedad cercano a  $9,8 \text{ m/s}^2$ , el desvío relativo aproximado por metro de altura es de  $3 \cdot 10^{-7}$ . En el caso de máquinas de alta exactitud, y de alturas mayores a 7 m, es necesario corregir el valor al baricentro de cada pesa.

Se presentan a continuación dos métodos de estimación y el método de medición absoluta y relativa.

El **primer método** es utilizando la ecuación de un geoide. Para estimar la gravedad en un determinado lugar, se requiere la latitud y altitud sobre el nivel del mar. Se utiliza en este caso la ecuación de Roman Schwartz y Andreas Lindau [7].

$$g = 9,780\ 318 [1 + 0,005\ 3024 \text{ sen}^2 \varphi - 0,000\ 0058 \text{ sen}^2 2\varphi] - 0,000\ 003085 \cdot h \quad \left| \text{Ecuación 2-4} \right.$$

El valor típico de incertidumbre en este caso puede llegar a ser de  $1 \cdot 10^{-5}$ , lo cual es suficiente para la mayoría de las mediciones, no así para definir la magnitud fuerza con alto grado de exactitud.

El **segundo método**, es utilizando el software SISProject [8] desarrollado por el *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB), en el cual se ingresan la latitud y longitud geográfica. Las mismas pueden obtenerse con suficiente exactitud utilizando herramientas de posicionamiento global (GPS). El software posee una base de datos de los valores medidos en distintas partes del mundo. Asimismo, puede ingresarse la altitud si es un dato disponible, o dejar que el software interpole la misma.

En el caso de que el software interpole la altitud, la incertidumbre en una zona de llanura y con muchos puntos de medición cercanos puede llegar a ser de  $4,0 \cdot 10^{-6}$ , mientras que ingresando la altitud dicho valor puede llegar a descender hasta  $1,0 \cdot 10^{-6}$ .

El **tercer método** es la medición de la gravedad en forma absoluta o relativa. Para ello se utilizan gravímetros que pueden basarse en el principio del péndulo o de la caída libre de un cuerpo medida su aceleración por interferometría. La medición en forma relativa generalmente utiliza el mismo principio, el equipo se ajusta en lugares de referencia (donde se midió en forma absoluta), y luego se transporta al lugar a determinar para obtener la diferencia. Se pueden alcanzar niveles de incertidumbre del orden de  $2 \cdot 10^{-7}$ .

Tanto en el primer método como en el segundo, los resultados están fuertemente influenciados por la geografía del terreno. En el caso particular del segundo método, también depende de la cantidad de puntos medidos en las cercanías. Asimismo, y en menor medida de las anomalías geológicas de la zona. El tercer método es el único que, por tratarse de una medición absoluta o transferida desde un valor absoluto, corrige todas estas anomalías. La medición puede durar 24 h para corregir la incidencia del sol y la luna, aunque la posición de estos astros es conocida al igual que su nivel de influencia, por lo cual los valores obtenidos pueden ser corregidos.



### 2.1.1.3 Densidad del aire. Determinación

La ecuación más exacta hasta el momento ( $3 \cdot 10^{-5}$ ), está basada en la fórmula CIPM (1981/91) [9], en este caso en particular es recomendable utilizar la expresión simplificada que recomienda el numeral E.3 de la OIML R111-1 [6], cuya exactitud es de  $2 \cdot 10^{-4}$ , debido a que la misma posee un cálculo simple que permite fácilmente su determinación en tiempo real. La expresión es la siguiente:

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot p - 0,009 \cdot hr \cdot \exp(0,0612 \cdot t)}{273,15 + t}$$

Ecuación 2-5

La densidad del aire  $\rho_a$  en  $kg \cdot m^{-3}$ , depende básicamente de tres variables: la temperatura ambiente  $t$  en  $^{\circ}C$ , la humedad relativa  $hr$  en %, y la presión atmosférica  $p$  en  $hPa$ . Las dos primeras son controladas con la climatización de la sala del laboratorio, con mayor o menor grado de exactitud; mientras que la presión atmosférica dentro del laboratorio guarda directa relación con la atmosférica; por lo tanto, esta variable no es fácilmente controlable.

Es común que las características estadísticas en muchos elementos meteorológicos, como lo es la presión atmosférica presenten un sesgo negativo. Esto hace que el intervalo de valores por debajo de la media sea mayor al intervalo de valores por encima de la misma. Por ejemplo, en la zona de implantación del laboratorio de fuerza del INTI, la presión atmosférica media es de 1013 hPa. El intervalo de valores (988 hPa a 1028 hPa) cubre aproximadamente el 95% del tiempo, y como puede observarse existe un sesgo negativo. Fuera de este intervalo de presión atmosférica, se discontinúan las actividades, o se calcula la densidad del aire, verificando estar dentro de los límites adecuados.

Estudios realizados por el NIST de Estados Unidos, y presentados en *Uncertainty in NIST Force Measurements* [10], muestran una variación de la densidad del aire utilizando la ecuación presentada precedentemente de  $\pm 0,04 kg/m^3$ . Los intervalos de variación que utilizaron fueron los siguientes: Temperatura [ $22,8^{\circ}C - 23,2^{\circ}C$ ], humedad relativa [10 % - 60 %] y presión atmosférica [981,5 hPa – 1023,3 hPa]. En la sección 3.1.1.3 se realizan los cálculos para los valores específicos en Buenos Aires, donde puede observarse la compatibilidad con estos resultados.

### 2.1.1.4 Densidad de las masas. Determinación

Desde el punto de vista de la incertidumbre, la densidad de las masas tiene la misma importancia que la densidad del aire, debido a que ambas poseen el mismo factor de sensibilidad ( $\rho_a/\rho_m$ ).

La densidad de las masas puede ser determinada **en función de la composición aproximada** del material, según Método F2 del numeral B.7.9.3. de la OIML R111-1 [6]; por ejemplo en el caso de un acero inoxidable con valor de densidad  $7950 kg \cdot m^{-3}$ , la incertidumbre ( $k=2$ ) puede estimarse en  $140 kg \cdot m^{-3}$ . Obviamente en el caso de materiales compuestos es necesario realizar un promedio ponde-



rado de la densidad y de la incertidumbre. No se recomienda utilizar el método F1, debido a que el suministro constante que nombra la recomendación no aplica a este tipo de equipamiento.

Otra metodología es **utilizar el certificado de colada del fabricante**, donde la misma puede poseer una incertidumbre de un tercio de la antes mencionada, o sea de unos  $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  para el caso del acero inoxidable. Como se demuestra en la sección 3.1.1.4 para la mayoría de los usos, en el caso del acero al carbono o el acero inoxidable no es necesario realizar la medición de la densidad de las masas con métodos más exactos. No sucede así en el caso del uso de aleaciones de aluminio.

Para **determinar la densidad de las masas** con mayor exactitud y confiabilidad, se recurre a la determinación experimental. La OIML R 111-1 [6] recomienda cinco métodos, sin contar el método F antes mencionado, la determinación del volumen por mediciones geométricas no es aplicable a estos casos, debido a la complicada geometría que presentan este tipo de masas.

Es recomendable utilizar los métodos A3 (OIML R111-1 numeral B.7.4.4), o el método C (numeral B.7.6). La elección de uno u otro dependerá del instrumental disponible, el tamaño de las masas, etc.

El método A3 consta de realizar al menos tres series de medición, pesando en aire y luego inmerso en agua destilada la masa a determinar la densidad. La expresión de cálculo es la siguiente:

$$\rho_t = \frac{I_{ta} \cdot \rho_l - I_{tl} \cdot \rho_a}{I_{ta} - I_{tl}}$$

Ecuación 2-6

Donde  $\rho_t$ ,  $\rho_l$  y  $\rho_a$  son la densidad de la masa a determinar, del agua y del aire respectivamente,  $I_{ta}$  e  $I_{tl}$  son la indicación de la balanza en aire y sumergida en agua respectivamente.

El método C consta de realizar al menos tres series de medición, pesando un recipiente con agua, y luego pesando el mismo con la masa sumergida y sostenida por un soporte. La expresión de cálculo es la siguiente:

$$\rho_t = \rho_a + (\rho_l - \rho_a) \cdot \frac{I_{ta}}{I_{ta} - I_{tl}}$$

Ecuación 2-7

Siendo las variables las mismas que en el caso anterior. Con esta metodología, pueden obtenerse incertidumbres menores a  $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . En este caso, las incertidumbres que se obtienen en la medición de la fuerza son muy bajas, debido al factor de sensibilidad ( $\rho_a/\rho_m$ ) que se utiliza.

Cabe señalar que la densidad de un material varía con la temperatura. En el caso de un acero inoxidable, un cambio en la temperatura de  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  tiene como consecuencia una diferencia de aproximadamente  $0,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , siendo este valor despreciable.



## 2.1.2. Magnitudes de influencia

Aquí se presentan las magnitudes de influencia que pueden llegar a afectar significativamente la incertidumbre de medición. La mayoría de las mismas tienen un carácter aleatorio o una sistematicidad difícil de determinar, mientras que otras por su sistematicidad son corregibles. Asimismo, estas magnitudes pueden ser estimadas e incluidas en el balance de incertidumbres, aunque esta no es una práctica frecuente debido a que generalmente la incidencia resulta despreciable.

### 2.1.2.1 Fuerzas laterales ( $F_x$ y $F_y$ ), momentos flectores ( $M_x$ , $M_y$ ) y momento torsional ( $M_z$ ).

Cuando el vector fuerza aplicado no pasa por el eje del transductor de fuerza, se generan en el mismo estados de tensiones parásitas, que cambian el estado de tensión original en el cual debería trabajar el transductor de fuerza. Estas tensiones se generan debido a fuerzas laterales, momentos flectores, así como el momento torsional que termina siendo aplicado al mismo por esta falta de alineación. Un vector fuerza paralelo al eje del transductor, o sea una excentricidad en el mismo, genera momentos flectores, mientras que un vector fuerza aplicado en algún punto del eje, pero no alineado con el mismo, genera fuerzas laterales por la descomposición del vector fuerza en longitudinal y transversal. El momento torsional se genera por un par torsional aplicado al mismo o por una componente del vector fuerza que genera este momento torsional y fuerzas laterales.

Dependiendo de la geometría del transductor y la instrumentación interna del mismo, cada uno de estos fenómenos tendrá una mayor o menor incidencia sobre la incertidumbre de medición. Los efectos relacionados al transductor de fuerza se presentan en la sección 2.2.1.4.

Para medir estas fuerzas y momentos, se utiliza un **dinamómetro de seis componentes**. El mismo es un sistema compuesto por seis transductores dispuestos de tal manera que por un análisis matemático matricial pueden determinarse las seis variables, o sea, la fuerza vertical  $F_z$ , dos fuerzas horizontales y perpendiculares entre sí ( $F_x$  y  $F_y$ ), dos momentos flectores ( $M_x$  y  $M_y$ ), y el momento torsional ( $M_z$ ). Los mismos corresponden a los grados de libertad de un cuerpo rígido en el espacio. Actualmente se cuenta con dinamómetros que miden todas estas magnitudes en un solo cuerpo de deformación, los mismos son más compactos, presentan la ventaja de no depender del meticuloso ensamblaje que requiere un sistema de transductores individuales, ni los rozamientos que aparecen en sus articulaciones. Así todo, los estados de tensiones que aparecen en el transductor “monocuerpo” son bastantes complejos de analizar.

Otra metodología es la utilización de **sistemas build-up**, con los cuales pueden medirse las fuerzas en los 3 ejes, y a través de la utilización de los principios de la estabilidad y la resistencia de los materiales pueden determinarse las mismas. En este caso varios de los trabajos publicados apuntan a la oscilación de las pesas de la máquina, lo que determina su efecto dinámico.



Otra opción para estimar los efectos consecuencia de estas fuerzas y momentos parásitos, es el **uso de transductores de referencia** para evidenciar cualitativamente<sup>15</sup> la excentricidad de la máquina. La misma consiste en medir con uno o varios transductores un único escalón de carga a la vez, pero en 8 posiciones distintas (girando el transductor cada 45°). Con ello se grafica en forma radial la diferencia entre el valor medido en cada posición y el valor medio.

Para finalizar, hay otra metodología que consiste en **medir la nivelación del marco de carga** utilizando niveles de alta exactitud (mejor a 0,1 mm/m), y una articulación de bajo rozamiento.

Puede decirse que definiendo la magnitud según se presentó en 2.1.1 y utilizando algunos de estos sistemas de evaluación, puede tenerse casi asegurado el éxito en la obtención de una CMC adecuada. Es por ello que este tema se profundiza en 2.1.3.

#### 2.1.2.2 *Atracción electrostática y magnética entre las pesas*

En la mayoría de los casos las pesas poseen grandes superficies y se encuentran separadas por una distancia relativamente pequeña. En el caso de las **cargas electrostáticas**, estas están relacionadas con la diferencia de potencial entre dos pesas continuas, una que se encuentra sostenida por el marco de carga, y otra que se encuentra descansando sobre la estructura de la máquina. En el caso de la máquina de 110 kN del INTI, la diferencia de potencial medida es inferior a 1 V, por lo cual es despreciable su efecto. En el caso de la máquina de 1,2 MN del NPL, la misma posee una diferencia de potencial de 15 V y en la referencia [4] sus autores concluyen que el efecto es despreciable.

Desde el punto de vista de la **atracción magnética** entre las pesas, el NPL en el mismo estudio, determinó que la permeabilidad magnética relativa no excede de 1,03. Cabe señalar que las pesas fueron fabricadas en acero inoxidable austenítico, el cual fue laminado en caliente prácticamente hasta su geometría final, esto lo hicieron, debido a que la deformación plástica por debajo de la temperatura A3<sup>16</sup>, tiende a incrementar dicha permeabilidad. La terminación final fue realizada por mecanizado, y luego se midió la permeabilidad relativa, obteniéndose dicho valor. Asimismo, indican que sin un estudio completo de las propiedades magnéticas no es posible determinar la magnitud de las fuerzas magnéticas asociadas con los niveles de permeabilidad, sin embargo, no observaron cambios en la indicación de los transductores de fuerza con el cambio en la distancia entre las mismas.

---

<sup>15</sup> Con esta metodología sólo puede evidenciarse cualitativamente el fenómeno de excentricidad, debido a que los efectos sobre el transductor bajo ensayo dependerán de la sensibilidad del mismo a este factor. Actualmente no se cuenta con sistemas que puedan cuantificar este fenómeno, por ello se utilizan dinamómetros de seis componentes.

<sup>16</sup> Es la curva de temperatura por encima de la cual la estructura cristalina del acero pasa de Fe  $\alpha$  a Fe  $\gamma$ , este último no tiene propiedades magnéticas. Esta temperatura en acero de bajo contenido de carbono como es el caso de los aceros inoxidables, en general está comprendida entre 700 °C y 910 °C. Los procesos de laminación en caliente se realizan en temperaturas del orden de los 1200 °C, por lo cual la deformación plástica a esa temperatura no afecta la permeabilidad magnética.



### 2.1.2.3 Atracción gravitatoria entre las pesas

En varias investigaciones llevadas a cabo, como la mencionada del NPL [4] o la del NIST [10], no se menciona este fenómeno como una fuente de incertidumbre. El INRiM en su investigación denominada *Influence of the Mutual Gravitational Attraction in a Set of Masses of Deadweight Machines* [11] utiliza como modelo matemático la ley de gravitación universal, así como una simulación por el método de los elementos finitos (FEM), reemplazando en este último el efecto de las fuerzas gravitatorias por el generado al utilizar fuerzas electrostáticas. En este estudio obtuvieron con la ley de gravitación universal un valor de  $0,66 \cdot 10^{-6}$  en su máquina de 100 kN (de funcionamiento secuencial) y de  $0,18 \cdot 10^{-6}$  en su máquina de 1 MN (de funcionamiento binario). Utilizando el modelo FEM obtuvieron  $0,04 \cdot 10^{-6}$  y  $0,09 \cdot 10^{-6}$  respectivamente. Con esto se concluye que la influencia de este fenómeno es despreciable.

En 3.1.2.3 se presenta el estudio realizado para las pesas de la máquina de 110 kN del INTI.

### 2.1.2.4 Flujo de aire. Fuerza de arrastre y principio de Bernoulli.

Aquí hay que estudiar el efecto que el aire en movimiento dentro de la sala de medición genera sobre las pesas, incluyendo el marco de carga de la máquina de pesos suspendidos. Este efecto fue estudiado desde dos puntos de vista distintos, los mismos se detallan a continuación:

El primer punto de vista es debido a la **fuerza de arrastre**<sup>17</sup> que se genera por el intercambio de cantidad de movimiento al tener el aire que rodear a las pesas. Este fenómeno fue estudiado por el INRiM, y presenta los resultados en *Influence of Aerodynamic Effects in Deadweight Machines* [12]. En su caso el flujo de aire es eminentemente vertical, en contraste al caso del laboratorio de fuerza del INTI que es prácticamente horizontal. Asimismo, aplican la ecuación de arrastre, que se presenta a continuación. Utilizando los valores medidos y/o calculados para la misma se tiene:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot V^2 \cdot A \cdot C_D = \frac{1}{2} \cdot 1,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot 1,13 \text{m}^2 \cdot 1,2 = 7,93 \cdot 10^{-3} \text{N}$$

Ecuación 2-8

Donde  $\rho_a$  es la densidad del aire,  $V$  es la velocidad del mismo,  $A$  es el área transversal expuesta al aire frontal y  $C_D$  es el coeficiente de arrastre<sup>18</sup>.

En la expresión se utilizó una velocidad de aire de 0,10 m/s, aunque las mediciones con anemómetros de hilo caliente indicaron un valor medio de 0,076 m/s. En el mismo no se indica el valor de fuerza actuando sobre el marco de carga, pero indica un efecto cuyo valor es ligeramente menor a  $1 \cdot 10^{-6}$ .

<sup>17</sup> Fuerza generada sobre un cuerpo por acción de una velocidad relativa entre el cuerpo y un fluido. La misma se da en la dirección de la velocidad relativa entre ambos.

<sup>18</sup> Los autores utilizaron un valor de 1,2 que es el correspondiente a una placa plana, lo cual en opinión del autor de la presente investigación es adecuado.



El segundo punto de vista, es aplicando la **ecuación de Bernoulli**<sup>19</sup>, para un flujo eminentemente horizontal. Debido al aumento de la energía cinética que experimenta el fluido al pasar entre dos pesas, se reduce la presión, con lo cual se genera una fuerza vertical que modifica el valor de fuerza de la máquina. El NPL realizó un estudio teórico al respecto, que presenta en la sección 7.3.6.1 de la referencia [4], partiendo de una velocidad del aire horizontal en el ambiente de 0,10 m/s en y por aplicación de la ecuación de Bernoulli, llega a una velocidad entre pesas de 0,40 m/s. Este aumento de velocidad es compensado por una disminución de la presión de 0,085 Pa, el cual aplicado a un área de 2,60 m<sup>2</sup>, que es el área expuesta de la pesa, se obtiene una carga vertical de 0,22 N, que equivale a  $22 \cdot 10^{-6}$ . Este estudio lo realizaron sobre su máquina de 1,2 MN y aplicada entre 2 pesas de 10 kN. Como esta fuerza es muy sensible a la distancia entre pesas, analizaron que sucedía si se variaba el huelgo entre ellas, y al hacerlo no se evidenció cambio en la indicación en los transductores bajo ensayo. Igualmente terminan adoptando un valor de  $2 \cdot 10^{-6}$  como un valor más adecuado.

Cabe aclarar que la mayoría de las máquinas de pesos suspendidos cuentan con un cerramiento, típicamente de acrílico translúcido, que reduce prácticamente a cero la velocidad del aire entre las pesas, al tiempo que reducen el polvo depositado en las mismas, aumenta la estabilidad térmica, etc.

En la sección 3.1.2.4 se presentan los cálculos realizados sobre la máquina de 110 kN del INTI.

#### 2.1.2.5 Orientación geográfica y magnética

Desde el punto de vista de la **orientación geográfica**, el efecto de Coriolis como la fuerza centrípeta, ambas generadas por la rotación de la tierra, al ser aceleraciones se combinan vectorialmente con el vector gravedad, por lo cual están contempladas dentro de la medición de la misma. Lo mismo sucede para la posición de los cuerpos celestes cercanos (sol y luna).

Desde el punto de vista del **campo magnético terrestre**, el acero inoxidable austenítico y las aleaciones de aluminio no son magnéticas, tanto desde el punto de vista de la remanencia magnética, como de la permeabilidad magnética, por lo cual no interactúan de modo significativo con los campos magnéticos, ni siquiera con campos magnéticos de grandes intensidades, como los generados por motores de inducción cercanos.

No hay disponibles estudios respecto a la orientación magnética en el caso de pesas de acero al carbono, u otros materiales magnetizables. Este tema en particular se analiza en la sección 3.1.2.5.

---

<sup>19</sup> Basada en la conservación de la energía mecánica o del primer principio de la termodinámica.



## 2.1.3. Dinamómetro de seis componentes y otros sistemas de evaluación

### 2.1.3.1 Dinamómetro de seis componentes

Hay muchos trabajos de investigación sobre este tema, la mayoría llevados a adelante por el INRIM. Asimismo, hay varios institutos que investigaron y están investigando la construcción y caracterización de sistemas de seis componentes, o transductores para medir el “vector fuerza”, pero se orientan más a la tecnología del transductor y su calibración en forma absoluta que al fenómeno que sucede en la máquina de pesos suspendidos a analizar. Se toma como referencia el trabajo *Evaluation of the Main Metrological Characteristics of the CENAM 150 kN Deadweight Force Standard Machine by Using the INRIM 100 kN Six-component Dynamometer* [13], cuya introducción dice:

*Las fuentes principales de los efectos parásitos son causadas por componentes indeseadas (fuerzas laterales y momentos) generados por asimetrías en la estructura de la máquina, deformaciones asimétricas de la máquina cargada, falla en el posicionamiento del transductor en la máquina, y la interacción máquina-transductor. Un progreso significativo puede ser realizado respecto a los patrones de fuerza, si estas componentes son medidas como una función de varios parámetros, por ejemplo, la nivelación de la carga, los sistemas de transmisión de carga, y el tipo de interfase máquina-dinamómetro.*

*Sólo en este modo y por medio de la reducción de los defectos y llevando a los efectos parásitos bajo control, la performance de las máquinas primarias de fuerza puede ser substancialmente mejoradas.*

A continuación, se presenta un diagrama esquemático del dinamómetro de 6 coordenadas del INRIM.

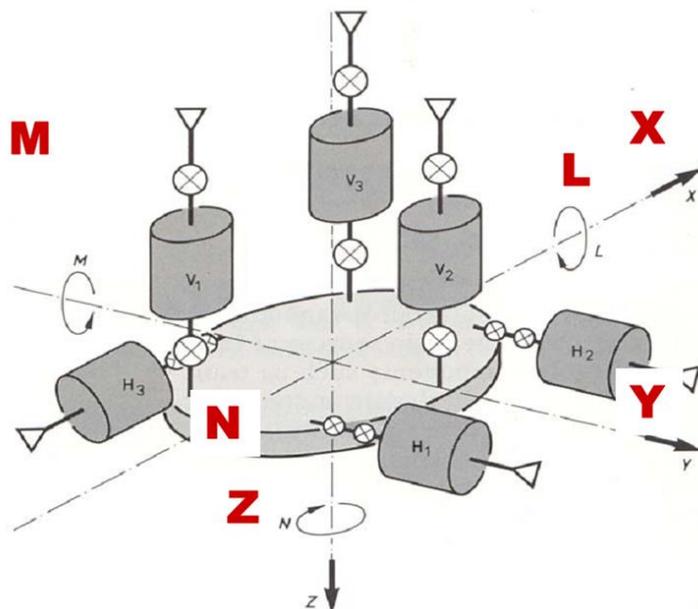


Ilustración 2. Diagrama esquemático del dinamómetro de seis componentes de 100 kN del INRIM.

El mismo posee las siguientes especificaciones técnicas:

- Carga axial: 100 kN ( $U = 3,0 \cdot 10^{-5}$ ;  $k=2$ )
- Componentes laterales  $F_x$  y  $F_y$ : 2,0 kN ( $U = 1,0 \cdot 10^{-3}$ ;  $k=2$ )



- Momentos flectores  $F_L$  y  $F_M$ : 0,5 kN·m ( $U = 1,5 \cdot 10^{-3}$ ;  $k=2$ )
- Par torsional  $F_N$ : 0,2 kN·m ( $U = 1,5 \cdot 10^{-3}$ ;  $k=2$ )
- Estabilidad temporal en la carga axial en 3 años mejor a  $2 \cdot 10^{-5}$ .
- Efecto de la temperatura del "span": 0,02% FS para 10 K

Asimismo, la configuración elegida presenta las siguientes ventajas:

- Alta sensibilidad a las componentes transversales (detecta pequeños ángulos de inclinación) y de pares torsionales.
- Baja interacción entre la componente axial y las componentes transversales.
- Baja dependencia en la interfase máquina-dinamómetro y en consecuencia en las componentes parásitas durante la fase de transmisión de carga.
- Baja rigidez<sup>20</sup>, con lo cual es posible colocar un sistema de protección contra sobrecargas y obtener una mayor sensibilidad del equipo a valores de cargas laterales pequeñas.

La medición en tiempo real y de cada señal en forma independiente, hace que pueda evaluarse los fenómenos dinámicos, tales como los transitorios que ocurren durante la aplicación de carga, como por ejemplo la libre oscilación del sistema bajo carga constante. Esta medición en tiempo real permite detectar anomalías que de otro modo serían muy difíciles de observar.

La interfase máquina-dinamómetro se realiza a través de una articulación lograda por medio de una esfera de 58,2 mm de diámetro cuya dureza en la escala C del durómetro Rockwell es de 60. El mismo tiene un espaciador plano blando. Para obtener una buena reproducibilidad, el dinamómetro se coloca usando una placa de centrado para referenciarlo axialmente.

Previo a posicionar el dinamómetro se verifica la horizontalidad de la placa base de la máquina. En este caso se tuvo una horizontalidad mejor a 0,04 mm/m en varias posiciones del marco de trabajo.

Las condiciones de medición son rigurosas y para reducir el efecto de creep y la recuperación del mismo en la descarga, se realiza un esquema de tiempos que debe seguirse durante todas las mediciones. Obviamente requiere de condiciones ambientales estables y de los tiempos de *estabilización térmica*<sup>21</sup> y *estabilización eléctrica*<sup>22</sup> adecuada.

---

<sup>20</sup> El equipo cuenta con transductores de fuerza de baja capacidad para realizar la medición de cargas laterales, con ello logra mayor sensibilidad. Al ser el sistema bastante flexible lateralmente, permite colocar topes de seguridad que protegen a dichos transductores en casos de sobrecarga.

<sup>21</sup> Es el tiempo necesario para que el instrumento adquiera la temperatura del laboratorio, sobre todo la de las superficies donde este apoya. Esto se hace para que la temperatura del instrumento sea la del laboratorio y para evitar los gradientes térmicos las cuales que generan tensiones parásitas internas.

<sup>22</sup> Es el tiempo necesario para que la electrónica adquiera la temperatura de trabajo y con ello la estabilidad. Asimismo, la pequeña corriente que circula por los "strain gage" genera un pequeño efecto térmico en su vecindad que requiere tiempo para estabilizarse.



Luego el esquema de medición puede seguir una metodología similar a la ISO 376. En este caso se hicieron los escalones de carga de 0, 20 kN, 40 kN, 60 kN y 80 kN, en las siguientes posiciones: 0°, 180°, 90°, 270°.

Lo importante del uso de este equipo, es que pueden realizarse cálculos, basados en ecuaciones demostradas a través de las teorías de la estabilidad. Las mismas son las siguientes:

$$\frac{\Delta F_z}{F_z} = \frac{F_x^2 + F_y^2}{2 \cdot F_z^2}$$

$$\Delta x = \frac{M_x}{F_z} \quad \Delta y = \frac{M_y}{F_z}$$

$$\theta_x = \frac{F_x}{F_z} \quad \theta_y = \frac{F_y}{F_z}$$

Ecuación 2-9

Ecuación 2-10

Ecuación 2-11

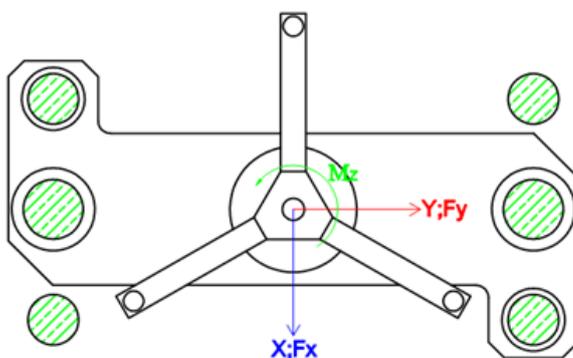
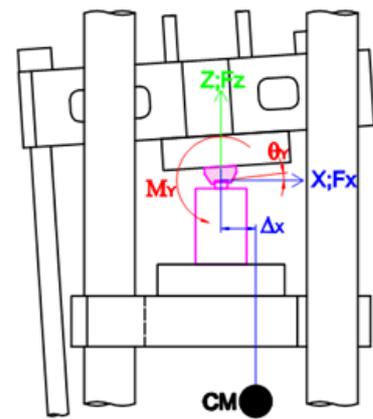
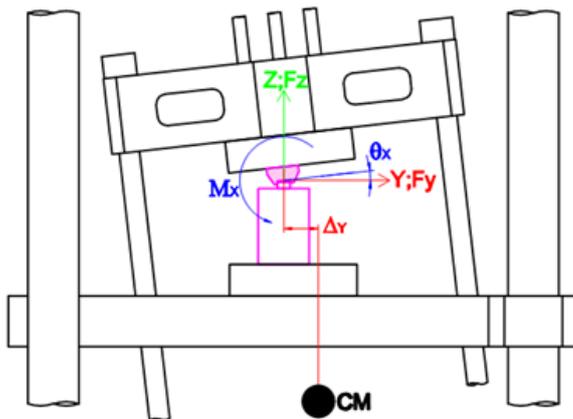


Ilustración 3. Esquema de variables utilizadas y su convención de signos.



La **Ecuación 2-9**, es la que indica la corrección a realizar en el valor de la fuerza vertical, en correspondencia con las fuerzas laterales. Puede observarse que con valores de fuerzas laterales menores al 0,1% de la fuerza vertical, la corrección es menor a  $1 \cdot 10^{-6}$ , por lo tanto, despreciable.

En el caso de la **Ecuación 2-10**, la misma determina la excentricidad en cada uno de los ejes ortogonales que se generan en el plano horizontal. Esta ecuación se analiza en la sección 3.1.3.

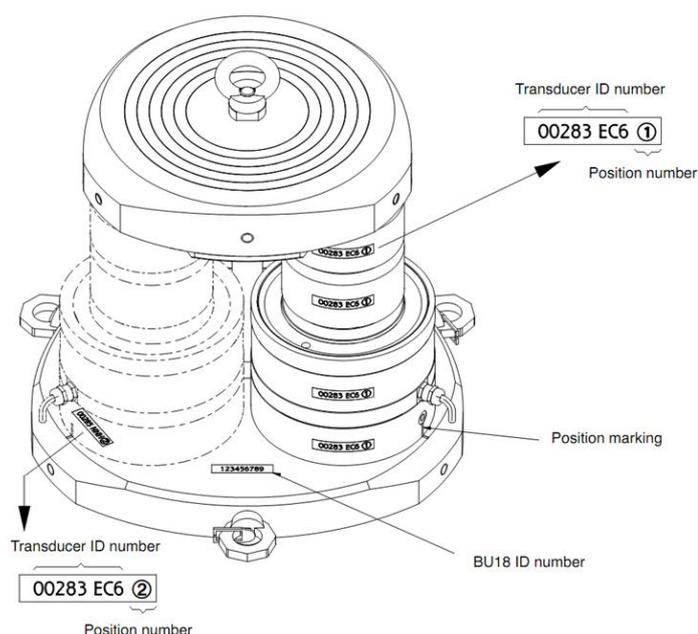
En tanto que de la **Ecuación 2-11** se puede obtener el ángulo de inclinación del vector fuerza, respecto a las fuerzas laterales y a la fuerza vertical. Si en esta ecuación se reemplaza el valor de  $F_x = 0,001 \cdot F_z$ , se obtiene que la inclinación debe ser menor a 0,001, o lo que es lo mismo debe ser menor a 1 mm/m para estar por debajo de  $1 \cdot 10^{-6}$ . Lo mismo puede plantearse en el caso de  $F_y$ .

De esta manera puede demostrarse la equivalencia entre la inclinación del marco de carga y las fuerzas laterales que actúan sobre el transductor bajo ensayo. Esta conclusión es muy importante, porque indica que, si la inclinación del marco de carga varía menos del valor indicado, se estaría en condiciones de asegurar que las fuerzas laterales son despreciables. La medición de la inclinación es relativamente más sencilla y económica que la medición con sistemas de seis componentes.

#### 2.1.3.2 Utilización de sistemas build-up

Como se mencionó, otra metodología planteada es la utilización de sistemas build-up, en este caso compuesto por 3 transductores de idéntica geometría y ubicados simétricamente respecto a un eje vertical. Los mismos también se colocan con su eje en posición vertical.

A continuación, se presenta un esquema del sistema build-up de 3MN de la firma HBM.



**Ilustración 4. Sistema build-up de 3 MN, compuesto por 3 transductores HBM, modelo C18 de 1 MN.**



Según el artículo *Evaluation of Force Standard Machines using Build-up System* [14], este sistema puede ser utilizado con dos motivos: La medición de las fuerzas laterales además de la fuerza vertical (componentes estáticas), y la oscilación de la máquina (componentes dinámicas).

La metodología de medición es similar al dinamómetro de seis componentes, o sea se requiere medir en varios escalones de carga y en varias posiciones angulares.

En la referencia [14] se plantean varios interrogantes como ser:

- La comparación con sistema de seis componentes.
- Los efectos de la estructura del sistema build-up, como ser el radio de curvatura y la dureza del botón de carga, la altura del sistema build-up, etc. También buscar la metodología para medir momentos parásitos.

En el trabajo *A Proposal for an Evaluation Method of Force Standard Machines by Using Build-up System* [15], se plantean las ecuaciones necesarias para calcular las fuerzas laterales en función de las indicaciones obtenidas en los transductores que conforman el conjunto. Esto puede deducirse por la aplicación de las ecuaciones de la estática.

#### 2.1.3.3 Utilización de niveles de alta exactitud

Por aplicación de la **Ecuación 2-10** pueden estimarse las fuerzas laterales en ambos ejes (X e Y), por medio de la medición del ángulo del marco de carga. Estos valores son estimativos, debido al rozamiento que se genera en la superficie de contacto de la articulación utilizada. Si la articulación fuese perfecta, podrían considerarse los momentos flectores despreciables y la inclinación del marco de carga indicaría las fuerzas laterales. Reduciendo la inclinación del marco de carga a valores inferiores a 1 mm/m, las fuerzas serían menores a  $1 \cdot 10^{-3}$ , y con ello por aplicación de la **Ecuación 2-9**, se obtendría un cambio en la fuerza vertical ( $F_z$ ) menor a  $1 \cdot 10^{-6}$ .

Esta metodología es aplicada periódicamente en la máquina de 110 kN del INTI para verificar que las fuerzas y momentos parásitos están dentro de límites tolerables.

#### 2.1.3.4 Utilización de transductores de referencia

Aquí la idea es el uso de transductores de referencia disponibles en el laboratorio. Se requiere el uso de más de un transductor, con distintas capacidades para tener buena sensibilidad en las cargas bajas de la máquina. Asimismo, transductores de la misma capacidad, pero de distinta geometría son útiles debido a la distinta interacción máquina-transductor que se puede obtener.

Cabe destacar que una máquina con buena reproducibilidad casi con seguridad no posee fuerzas ni momentos parásitos significativos.



Esta metodología fue transmitida oralmente por el Ing. Günther Haucke, perteneciente al PTB, durante la evaluación por pares desarrollada en el laboratorio de fuerza del INTI, efectuada del 31 de julio al 6 de agosto de 2013. En 3.1.3.4 se presentan las mediciones realizadas con posterioridad a dicha actividad.

## **2.2. PATRONES DE TRANSFERENCIA**

Dentro de esta sección se da una introducción a los sistemas de medición de fuerza y el estado del arte de los mismos. Un **sistema de medición de fuerza** está compuesto por un transductor de fuerza y su instrumental asociado, dentro de este último se puede mencionar al amplificador o indicador que es un único instrumento, o un amplificador, conversores analógico-digitales, sistemas de adquisición de datos y software correspondiente. Incluso los cables de conexión entre transductor y amplificador son parte del sistema de medición, o sea la instrumentación va desde el cable de conexión hasta llegar al resultado de medición que puede observar el usuario.

En modo estricto, un transductor es un dispositivo que recibe un estímulo físico y lo cambia a una magnitud física medible a través de una relación conocida. En términos prácticos, un transductor de fuerza es una cadena de varios transductores. Por ejemplo la fuerza puede actuar sobre una barra cilíndrica que es traccionada con lo cual se estira, el cambio en longitud altera la resistencia eléctrica de las celdas de esfuerzo solidarias a la superficie de la barra, y la instrumentación mide este cambio en resistencia a través del desbalanceo de un *punto de Wheatstone*<sup>23</sup>.

El transductor utilizado como referencia y/o transferencia, es al momento y por excelencia, el formado por un elemento metálico elástico con celdas de esfuerzo metálicas adheridas, cuya vinculación al instrumental es una *conexión a 6 hilos*<sup>24</sup>, y posee una salida analógica. El alcance de la presente investigación está limitado a este tipo de instrumento.

Si bien el transductor de fuerza suele estar compuesto por un conjunto de piezas solidarias y no desmontables por el usuario, hay algunos accesorios que pueden asociarse como formando parte del mismo, dentro de estos es necesario incluir a los dispositivos de carga.

Cabe destacar que en muchos casos se requieren varios dispositivos para el montaje del transductor, sobre todo cuando es solicitado a tracción, y más aún cuando se los utiliza en máquinas universales

---

<sup>23</sup> Sistema de conexión donde las resistencias y/o inductancias se colocan en cuatro ramas formando un rombo, por dos vértices opuestos se lo alimenta con una tensión continua o alterna, y en los otros vértices opuestos se mide la señal del desbalanceo del mismo. Este sistema es muy sensible a pequeños cambios en la resistencia.

<sup>24</sup> Conexión eléctrica asociada al puente de Wheatstone donde dos cables se utilizan para alimentar al puente, dos cables más para medir la tensión en los vértices del mismo y otros dos cables para medir la señal de salida en mV.



de ensayo. En estos casos se puede definir como parte del transductor a los accesorios que son necesarios incluir en la mayoría de las instancias de uso del mismo, o a todos aquellos dispositivos y/o accesorios necesarios que si fuesen intercambiados por otros podrían contribuir a la fuente de incertidumbre. El tema de dispositivos de carga, por su alta incidencia en la exactitud de medición, es planteado en detalle en las secciones 2.2.2 y 3.2.2.

En cuanto al **instrumental asociado**, sólo se describirá a los amplificadores que toman la señal analógica del transductor por medio de una conexión de 6 hilos, la amplifican, la convierten en una señal digital, y la entregan o bien en un display o por medio de un sistema de adquisición de datos a un computador personal.

La indicación del valor de fuerza puede ser realizada en unidades de fuerza, como ser N, kN, o en unidades eléctricas como el mV/V, siendo este último caso el utilizado en el presente informe.

### **2.2.1. Características metrológicas de los transductores de fuerza de alta exactitud**

En sistemas de medición de fuerza es más adecuado hablar de “performance” del sistema que de exactitud, debido a que en función de la metodología de medición, los tiempos involucrados y el equipamiento utilizado se pueden obtener valores de exactitud muy distintos, debido a la distinta incidencia de los factores que afectan la performance que posee el transductor. Un ejemplo es la deriva a largo plazo que afecta significativamente a un transductor utilizado como *referencia*<sup>25</sup> debido a que el mismo trabaja durante un largo período de tiempo, mientras que no es tan significativa en un transductor utilizado como *transferencia*<sup>26</sup> cuyo valor de medición se transfiere en un tiempo corto.

Es necesario entonces, estudiar en cada caso la combinación de estos factores, en cuyo caso es de aplicación la guía GUM [1]. Asimismo en varios casos los análisis ya fueron realizados y se encuentran reconocidos internacionalmente, estos casos son los que plantea la EURAMET cg-4 [2], y la ISO 376:11 [3], en este último caso para calibración de transductores de fuerza que luego se utilizarán para calibrar máquinas para ensayos.

A continuación, se presentan los datos suministrados por fabricantes que producen sistemas de medición de fuerza de alta exactitud. Se eligieron estos modelos de transductores, amplificadores y unidades de calibración debido a que son los disponibles en el laboratorio de fuerza del INTI, y además son normalmente utilizados en trabajos de intercomparación y trazabilidad de alta exactitud a nivel internacional.

---

<sup>25</sup> Un transductor de fuerza utilizado como referencia es calibrado, y luego utilizado en una máquina de calibración por comparación, en la cual puede trabajar como “patrón” hasta 26 meses, según requisitos de la ISO 376.

<sup>26</sup> Un transductor de fuerza utilizado como transferencia es calibrado e inmediatamente utilizado para transferir el valor de fuerza a otro sistema de medición.

**Tabla 2. Características metroológicas de transductores de fuerza de alta exactitud**

Descripción	Símbolo	HBM	HBM	GTM
		TOP-Z30A (2 a 10 kN)	TOP-Z4A (20 a 500 kN)	VN (10 a 500 kN)
		$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Repetibilidad	.b'	20	30	20
Reproducibilidad en compresión	.b	50	80	50
Reproducibilidad en tracción	.b	100	160	---
Temperatura en cero (1 K)	TKc	10	10	10
Temperatura en <i>span</i> (1 K)	TKo	10	15	10
Histéresis	.v	300	300	600
Creep (20 min)	.c	100	100	80
Fuerzas transversales ( $0,1 \cdot F_{\text{nominal}}$ )	dQ	1000	300	---
Excentricidad (1 mm)	dE	50	50	(a)
Interpolación	.fc	20	20	20
Retorno a cero	.fo	40	40	80
Mejor incertidumbre esperada <sup>(b)</sup> utilizando una máquina de $2 \cdot 10^{-5}$		35 a 50	35 a 50	35 a 50

(a) Considera una excentricidad permitida de 5mm sin plantear sensibilidad.

(b) Opinión del autor considerando una CMC en la FSM de  $2 \cdot 10^{-5}$ , operando con todas las reglas del arte. El cálculo puede realizarse con los pasos 1 y 2 del numeral 5.2 de la EURAMET cg-4.

**Tabla 3. Características metroológicas de amplificador digital y unidades de calibración de puentes**

Descripción	Símbolo	HBM	HBM	HBM
		BN100A (calibrador)	K3608 (calibrador)	DMP40 (a) (amplificador)
		$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Falta de linealidad	.fo			5
Temperatura en cero (1 K)	TKc			0,2
Temperatura en <i>span</i> (1 K)	TKo	--	2,5	0,5
Deriva a corto plazo (5 min) <sup>(b)</sup>				1
Deriva a largo plazo (24 h) <sup>(b)</sup>				2
Error de calibración (a 2 mV/V)		5	25	
Error en cada escalón		3	25	
Cambio señal al cambiar polaridad		4	--	
Incetidumbre total estimada <sup>(c)</sup>		10	20	22 <sup>(d)</sup> 12 <sup>(e)</sup>

(a) Se presentan los datos del DMP41, el cual se considera equivalente.

(b) Luego de estar energizado al menos 2 h.

(c) HBM K3608 y HBM DMP40 de resultados de calibración, BN100A estimado por el autor.

(d) Utilizando el K3608 (equipo disponible en el laboratorio).

(e) Utilizando el BN100A (equipo utilizado en intercomparaciones).



Los valores presentados en las tablas anteriores son orientativos. Cada transductor en particular presentará por lo general mejores características en caso que las mediciones sean llevadas a cabo con todas las reglas del arte.

A continuación, se describen cada uno de los factores que afectarán en la incertidumbre final de estos sistemas de medición.

### 2.2.1.1 Repetibilidad y reproducibilidad

La **repetibilidad** es la capacidad que posee el sistema de medición de medir consistentemente. En términos generales se define como el grado de acuerdo de la indicación de un sistema de medición para aplicaciones repetidas de un mismo valor de fuerza. En varias magnitudes la repetibilidad es cuantificada a través del desvío estándar, por lo cual se consideran una distribución de probabilidad normal, en cambio, en metrología de fuerza al realizarse sólo dos determinaciones en las mismas condiciones, la misma se cuantifica a través de la amplitud de la indicación obtenida, siendo aplicable la distribución de probabilidad rectangular.

Para estar dentro del concepto de repetibilidad, las mediciones deben ser realizadas por el mismo operador, el mismo equipo de medición, en la misma ocasión, sin perturbación mecánica o eléctrica, y en condiciones de medición lo más constante posible de temperatura, alineación de la carga y del intervalo de tiempo entre lecturas.

Si bien el fabricante indica un valor de repetibilidad, el mismo debe ser tomado a modo orientativo, debido a que los resultados no sólo dependen del transductor en sí, sino también de la metodología de medición, la estabilidad de las condiciones ambientales, y de las características metrológicas de la máquina de fuerza utilizada.

En contraste con la repetibilidad, la **reproducibilidad** se define como el grado de concordancia entre los resultados de mediciones de la misma fuerza llevadas a cabo bajo condiciones modificadas de medición. Es necesario entonces indicar cuál fue la condición que se cambió, en metrología de fuerza, la reproducibilidad supone la rotación del transductor sobre su propio eje, manteniendo el resto de las condiciones lo más parejas posibles. De aquí se desprende que, si la metodología es la adecuada, y si la máquina de pesos suspendidos es “ideal”, la reproducibilidad tiende a la repetibilidad.

En metrología de fuerza la reproducibilidad es cuantificada a través del intervalo de valores obtenidos, y su contribución a la incertidumbre es a través de una distribución normal.



### 2.2.1.2 Temperatura, humedad y presión atmosférica

El cambio de la **temperatura** afecta tanto a la indicación en cero, como en la indicación bajo carga. La sensibilidad del instrumento (transductor e indicador), tanto en la señal de cero, como en el *span* son informados por el fabricante. En el caso del valor de cero, puede ser corregido para mediciones en las cuales la variación de temperatura sea despreciable, debido a que el cero se mide constantemente en cada *serie de medición*<sup>27</sup>. En el caso de la sensibilidad en el *span*, se debe incluir como una fuente más de incertidumbre.

El valor indicado por el fabricante es orientativo y no posee signo, por lo cual es un factor a sumar aritméticamente al balance de incertidumbre. En el caso que se determine experimentalmente el coeficiente de temperatura en el *span*, este puede ser corregido, introduciendo un valor menor y en forma cuadrática en el balance de incertidumbre.

La sensibilidad a la temperatura puede ser determinada por la medición a capacidad máxima del transductor en varios puntos de temperatura, estabilizada el tiempo suficiente, por medio de la medición de la señal de cero y de carga máxima a través de al menos ocho series. Las últimas tres a cuatro series son las utilizadas para tomar el valor medio, tomando las primeras como precargas.

En la referencia [4] se presenta la siguiente frase: *“Un sistema de medición de fuerza podría necesitar mantener la temperatura constante, o generar las condiciones ambientales con la suficiente antelación para lograr una alta exactitud de medición cuando sea requerido. En muchos casos los gradientes de temperatura dentro de la instalación de medición crean problemas aun cuando la temperatura media es estable”*.

Asimismo, en la misma referencia se indica que un transductor bien compensado puede tener una sensibilidad en el *span* tan baja como  $1 \cdot 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$ . También indica que una diferencia de temperatura de  $0,1^{\circ}\text{C}$  entre la celda de esfuerzo y el material del elemento elástico, puede generar una diferencia de  $3 \cdot 10^{-5}$ . Por ello es práctica habitual estabilizar térmicamente el transductor en la sala de medición durante la noche anterior a ensayar, en opinión del autor y de otros especialistas, se requiere dejar el instrumento montado en la máquina y en la posición de medición. En la sección 3.2.1.2 se presentan propuestas de identificación de este fenómeno y algunas metodologías de reducción. Con el mismo principio se requiere una estabilización eléctrica, debido a la pequeña disipación de calor de las celdas de esfuerzo al ser alimentadas eléctricamente, por ello la práctica habitual es dejar energizado al transductor como mínimo 1 h, e idealmente toda una noche.

---

<sup>27</sup> Es la compuesta por una secuencia que inicia y termina con carga cero, que pueden poseer escalones de medición ascendente y descendente, o sólo ascendente; pero en todo caso completan un ciclo.



En cuanto a la **humedad**, no hay valores de referencia dados por el fabricante, ni determinados experimentalmente. Sí es importante mencionar que humedades muy bajas pueden traer como consecuencia corrientes estáticas que afectan en mayor medida a los amplificadores digitales, que se manifiestan con una oscilación en la indicación. En el caso de altas humedades, estas propician la corrosión, siendo la misma muy crítica en los contactos eléctricos y en las juntas de soldadura de las conexiones, sobre todo las realizadas sobre las estampillas de las celdas de esfuerzo. Incluso puede haber corrosión del propio material del cuerpo del transductor, y/o afectar al comportamiento reológico del adhesivo que une la celda de esfuerzo con el transductor. Temperaturas de superficie fría respecto a la temperatura ambiente con alto grado de humedad, puede generar condensaciones dentro del cuerpo del transductor con el consiguiente aceleramiento de la corrosión.

En cuanto al valor de la **presión atmosférica**, tampoco hay valores de referencia. En el caso del transductor de fuerza modelo Z4A de la firma HBM, en el numeral 4.3 de la referencia [16] el fabricante indica que en el caso de los transductores de 20 kN y 50 kN un cambio en la presión atmosférica de 10 hPa puede traer un efecto en la señal de cero de 6 N.

### 2.2.1.3 Histéresis y creep

La **histéresis** se define como la diferencia entre el valor obtenido en cargas decrecientes y el obtenido en cargas crecientes, para el mismo valor de fuerza generado.

Es importante medir en el mismo valor de fuerza para reducir los efectos de la no linealidad del instrumento. Los valores máximos de histéresis se encuentran normalmente a la mitad de la capacidad máxima de ensayo. A grandes rasgos se observa que la amplitud de la histéresis es proporcional a la amplitud de la serie de medición.

El **creep** es definido comúnmente como el cambio en la indicación bajo carga constante y con el tiempo, luego de haber incrementado la carga de un valor a otro. Muchos fabricantes especifican el creep como el máximo cambio de indicación sobre un tiempo especificado, generalmente de 20 a 30 minutos, luego de incrementar la carga desde cero hasta la capacidad máxima. La recuperación del creep es el mismo fenómeno, pero cuando se descarga el instrumento. En ambos casos los resultados dependen de cuánto tiempo la carga fue aplicada con anterioridad al cambio de la misma.

Son varios los factores que determinan el comportamiento a creep de un transductor de fuerza, estando el estudio de los mismos fuera del alcance de la presente investigación. Para más información al respecto se sugiere ver la referencia [4].

Toda medición de histéresis siempre tendrá una parte de creep enmascarada, por lo tanto, es recomendable un estricto control de los tiempos en las series de medición. Tanto la histéresis como el



creep son fuentes de error sistemático, por lo cual se suman aritméticamente a la incertidumbre en caso de no corregirse, o pueden corregirse, agregando igualmente una contribución del fenómeno, pero sumado cuadráticamente. La corrección de estos valores sólo es posible si los mismos son consistentes.

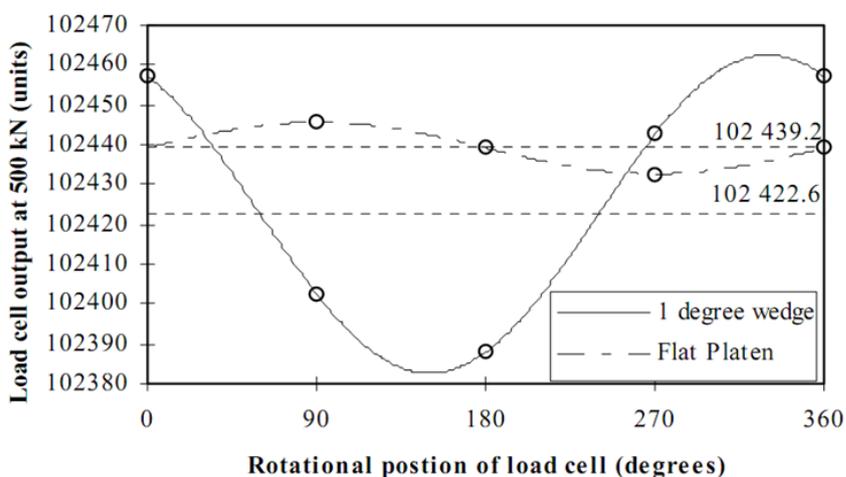
#### 2.2.1.4 Fuerzas transversales y momentos flectores

Los transductores de fuerza son diseñados de modo de ser insensibles, dentro de ciertos límites, a las cargas transversales y a los momentos flectores. Para que un transductor de fuerza sólo sea sensible a la fuerza aplicada sobre su eje de referencia, es importante asegurar la simetría en el mecanizado de los elementos elásticos y el posicionamiento de las celdas de esfuerzo. En la práctica las limitaciones vienen dadas por la exactitud de fabricación, por lo cual distintos individuos dentro de un mismo modelo de transductor de fuerza presentarán mayor o menor sensibilidad a este fenómeno, siendo no predecible su comportamiento, sí puede obtenerse una sensibilidad máxima en función de las tolerancias de fabricación y montaje.

Adicionalmente, las máquinas de pesos suspendidos aplican pequeñas fuerzas transversales y momentos flectores al transductor bajo ensayo. La misma puede poseer distorsión irregular del marco de carga y cierto grado de desbalanceo de las pesas con respecto al eje de carga asumido de la máquina. La articulación interpuesta entre transductor y máquina eliminaría los momentos flectores, pero debido a la fricción en los dispositivos de carga pequeños momentos siguen estando aplicados, la incidencia de la inclinación de la carga puede ser despreciable (la corrección por el coseno del ángulo), pero cargas laterales importantes pueden generarse, modificando el estado de tensiones en el propio elemento elástico.

Durante la calibración, estos fenómenos quedan medianamente cuantificados en la reproducibilidad obtenida debida a los giros que se realizan del transductor bajo ensayo.

Un estudio realizado por el NPL con un transductor de 500 kN en compresión y colocado en su máquina de pesos suspendidos de 500 kN, manteniendo una exactitud en el giro, o sea con desplazamientos laterales menores a 0,1 mm, muestra lo siguiente:



**Ilustración 5. Indicaciones en un transductor de 500kN medido en la DW-FSM de 500 kN del NPL.**

Respecto a la Ilustración 5, la línea continua corresponde a las mediciones realizadas con el uso de una articulación intermedia entre el transductor de fuerza y la máquina de pesos suspendidos y una placa plana en la base del mismo, en el caso de la línea punteada, se utilizaron placas planas tanto arriba como abajo del transductor de fuerza.

Si se asume que la sensibilidad del transductor a estos factores es lineal con la magnitud de las mismas y que estas tienen magnitud y dirección, y que son independientes a la posición de rotación del transductor, habrá una relación sinusoidal entre la indicación del transductor y su posición angular. La amplitud será determinada por la máxima sensibilidad del transductor en toda dirección para cargas laterales y momentos flectores y también para las magnitudes de estas que son aplicadas por la máquina. El valor medio de esta relación sinusoidal es teóricamente el valor que sería obtenido si no habría fuerzas laterales ni momentos flectores aplicados y sumados a la componente de fuerza principal. Esto se confirma con los resultados de la figura presentada, donde el valor medio obtenido para la condición con articulación es 0,016% menor que la obtenida para ambas placas planas. La diferencia obtenida por corrección del coseno de la fuerza principal es de 0,015%; esto finalmente demuestra que no hubo traslaciones significativas durante la rotación del transductor de fuerza, y que las fuerzas y momentos aplicados por la máquina son repetibles.

Como diferentes máquinas de pesos suspendidos aplicarán fuerzas y momentos que difieren en magnitud y dirección, es esperable que los resultados de medición del mismo transductor de fuerza con la misma metodología difieran entre distintas máquinas.

Se vuelve entonces muy importante la metodología de posicionamiento y rotación del transductor de fuerza. Actualmente hay dos métodos que se utilizan, el primero, que es utilizado en la mayoría de las máquinas, y que consiste en centrar el mismo respecto de la placa cilíndrica superior que forma parte del marco de carga, la misma se realiza por medio de instrumentos de medición dimensional. El



segundo método es a través de uso de pequeños orificios con pernos guía montados tanto en el plato de la máquina como en el dispositivo de carga del transductor. Esta guía puede hacerse tanto en el plato solidario al marco de carga como al plato solidario a la estructura fija de la misma.

La estimación del error de estos métodos, junto a un tercer método desarrollado por el autor del presente informe, es presentado en la sección 3.2.1.4.

Como conclusión a la presente sección se cita un párrafo de la referencia [4], “*Utilizando amplificadores de alta resolución y estabilidad, y controlando cuidadosamente las condiciones de calibración, es posible alcanzar un valor de transferencia dentro de  $5 \cdot 10^{-5}$* ”, este valor no podría ser alcanzado con la combinación de la incertidumbre de los factores presentados anteriormente y utilizando los valores brindados por el fabricante.

#### 2.2.1.5 No linealidad - Error de interpolación

La **no linealidad** es el desvío de la indicación medida, obtenido para cargas crecientes solamente, respecto de una línea recta que pasa a través de la indicación de cero y de la indicación de carga máxima. Para mediciones de fuerza de alta exactitud se hace necesario corregir este fenómeno, en forma directa o por medio de la instrumentación. La relación entre la indicación del transductor de fuerza y la carga aplicada pueden ser expresadas por una ecuación, que en la práctica habitual es una polinómica de tercer grado. Esto reduce los errores debido a la no linealidad a un nivel que los hace despreciables. Sin embargo, para las mediciones de fuerza donde se requiera la mejor exactitud, el transductor debe ser utilizado subsecuentemente en los puntos exactos de calibración.

El **error de interpolación** es la diferencia entre el valor medido, obtenido del promedio de las indicaciones para cargas crecientes solamente, y el valor obtenido a través del uso del polinomio de aproximación.

Si bien hay muchos tipos de amplificadores y software de adquisición de datos que permiten aplicar una curva de linealidad, o un ajuste por puntos, no es práctica habitual utilizar estas conversiones en mediciones de alta exactitud, incluso no son recomendables en ninguna medición a nivel laboratorio.

Es práctica habitual obtener las indicaciones en unidades eléctricas, generalmente en  $mV/V$ , y utilizar un polinomio de tercer grado para calcular valores interpolados entre los puntos de calibración. Varios INM utilizan dicho polinomio sin término independiente, o sea la indicación interpolada en fuerza cero es cero. Otros INM calculan sus polinomios con término independiente, por lo cual la indicación interpolada en fuerza cero, casi con seguridad que no será cero. En la sección 3.2.1.5 se analizan las diferencias conceptuales y de resultados que se presentan en contemplar distintos tipos de polinomios de aproximación.



### 2.2.1.6 Instrumental asociado – Amplificador digital

El sistema de medición, compuesto por dispositivos de carga, transductor de fuerza, cables, amplificador digital e indicador, pueden ser calibrados todos en la misma oportunidad, o sea como un único instrumento, o puede calibrarse abriendo el sistema por partes. En esta sección se analiza la apertura del sistema, intercambiando el amplificador digital e indicador.

El cambio de los dispositivos de carga, no se recomienda, aun así el tema es tratado en parte en las secciones 3.2.1.8 y 3.2.2. Tampoco es recomendable cambiar parte del instrumental. La práctica habitual es mantener el amplificador y conversor analógico digital en un único instrumento, pues dentro de las buenas prácticas, el valor digitalizado no corre riesgo de ser alterado si se cambia el indicador, o el software de adquisición de datos.

Si bien el sistema transductor-amplificador es conveniente mantenerlo unido, o sea contemplar a este conjunto como un instrumento único, hay casos en los cuales es conveniente abrir el sistema, y calibrar el transductor por un lado, y el amplificador por otro. En este último caso se agrega una fuente de incertidumbre que se puede asociar a magnitudes eléctricas. La conveniencia o no de esta metodología depende de los instrumentos con los que cuenta el usuario.

A veces es adecuado, sobre todo por temas de transporte, enviar el transductor y una *unidad de calibración de puentes*<sup>28</sup>, como es el caso de las comparaciones internacionales, en la cual uno o varios transductores de fuerza y una unidad de calibración son utilizados. Este instrumento se utiliza para vincular el amplificador perteneciente al laboratorio al sistema de medición de transferencia que forman los transductores y la unidad de calibración.

La intercambiabilidad del amplificador o indicador, las condiciones que deben cumplir los mismos y la contribución a la incertidumbre que esto genera es tratado en el numeral 10.3 de la *Guide to the Uncertainty of Force Measurement* [4], en el numeral 7.1 de la guía EURAMET cg-4 [2], así como en el numeral C.2.11 de la norma ISO 376:11 [3].

Merece un breve comentario el cable de conexión entre el transductor de fuerza y el amplificador digital. En mediciones de alta exactitud se utiliza casi con exclusividad la conexión a 6 hilos, así como la corriente alterna, en muchos casos con frecuencia portadora de 225 Hz o similar. La conexión a 6 hilos reduce la sensibilidad de la longitud del cable y compensa la variación de resistencia en los cables de alimentación por efectos térmicos, el uso de la corriente alterna reduce las tensiones de contacto, así como las pilas galvánicas en uniones de distintas aleaciones, mientras que la frecuencia no

---

<sup>28</sup> Instrumento eléctrico que se utiliza para darle trazabilidad a un amplificador. Puede ser de funcionamiento resistivo o inductivo. El mismo recibe la tensión de alimentación del amplificador y entrega a la salida relaciones fijas, como ser 0,2 mV/V; 0,4 mV/V, etc. En la industria del pesaje se lo denomina “simulador de celda de carga”.



múltiplo de la frecuencia de la red eléctrica de alimentación, reduce los ruidos de la línea, al no entrar en fase. Así todo, no es recomendable acortar el cable, utilizar alargues, o cambiar la ficha de conexión, tampoco intercambiar el cable en caso de que los mismos puedan ser desmontados del transductor. Muchos metrólogos en fuerza consideran que un cambio en alguna de estas condiciones hace perder la calibración.

#### 2.2.1.7 Deriva temporal a largo plazo

La estabilidad a largo plazo afecta tanto a la señal de cero, como a la sensibilidad del *span*. En el caso de la deriva de la indicación sin carga, no afecta a la incertidumbre de medición, aunque puede ser un indicativo de problemas en el transductor.

En el caso de la deriva de la indicación bajo carga, o de la sensibilidad, resulta ser una fuente de incertidumbre, que puede contribuir en gran medida a la incertidumbre final. La causa de la deriva a largo plazo puede estar determinada por varios factores como ser la protección de las celdas de esfuerzo contra la humedad y las condiciones bajo la cual el transductor es resguardado, transportado y utilizado.

El estudio de deriva es muy importante para detectar problemas en los instrumentos, y cuando se observan tendencias lineales de corrimiento, estos pueden ser en parte corregidos.

#### 2.2.1.8 Condiciones extremas de carga

Generalmente un transductor de fuerza posee dos interfases donde la fuerza es aplicada. En el caso de compresión son ambas superficies (superior e inferior), y en el caso de tracción son ambas uniones roscadas. En algunos casos la interfase es parte del elemento elástico donde las celdas de esfuerzo se encuentran adheridas, mientras que en otros casos las interfases se encuentran alejadas del mismo. En cada interfase hay una distribución de tensiones que dependerá de las condiciones extremas de carga. Un cambio en estas condiciones puede causar un cambio en esta distribución de tensiones, resultando un cambio en la sensibilidad del *span* del instrumento, aun cuando la fuerza aplicada a través de la interfase sea la misma.

En el caso de compresión, las condiciones extremas de carga son determinadas por:

- Las propiedades del material en contacto con las superficies de carga tales como la dureza y el coeficiente de fricción.
- Las formas de la superficie en contacto con la interfase, radios de curvatura, falta de planitud, etc.
- Deformaciones elásticas y plásticas de las superficies bajo carga.



Para los transductores de tracción con interfases roscadas, las condiciones extremas de carga son determinadas por la exactitud en el mecanizado de las roscas, la cantidad de filetes roscados, la dureza y el módulo elástico del material, etc.

La norma ISO 376:11 [3] en el numeral B.2, sugiere un ensayo para verificar la interacción entre el transductor de fuerza trabajando en compresión y la placa base de apoyo. Asimismo, fija tolerancias para las distintas clases de exactitud.

En la referencia [4] indica que para transductores cuyo elemento elástico es del tipo columna, o sea una barra trabajando a compresión o tracción, y donde las celdas de esfuerzo son adheridas aproximadamente en la mitad de la misma, la relación  $l/d$  es el parámetro principal que determina la magnitud de la influencia de las condiciones extremas de carga. Por ejemplo, el transductor de 500 kN del NPL posee una relación  $l/d$  de 3,7 y muestra un cambio en el ensayo según el numeral B.2 de la ISO 376 menor a 0,005%, mientras que algunos transductores comerciales, cuya relación  $l/d$  están cerca de la unidad, pueden llegar a valores del 1% cuando se realiza dicho ensayo. Por ello, es fundamental que la base donde apoya el transductor sea al menos del mismo diámetro que la base del transductor en sí. Varios fabricantes de transductores recomiendan, o directamente proveen dispositivos de carga adicionales para reducir estos efectos. En la sección 3.2.1.8 se dan ejemplos y propuestas al respecto.

#### 2.2.1.9 Toma de datos

Es necesario mantener una secuencia de medición bien programada, en la cual los tiempos entre toma de datos, estabilización de la carga, etc., sean repetitivos.

La toma de un valor de indicación en cada punto de medición, puede no hacer evidente varios fenómenos, como ser la inestabilidad de la carga, la oscilación de las pesas de la máquina de pesos suspendidos, rozamientos entre dichas pesas, efectos dinámicos de acomodamiento de las mismas, etc. Evidentemente el registro de datos en forma continua y con una frecuencia establecida, puede evidenciar varios fenómenos.

### **2.2.2. Dispositivos de carga utilizados**

En la sección 2.2.1.8 se explicó la incidencia de las superficies que forman las condiciones extremas de carga. Los dispositivos de carga cumplen las siguientes funciones:

- Ser un intermediario entre el transductor de fuerza y la máquina, adaptando su vinculación.
- Generar una transición de tensiones adecuada, de modo de uniformizar las mismas sobre la zona sensible del transductor de fuerza, asimismo reduciendo las tensiones de contacto en los elementos, a niveles adecuados para los materiales utilizados. Ver nota.



- Permitir la alineación del transductor con la máquina de modo de reducir las cargas laterales, transmitiendo la carga en forma axial.
- En el caso de compresión, generar una articulación, la cual reduce los momentos flectores.
- En el caso de tracción, generar dos articulaciones, las cuales reducen los momentos flectores y las cargas laterales.
- En algunos casos, proteger al transductor de la rugosidad, protuberancias, etc, de la máquina, así como ser la pieza de desgaste.

Nota: En la zona elástica donde son solidarias las celdas de esfuerzo, en un transductor con sensibilidad de 2 mV/V y cuerpo de acero, se tienen tensiones del orden de 420 MPa. Generalmente el material utilizado en los transductores permite tensiones de contacto con los dispositivos de carga de aproximadamente 200 MPa. La tensión de contacto entre los dispositivos de carga y las máquinas deben ser menores a 100 MPa, este último valor es el requisito planteado en el numeral A.4.5 de la norma ISO 376:11 [3].

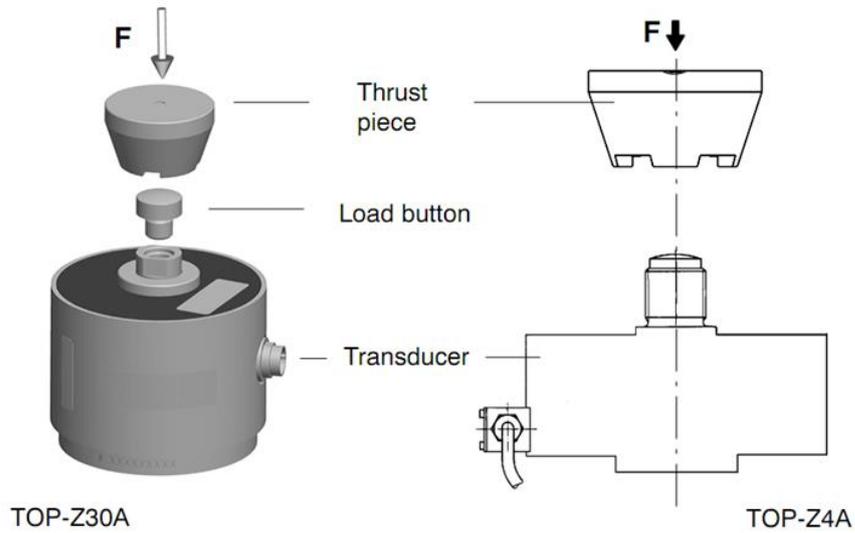
Es fundamental seguir las indicaciones dadas en el Anexo A de la norma ISO 376:11, y las dadas por el fabricante respecto a los dispositivos de carga y al modo de montaje de los instrumentos.

Se considera importante citar el numeral 7.1.3 de la referencia [4], sobre acuerdo entre las máquinas y el efecto de interacción: *“La geometría de la superficie de carga y la composición en diferentes máquinas de pesos suspendidos se comportarán diferente bajo carga. Un material más blando o duro o una forma diferente del plato de carga puede llevar a una posición ligeramente diferente del transductor de fuerza bajo carga. Los instrumentos que son sensibles a estas diferencias presentan un perfil diferente de calibración en diferentes máquinas. Por ello es probable que no coincidan exactamente los resultados en dos máquinas diferentes.”*

Este párrafo está en concordancia con la cita realizada en la sección 1.2 del EURAMET cg-4 [2]. Si bien este fenómeno puede ser asignado a la máquina de pesos suspendidos, se lo cita aquí debido a que un buen uso de los dispositivos de carga y a través del diseño de transductores de fuerza con mejor comportamiento a este fenómeno, puede reducirse substancialmente la incidencia de los efectos de interacción. En la sección 3.2.1.8 y en la 3.2.2 se realizan propuestas al respecto.

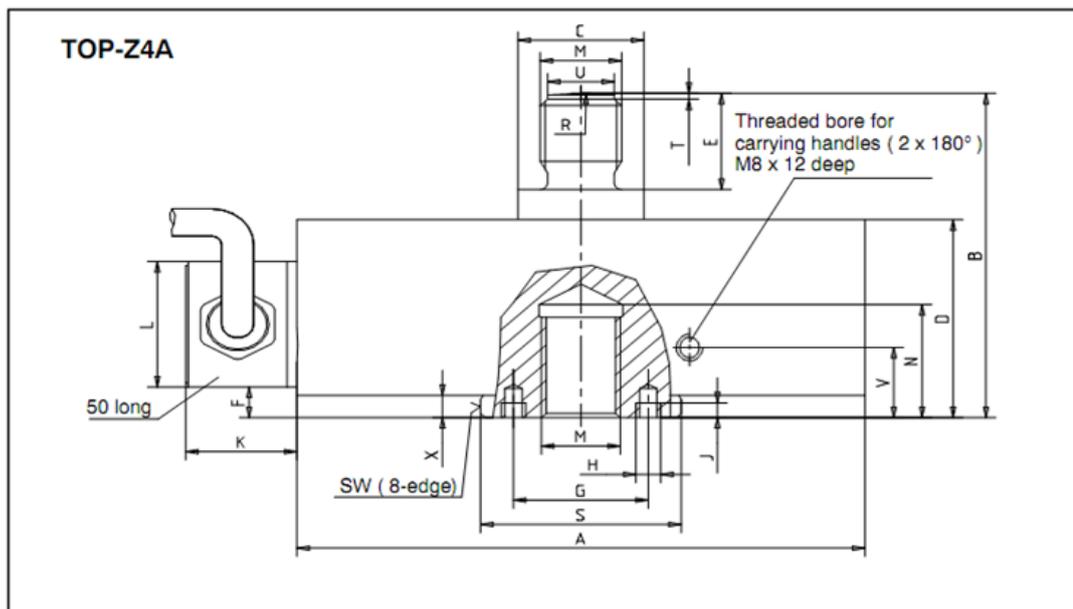
Como los efectos dependen en gran medida de la geometría del transductor y de la instrumentación interna del mismo, no pueden darse criterios aplicables a las distintas geometrías, dando al mismo tiempo con el nivel de detalle necesario para alcanzar una exactitud adecuada.

Se hace referencia al documento de la firma HBM *Mounting instructions - Force transfer standard – TOP Transfer Z30A / Z4A* [16], que cumple con todas las especificaciones de la norma ISO 376 [3].



**Ilustración 6. Dispositivos de carga para transductores HBM Z30A y Z4A, solicitados en compresión.**

En el caso del TOP-Z4A, las dimensiones del transductor, y del cabezal de carga son las siguientes:



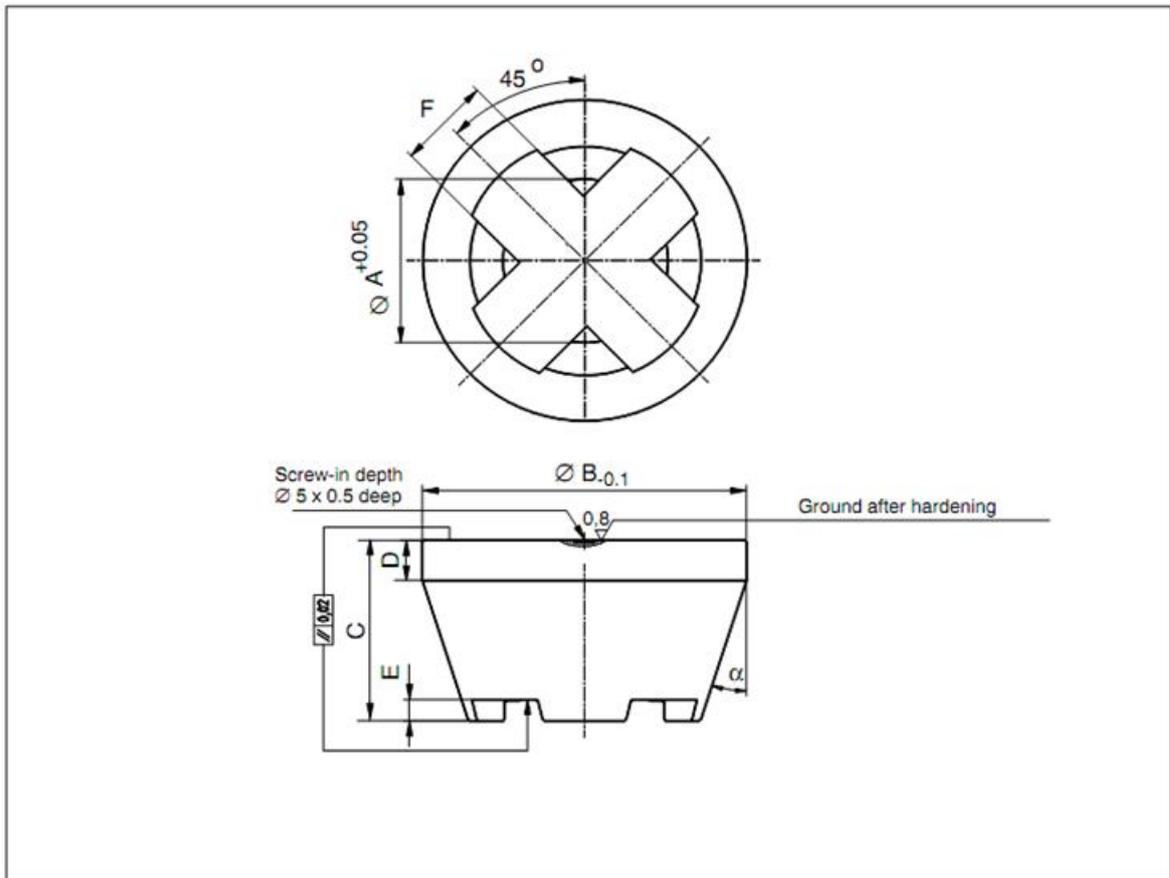
**Ilustración 7. Dimensiones de transductores HBM Z4A – Esquema.**



Type	∅ A	B	∅ C <sub>f7</sub>	D	E	F	G	H	J	M
TOP-Z4A/20kN	115	77	25	47	23	7.3	-	-	-	M16
TOP-Z4A/50kN	120	83	26	55	23	10.2				M20x1.5
TOP-Z4A/100kN	146	107	40	69	33	12.2				M30x2
TOP-Z4A/200kN	180	137	50	89	43	13.1	68	M6	6	M39x2
TOP-Z4A/500kN	275	250	100	145	95	21	118	M8	8	M72x4

Type	N	R	∅ S <sub>f7</sub>	T	∅ U	V	X	SW	K	L
TOP-Z4A/20kN	27	60	40	1.4	13	-	5.3	38	22	30
TOP-Z4A/50kN	28	60	48	1.4	17		8.2	45		
TOP-Z4A/100kN	37	160	62	1.4	27		10.2	59		
TOP-Z4A/200kN	45	160	76	1.8	36		11.1	73		
TOP-Z4A/500kN	87	400	140	3	65		35	20		

**Ilustración 8. Dimensiones de transductores HBM Z4A - Tabla.**

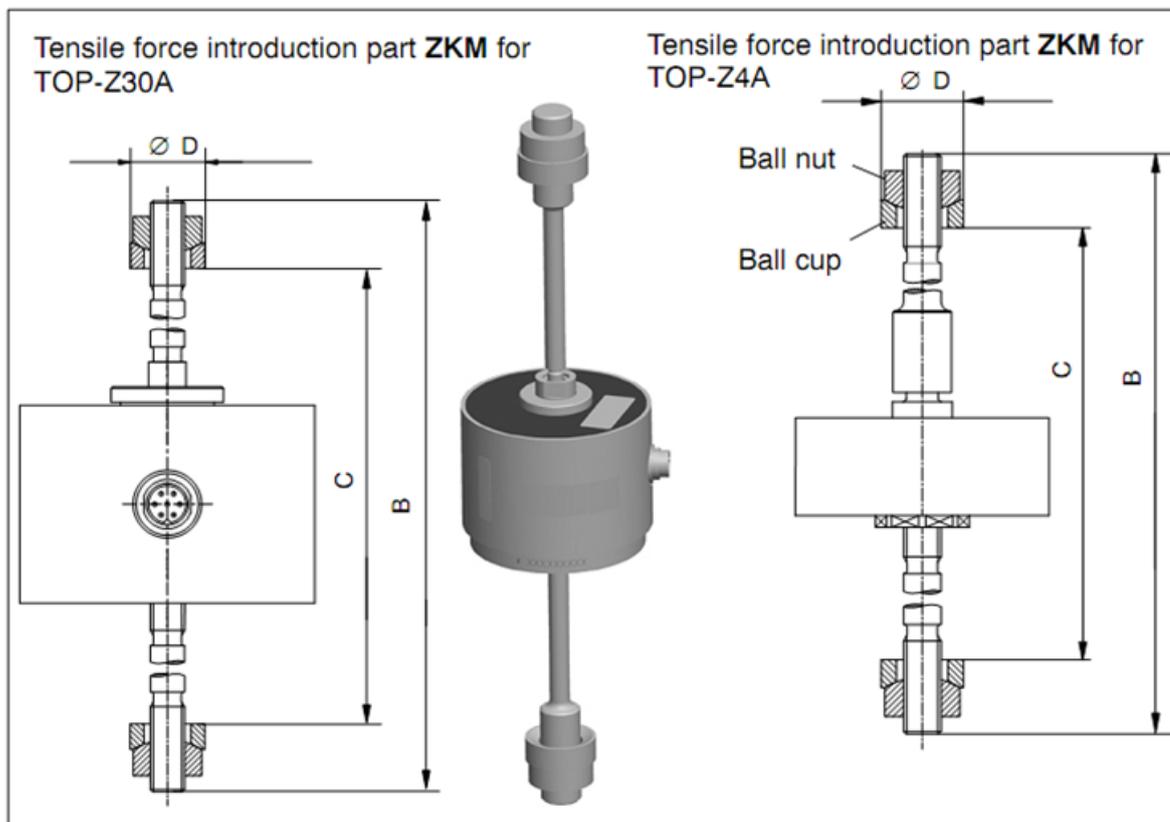


Type	Thrust piece Order number	Weight (kg)	∅ A	∅ B	C	D	E	F	α
TOP-Z4A/20kN	1-EDO4/20kN	0.34	16.2	48	29	8	5	12	18°
TOP-Z4A/50kN	1-EDO4/50kN		20.2		29		5		
TOP-Z4A/100kN	1-EDO4/100kN	1.58	30.2	80	45	10	5	23	
TOP-Z4A/200kN	1-EDO4/200kN		39.2						
TOP-Z4A/500kN	1-EDO4/500kN	4.35	72.4	112	68	15	12	30	

**Ilustración 9. Dispositivo de carga (cabezal para compresión) para transductor HBM Z4A.**



En el caso de los dispositivos para tracción, las dimensiones son las siguientes:



Type	ZKM Order number	B	C		Ø D
			min	max.	
TOP-Z30A/2kN-10kN	1-Z30/10kN/ZKM	229	250	312	35 <sup>-0.120</sup> -0.280

Type	ZKM Order number	Weight (kg)	B	C		Ø D
				min	max.	
TOP-Z4A/20kN	1-Z4A/20kN/ZKM	0.82	325	228	276	35 <sup>-0.120</sup> -0.280
TOP-Z4A/50kN	1-Z4A/50kN/ZKM	1.45	350	248	299	45 <sup>-0.130</sup> -0.290
TOP-Z4A/100kN	1-Z4A/100kN/ ZKM	2.32	395	277	334	50 <sup>-0.130</sup> -0.290
TOP-Z4A/200kN	1-Z4A/200kN/ ZKM	4.19	447	317	382	64 <sup>-0.170</sup> -0.330
TOP-Z4A/500kN	1-Z4A/500kN/ ZKM	20.1	623	432	522	90 <sup>-0.170</sup> -0.390

**Ilustración 10. Dispositivos de carga para transductores HBM Z30A y Z4A, solicitados en tracción.**



## 2.3. METODOLOGÍA E INCIDENCIA DEL OPERADOR

Hay varias metodologías acordadas internacionalmente, o entre las partes en el caso de comparaciones internacionales, las cuales varían en función de los objetivos buscados y con la exactitud de medición requerida. Dentro del alcance de la presente investigación se pueden citar tres metodologías, las que se presentan a continuación ordenadas desde la de mejor jerarquía metrológica:

### **Trazabilidad por Ruta B:**

La misma pretende comparar máquinas de pesos suspendidos que se trazan por la ruta B de la guía EURAMET cg-4 [2], o sea referidas directamente a las magnitudes de base de masa, longitud y tiempo. La incertidumbre típica de estas máquinas es del orden de  $1 \cdot 10^{-5}$  a  $2 \cdot 10^{-5}$ .

Aquí se realizan mediciones con uno o dos transductores de la misma capacidad. Se miden pocos escalones de carga, por ejemplo, al 50% y 100% del mismo, se realiza la medición con toma de datos cada 6 minutos para reducir significativamente el creep del transductor y la oscilación de las masas de la máquina. Se realizan giros cada  $60^\circ$  y se realiza una serie de precarga y dos series de medición en cada posición. Tanto las precargas como las mediciones poseen el mismo esquema. Se realizan dos giros completos, iniciando en  $0^\circ$  y terminando en  $720^\circ$ , o sea se mide en 13 posiciones. El valor obtenido en la máquina es el valor medio, corregido o no en cada serie por la deriva a corto plazo. Asimismo, se corrige por la incidencia de la deriva a largo plazo, por ello el instituto piloto mide al menos al inicio y al cierre del ejercicio. También se corrige por temperatura, pues se conoce la sensibilidad de los transductores utilizados con su signo respectivo.

Para realizar este tipo de intercomparación, que generalmente se trata de una comparación tipo clave, se requiere definir la magnitud fuerza a sus magnitudes de base, así como tener un ambiente climatizado en por ejemplo  $20^\circ\text{C}$  ó  $21^\circ\text{C}$  y con una dispersión de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Asimismo es necesario tener analizadas todas las magnitudes de influencia, temas tratados en la sección 2.1.1 y 2.1.2.

### **Trazabilidad por Ruta A:**

La misma pretende transferir trazabilidad desde una máquina de pesos suspendidos trazada por Ruta B de la guía EURAMET cg-4 [2], a una máquina de pesos suspendidos secundaria. La incertidumbre típica de estas máquinas es del orden de  $5 \cdot 10^{-5}$  a  $1 \cdot 10^{-4}$ .

Aquí se realizan mediciones utilizando de 3 a 5 transductores de transferencia de distinta capacidad, cada uno de los cuales mide entre 4 y 6 escalones de carga, pero en ningún caso por debajo del 40% de la capacidad del transductor. Es conveniente solapar los puntos de fuerza con distintos transductores. La metodología de medición básica puede ser la de la ISO 376 [3], aunque se recomienda realizar al menos posiciones cada  $90^\circ$ , en lugar de cada  $120^\circ$ .



Para realizar este tipo de trazabilidad se requiere tener un ambiente climatizado en por ejemplo 20 °C ó 21 °C y con dispersión de  $\pm 2$  °C. Asimismo es recomendable tener analizadas todas las magnitudes de influencia nombradas en la sección 2.1.2.

### **Calibración de instrumentos de medición de fuerza de acuerdo a la norma ISO 376:11:**

La misma es una metodología muy utilizada para la calibración de la mayoría de los instrumentos de medición de fuerza. Los requisitos de la norma están claramente presentados en la misma. La incertidumbre esperada, es función de la clase de exactitud que debería cumplir el transductor. Se presenta a continuación la tabla con las tolerancias máximas de cada factor para cada clase de exactitud.

Clase	Error relativo del instrumento de medición de fuerza						Incertidumbre ampliada de la fuerza de calibración aplicada (95% de nivel de confianza) %
	de reproducibilidad <i>b</i>	de repetibilidad <i>b'</i>	% de interpolación <i>f<sub>c</sub></i>	de cero <i>f<sub>0</sub></i>	de reversibilidad <i>v</i>	de fluencia <i>c</i>	
00	0,05	0,025	$\pm 0,025$	$\pm 0,012$	0,07	0,025	$\pm 0,01$
0,5	0,10	0,05	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$	0,15	0,05	$\pm 0,02$
1	0,20	0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,050$	0,30	0,10	$\pm 0,05$
2	0,40	0,20	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$	0,50	0,20	$\pm 0,10$

**Ilustración 11. Características de los instrumentos de medición según ISO 376:11.**

Como puede observarse para la clase 00, la máquina utilizada para calibrar los transductores requiere un nivel de incertidumbre máxima de  $1 \cdot 10^{-4}$ , o sea es alcanzable por las metodologías nombradas precedentemente.

**En cuanto al operador**, lo único que hay que mencionar, es que requiere estar debidamente capacitado al nivel de la medición que va a realizar, y que el mismo debe observar todas las pautas necesarias. Utilizando las metodologías nombradas, y las recomendaciones de los fabricantes, la incidencia del operador llega a ser despreciable. Asimismo es recomendable realizar estudios de  $R\&R^{29}$  entre el personal técnico del laboratorio.

A lo largo de todo el informe se presentan datos y análisis que resultan de utilidad respecto a la operación y la metodología de medición, por lo cual no se considera necesario redactar una nueva sección dentro del desarrollo conceptual de este informe para condensar toda esa información. Igualmente en la sección 3 se presenta la declaración de la CMC en la máquina de 110 kN del INTI.

<sup>29</sup> Metodología donde se evalúa la Repetibilidad y Reproducibilidad variando el operador, o condiciones de medición, de modo de obtener la sensibilidad a dicho cambio.



### **3. DESARROLLO ANALÍTICO, CONCEPTUAL Y EXPERIMENTAL**

Por un tema de claridad, en el presente capítulo se mantiene prácticamente la misma estructura y secuencia del capítulo 2.

En la sección 3.1 se analiza la realización de la magnitud, la cual comprende a todas las magnitudes que definen la unidad y las magnitudes de influencia que contribuyen a la incertidumbre en la generación de fuerza en una máquina de pesos suspendidos. También se presentan las mediciones realizadas con un dinamómetro de seis componentes y otras metodologías, así como las correcciones realizadas en la máquina de 110 kN en dichas oportunidades. Finalmente se presenta la intercomparación internacional donde se concluye con la demostración de la CMC de la máquina.

En la sección 3.2 se analizan transductores de referencia y/o transferencia, y comprende a todas las magnitudes de influencia que contribuyen a la incertidumbre de medición del sistema de medición de fuerza, el cual fue definido en la sección 2.2 como el comprendido por el transductor de fuerza y sus dispositivos de carga, el cable de conexión y su instrumental asociado.

#### **3.1. REALIZACIÓN DE LA MAGNITUD**

En esta sección se presenta la realización de la magnitud para la máquina primaria de pesos suspendidos (DW-FSM) de 110 kN del INTI. Para ello se pasa a describir brevemente el funcionamiento y la composición de la misma.

La máquina de pesos suspendidos de 110 kN del INTI es de la firma GTM, cuyo modelo es el K-NME 110 kN. Posee una capacidad máxima de 110 kN, iniciando con un escalón de carga de 2 kN, la misma es una máquina de tipo secuencial, o sea la secuencia de los escalones de carga y de cada pesa a aplicar es fija e invariable. Los escalones de carga posibles de realizar son los siguientes: 2, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100 y 110 kN.

Cabe destacar que los escalones de 22, 55 y 110 kN son para el ensayo de sobrecarga que recomienda la norma ISO 376:11 [3], en su Anexo B, numeral B.1. Este ensayo no es obligatorio para certificar la norma, pero es aconsejable aplicarlo cuando se desarrolla un nuevo modelo de transductor, así como también para aplicarlo sobre cada individuo antes de utilizarlo por primera vez. Es por ello que muchas máquinas no poseen estos escalones extras de carga.

Respecto al material, las pesas y el marco de carga son de acero al carbono categoría St52-3, las mismas poseen un recubrimiento de níquel químico de espesor entre 25 y 30  $\mu\text{m}$ .



El marco de carga está formado por tres columnas, y está unido superiormente por una viga de tres brazos, los cuales funcionan como paralelogramos deformables, mientras que la zona central de dicha viga posee alta rigidez para reducir la interacción máquina-transductor. En la parte inferior, estas columnas se unen a un disco de 700 mm de diámetro y 40 mm de espesor. Todo este conjunto de piezas forma el marco de carga que constituye el primer escalón de carga cuyo valor nominal es de 2kN.

La zona de tracción de la máquina se realiza por sobre el marco de carga, el cual posee en su parte superior un alojamiento para accesorios que cumplen la norma ISO 376, Anexo A.

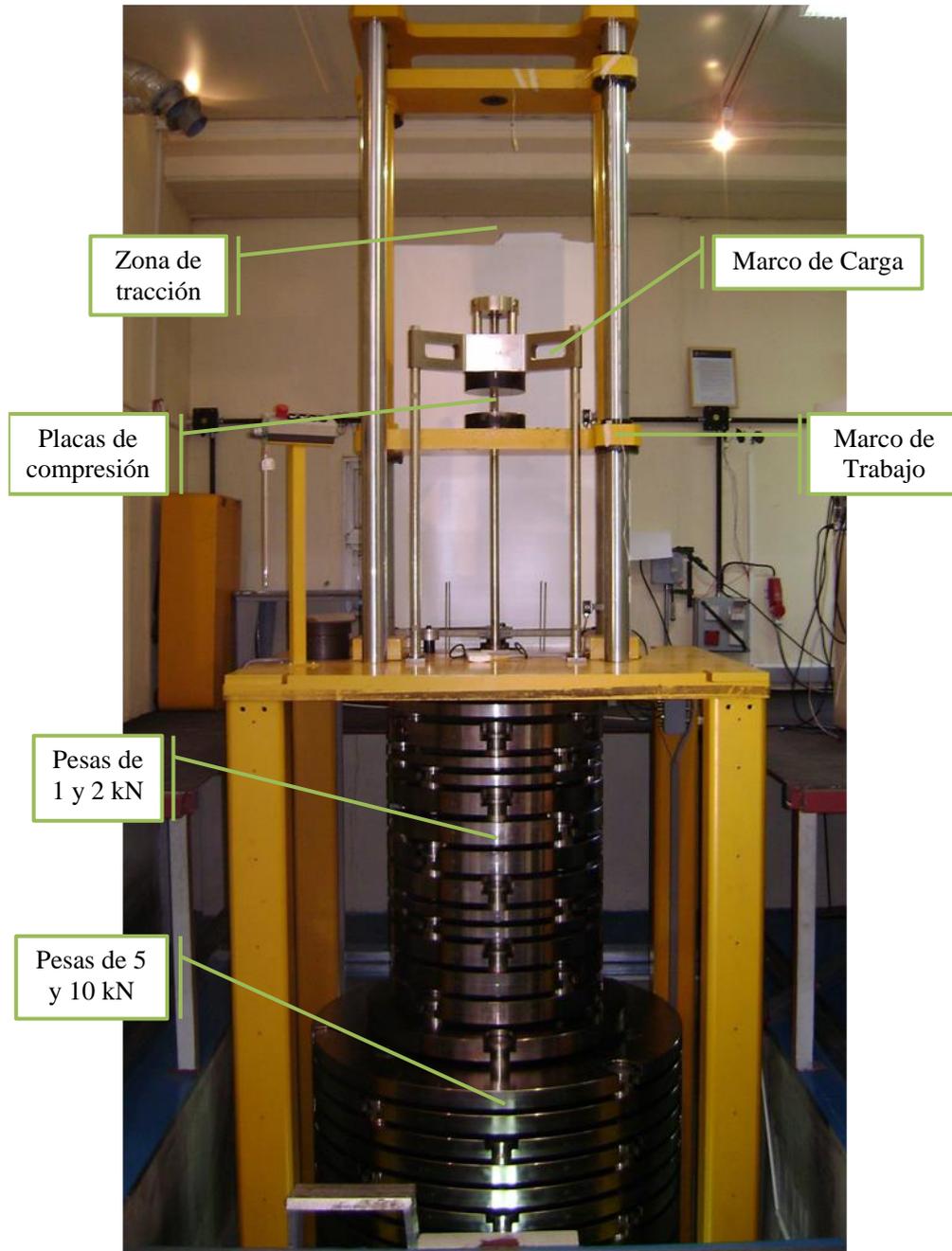
Debido a que las mediciones a tracción se realizan por arriba del marco de carga, que la misma cuenta con 3 columnas y que gran parte de su peso se encuentra concentrado en el disco inferior, dicha máquina logra muy buena estabilidad desde el primer punto de carga. Esto puede verse en el resultado de la medición en 2 kN realizada en la sección 3.1.3.4.

Cada pesa se sustenta de la anterior a través de 3 soportes distribuidos cada  $120^\circ$  y ubicados prácticamente en la periferia de cada disco. Entre pesa y pesa hay un desfase de  $60^\circ$  respecto a los apoyos de la pesa anterior. Este sistema logra una muy buena estabilidad y rigidez dimensional, iniciando desde el marco de carga hasta llegar a la última pesa. Constructivamente podrían haberse construido los apoyos sin el desfase entre las pesas. En opinión del autor de la presente investigación, el desfase fue realizado por simplicidad de construcción, pero también debido a que le da elasticidad vertical al sistema, o sea las pequeñas deformaciones generadas por flexión en cada pesa hacen que el transitorio mientras se cambia el valor de carga sea más suave, sin por ello perder rigidez en el plano horizontal. En definitiva, el sistema forma una suerte de reticulado en tres dimensiones.

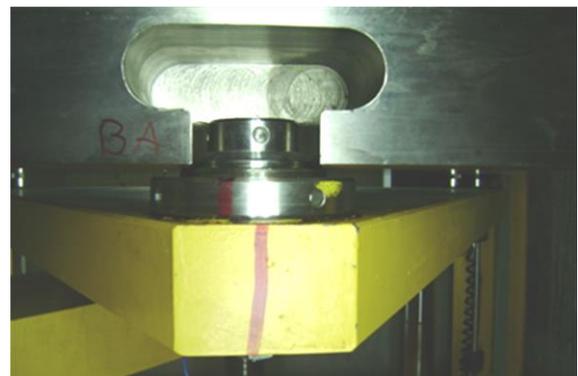
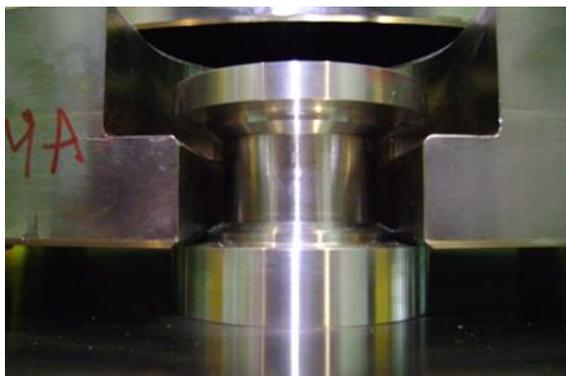
El movimiento de las pesas es realizado por una mesa asociada a un tornillo de bolas re-circulantes y guiado por dos columnas.

Como se había mencionado, esta máquina fue construida junto con la del PTB, o sea fueron máquinas "gemelas". Recientemente el PTB modificó la vinculación entre el marco de carga y la primera pesa, de modo de cambiar los tres apoyos que dan gran rigidez, por una articulación. Esto logra una mejor alineación de las pesas, introduciendo menores momentos flectores en el transductor, pero como contrapartida, los métodos de verificación que se presentan en las secciones 3.1.3.2 y 3.1.3.3 no resultan de gran utilidad como en el caso de no realizar dicha reforma.

A continuación, se presentan fotografías de la máquina de 110 kN del INTI, así como el sistema de apoyos con los que cuenta.



**Ilustración 12. Máquina de pesos suspendidos (DW-FSM) de 110 kN del INTI.**



**Ilustración 13. DW-FSM de 110 kN. Izq. Acoplamiento entre pesas. Der. Apoyo de la última pesa.**



Para definir la magnitud se recurre a la metodología planteada por la Ruta B de la EURAMET cg-4 [2], la cual requiere de los siguientes trabajos:

- La definición de la magnitud respecto a las magnitudes de base, o sea masa, longitud y tiempo, así como la determinación de la incertidumbre alcanzada a través de las mismas. Ambas son determinadas con la **Ecuación 2-2** y la **Ecuación 2-3**, las cuales fueron presentadas en la sección 2.1.1. El desarrollo en detalle de este tema se presenta en la sección 3.1.1.
- La participación en una comparación internacional donde participen otras FSM, para demostrar la compatibilidad de la definición de la magnitud con otros institutos. Este tema se presenta en la sección 3.1.4.

Adicionalmente a estos requisitos de la guía EURAMET cg-4, fue necesario el estudio de las magnitudes de influencia de dicha máquina, de modo de cuantificarlos y de reducirlos en los casos que fueran necesarios. Este tema se presenta en la sección 3.1.2, y el estudio con el uso en particular de un dinamómetro de seis componentes es presentado en la sección 3.1.3.1.

### **3.1.1. Magnitudes que definen la unidad**

En esta sección se presentan los resultados de la definición de la magnitud para la máquina de pesos suspendidos de 110 kN del INTI.

Al momento de iniciar la presente investigación, la DW-FSM en cuestión ya prestaba servicios. Cabe destacar que el autor de la presente tesis ingresó al laboratorio de fuerza a mediados del año 2006, mientras que la máquina fue construida e instalada entre el año 1998 y 2000, para realizarse luego en el año 2002 la caracterización de la misma, alcanzado en aquella oportunidad una CMC de  $1 \cdot 10^{-4}$ .

Debido a lo expresado en el párrafo anterior, se pasan a describir brevemente los pasos que posiblemente se siguieron desde la concepción de la máquina hasta declarar su incertidumbre de medición:

- Determinación de la gravedad local por medición relativa utilizando un gravímetro de péndulo. El mismo fue obtenido por medio de la contratación del servicio al Instituto Geográfico Militar, en junio de 1998.
- Determinación de la densidad del aire de referencia, a través de definir el intervalo de condiciones ambientales en la cual la máquina iba a prestar servicios, tarea realizada por parte del INTI.
- Con los datos anteriores el fabricante pudo determinar el valor de masa que requería cada pesa para obtener el valor de fuerza nominal requerido en las condiciones de implantación.



- Construcción de la máquina y montaje de la misma. La alineación de las pesas fue realizada geoméricamente utilizando una plomada para lograr la alineación vertical, tarea realizada por el fabricante en el año 2000.
- Caracterización de la máquina a través de su comparación respecto de la máquina de 110 kN del PTB, la cual estaba trazada directamente a las magnitudes de base. Para ello se utilizaron 3 transductores de fuerza de 10 kN, 50 kN y 100 kN pertenecientes al INTI. Se midieron al inicio y al final en la máquina del PTB, para obtener tanto el valor de referencia como para determinar la deriva del transductor de transferencia. La medición intermedia fue realizada en la máquina del INTI. La metodología fue similar a ISO 376, pero con giros cada 90°.

Los pasos nombrados anteriormente se presentan a modo aclaratorio. La determinación de la gravedad local, la densidad del aire, la densidad de las pesas, y la determinación del valor de las masas de la máquina fueron realizadas en esa oportunidad. Para el análisis llevado a cabo durante la presente investigación, cabe destacar lo siguiente:

- Para el valor de las masas se tomaron los valores originales del certificado de calibración del año 1999, debido a que no resultaba viable el desmontaje de la máquina. Asimismo se consideró despreciable su deriva a largo plazo, tema que se justifica en la sección 3.1.1.1.
- En el caso de la determinación del valor de la gravedad local, se tomó el valor original medido en 1998 por parte del Instituto Geográfico Militar. En la sección 3.1.1.2 se presenta la determinación por distintos métodos para el sitio de implantación y la comparación con el valor tomado como referencia.
- En el caso de la densidad del aire, el valor original adoptado fue  $1,2 \text{ kg/m}^3$ , en la sección 3.1.1.3 se presenta el valor medio calculado y el intervalo probable del mismo en función de los requerimientos térmicos e higrométricos de la sala de medición.
- Por último, en el caso de la densidad de las masas, se tomó el valor del certificado original, por la misma razón que la determinación de las masas, por no resultar viable el desmontaje.

A continuación se pasa a detallar cada una de estas magnitudes, que fueron definidas en la **Ecuación 2-2**. Asimismo, en cada sección se presentan los análisis realizados, las metodologías utilizadas y los comentarios que el autor del presente considera oportuno.

### 3.1.1.1 Masa. Determinación de su valor.

Las pesas de una máquina de pesos suspendidos se construyen con un valor de masa tal que genere un valor entero nominal de fuerza. Para ello se ajustan a la gravedad local del sitio de implantación de la máquina, y se corrige por el empuje que genera el aire del ambiente en función de la densidad estandarizada del mismo.



Para poder determinar la masa de las pesas, se recurre a la comparación contra patrones de masas, siendo necesaria la combinación de varias de estas para lograr el valor nominal de fuerza.

Cuando se trata de pesas grandes, puede llegar a ser necesario, por un tema operativo, la utilización de varias masas patrones, o también debido a que con esas masas se puede lograr una menor incertidumbre relativa. Como ejemplo puede citarse el uso de 20 pesas patrón F1 de 50 kg para determinar la masa de una pesa F2 de 1000 kg.

La determinación de la masa de las pesas de la máquina de pesos suspendidos de 110 kN fue realizada por el fabricante en origen. Se transcriben a continuación los resultados obtenidos:

**Tabla 4. Determinación de la masa de las pesas de la DW-FSM de 110 kN.**

Fecha 05/07/1999  
Certificado 1.11 - 99.004 PTB

ld	m [kg]	$\sigma_m$ [kg]
Marco de carga 2 kN	204,1778	0,001
Pesa 1 - 2kN	204,1778	0,001
Pesa 2 - 1kN	102,0889	0,001
Pesa 3 - 1kN	102,0889	0,001
Pesa 4 - 2kN	204,1778	0,001
Pesa 5 - 2kN	204,1778	0,001
Pesa 6 - 2kN	204,1778	0,001
Pesa 7 - 2kN	204,1778	0,001
Pesa 8 - 1kN	102,0889	0,001
Pesa 9 - 1kN	102,0889	0,001
Pesa 10 - 2kN	204,1778	0,001
Pesa 11 - 2kN	204,1778	0,001
Pesa 12 - 2kN	204,1778	0,001

ld	m [kg]	$\sigma_m$ [kg]
Pesa 13 - 3kN	306,2666	0,002
Pesa 14 - 5kN	510,4444	0,003
Pesa 15 - 5kN	510,4444	0,003
Pesa 16 - 5kN	510,4444	0,003
Pesa 17 - 5kN	510,4444	0,003
Pesa 18 - 5kN	510,4444	0,003
Pesa 19 - 5kN	510,4444	0,003
Pesa 20 - 5kN	510,4444	0,003
Pesa 21 - 10kN	1020,889	0,005
Pesa 22 - 10kN	1020,889	0,005
Pesa 23 - 10kN	1020,889	0,005
Pesa 24 - 10kN	1020,889	0,005
Pesa 25 - 10kN	1020,889	0,005

Como se comentó en la sección 3.1.1 no era viable desmontar la máquina, así como que se consideró despreciable la deriva del valor de masa de las pesas que forman parte de la DW-FSM de 110 kN. Esta última suposición surge de no haberse evidenciado signos de corrosión y/o manchas sobre las mismas, ni desgaste. En el caso de desgaste se comenta que el posicionamiento de las pesas puede estar acompañado de pequeños choques con muy bajo rozamiento, por lo cual el desgaste debería ser evidenciado por pequeñas limaduras de material.

Como comentario final al tema, el autor del presente quiere destacar que, en función del equipamiento disponible en el laboratorio de masas del instituto donde se desarrollan estas mediciones, es necesario definir la tolerancia de ajuste y la incertidumbre de determinación. Por ejemplo, para una má-



quina de pesos suspendidos con una incertidumbre de  $2 \cdot 10^{-5}$ , es esperable obtener incertidumbres del orden de  $5 \cdot 10^{-6}$ . Para ello debería fabricarse la pesa con las especificaciones de una clase F1, pero la tolerancia máxima sería de  $3,5 \cdot 10^{-6}$ , debido a que la incertidumbre ya aporta  $1,5 \cdot 10^{-6}$ . Este mismo razonamiento debería llevarse a cabo en otros casos. Obviamente si se posee una comparadora de masas que no logra una incertidumbre de  $1,5 \cdot 10^{-6}$ , el trabajo de ajuste deberá ser más esmerado de modo de que la suma aritmética de desvío e incertidumbre sea inferior a  $5 \cdot 10^{-6}$ .

### 3.1.1.2 Gravedad local. Estimación y medición.

La máquina de pesos suspendidos del INTI está definida utilizando el valor de gravedad medido en junio de 1998, por contratación del servicio al ex Instituto Geográfico Militar (IGM), actualmente denominado Instituto Geográfico Nacional (IGN). La medición fue realizada en forma relativa y utilizando un gravímetro de péndulo. La medición se inició en un punto fijo del entonces IGM, o sea donde se había medido en forma absoluta, y luego se realizó la medición en varios puntos del INTI, entre ellos el de implantación de la DW-FSM de 110 kN, finalmente la medición se cerró en el mismo punto fijo para determinar la deriva.

En esta sección se presentan algunos de los distintos métodos de estimación y medición de la gravedad, de modo de elegir el más conveniente en cada caso. Asimismo, la verificación de los resultados y sus desvíos utilizando los distintos métodos, validan en parte el uso de los mismos y dan mayor confiabilidad al valor medido que actualmente se utiliza como referencia.

El **primer método** es utilizando la ecuación de un geode. Se utiliza en este caso en particular la ecuación de Roman Schwartz y Andreas Lindau [7].

Para ello es necesario contar con los datos geodésicos de Latitud y Altitud. En este caso son:

Latitud: 34,577° Sur

Altitud: 23 m

Por la utilización de la Ecuación 2-4 y reemplazando valores se tiene:

$$g = 9,780\ 318 [1 + 0,005\ 3024 \operatorname{sen}^2 (-34,577^\circ) - 0,000\ 0058 \operatorname{sen}^2 2 \cdot (-34,577^\circ)] - 0,000\ 003085 \cdot (23m)$$

$$g = ( 9,796\ 90 \pm 0,000\ 01 ) \text{ m/s}^2$$

Siendo la incertidumbre relativa ( $1,0 \cdot 10^{-5}$ )

Cabe destacar que la ecuación presentada fue desarrollada para ser utilizada en Europa, por lo cual se espera que se ajuste mejor a ese territorio. La utilización de la misma fue debido a la falta de referencias confiables en la región.



Esta ecuación no tiene en cuenta la variación en los estratos de suelo, el apartamiento de la geometría real de la tierra respecto a un geoide, etc. Asimismo, el valor de incertidumbre alcanzado en este caso en particular es bueno debido a la geografía del lugar.

El **segundo método**, es utilizando el software SISProject [8] desarrollado por el *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB), en el cual se ingresan las coordenadas geográficas (latitud y longitud), en el caso de longitud Oeste, se coloca signo negativo, al igual que en el caso de latitud Sur. La determinación de estas coordenadas puede realizarse con suficiente exactitud utilizando herramientas de posicionamiento global (GPS) o software de información geográfica (GIS).

Ingresando latitud y longitud, el software determina la altura a través de algoritmos de cálculo, aunque si la altura sobre el nivel del mar se conoce con mayor exactitud, esta puede ser ingresada, de modo de mejorar la exactitud en la determinación. El valor de altitud puede obtenerse a través de los mojones de referencia del IGN y propagarlo a la ubicación de implantación de la máquina utilizando por ejemplo *nivelación geométrica*<sup>30</sup>.

En el primer caso, o sea sin ingresar la altitud, el software determina:

Longitud: -58,516000°  
Latitud: -34,577000°  
Altitud: 23,9 m

**$g = ( 9,796\ 875 \pm 0,000\ 037 )\ m/s^2$**  Siendo la incertidumbre relativa ( $3,8 \cdot 10^{-6}$ )

En el segundo caso, o sea ingresando la altitud, el software determina:

Longitude: -58,516000°  
Latitude: -34,577000°  
Height: 23,0 m

**$g = ( 9,796\ 877 \pm 0,000\ 010 )\ m/s^2$**  Siendo la incertidumbre relativa ( $1,0 \cdot 10^{-6}$ )

Cabe destacar que la exactitud de la determinación está fuertemente condicionada a la geografía del terreno (zonas montañosas presentan mayor dispersión), así como de la cantidad de puntos de referencia cercanos. En esta ubicación en particular la incertidumbre es muy buena debido a la llanura, baja altitud sobre el nivel del mar, la homogeneidad de los estratos de suelo y subsuelo, así como la gran cantidad de puntos de medición absoluta y relativa con los cuales el software interpoló.

Si bien este último valor es adecuado, no se recomienda para la definición de la magnitud fuerza en incertidumbres mejores a  $2 \cdot 10^{-5}$ , pero sí es muy conveniente para incertidumbres mayores a ese va-

---

<sup>30</sup> Distintas técnicas de la geotopografía y/o geodesia para determinar altitudes.



lor. Básicamente debido a que con un reducido costo se puede acceder a la medición por parte de un servicio oficial, en Argentina a través del IGN, obteniéndose incertidumbres muy bajas y confiables al mismo tiempo.

El **tercer método** es la medición de la gravedad en forma absoluta o relativa. La medición en INTI, se realizó con un gravímetro de péndulo en forma relativa, en junio de 1998. El valor de la gravedad y la incertidumbre asociada fueron:

$$g = ( 9,796\ 883\ 7 \pm 0,000\ 002\ 0 ) \text{ m/s}^2 \quad \text{Siendo la incertidumbre relativa } (0,2 \cdot 10^{-6}).$$

De manera similar, en marzo de 2014 fue realizada una medición absoluta aproximadamente a 540m al Oeste Noroeste del laboratorio de fuerza, en el punto RAGA IGN0 [17] del IGN. En el mismo se obtuvo un valor de **9,796 882 39** m/s<sup>2</sup>. Las coordenadas informadas fueron 34°34'21,6" latitud Sur y 58°30'58,8" longitud Oeste, así como una altitud de 18 m sobre el nivel del mar. En el informe no se presenta el valor de incertidumbre, aunque indica un desvío estándar de 0,02 mgal ( $2 \cdot 10^{-8}$ )

Lo ideal sería trasladar el valor medido utilizando un gravímetro en forma relativa, pero debido a que ello no fue posible, se trasladó el valor en forma analítica al sitio de implantación de la DW-FSM de 110 kN. Para ello hubo varias alternativas, las cuales se presentan a continuación:

- Corrigiendo sólo por altitud, utilizando el gradiente de gravedad por metro de cambio de altitud. Este método es sencillo, pero posee alta incertidumbre y baja confiabilidad.
- Obteniendo la diferencia entre los dos sitios utilizando la ecuación de Roman Schwartz y Andreas Lindau [7], la misma requiere de latitud y altitud. Este método es más confiable que el anterior, pero sigue presentando una alta incertidumbre.
- Obteniendo la diferencia entre los dos sitios utilizando el software SISProject [8]. Como tiene en cuenta la latitud, longitud y altitud, utilizando al mismo tiempo varios puntos de medición. Analíticamente este es el método más confiable, y debido a que estuvo disponible durante la presente investigación, fue el método utilizado.

Para validar que el método de traslación es válido, se utiliza el software SISProject en el punto RAGA IGN0, verificando la concordancia de valores, para luego trasladarlo al sitio de implantación de la DW-FSM de 110 kN y verificar la concordancia con el valor medido oportunamente en junio de 1998. Esto se presenta a continuación:

**Tabla 5. Corrección del valor RAGA IGNO por traslación a la ubicación de la DW-FSM de 110 kN.**

Método	Descripción	Valor [m/s <sup>2</sup> ]	Incertidumbre (k=2) 1·10 <sup>-6</sup>	Desvío Relativo 1·10 <sup>-6</sup>	Error Normalizado En
<b>Desvío relativo entre RAGA IGNO y SISProject</b>					
3	Medición absoluta - sitio RAGA 0	9,7968824	<b>0,2</b>	-	
2B	SISProject (PTB) - sitio RAGA 0	9,7968800	<b>0,5</b>	-0,24	-0,45
<b>Traslación del valor RAGA IGNO al sitio de implantación de la FSM de 110 kN</b>					
2B	SISProject (PTB) - sitio INTI	9,7968770	1,0		
	Medición RAGA 0 corregida a sitio INTI	9,7968794	<b>0,5</b>		

*Nota:* El valor de incertidumbre de  $0,2 \cdot 10^{-6}$  en la medición en RAGA IGNO se estima en función de las buenas prácticas de medición. En el caso de la incertidumbre de  $0,5 \cdot 10^{-6}$  en la traslación al sitio de implantación de la DW-FSM de 110 kN se estimó en un valor más bajo al del método SISProject, debido a que se trata de una medición diferencial.

Para concluir el tema, se presenta el grado de equivalencia entre las metodologías aplicadas y los valores medidos. Esto es para demostrar la aptitud de las distintas estimaciones y mediciones realizadas. Para ello se tomó como referencia el método 3 (1998) debido a que es el valor con el cual se define la magnitud actualmente.

**Tabla 6. Comparación entre valores estimados y medidos de gravedad local.**

Método	Descripción	Valor [m/s <sup>2</sup> ]	Incertidumbre (k=2) 1·10 <sup>-6</sup>	Desvío Relativo 1·10 <sup>-6</sup>	Error Normalizado En
1	Estimación por Schwartz y Lindau	9,7969000	<b>10,0</b>	1,66	0,17
2A	SISProject (PTB) con altitud automática	9,7968750	3,8	-0,89	0,23
2B	SISProject (PTB) con altitud ingresada	9,7968770	1,0	-0,68	0,67
3 (1998)	Medición relativa, IGM 1998	9,7968837	0,2	-	-
3 (2014)	Medición RAGA 0 corregida a sitio FSM	9,7968794	<b>0,5</b>	-0,44	0,82

*Nota:* Los valores de incertidumbre en "negrita" son estimados. El error normalizado se calculó según las reglas del arte, o sea como el valor absoluto del desvío relativo dividido la raíz cuadrada de la sumatoria de las incertidumbres de los métodos al cuadrado.

Como puede observarse en la tabla precedente, los errores normalizados se encuentran por debajo de 1, por lo cual todas las mediciones y estimaciones son consistentes. Igualmente, y descartando por su elevada incertidumbre el caso de la estimación por Schwartz y Lindau, los demás valores estimados se encuentran por debajo del valor medido, esto puede ser debido a un error sistemático en la medición de la altitud. Puede demostrarse en este caso que cambiando la altitud de 23 m a 21,22 m en el uso del SISProject, y en la traslación del punto RAGA IGNO, se obtiene un valor intermedio, el cual se presenta en la siguiente tabla:



**Tabla 7. Cambio en la altitud del sitio de implantación de la DW-FSM de 110 kN.**

Método	Descripción	Valor [m/s <sup>2</sup> ]	Incertidumbre (k=2) 1·10 <sup>-6</sup>	Desvío Relativo 1·10 <sup>-6</sup>	Error Normalizado En
2B	SISProject (PTB) con altitud ingresada	9,7968825	1,0	-0,12	0,12
3 (1998)	Medición relativa	9,7968837	0,2	-	-
3 (2014)	Medición RAGA 0 corregida a sitio FSM	9,7968849	<b>0,5</b>	0,12	0,22

Para concluir con el tema, y debido a la clara tendencia negativa de los valores estimados, se recomienda efectuar nuevamente la medición de la gravedad en el sitio de implantación de la DW-FSM de 110 kN, así como la determinación de la altitud, referenciándola a un punto fijo.

### 3.1.1.3 Densidad del aire. Determinación

El estado del arte sobre este tema fue expuesto en la sección 2.1.1.3, y en opinión del autor no hay comentarios ni propuestas de mejoras para este tipo de determinación.

A continuación se utiliza la Ecuación 2-5, para los posibles intervalos de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, obteniendo:

**Tabla 8. Cálculo de la densidad del aire en distintas condiciones atmosféricas.**

Grupo de Máquina	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Presión atmosférica [hPa]	Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]	Incertidumbre densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Incertidumbre total [kg/m <sup>3</sup> ]	Incertidumbre total relativa
1 (máxima)	18,0	40	1028	1,2267	0,0027	0,037	0,031
1 (mínima)	22,0	80	988	1,1571	0,0027		
1 (diferencia)	4,0	40,0	40,0	0,070	-		
2 (máxima)	19,0	50	1028	1,2213	0,0012	0,031	0,026
2 (mínima)	21,0	70	988	1,1627	0,0012		
2 (diferencia)	2,0	20,0	40,0	0,059	-		
3 (máxima)	19,5	55	1028	1,2185	0,0010	0,028	0,023
3 (mínima)	20,5	65	988	1,1654	0,0010		
3 (diferencia)	1,0	10,0	40,0	0,053	-		

**Nota:** Para las temperaturas se tomó una semi-amplitud de 2°C, 1°C y 0,5°C para los grupos de máquina 1, 2 y 3 respectivamente. Lo mismo para la humedad relativa que fue de 20%, 10% y 5% respectivamente.

La diferencia máxima respecto a la condición estándar es de 0,031; 0,026 y 0,023 para cada uno de los grupos. Se aplica el factor de sensibilidad ( $\rho_a/\rho_m$ ) de la Ecuación 2-3, y se multiplica dicho factor por la incertidumbre relativa obtenida en la Tabla 8. Obteniéndose:

**Tabla 9. Incertidumbre debida a la densidad del aire en distintas condiciones atmosféricas.**

Grupo de Máquina	$\rho_a$	$\rho_m$	$\rho_a/\rho_m$	Incertidumbre de la densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]	Incertidumbre relativa por densidad [1·10 <sup>-6</sup> ]	Comentarios
1 Acero	1,20	8000	1,5E-04	0,0315	3,9	Valor adecuado
1 Aluminio	1,20	2800	4,3E-04		11,2	Valor adecuado
2 Acero	1,20	8000	1,5E-04	0,0256	3,2	Valor adecuado
2 Aluminio	1,20	2800	4,3E-04		9,1	Se recomienda corregir valor
3 Acero	1,20	8000	1,5E-04	0,0231	2,9	Se recomienda corregir valor
3 Aluminio	1,20	2800	4,3E-04		8,3	No es adecuado utilizar aluminio

En la Tabla 8 se utilizó una amplitud de 2 °C, 1 °C y 0,5 °C para los distintos grupos de incertidumbre. Estos valores están en función de dos criterios, los cuales se presentan a continuación:

- La necesidad de reducir la incertidumbre que aporta la densidad del aire en función del cambio de la temperatura. Si bien podría tolerarse un mayor intervalo, el mayor aporte a la incertidumbre debería ser contrarrestado de una menor incertidumbre, por ejemplo, en la determinación de las masas, incrementando los costos y los cuidados sobre las mismas.
- La sensibilidad de los transductores de referencia y/o transferencia a la temperatura, sobre todo la sensibilidad bajo carga o *span*. En la sección 2.2.1 se presentaron las características metrológicas típicas de algunos transductores de alta exactitud, así como en la sección 2.2.1.2 se desarrolló el tema. Debido a que puede suponerse como buena sensibilidad un valor de  $10 \cdot 10^{-6}$  1/K, es necesario mantener la amplitud de temperatura dentro márgenes acotados.

Tanto la temperatura como la humedad son variables controlables dentro de las técnicas y costos habituales, mientras que pretender mantener un nivel de presión atmosférica, requiere de salas de laboratorio diseñadas específicamente para ello, con costos de inversión y operativos muy elevados; por lo cual se recomienda corregir los valores de fuerza determinados en función de la determinación de la presión atmosférica en los casos que sean necesarios. Aunque este tipo de corrección no es práctica habitual en el ámbito de la metrología de fuerza, el autor del presente informe recomienda la práctica, debido a que solamente se aplicaría en los patrones primarios y cuando se realicen trabajos que así lo ameriten.

Cabe destacar el cuidado especial que hay que tener en cuanto al cambio de la presión atmosférica del laboratorio respecto del exterior, sobre todo el generado por los sistemas de climatización y dependientes también de la calidad del sellado de la sala. Por esta razón se recomienda realizar la medición de presión atmosférica dentro de la sala donde se ubica la máquina de pesos suspendidos.



En el caso particular de la DW-FSM de 110 kN del INTI, la misma cuenta con un cerramiento de acrílico en la zona de las pesas. El recinto generado por este cerramiento, se encuentra con presión positiva, debido a la utilización de un pequeño forzador con un filtro que insufla aire limpio a esta zona, con la función de reducir la acumulación de polvo sobre las pesas. La máxima diferencia de presión medida entre el interior y exterior del recinto, fue de 0,2 hPa, valor que puede despreciarse al momento de calcular la densidad del aire, considerando adecuado medir la presión atmosférica en la sala donde está instalada la máquina.

### 3.1.1.4 Densidad de las masas. Determinación

En la sección 2.1.1.4 se presentó la metodología de determinación de la densidad utilizando la OIML R111-1 [6], así como el valor esperado que puede llegar a informar el fabricante.

Se analiza a continuación el uso de aceros al carbono e inoxidable, así como aleaciones de aluminio. Con el análisis siguiente, se puede llegar a determinar la viabilidad o no del uso de aleaciones de aluminio en cada grupo de incertidumbre planteado, así como la incertidumbre atribuible a la densidad de las pesas.

Se parte de la determinación del coeficiente de sensibilidad ( $\rho_a/\rho_m$ ), que surge de la aplicación de la **Ecuación 2-3**, obteniendo:

$$\begin{array}{l} \text{Acero inoxidable y acero al carbono:} \quad (1,2 / 8000) = 1,5 \cdot 10^{-4} \\ \text{Aleaciones de aluminio:} \quad (1,2 / 2800) = 4,3 \cdot 10^{-4} \end{array}$$

Luego se calcula la incertidumbre relativa de la determinación de la densidad. Para el caso de utilizar los datos provistos por el fabricante del material, se tiene lo siguiente:

$$\begin{array}{l} \text{Acero inoxidable y acero al carbono:} \quad (50 / 8000) = 6,25 \cdot 10^{-3} \\ \text{Aleaciones de aluminio:} \quad (50 / 2800) = 17,86 \cdot 10^{-3} \end{array}$$

Multiplicando estos valores de incertidumbre, por el factor de sensibilidad, se obtiene la incertidumbre debida a la densidad de las masas:

$$\begin{array}{l} \text{Acero inoxidable y acero al carbono:} \quad 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 6,25 \cdot 10^{-3} = 1,0 \cdot 10^{-6} \\ \text{Aleaciones de aluminio:} \quad 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot 17,86 \cdot 10^{-3} = 7,7 \cdot 10^{-6} \end{array}$$

Como puede observarse en el caso del acero, los valores son suficientemente bajos para los 3 grupos de incertidumbre planteados, igualmente se recomienda medir y/o estimar la densidad de las masas con mayor exactitud para el grupo 3, o sea para incertidumbres menores a  $1 \cdot 10^{-5}$ . En el caso



del aluminio, la medición de la densidad es necesaria para el grupo 2, y no es recomendable su utilización en el grupo 3.

En el caso de medir la densidad de las masas, los valores de incertidumbre esperables son:

$$\text{Acero inoxidable y acero al carbono:} \quad 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 5,0 \cdot 10^{-4} = 7,5 \cdot 10^{-8}$$

$$\text{Aleaciones de aluminio:} \quad 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} = 43,0 \cdot 10^{-8}$$

Como puede observarse, en ambos casos las incertidumbres obtenidas son muy bajas por lo cual su contribución al balance de incertidumbres será pequeña.

Si se decide determinar la densidad del material, y en caso de no ser posible realizar el ensayo sobre la pesa completa debido a temas operativos como ser su alto peso o su gran volumen, pueden tomarse muestras del mismo material. No es necesario realizar la medición para cada pesa, sino una por cada lote de fabricación del material representativo.

En el caso de que un elemento, como por ejemplo el marco de carga presente distintos materiales, incluso aluminio y acero, es conveniente calcular la densidad pondera del conjunto, o sea realizar la sumatoria de las densidades multiplicadas por sus masas, y luego dividir esta sumatoria por la masa total. La incertidumbre obtenida de la densidad del conjunto se determina de manera similar.

Cabe señalar que cada escalón de carga, materializado por una pesa, estará conformado por el ensamble de varias piezas, cuyas procedencias serán distintas, incluso en el caso que la clasificación normativa de dicho material sea la misma. Las densidades informadas por el fabricante, u obtenidas por medición sólo representan a un mismo lote, por lo cual hay que tener cuidado en no asignar estas incertidumbres, generalmente bajas, a otros elementos.

### 3.1.1.5 Definición de la magnitud para la máquina de pesos suspendidos de 110 kN

Antes de presentar los resultados específicos sobre la DW-FSM de 110 kN del INTI, y a modo orientativo para la definición de la magnitud utilizando máquinas de pesos suspendidos con los distintos niveles de incertidumbre representados por los tres grupos nombrados en la sección 2.1, se procede de la siguiente manera:

A través del uso de la Ecuación 2-2, la Ecuación 2-3, y los análisis realizados en las secciones 3.1.1.1 a 3.1.1.4 se confeccionó la tabla que se presenta a continuación, en la cual se aplicaron los distintos métodos presentados para alcanzar un nivel de incertidumbre adecuado a cada grupo de incertidumbre definido.



Tabla 10. Elección de las metodologías a aplicar en función de la incertidumbre final requerida.

Magnitud de definición	Símbolo	Unidad	Factor de sensibilidad	Método	$U$ $k=2$ [ $1 \cdot 10^{-6}$ ]
<b>GRUPO 1 (<math>5 \cdot 10^{-5} &lt; U &lt; 1 \cdot 10^{-4}</math>)</b>					
Masa	m	kg	$m$	OIML R111-1 ajuste F2, clase M1	15,0
Gravedad	g	$m/s^2$	$g$	SISProject (altitud interpolada)	4,0
Densidad del aire	$\rho_a$	$kg/m^3$	$\rho_a/\rho_m$	sin corregir	3,3
Densidad de las masas	$\rho_m$	$kg/m^3$	$\rho_a/\rho_m$	Composición de la aleación	2,7
<b>Incertidumbre</b>	<b><math>U</math></b>	<b><math>N</math></b>			<b>16,1</b>
<b>GRUPO 2 (<math>1 \cdot 10^{-5} &lt; U &lt; 2 \cdot 10^{-5}</math>)</b>					
Masa	m	kg	$m$	OIML R111-1 ajuste F1, clase F2	5,0
Gravedad	g	$m/s^2$	$g$	SISProject (altitud medida), o por gravimetría relativa	1,5
Densidad del aire	$\rho_a$	$kg/m^3$	$\rho_a/\rho_m$	sin corregir	3,3
Densidad de las masas	$\rho_m$	$kg/m^3$	$\rho_a/\rho_m$	datos fabricante	1,0
<b>Incertidumbre</b>	<b><math>U</math></b>	<b><math>N</math></b>			<b>6,2</b>
<b>GRUPO 3 (<math>U &lt; 1 \cdot 10^{-5}</math>)</b>					
Masa	m	kg	$m$	OIML R111-1 ajuste E2, clase F1	1,50
Gravedad	g	$m/s^2$	$g$	Gravimetría relativa u absoluta	0,20
Densidad del aire	$\rho_a$	$kg/m^3$	$\rho_a/\rho_m$	corregir en tiempo real	0,2
Densidad de las masas	$\rho_m$	$kg/m^3$	$\rho_a/\rho_m$	medido	0,2
<b>Incertidumbre</b>	<b><math>U</math></b>	<b><math>N</math></b>			<b>1,53</b>

*Nota* : En todos los casos se utilizó acero, en caso de utilizar aluminio, y a modo orientativo la incertidumbre por densidad del aire, y de las pesas se obtiene multiplicandola por 2,86.



Este mismo análisis, pero para el caso en particular de la definición de la unidad para la máquina de pesos suspendidos de 110 kN del INTI, es el siguiente:

**Tabla 11. Balance de incertidumbre para la definición de la magnitud de la DW-FSM de 110 kN.**

$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,7968837	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,199	$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	7850
$\sigma_g$ (m/s <sup>2</sup> )	0,0000020	$\sigma_{\rho a}$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,026	$\sigma_{\rho m}$ (kg/m <sup>3</sup> )	50

ld	m [kg]	$\sigma_m$ [kg]	F [N]	$\Delta F$ 1·10 <sup>-6</sup>	$\sigma_F/F + \Delta F$ 1·10 <sup>-6</sup>
Marco de carga 2 kN	204,1778	0,001	2000,001	0,3	6,4
Pesa 1 - 2kN	204,1778	0,001	2000,001	0,3	6,4
Pesa 2 - 1kN	102,0889	0,001	1000,000	0,3	6,4
Pesa 3 - 1kN	102,0889	0,001	1000,000	0,3	6,4
Pesa 4 - 2kN	204,1778	0,001	2000,001	0,3	6,4
Pesa 5 - 2kN	204,1778	0,001	2000,001	0,3	6,4
Pesa 6 - 2kN	204,1778	0,001	2000,001	0,3	6,4
Pesa 7 - 2kN	204,1778	0,001	2000,001	0,3	6,4
Pesa 8 - 1kN	102,0889	0,001	1000,000	0,3	6,4
Pesa 9 - 1kN	102,0889	0,001	1000,000	0,3	6,4
Pesa 10 - 2kN	204,1778	0,001	2000,001	0,3	6,4
Pesa 11 - 2kN	204,1778	0,001	2000,001	0,3	6,4
Pesa 12 - 2kN	204,1778	0,001	2000,001	0,3	6,4
Pesa 13 - 3kN	306,2666	0,002	3000,000	0,0	6,1
Pesa 14 - 5kN	510,4444	0,003	5000,001	0,1	6,2
Pesa 15 - 5kN	510,4444	0,003	5000,001	0,1	6,2
Pesa 16 - 5kN	510,4444	0,003	5000,001	0,1	6,2
Pesa 17 - 5kN	510,4444	0,003	5000,001	0,1	6,2
Pesa 18 - 5kN	510,4444	0,003	5000,001	0,1	6,2
Pesa 19 - 5kN	510,4444	0,003	5000,001	0,1	6,2
Pesa 20 - 5kN	510,4444	0,003	5000,001	0,1	6,2
Pesa 21 - 10kN	1020,889	0,005	10000,003	0,3	6,4
Pesa 22 - 10kN	1020,889	0,005	10000,003	0,3	6,4
Pesa 23 - 10kN	1020,889	0,005	10000,003	0,3	6,4
Pesa 24 - 10kN	1020,889	0,005	10000,003	0,3	6,4
Pesa 25 - 10kN	1020,889	0,005	10000,003	0,3	6,4

Como puede verse, y por aplicación de la Ecuación 2-3, se obtuvo la incertidumbre estándar de cada escalón de carga debido a la definición de la magnitud. Esta tabla, guarda cierta relación con el grupo 2 de la Tabla 10. La incertidumbre estándar es aproximadamente de  $6,4 \cdot 10^{-6}$ , valor lógico y aceptable para definir una CMC de  $2 \cdot 10^{-5}$ .



### 3.1.2. Magnitudes de influencia

En la sección 2.1.2 se presentó el marco teórico y el estado del arte de las magnitudes de influencia referidas a la realización de la magnitud, o sea las que forman parte de la máquina de pesos suspendidos. En la presente sección se realizan los cálculos y estimaciones respectivas para el caso particular de la máquina de pesos suspendidos de 110 kN del INTI. Asimismo, en cada tema se realizan algunos comentarios para la generalidad de los casos.

#### 3.1.2.1 Fuerzas laterales ( $F_x$ y $F_y$ ), momentos flectores ( $M_x$ , $M_y$ ) y momento torsor ( $M_z$ ).

Este es un tema muy importante para definir la magnitud aunque la guía EURAMET cg-4 [2] no lo exija para realizar la declaración de capacidades de medición por ruta B. El mismo es presentado en la sección 3.1.3.1, debido a que se realizaron varios tipos de mediciones y determinaciones al respecto.

#### 3.1.2.2 Atracción electrostática y magnética entre las pesas

Como se concluyó en la sección 2.1.2.2, **las cargas electrostáticas** son despreciables en función de la pequeña diferencia de potencial que puede llegar a haber entre las pesas en cuestión.

Existe la posibilidad de un efecto que no se nombró en la sección 2.1.2.2 y es el debido a que en el caso de pesas de acero al carbono y cuando la diferencia de potencial entre las misma está dada por una corriente alterna, se generará una *fem inducida*<sup>31</sup>. Es necesario entonces medir la diferencia de potencial y ver su naturaleza alterna. En el caso de la máquina del INTI, la diferencia de potencial es de carácter básicamente continuo y es debida al cierre de un circuito eléctrico que indica al usuario el rozamiento entre las pesas apoyadas en la estructura y las colgadas del marco de carga. Por lo cual se concluye que los campos magnéticos generados por la fem inducida son despreciables.

Respecto a la **atracción magnética**, hay que destacar que la máquina en cuestión posee pesas de acero al carbono tipo DIN St52-3, el cual tiene un contenido de carbono inferior a 0,22%, silicio menor a 0,55%, manganeso menor a 1,60%, y bajo nivel de impurezas como fósforo y azufre. Las mismas poseen un recubrimiento de níquel químico de 25 a 30  $\mu\text{m}$ . Este tipo de material es ferromagnético, y se requiere tener especial atención en cuanto a la magnetización residual que pudo haber quedado producto de los procesos de fabricación, así como la posibilidad de tomar magnetismo en forma accidental.

---

<sup>31</sup> Fuerza electromotriz inducida, se da cuando existe un campo eléctrico variable y/o alterno y en presencia de materiales magnetizables.



No se realizó un estudio en particular de la situación, igualmente se concluye que el efecto es despreciable<sup>32</sup>, debido a que no se evidenció cambios en la indicación de transductores de fuerza de alta resolución y exactitud con el cambio de la distancia entre las pesas.

La recomendación OIML R111-1 [6], en su capítulo 9 pide una máxima polarización en función de la clase de pesa. Según sea el caso, se estará en la clase F2, F1, e incluso en la E2. Este tema hay que consultarlo con el departamento de masas del instituto que realiza la determinación de la misma. En opinión del autor, si la pesa cumple con la clase OIML que asegura la incertidumbre y desvío necesarios, es razón suficiente para considerar despreciable los efectos en la máquina de pesos suspendidos.

Cabe destacar que lo desarrollado en la sección 2.1.2.2 y en la presente se refiere a máquinas de operación secuencial, o sea en las que una pesa se va cargando a continuación de la otra, con una secuencia fija e invariable. Esto genera una sola interfase entre una pesa generando el valor de fuerza correspondiente sobre el instrumento a medir y la estructura de la máquina, así como una sola interfase entre dos pesas, de las cuales una descansa en la estructura de la máquina y la otra se encuentra cargada sobre el instrumento a medir. En el caso de la DW-FSM de 110 kN del INTI, la primera interfase, o sea entre estructura de la máquina y la primera pesa colgando hay una luz de 35 mm  $\pm$  5 mm; mientras que la interfase entre pesas (una apoyada en la estructura y la otra colgando del instrumento a medir), posee una distancia de 15 mm  $\pm$  1 mm.

En el caso de máquinas de operación binaria, las cuales funcionan por la combinación de pesas de selección independiente, la cantidad de interfases que se generan entre pesas colgadas del instrumento y apoyadas en la estructura, será mayor a dos, y dependerá tanto de la máquina en cuestión, como del punto de medición debido a la combinatoria utilizada.

### 3.1.2.3 *Atracción gravitatoria entre las pesas*

Como se mencionó en la sección 2.1.2.3 esta magnitud resulta en general despreciable.

A continuación, se realiza el análisis de la atracción gravitatoria entre las pesas de la DW-FSM de 110 kN del INTI. Las mismas pueden considerarse simétricas respecto al eje en el que actúan, además sólo interesa conocer los efectos de la atracción entre las masas sobre el eje que actúa la gravedad terrestre (eje Z), por lo cual la ecuación vectorial de gravitación universal puede ser utilizada en forma escalar, siendo la misma:

---

<sup>32</sup> Debido a que las fuerzas electroestáticas y las fuerzas magnéticas son función de la distancia al cuadrado, utilizando transductores de fuerza de alta exactitud puede determinarse la incidencia, en forma empírica, de estos fenómenos por medio de la variación de la distancia entre las pesas.



$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Ecuación 3-1

La situación más desfavorable en una máquina primaria de fuerza, es cuando está actuando la primera pesa, que generalmente es la más pequeña, mientras que todas las demás están apoyadas en la estructura de la máquina.

En el caso de la máquina de 110 kN, esta situación se da entre el marco de carga (2 kN) y la primera pesa de valor individual 2 kN. En el caso del marco de carga, el mismo posee un disco de 700 mm de diámetro y espesor 40,0 mm, cuya masa estimada es de 120,80 kg. La primera pesa subsiguiente posee 700 mm de diámetro, un espesor de 77,6 mm y una masa de 204,18 kg. La distancia entre las superficies de ambos discos es de 15 mm  $\pm$  1 mm cuando la primera se encuentra solidaria al instrumento a medir y la segunda apoyada en la estructura. Esto genera una distancia entre centros de gravedad de 73,8 mm. Por aplicación de la Ecuación 3-1 se tiene:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = 6,67191 \cdot 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2} \cdot \frac{120,80 kg \cdot 204,18 kg}{(0,0738 m)^2} = 3,02 \cdot 10^{-4} N$$

*Nota:* El valor de la constante universal utilizado es el determinado en el año 1999, igualmente el pequeño cambio entre distintas fuentes bibliográficas es irrelevante para este tipo de cálculo.

Si al valor recién obtenido se lo refiere al valor de 2 kN que forma el marco de carga, se obtiene la incidencia de la atracción gravitatoria entre pesas en forma relativa, o sea:

$$Incidencia = \frac{F_{grav}}{F_{marco}} = \frac{3,02 \cdot 10^{-4} N}{2000 N} = 1,5 \cdot 10^{-7}$$

Como puede verse, el efecto de la atracción gravitatoria para la máquina del INTI es despreciable.

Como complemento al presente análisis, se puede presentar el caso de las mediciones de la gravedad local, realizadas por el PTB en su laboratorio de fuerza. El estudio y análisis es presentado en su trabajo *Investigation in the local gravity field of a force laboratory of PTB* [18], en el mismo se realizaron mediciones absolutas antes y después del montaje de su máquina de pesos suspendidos de 2 MN. La instalación de la DW-FSM de 2 MN se ubicó en la estación de gravedad N° 5. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 12. Valores de gravedad obtenidos antes y después del montaje de la DW-FSM de 2MN del PTB.**

Ubicación	Altitud [m]	Medición anterior		Medición posterior		Variación relativa [ $10^{-6}$ ]
		Gravedad medida [ $m/s^2$ ]	Desvío estandar [ $10^{-6} m/s^2$ ]	Gravedad medida [ $m/s^2$ ]	Desvío estandar [ $10^{-6} m/s^2$ ]	
a	67,825	9,812535487	0,077	9,812534909	0,035	0,059
b	71,530	9,812527396	0,065	9,812526816	0,035	0,059
c	75,285	9,812518570	0,050	9,812519156	0,026	-0,060
d	79,345	9,812507402	0,060	9,812507466	0,032	-0,007
e	82,635	9,812498025	0,073	9,812497976	0,033	0,005
				Variación media		0,011

Como puede observarse en la tabla anterior, la variación media del valor de la gravedad antes y después del montaje de la máquina de 2 MN es de  $0,011 \cdot 10^{-6} m/s^2$ , lo cual resulta despreciable. Puede observarse que los valores del desvío estándar son del orden del 30% al 60% de la variación obtenida, y por ello las diferencias entre la variación relativa en los distintos puntos pueden asignarse en parte a un comportamiento aleatorio, el cual es cuantificado por el desvío estándar.

Con este análisis se quiere demostrar que la incidencia de la atracción gravitatoria es en general despreciable. En este caso se agregó en la zona de medición una masa aproximada de 280 000 kg, y sin embargo la variación de la gravedad no varió en forma significativa.

En esta sección, cabe el mismo análisis que para la sección 3.1.2.2, por lo cual para máquinas de operación binaria, los resultados serán en general mayores y deberá analizarse en función de cada máquina y para cada combinación de pesas en particular.

#### 3.1.2.4 Flujo de aire. Fuerza de arrastre y principio de Bernoulli.

En la sección 2.1.2.4 se presentó el estudio realizado por el INRiM en sus máquinas de 100 kN y 1 MN respectivamente, donde el flujo era eminentemente vertical, en el mismo habían determinado la fuerza de arrastre generado sobre la primera pesa. Asimismo, se presentó el estudio realizado por el NPL en su máquina de 1,2 MN, en cuyo caso el flujo era eminentemente horizontal, y habían determinado las fuerzas generadas por aplicación del principio de Bernoulli.

En el caso de la máquina de pesos suspendidos de 110 kN del INTI, donde las pesas de la misma, al igual que en la mayoría de los casos, se encuentra cerrada por acrílicos traslúcidos, que además de reducir la velocidad del aire prácticamente a cero, reduce substancialmente la acumulación de polvo y mejora la estabilidad térmica. Igualmente, en esta sección se analiza el efecto que generaría una corriente de aire como si ese recubrimiento no estuviese, siendo el flujo en este caso horizontal.



Para ello se analiza la fuerza de arrastre que generará una fuerza horizontal, y por aplicación del principio de Bernoulli, se determinará la fuerza vertical.

La **fuerza de arrastre** estará aplicada sobre el baricentro de la proyección de las pesas. En este caso, se puede separar la proyección que generan las pesas de 1 kN, 2 kN y 3 kN, cuyo ancho es de 700 mm, la altura total de las mismas es de 1061 mm y el baricentro de la proyección posee una distancia a la articulación, o sea donde se aplica la carga al instrumento, de 1352 mm. En el caso de las pesas de 5 kN y 10 kN, el ancho es de 1226 mm, la altura total de 1314 mm, y la distancia del baricentro de la proyección a la articulación es de 2491 mm.

Para el cálculo se contempla que no pasa aire entre las pesas, o sea se considera al conjunto de las mismas con un sólido único, obteniéndose así un valor conservador.

A continuación se determina la fuerza para cada subconjunto de pesas utilizando la **Ecuación 2-8**:

$$F_{D_{-1}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot V^2 \cdot A \cdot C_D = \frac{1}{2} \cdot 1,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot 0,700\text{m} \cdot 1,061\text{m} \cdot 1,0 = 4,46 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{D_{-2}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot V^2 \cdot A \cdot C_D = \frac{1}{2} \cdot 1,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot 1,226\text{m} \cdot 1,314\text{m} \cdot 1,0 = 9,67 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Donde:

$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	densidad del aire.
S	[m <sup>2</sup> ]	proyección del área perpendicular a la cual actúa el flujo de aire.
C <sub>D</sub>		coeficiente de arrastre, en función de la geometría.
V	[m/s]	velocidad relativa entre el flujo de aire y la pieza donde incide.

En las ecuaciones anteriores se utilizó un coeficiente de arrastre de 1,0 debido a que la geometría analizada puede asimilarse a un cilindro.

En la sección 2.1.3 se presentó el tema de las fuerzas laterales y los momentos flectores, si se aplica la **Ecuación 2-9**, la variación en la fuerza en el eje vertical será:

$$\frac{\Delta F_z}{F_z} = \frac{F_x^2 + F_y^2}{2 \cdot F_z^2} = \frac{(4,46 \cdot 10^{-3} \text{ N} + 9,67 \cdot 10^{-3} \text{ N})^2}{2 \cdot (100000 \text{ N})^2} = 1,0 \cdot 10^{-14} \quad \text{Valor despreciable.}$$

Si se aplica la **Ecuación 2-11**, para determinar la inclinación del marco de carga se obtiene:

$$\theta_x = \frac{F_x}{F_z} = \frac{4,46 \cdot 10^{-3} \text{ N} + 9,67 \cdot 10^{-3} \text{ N}}{100000 \text{ N}} = 1,41 \cdot 10^{-7} \quad \text{Valor también despreciable.}$$



Para determinar la fuerza vertical, es de aplicación el principio de conservación de la energía, o **principio de Bernoulli**, para obtener la situación más comprometida en el caso de la DW-FSM de 110 kN del INTI, habría que aplicar la misma con sólo el marco de carga actuando sobre el instrumento a medir.

En este caso, el marco de carga posee un disco de 700 mm de diámetro y 40 mm de espesor, el cual se encuentra separado 35 mm de la estructura de la máquina, y 15 mm respecto de la pesa de 2 kN que le sigue en la secuencia y que está apoyada en la estructura.

Primero, y por aplicación de la ecuación de conservación de la masa de Lavoisier, y suponiendo flujo incompresible, debido a que los pequeños cambios de presión experimentados por el aire no varían significativamente el valor de su densidad, se puede determinar la velocidad entre las pesas:

$$Q = cte \rightarrow V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \rightarrow V_1 \cdot \text{Alto}_{total} = V_2 \cdot \text{Espacio}_{total} \rightarrow V_2 = V_1 \cdot \frac{\text{Alto}_{total}}{\text{Espacio}_{total}} \rightarrow$$
$$\rightarrow V_2 = 0,10 \frac{m}{s} \cdot \frac{128,8mm}{50mm} = 0,2576 \frac{m}{s}$$

A continuación, se aplica la ecuación de Bernoulli para determinar la diferencia de presión entre el ambiente y en la zona entre las pesas, y con ello la fuerza vertical generada.

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + Z_2 \rightarrow P_2 - P_1 = \rho \cdot \left[ \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right] \rightarrow$$
$$\rightarrow P_2 - P_1 = 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot \left[ \frac{\left(0,10 \frac{m}{s}\right)^2 - \left(0,2576 \frac{m}{s}\right)^2}{2} \right] = -0,034 Pa$$

Donde:

$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	densidad del fluido, en este caso la densidad del aire.
V	[m/s]	velocidad del fluido.
P	[Pa]	presión absoluta.
.g	[m/s <sup>2</sup> ]	aceleración de la gravedad.
Z	[m]	altura geométrica, se desprecia para el aire.

Para obtener la incidencia de la fuerza que actúa en forma vertical, se multiplica esta diferencia de presión obtenida por el área de la pesa en cuestión, y se la divide por la fuerza generada por la máquina, obteniéndose:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{(P_2 - P_1) \cdot \text{Area}}{\text{Fuerza}_{Pesa}} = \frac{-0,034 Pa \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,700m)^2}{2000N} = -6,5 \cdot 10^{-6}$$



Este valor no es para nada despreciable. El signo negativo indica que la fuerza es hacia abajo, por lo que se suma al valor generado por la máquina. Igualmente, en este caso se consideró al sistema sin ningún tipo de pérdidas, por lo cual el valor obtenido es el máximo teórico negativo. En el caso real, donde las pérdidas no son despreciables, gran parte de la energía cinética que trae el fluido será en parte disipada por fricción entre las capas de fluido que se moverán a distintas velocidades en función de su distancia a los márgenes sólidos.

En el caso que la disipación de energía sea completa, o sea que toda la energía cinética se transforma en energía de presión entre las pesas, es de aplicación la ecuación de cantidad de movimiento, cuya expresión referida al valor de fuerza generada vale:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot A}{F} = \frac{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot (0,700\text{m} \cdot 0,1288\text{m})}{2000\text{N}} = 0,54 \cdot 10^{-6}$$

Donde:

$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	densidad del fluido, en este caso la densidad del aire.
V	[m/s]	velocidad del fluido.
A	[m <sup>2</sup> ]	área de circulación del aire.

En este caso el valor es positivo, indicando que la fuerza se resta del valor generado por la máquina, siendo este valor el máximo teórico positivo, así todo, su incidencia es despreciable.

Asimismo, para un laboratorio con máquinas de pesos suspendidos, es importante mantener velocidades de aire inferiores a por ejemplo 0,10 m/s. Si bien este valor puede ser medido con instrumental específico, puede ser suficiente con no notar corrientes de aire en el ambiente. Este último criterio es adecuado debido a que la mayoría de las personas empiezan a sentir la brisa en velocidades de aproximadamente 0,08 m/s.

En el caso de máquinas de operación binaria es necesario considerar los criterios mencionados en las secciones anteriores.

### 3.1.2.5 Orientación geográfica y magnética

En la sección 2.1.2.5 se concluyó que la orientación geográfica no interviene, debido a que la misma es contemplada en conjunto con la medición de la gravedad local, mientras que en el caso del campo magnético terrestre, las máquinas construidas en acero inoxidable austenítico y aleaciones de aluminio, al no ser magnéticas, no presentan inconvenientes al respecto, incluso tampoco parecen ser afectadas por campos magnéticos mayores causados por motores de inducción cercanos.



Igualmente, en máquinas primarias de grandes dimensiones (normalmente mayores a los 20 kN), está generalizada la utilización de aceros al carbono, con recubrimientos de níquel químico. Tanto el acero al carbono, como el níquel del recubrimiento son altamente magnetizables, la permeabilidad magnética del acero es muy alta (aproximadamente 7000 veces mayor que la del aire) y la remanencia del magnetismo depende fundamentalmente del porcentaje de carbono y aleantes.

Las líneas del campo magnético terrestre se pueden considerar paralelas a la corteza terrestre en las zonas del Ecuador, mientras que podrán considerarse perpendiculares a la misma en los polos. Por convención se adopta que dichas líneas salen del polo norte y entran en el polo sur.

La dirección de estas líneas es la dirección de acción de la fuerza magnética terrestre sobre los objetos en los que actúa. Esta inclinación, respecto a la horizontal se denomina "inclinación magnética", y es aproximadamente igual a la latitud del lugar. En el caso de Buenos Aires que está a 34,577° latitud Sur, presenta mediciones de inclinación magnética de aproximadamente -39°. Así como el valor determinado en el mismo sitio ronda los 0,5 Gauss.

Este tema no fue resuelto durante la presente investigación, quedando pendiente para futuras investigaciones. Igualmente, no parece ser un factor que introduzca un error más allá de  $1 \cdot 10^{-6}$  a  $2 \cdot 10^{-6}$ .

### **3.1.3. Medición con dinamómetro de seis componentes y metodología de verificación**

En esta sección se presentan las mediciones llevadas a cabo para estudiar las magnitudes de influencia en la realización de la unidad, y las acciones llevadas a cabo para reducir dichas magnitudes.

#### **3.1.3.1 Medición con dinamómetro de seis componentes**

En esta sección se presenta el trabajo realizado desde diciembre de 2008 a setiembre de 2009 utilizando un dinamómetro de seis componentes. El mismo estaba compuesto por un transductor de múltiples componentes de la firma GTM, de la serie MKA y de 160 kN de capacidad máxima. Este se utilizó asociado a un amplificador digital de 8 canales de la firma HBM, modelo QuantumX MX840 AC. Las principales características metrológicas de ambos instrumentos se presentan a continuación:

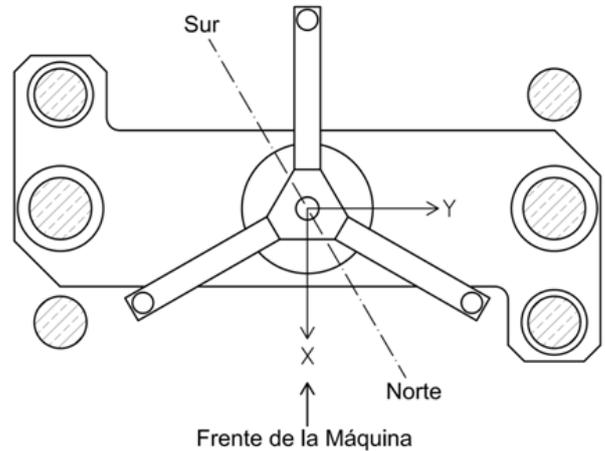
**Tabla 13. Características metrológicas del transductor multicomponente GTM MKA de 160 kN.**

Descripción	Símbolo	Valor	Sensibilidad [mV/V]
Capacidad máxima vertical	Fz [kN]	160	0,505
Cargas laterales	Fx, Fy [kN]	160	2,842 / 2,850
Momentos flectores	Mx, My [kN·m]	8	1,270 / 1,256
Momento torsional	Mz [kN·m]	8	1,538
Error de linealidad	.d <sub>lin</sub>	0,2 %	
Histéresis	.h	0,1 %	
Repetibilidad a fondo de escala	.b'	0,01 %	
Temperatura en cero (1 K)	TKc	0,004 %	
Temperatura en <i>span</i> (1 K)	TKo	0,0025 %	
Creep (20 min)	.c	0,05 %	
<b><i>Incertidumbre esperada (k=2)</i></b>		<b>0,50 %</b>	

**Tabla 14. Características metrológicas del amplificador digital HBM QuantumX MX840 AC.**

Descripción	Símbolo	Valor %
Error de linealidad	.fo	0,02
Temperatura en cero (1 K)	TKc	0,002
Temperatura en <i>span</i> (1 K)	TKo	0,005
<b><i>Incertidumbre esperada (k=2)</i></b>		<b>0,05</b>

Es importante definir los ejes de medición para poder referenciar los resultados a los mismos. A continuación, se presenta la ubicación de dichos ejes en el plano XY, así como la imagen del dinamómetro montado en la DW-FSM de 110 kN. El eje Z fue tomado positivo hacia arriba.



**Ilustración 14. Dinamómetro GTM-MKA de 160 kN, y definición de los ejes de coordenadas a utilizar.**

La secuencia de medición fue diseñada para medir las componentes parásitas cuando la carga de la máquina de pesos suspendidos es aplicada sobre el transductor de seis componentes, en la condición en que el sistema oscile libremente (situación estática) y durante los transitorios de carga (situación dinámica).

Las mediciones fueron llevadas a cabo con el dinamómetro en 5 posiciones angulares ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $360^\circ$ ). El giro se realiza en forma horaria visto desde arriba. Es importante hacer notar que al realizar el giro, los ejes definidos sobre el propio transductor cambian respecto de los ejes definidos para la máquina, por lo cual en cada posición de montaje es necesario mantener los ejes de referencia de la máquina. Por ejemplo, en  $0^\circ$  coinciden los ejes X e Y de transductor y máquina, pero en  $90^\circ$  el Eje X de la máquina es el Eje Y del transductor, mientras que el Eje Y de la máquina es el Eje  $-X$  del transductor.

En cada posición de montaje, se realizaron dos precargas de 100 kN, de tres minutos de duración cada una. Las mediciones fueron realizadas sólo para cargas crecientes y los escalones utilizados fueron: 0, 20 kN, 40 kN, 60 kN, 80 kN y 100 kN; en cada escalón de fuerza, la carga fue mantenida durante un minuto.

El amplificador digital fue conectado a un PC y los datos fueron registrados en tiempo real, con una frecuencia de 4 Hz. Esta frecuencia fue adoptada para determinar las cargas dinámicas generadas en el transitorio que sucede durante la aplicación de carga.

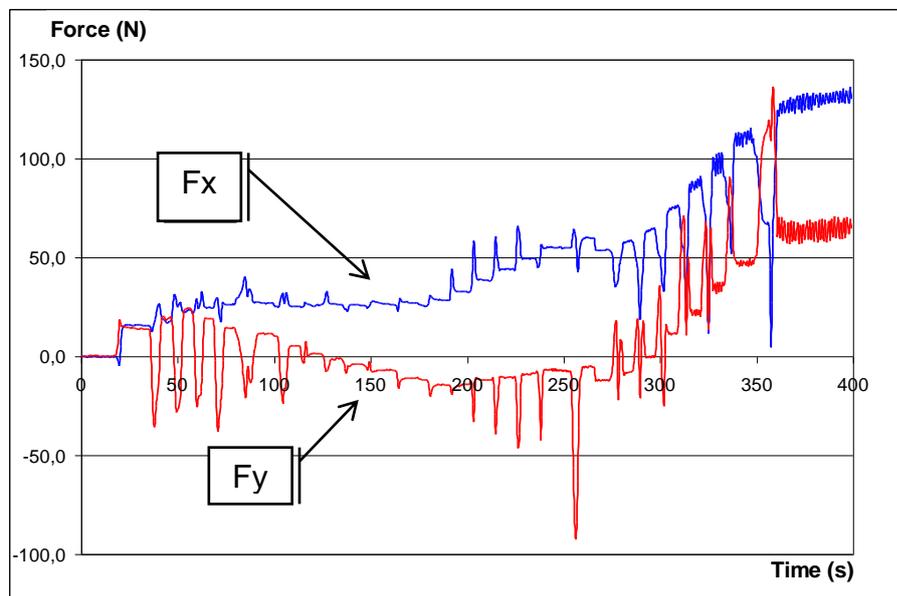
Las mediciones en las distintas posiciones de montaje se realizaron para reducir los efectos de los errores sistemáticos que pueden ser debidos al propio transductor, así como para verificar que la po-



sición de montaje fue adecuada, mientras que el cierre de la medición en la misma posición se realizó para verificar que el posicionamiento fue adecuado, así como para determinar posibles derivas temporales a corto plazo.

La temperatura fue mantenida en el entorno de  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , debido a la alta sensibilidad que evidenciaba tanto el dinamómetro como el amplificador. Para lograr esta condición, se realizaron varios ajustes momentáneos sobre el sistema de control de la climatización, así como la protección con una pantalla que redujo la variación en la zona del transductor. Asimismo el amplificador fue colocado dentro de un recinto parcialmente ventilado con el mismo propósito.

Se presentan a continuación lecturas obtenidas antes de realizar cualquier ajuste sobre la máquina.



**Ilustración 15. Primer medición con dinamómetro de seis componentes – Cargas laterales.**

Como puede observarse, las cargas laterales a fondo de escala llegan a aproximadamente 130 N en el caso del Eje X y de 60 N en el caso del Eje Y, utilizando la Ecuación 2-9 se obtiene:

$$\frac{\Delta F_z}{F_z} = \frac{F_x^2 + F_y^2}{2 \cdot F_z^2} = \frac{(130\text{N})^2 + (60\text{N})^2}{2 \cdot (100000\text{N})^2} \cong 1 \cdot 10^{-6} \quad \text{Valor aceptable.}$$

Igualmente, en la ilustración se observan grandes picos debido a componentes dinámicos que es necesario reducir.

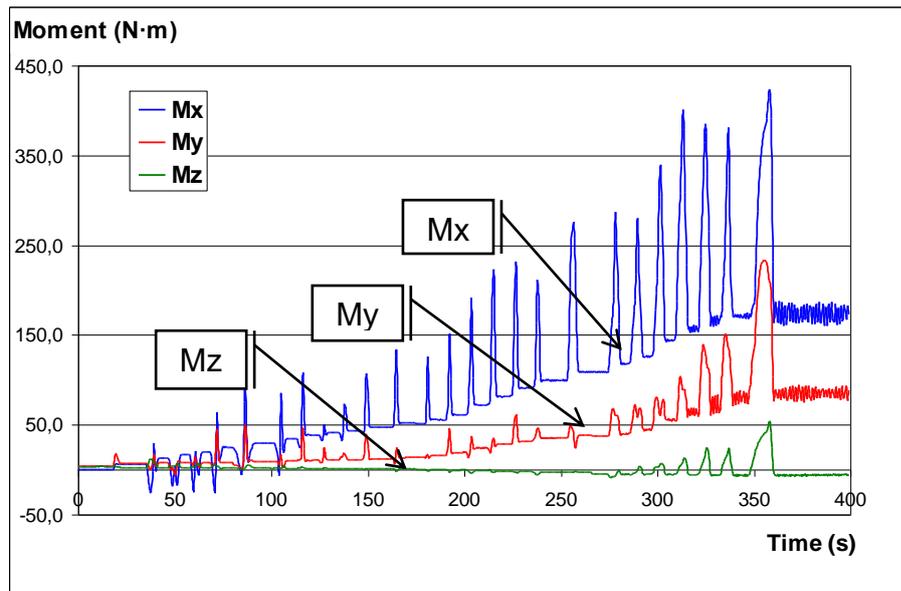


Ilustración 16. Primer medición con dinamómetro de seis componentes – Momentos flector y torsor.

En el caso de los momentos flectores, los mismos alcanzan valores importantes, aunque el mayor efecto que se evidencia es una gran componente dinámica. Por aplicación de la Ecuación 2-10, puede obtenerse:

$$\Delta x = \frac{M_x}{F_z} = \frac{170 \text{ N}\cdot\text{m}}{100000 \text{ N}} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,7 \text{ mm} \quad \Delta y = \frac{M_y}{F_z} = \frac{80 \text{ N}\cdot\text{m}}{100000 \text{ N}} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,8 \text{ mm}$$

Estos valores son substancialmente altos, siendo esperables valores del orden de 0,5 mm o menor.

El problema principal que se evidenciaba era la gran componente dinámica tanto en las cargas laterales como en los momentos flectores; así como valores medios moderadamente altos.

A continuación, se realizaron varios ajustes mecánicos sobre la máquina, que se pasan a detallar:

- *Horizontalidad de la placa base del marco de trabajo.* El mismo es el plato de carga donde se apoyan los instrumentos a medir, requiriendo estar plano y horizontal. La horizontalidad inicial presentaba un valor de 0,25 mm/m, el cual fue corregido a un valor mejor a 0,05 mm/m. Esta corrección es necesaria para colocar el eje del transductor en posición vertical.
- *Paralelismo entre ambas placas de compresión:* Si ambas placas no están paralelas al momento de iniciar la carga, la inclinación del marco de carga sólo se recupera con la aplicación de momentos flectores y cargas laterales sobre el propio transductor. En cambio, si se tienen las placas paralelas antes de cargar el transductor, puede tomarse la inclinación del marco de carga como un valor de referencia para estimar las fuerzas laterales. La misma tenía una falta de paralelismo de 0,10 mm/m, la cual fue corregida a un valor mejor a 0,02 mm/m.



- *Alineación del transductor:* Se midió la distancia de cada una de las tres columnas del marco de carga respecto al centro de la placa de carga inferior. Los resultados mostraron que era necesario desplazar el transductor bajo calibración 1 mm en sentido negativo respecto del eje X, para lograr una mejor alineación. Para evitar esto, el plato inferior fue desmontado y se montó con un centrador excéntrico para poder referenciar el transductor al plato sin ningún ajuste.
- *Alineación de las pesas:* Se midió la alineación de cada pesa respecto a su pesa superior, tanto en el Eje X como en el Eje Y. Las que presentaban un desplazamiento mayor a 0,5 mm respecto de la pesa superior fueron ajustadas. Las pesas corregidas fueron la N°: 4, 5, 7, 11, 16, 21 y 22, que corresponden a los siguientes escalones de carga: 8 kN, 10 kN, 14 kN, 20 kN, 40 kN, 70 kN y 80 kN respectivamente.
- *Transitorios globales de aplicación de carga:* Los picos que se evidencian en la **Ilustración 15** y la **Ilustración 16**, son debidos a la falta de horizontalidad de la mesa donde apoyan las pesas. Este fenómeno fue reducido al ajustar diferencialmente los 3 apoyos con los que cuenta el mismo.
- *Paralelismo entre las pesas:* A pesar de haber corregido los transitorios globales de aplicación de la carga, algunos picos significativos permanecieron, lo cual demostraba la falta de paralelismo entre algunos pares de pesas. El huelgo entre cada uno de los tres apoyos de cada pesa fue medido. El apoyo trasero-izquierdo entre el marco de carga y la primera pesa fue suplementado en 0,8 mm.

Luego de los ajustes mecánicos se realizaron nuevamente las mediciones con el dinamómetro de seis componentes. En esta oportunidad se omitió la posición de 360° debido a que las mediciones anteriores habían demostrado una buena reproducibilidad en cuanto al giro.

A continuación, se presentan los resultados para el **comportamiento estático** respecto de las cargas laterales en el Eje X y los momentos flectores en el Eje Y.

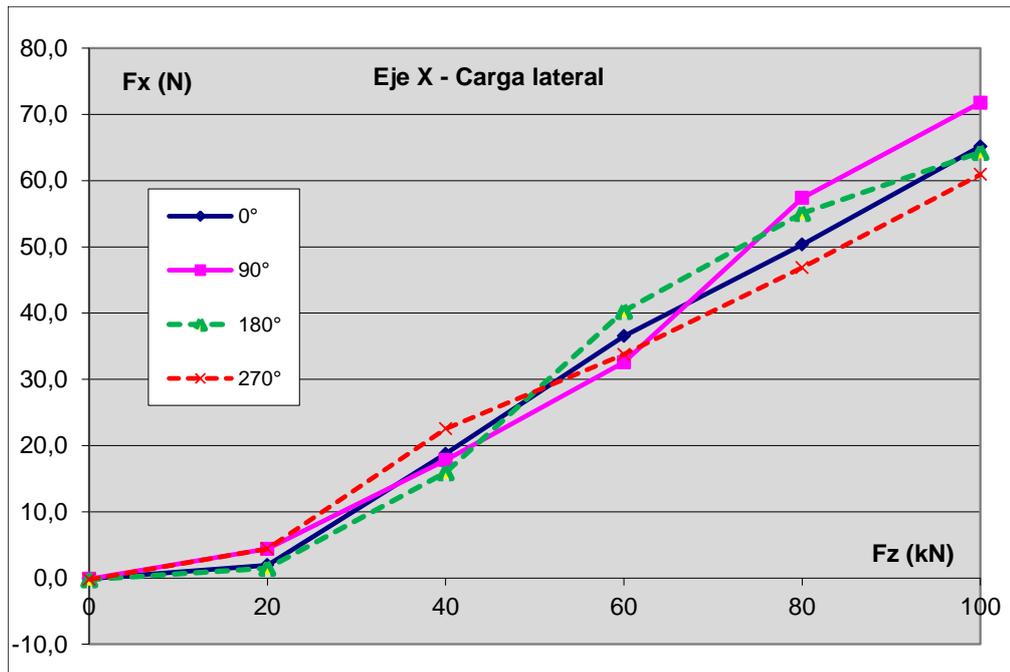


Ilustración 17. Resultados luego de los ajustes mecánicos – Cargas laterales Eje X.

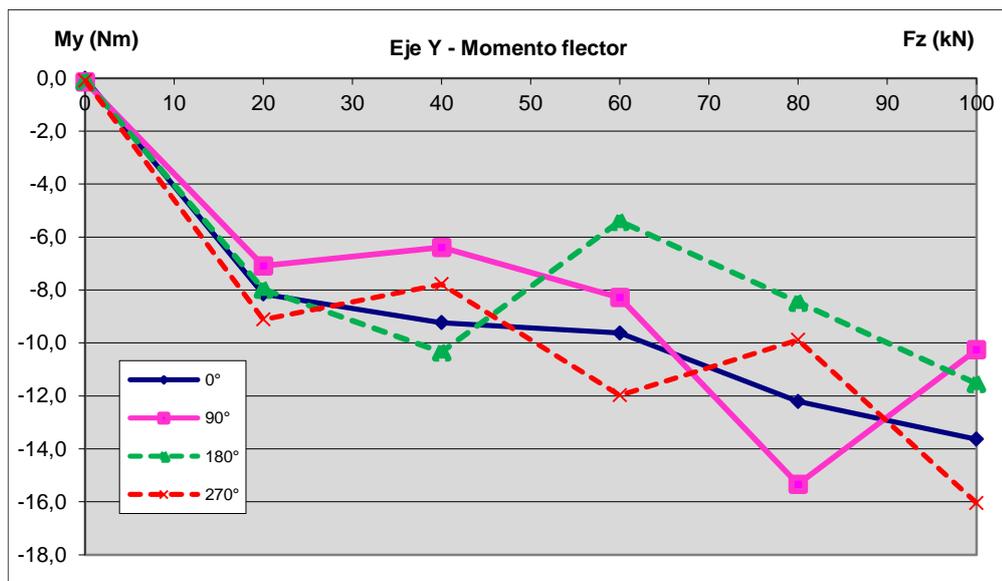


Ilustración 18. Resultados luego de los ajustes mecánicos – Momento flector Eje Y.

Como puede observarse de las ilustraciones anteriores, el acuerdo en la medición en las distintas posiciones de montaje fue muy bueno en el caso de la carga lateral y aceptable en el caso de los momentos flectores.

Debido a que la reproducibilidad del dinamómetro es aceptable, se puede trabajar con los valores medios y se concluye que el mismo funcionó adecuadamente, también que el montaje y la metodología fueron adecuadas. Si la reproducibilidad del dinamómetro es adecuada, la carga vertical que el mismo mide debe ser repetitiva, esto se muestra a continuación:

**Tabla 15. Resultados luego de los ajustes mecánicos – Carga Vertical.**

<b>Fz</b> <b>(nominal)</b> <b>kN</b>	<b>Fz</b>				<b>Fz</b>	
	<b>0°</b>	<b>90°</b>	<b>180°</b>	<b>270°</b>	<b>Media</b>	<b>Std dev</b>
	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>		<b>1·10<sup>-6</sup></b>
<b>0</b>	-3	-2	-2	-2	-2	--
<b>20</b>	-19892	-19889	-19889	-19900	-19892	277
<b>40</b>	-39896	-39895	-39894	-39900	-39896	64
<b>60</b>	-59880	-59897	-59893	-59879	-59887	152
<b>80</b>	-79860	-79877	-79872	-79859	-79867	109
<b>100</b>	-99840	-99856	-99852	-99839	-99847	85

Si bien el desvío estándar no es bajo, cabe destacar que las características metrológicas del sistema de medición utilizado no son las correspondientes a un transductor de alta exactitud.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos en cuanto a las cargas laterales y los momentos flectores, así como el gráfico de estos valores:

**Tabla 16. Resultados luego de los ajustes mecánicos – Cargas laterales.**

<b>Fz</b> <b>(nominal)</b> <b>kN</b>	<b>Fx</b>				<b>Fx</b>	
	<b>0°</b>	<b>90°</b>	<b>180°</b>	<b>270°</b>	<b>Media</b>	<b>Std dev</b>
	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>		<b>1·10<sup>-3</sup></b>
<b>0</b>	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	0	--
<b>20</b>	1,9	4,4	1,5	4,4	3	511
<b>40</b>	18,8	17,8	15,9	22,5	19	148
<b>60</b>	36,5	32,6	40,3	33,8	36	96
<b>80</b>	50,4	57,4	55,1	46,9	52	90
<b>100</b>	65,2	71,8	64,3	60,9	66	69

<b>Fz</b> <b>(nominal)</b> <b>kN</b>	<b>Fy</b>				<b>Fy</b>	
	<b>0°</b>	<b>90°</b>	<b>180°</b>	<b>270°</b>	<b>Media</b>	<b>Std dev</b>
	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>		<b>1·10<sup>-3</sup></b>
<b>0</b>	-0,1	-0,3	-0,4	-0,3	0	--
<b>20</b>	-20,1	-18,9	-18,4	-21,3	-20	64
<b>40</b>	-16,6	-19,4	-13,7	-21,3	-18	189
<b>60</b>	-4,9	-3,2	-11,1	-14,0	-8	613
<b>80</b>	7,5	12,8	17,2	0,9	10	733
<b>100</b>	18,7	22,4	20,2	16,6	19	127



Tabla 17. Resultados luego de los ajustes mecánicos – Momentos flectores.

Fz (nominal) kN	Mx				Mx		$\Delta x$ mm
	0°	90°	180°	270°	Media	Std dev	
	N·m	N·m	N·m	N·m		$1 \cdot 10^{-3}$	
0	0,1	0,0	0,1	0,1	0	--	
20	5,1	4,4	5,5	5,0	5	85	0,25
40	0,1	-0,5	0,4	-0,4	0	3802	0,00
60	-4,0	-5,7	-1,4	-2,9	-4	519	-0,06
80	-6,7	-12,3	-7,6	-4,4	-8	431	-0,10
100	-7,8	-6,8	-4,1	-11,0	-7	387	-0,07

Fz (nominal) kN	My				My		$\Delta y$ mm
	0°	90°	180°	270°	Media	Std dev	
	N·m	N·m	N·m	N·m		$1 \cdot 10^{-3}$	
0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0	--	
20	-8,2	-7,1	-8,0	-9,1	-8	103	-0,40
40	-9,2	-6,4	-10,3	-7,8	-8	204	-0,21
60	-9,6	-8,3	-5,4	-12,0	-9	311	-0,15
80	-12,2	-15,3	-8,5	-9,9	-11	262	-0,14
100	-13,6	-10,3	-11,5	-16,0	-13	197	-0,13

Como puede observarse, los valores fueron reducidos substancialmente respecto a los valores iniciales. En cuanto a las cargas laterales, y por aplicación de la Ecuación 2-9, puede determinarse que la variación de la fuerza sobre el Eje Z es menor a  $0,5 \cdot 10^{-6}$ , mientras que el caso de los momentos flectores, la excentricidad esperada fue calculada con la Ecuación 2-10 y presentada en la Tabla 17.

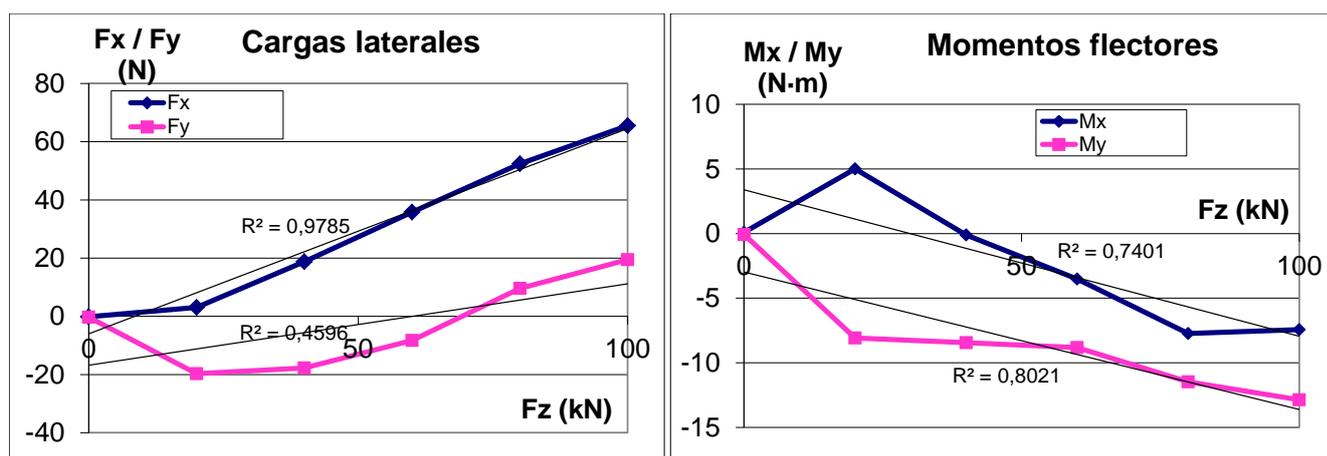


Ilustración 19. Resultados luego de los ajustes mecánicos – Cargas laterales y Momentos flectores.

Los gráficos presentados son para evidenciar la relación que hay entre las cargas laterales y los momentos flectores. Puede verse que el comportamiento de las fuerzas laterales en el Eje X se corresponde con la de los momentos en el Eje Y y viceversa.



Respecto al **comportamiento dinámico**, se presentan los siguientes resultados:

Tabla 18. Resultados luego de los ajustes mecánicos – Comportamiento dinámico vs. estático.

Fz (nominal) kN	Fx		Fy		Mx		My	
	Dinámico N	Estático N	Dinámico N	Estático N	Dinámico N·m	Estático N·m	Dinámico N·m	Estático N·m
0		0		0		0		0
20	48	3	-25	-20	5	5	-10	-8
40	10	19	-52	-18	4	0	-14	-8
60	5	36	-37	-8	-3	-4	-21	-9
80	52	52	-66	10	-10	-8	-23	-11
100	64	66	21	19	-9	-7	-20	-13

Como puede observarse, tanto en el caso de las cargas laterales como de los momentos flectores, los valores son medianamente comparables. Con estos resultados se concluye que la máquina posiciona las pesas de forma adecuada, o sea sin introducir grandes componentes dinámicas, incluso sin choques que afecten a la deriva de la masa de las pesas.

Para finalizar con este tema, se presenta la comparación entre el estado inicial, o sea antes de realizar ningún ajuste y el estado final, o sea luego de los ajustes mecánicos:

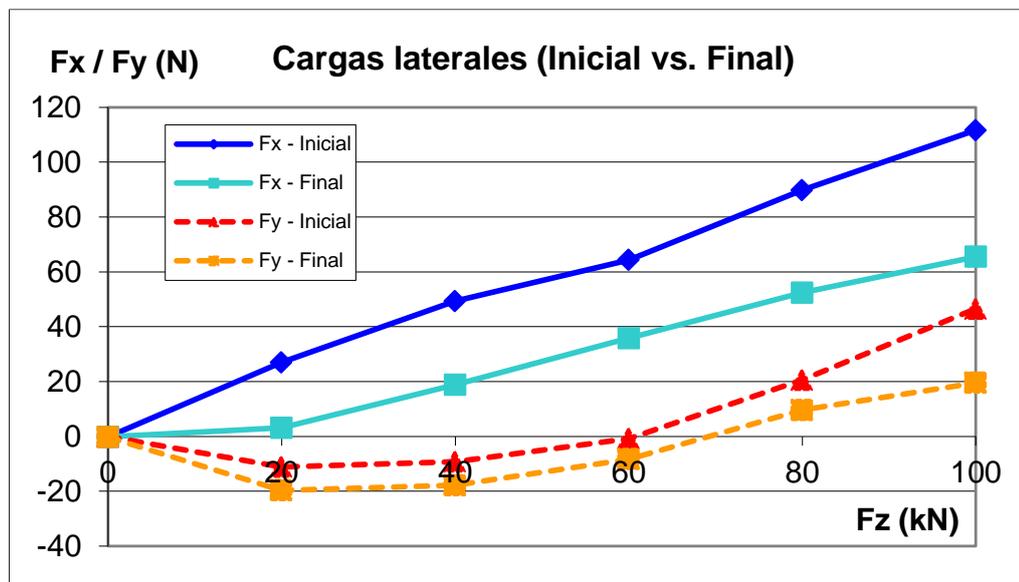
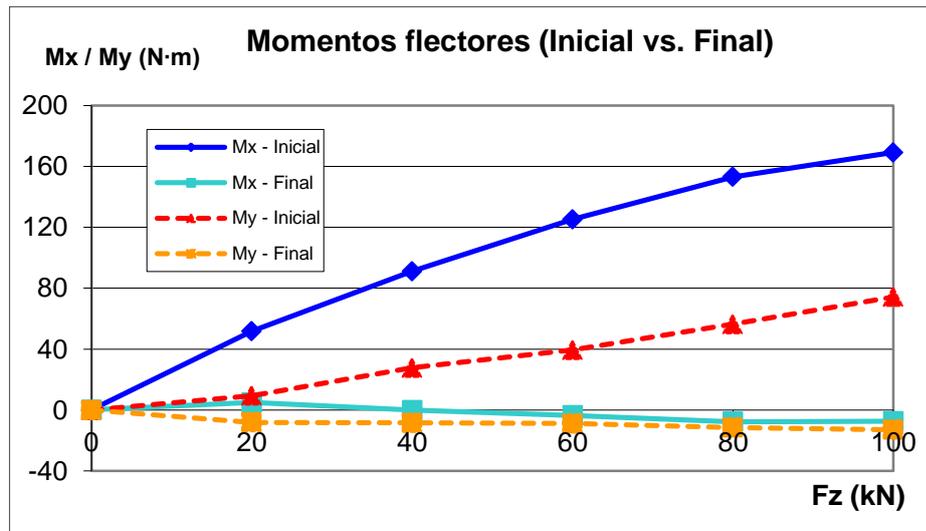


Ilustración 20. Comparación de los resultados antes y después de los ajustes – Cargas laterales.



**Ilustración 21. Comparación de los resultados antes y después de los ajustes – Momentos flectores.**

Como conclusión de estas mediciones y ajustes, se puede mencionar:

- Las cargas laterales ( $F_x$ ,  $F_y$ ) son repetibles, y corresponden a una máxima inclinación del marco de carga de aproximadamente de  $1 \cdot 10^{-3}$  rad ( $F_x \leq 66$  N;  $-20$  N  $\leq F_y \leq 20$  N). La corrección resultante a la carga axial es menor a  $0,5 \cdot 10^{-6}$ .
- La reproducibilidad de las cargas laterales indica que la máquina es estable y que la interacción máquina-transductor es muy baja.
- Los momentos flectores son bajos, y en el caso del eje Y, pueden ser mejorados por el centrado del transductor bajo carga, a través del desplazamiento del mismo 0,15 mm en el sentido - Y.
- El comportamiento relativamente lineal de las cargas laterales en el eje X ( $R^2 = 0,9785$ ), así como en los momentos flectores en el eje Y ( $R^2 = 0,8021$ ), indican que estos dependen esencialmente de la configuración inicial de la DW-FSM.
- La no linealidad para las cargas laterales en el eje Y, así como en los momentos flectores en el eje X, indican que la máquina posee alguna deformación en el plazo YZ.
- Los momentos flectores en el intervalo de 20 kN a 100 kN muestran una excentricidad media menor a 0,25 mm.
- Las componentes dinámicas fueron apropiadamente medidas por el sistema de medición. Estas ponen claramente en evidencia la influencia del cambio de las cargas, de la deformación estructural, y de la desalineación, esto es debido al incremento de las componentes parásitas durante la aplicación de carga.
- Los valores principales obtenidos en esta investigación son suficientes para mejorar la incertidumbre de la máquina, a través de una comparación internacional.
- Las componentes parásitas pueden ser considerablemente reducidas por el centrado de cada pesa usando una articulación sin fricción en compresión. Para reducir las componentes dinámicas, la



misma inclinación debe observarse antes y después de aplicar cada pesa. Esto puede ser logrado si se alcanza el mismo huelgo en cada uno de los tres apoyos de cada pesa.

### 3.1.3.2 Utilización de sistemas build-up

Como se mencionó en la sección 2.1.3.2, y según el artículo *Evaluation of Force Standard Machines using Build-up System* [14], este sistema puede ser utilizado con dos motivos: La medición de las fuerzas laterales además de la fuerza vertical (componentes estáticas), y la oscilación de la máquina (componentes dinámicas).

En opinión del autor de la presente investigación, el sistema build-up puede utilizarse para “estimar” las fuerzas laterales en el caso de poseer una articulación que vincule máquina-transductor de muy baja fricción, o medir los momentos flectores además de la fuerza vertical en el caso de no utilizar esta articulación. Lo ideal sería utilizar un dispositivo de acoplamiento-desacoplamiento en tiempo real de la articulación para medir ambos efectos, y con ello reducir los errores por distintas condiciones de interfase máquina-transductor. Esto se plantea, debido a la correlación que existe entre una fuerza lateral y el momento flector en el eje que es ortogonal a dicha fuerza. Aplicando los principios de la estática la fuerza en el eje X se corresponde con el momento en el eje Y, y la fuerza en el eje Y se corresponde con el momento en el eje X, siendo la relación en este último caso negativa, debido a la convención de signos. En el caso del eje Z, la fuerza es medida como suma aritmética de los tres transductores en cuestión, no siendo posible la determinación de los momentos torsores ( $M_z$ ) debido a que los tres transductores actúan en el eje Z y son colineales.

En el caso de las fuerzas laterales, se trata de una estimación, debido a que si se articula el sistema, dicha articulación presentará mayor o menor fricción y con ello no se absorberán los momentos flectores en su totalidad. Asimismo, hay que considerar la interacción entre los propios transductores que forman parte del sistema, debido a que el mismo no presenta gran rigidez a las cargas laterales. Se estima que la repetibilidad en la medición de las cargas laterales no será del todo buena.

Desde el punto de vista de la medición de los momentos flectores, se considera que el sistema es adecuado, debido a que el mismo es muy rígido, y permite contrarrestar los momentos aplicados con una buena relación de palanca. La repetibilidad en este caso debería ser buena, y la exactitud de medición estaría limitada, además de por las características intrínsecas de los transductores individuales, por la exactitud en el montaje y por la medición de las distancias respecto al eje del conjunto.

Igualmente, en el caso de los momentos flectores, se considera que esta metodología es apropiada para trabajos de verificación y mejora de las características, pero no puede asegurarse que la máquina luego genere esos momentos, debido a que la deformación en el uso con transductores convencionales, o sea articulados, será con toda probabilidad diferente.



En el caso de utilizar estos sistemas, la metodología de medición a llevar adelante puede ser similar a la utilizada con el dinamómetro de seis componentes, o sea se requiere medir en varios escalones de carga y en varias posiciones de montaje. Debido a que el sistema se compone de tres transductores montados cada  $120^\circ$  respecto de su eje central, puede no resultar buena la reproducibilidad si se realizan los giros cada  $90^\circ$ . Podrían entonces realizarse cada  $120^\circ$ , pero así todo podría quedar enmascarado algún efecto de la interacción máquina-dinamómetro, por lo cual se recomienda realizar giros cada  $60^\circ$ .

También puede depender de la geometría del marco de carga y de la estructura que sustenta el plato inferior de compresión. Si las mediciones en las posiciones de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$  presentan buena reproducibilidad entre sí, y las mediciones de  $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $300^\circ$  también presentan buena reproducibilidad entre sí, pero hay diferencias significativas entre ambos grupos de mediciones, es muy probable que haya una interacción importante entre máquina y dinamómetro, causa que habrá que investigar en particular.

### 3.1.3.3 Utilización de niveles de alta exactitud

Como se presentó en la sección 2.1.3.3, y con la utilización de la **Ecuación 2-11**, pueden estimarse las cargas laterales en función de la medición del ángulo de inclinación del marco de carga. En la DW-FSM de 110 kN del INTI esta estimación puede considerarse adecuada, debido a que la rigidez de la máquina lograda por el sistema de acoplamiento entre el marco de carga y todas las pesas entre sí, permite que la inclinación del marco de carga sea bastante representativa de las cargas laterales<sup>33</sup>.

También se había demostrado que por utilización de la **Ecuación 2-9**, podía considerarse despreciables las cargas laterales si las mismas eran menores al 0,1% de la carga vertical. Como estas cargas laterales están relacionadas a la inclinación del marco de carga a través de la **Ecuación 2-11**, puede demostrarse que una inclinación menor a 0,001, o sea menor a 1 mm/m, hace que las cargas laterales sean despreciables.

Como esta metodología es una aproximación a la medición de las fuerzas laterales, una de las maneras para asegurar que las mismas son despreciables es reducir la tolerancia en la inclinación del marco de carga. Un buen criterio podría ser fijar tolerancia máxima en 0,5 mm/m.

Dicho lo anterior, para poder realizar la medición de la inclinación del marco de carga, es necesario contar con dos niveles, uno en el eje X y otro en el eje Y, con una resolución máxima de 0,1 mm/m.

---

<sup>33</sup> El marco de carga junto a las pesas forma una especie de reticulado espacial, el cual le confiere un comportamiento, dentro de ciertos límites, asimilable a un cuerpo rígido. Por ello la rotación del marco de carga indicaría la rotación de todo el conjunto



Una serie de medición se realizó con el sistema de seis componentes y con el nivel al mismo tiempo, con el sólo fin de determinar la correlación existente entre la inclinación determinada por medición de las cargas laterales y utilizando la Ecuación 2-11, y la medición de la inclinación del marco de carga utilizando niveles de alta exactitud.

**Tabla 19. Inclinación calculada con el dinamómetro de seis componentes versus la medida con niveles.**

<b>Fz</b> (nominal)	<b>Componentes laterales</b>		<b>Inclinación calculada</b>		<b>Inclinación medida</b>	
	<b>Fx</b>	<b>Fy</b>	<b>-Fx/Fz</b>	<b>Fy/Fz</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>kN</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>mm/m</b>	<b>mm/m</b>	<b>mm/m</b>	<b>mm/m</b>
<b>20</b>	9	0	-0,46	-0,01	-0,30	0,65
<b>40</b>	56	17	-1,40	0,43	-0,40	0,60
<b>60</b>	74	38	-1,23	0,64	-0,40	0,55
<b>80</b>	81	49	-1,01	0,61	-0,50	0,55
<b>100</b>	92	67	-0,92	0,67	-0,55	0,65

Como puede observarse en la tabla anterior, la equivalencia entre el cálculo y la medición es bastante buena en el caso del eje Y, mientras que en el caso del eje X la medición subestima al cálculo. Este fenómeno puede ser en parte justificado por el rozamiento en la articulación, que reduce la inclinación del marco de carga. Igualmente sería necesario determinar la relación de los momentos flectores medidos, debido a que los mismos son dependientes de las cargas laterales.

La medición de la inclinación del marco de carga, se realiza desde ese entonces, y con una periodicidad bianual, con el objetivo de verificar que las componentes parásitas se mantienen dentro de márgenes acotados. Esta medición forma parte de una metodología más completa de verificación y ajuste de la máquina, que consiste en los siguientes pasos:

1.- Verificación de la horizontalidad del plato de carga inferior.

El máximo valor tolerado es de 0,05 mm/m en cualquier dirección, para ello se utilizan dos niveles de 0,02 mm/m de resolución para medir en dos ejes ortogonales, siendo por lo tanto necesario que el valor combinado cuadráticamente de ambos ejes sea menor a 0,05 mm/m, caso contrario el mismo debe ajustarse. Para llevar a cabo el ajuste, se gira y se busca la mejor posición del plato. La última medición fue realizada el 6 de abril de 2015, resultando una falta de horizontalidad en el eje X menor a 0,04 mm/m, mientras que en el eje Y fue menor a 0,02 mm/m.

Cabe destacar que originalmente el plato inferior estaba simplemente apoyado y centrado dentro de un alojamiento cilíndrico. Entre el plato y la máquina se ubicaba una placa de Pertinax de 2 mm de espesor. Como se evidenció deformación en la misma, se precargó el plato a través de un bulón que la ajustaba sobre la estructura de la máquina. Igualmente se siguió evidenciando un cambio en la horizontalidad del plato de carga de aproximadamente 0,02 mm/m; por lo cual se retiró la placa de Per-



tinax y se colocó en su lugar una lámina de papel de 90 g/m<sup>2</sup>. La necesidad de esta lámina es para que no cierre el circuito eléctrico que la máquina utiliza para detectar el rozamiento entre las pesas.

### 2.- Verificación del paralelismo entre los platos de carga.

Apoyando ambos platos y utilizando un nivel de 0,02 mm/m de resolución se verifica que el paralelismo entre los mismos sea mejor a 0,05 mm/m en cualquier dirección. Para ello se sube y baja el marco de carga sostenido por el plato inferior de compresión. En caso de ser necesario, el ajuste se realiza suplementando uno o más de los tres apoyos que el marco de carga posee sobre la estructura.

### 3.- Verificación de la nivelación y centrado de las pesas.

Aquí se utiliza una articulación de muy bajo rozamiento. En el laboratorio se cuenta con una formada por dos alojamientos cilíndricos, y una esfera de 38,1 mm de diámetro, siendo todas las piezas de acero duro<sup>34</sup>. El huelgo entre el cilindro y la esfera es menor a 0,05 mm, de modo de tener una excentricidad máxima de 0,10 mm.



**Ilustración 22. Articulación de muy bajo rozamiento.**

Se centra la articulación dimensionalmente respecto del plato superior de carga, y se realizan algunas carreras de subida y de bajada de todas las pesas. De este modo se verifica a grandes rasgos la nivelación. Si la nivelación no es adecuada, las pesas pueden desplazarse horizontalmente a través de ajustar sus apoyos, así como también es posible suplementar alguno de los mismos, de modo de darle inclinación al eje ficticio de la máquina. Cuando se logra una nivelación aceptable, se realiza la medición de la misma.

---

<sup>34</sup> Bolilla de acero AISI 52100 (acero de rodamiento), platinas de carga SAE 4140 nitrurado y bonificado (pastilla de botador de válvula para automotor).



A continuación se presentan dos mediciones realizadas durante el año 2015, antes y después de un ajuste que fue necesario realizar:

**Tabla 20. Medición de la inclinación del marco de carga.**

<b>Fecha:</b>	30/03/2015
<b>Certificado:</b>	
<b>Tolerancia</b>	0,5 mm/m

<b>Fecha:</b>	08/04/2015
<b>Certificado:</b>	
<b>Tolerancia</b>	0,5 mm/m

Fuerza [kN]	Nivel	
	X [mm/m]	Y [mm/m]
0	0,00	0,00
2	-0,05	0,10
4	0,10	0,05
5	0,20	0,00
6	0,20	0,00
8	0,25	0,00
10	0,15	-0,05
12	0,10	-0,05
14	0,05	-0,10
15	0,05	-0,10
16	0,00	-0,15
18	0,00	-0,15
20	-0,05	-0,15
22	-0,10	-0,15
25	-0,15	-0,25
30	-0,20	-0,25
35	-0,25	-0,25
40	-0,30	-0,30
45	-0,35	-0,30
50	-0,35	-0,35
55	-0,40	-0,35
60	-0,45	-0,40
70	-0,45	-0,45
80	-0,45	-0,45
90	-0,45	-0,45
100	-0,45	-0,45
110	-0,45	-0,45

Fuerza [kN]	Level	
	X [mm/m]	Y [mm/m]
0	0,00	0,00
2	0,00	0,00
4	0,25	-0,20
5	0,25	-0,25
6	0,30	-0,20
8	0,30	-0,20
10	0,30	-0,20
12	0,25	-0,10
14	0,20	-0,10
15	0,22	-0,10
16	0,22	-0,10
18	0,25	-0,15
20	0,25	-0,20
22	0,25	-0,20
25	0,25	-0,20
30	0,20	-0,20
35	0,20	-0,20
40	0,20	-0,27
45	0,20	-0,30
50	0,10	-0,30
55	0,15	-0,30
60	0,05	-0,35
70	0,05	-0,30
80	0,10	-0,30
90	0,05	-0,30
100	0,10	-0,30
110	0,10	-0,30

Como puede observarse, luego del ajuste los valores son menores a 0,40 mm/m.

#### 4.- Verificación del comportamiento dinámico.

El uso de niveles de alta exactitud, y a modo cualitativo, puede ser utilizado para detectar algunos problemas dinámicos y reducirlos. Básicamente en el caso de la DW-FSM de 110 kN del INTI, gran parte de los efectos dinámicos son debidos a que los tres apoyos que posee cada pesa no entran en contacto al mismo tiempo.



La metodología desarrollada para reducir este fenómeno consiste en lo siguiente:

- Subir y bajar todas las pesas con el marco de carga apoyado en la estructura al menos cinco veces. Esto se realiza para lograr que las mismas se acomoden con el marco de carga nivelado.
- Dejar todas las pesas colgando del marco de carga apoyado y ajustar por sondeo la distancia de cada uno de los apoyos de la mesa de carga a 5,5 mm. Con esto se consigue un apoyo más parejo de las pesas.
- Subir y bajar varias veces las pesas, verificando que los apoyos de las mismas tengan un huelgo de  $5,0 \pm 0,6$  mm, de modo que se eviten los roces por libre oscilación del conjunto de pesas cargado. Para corregir este valor, lo más sencillo es adelantar o atrasar el *encoder* que mide el posicionamiento de las pesas.
- Colocar una articulación y nivelar la máquina en una carga de entre 30 kN y 50 kN.
- Subir y bajar varias veces las pesas en esta condición, verificando que los apoyos de las pesas tengan un huelgo de  $5,0 \pm 0,3$  mm. Este valor también se corrige con el *encoder*.

Los 4 pasos descritos anteriormente sólo se realizan en secuencia y una única vez en el caso que todas las mediciones resulten dentro de las tolerancias, caso contrario es necesario repetir los pasos 2 al 4 varias veces, debido a que una modificación en un paso modifica las condiciones de los demás.

Cabe destacar que en la metodología no se nombra ninguna verificación del centrado, o sea con lo expuesto se logra el paralelismo de la carga con el eje del transductor, mientras que el centrado se logra reduciendo la excentricidad del mismo. Internacionalmente la buena práctica es centrar el transductor respecto del plato superior de la máquina.

Esto también debería ser verificado, en el caso de la máquina del INTI el centrado es mejor a 0,2mm, que es un buen valor, pero no es suficiente. El tema en esta cuestión es que para realizar el ajuste se requiere de modificar muchas de las condiciones de la máquina, por lo cual se recomienda medir el valor y dejarlo indicado en la máquina, en la máquina del INTI debería decir "*centrar el transductor desplazado -0,2 mm en el eje X*".

Siguiendo los pasos anteriores puede tenerse la máquina en óptimas condiciones de medición, debido a que una buena nivelación reduce substancialmente las cargas laterales y con ello se logra una mejor reproducibilidad. Además de lo anterior, para obtener una buena reproducibilidad en las mediciones, es necesario centrar adecuadamente el transductor a ensayar, motivo por el cual se desarrolló un método de centrado utilizando niveles de alta exactitud, en reemplazo de la metodología de centrar respecto del plato superior. Este método se describe en la sección 3.2.1.4.



### 3.1.3.4 Utilización de transductores de referencia

En la presente sección se describe la utilización de transductores de excelentes características metrológicas para verificar cualitativamente la excentricidad de la máquina, así como problemas de montaje y posicionamiento y finalmente obtener un valor de reproducibilidad a modo comparativo.

Como se explicó en la sección 2.1.3.4, se utilizan varios transductores de fuerza, de distintas capacidades y de ser posible de distintas geometría para obtener distinta interacción máquina-transductor.

La metodología consiste en medir en el mismo nivel de carga, y realizando una secuencia muy fija en tiempos, varias series de mediciones en distintas posiciones de montaje cada 45°.

Esta metodología es necesario desarrollarla en varios escalones de carga de la máquina. En el caso de la máquina del INTI, la misma fue realizada en los puntos de 2 kN, 10 kN y 50 kN. Se consideró suficiente esta cantidad de puntos, debido a que se sabe que la máquina está balanceada en todo su intervalo, esto se obtuvo por el uso de la metodología presentada en 3.1.3.3.

Aquí se presentan algunos de los resultados obtenidos en mediciones llevadas a cabo en el mes de mayo de 2015. Para ello se tomaron dos mediciones para cada posición de montaje y un tiempo de estabilización de 30 s. El centrado del transductor se realiza en forma dimensional respecto del plato superior, esto es debido a que los resultados serían influenciados si se utilizara el centrado con los niveles de alta exactitud, así como una demora mayor en los giros que traería aparejado una mayor deriva a corto plazo.

El primer transductor utilizado fue un HBM Z30TOP de 5kN de capacidad máxima, midiendo en el punto de 2 kN. Los resultados son los siguientes:

**Tabla 21. Utilización de transductores de referencia – Z30TOP 5kN, punto 2kN.**

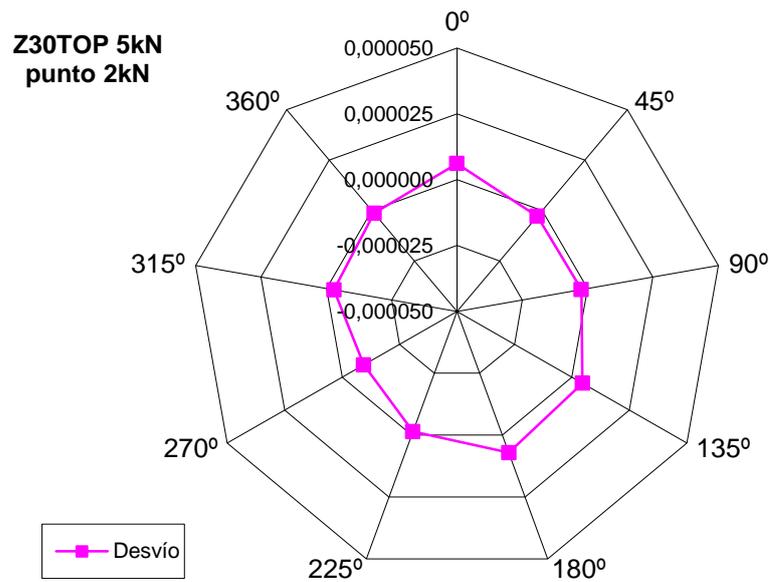
Transductor	Z30TOP 5kN		Punto 2kN		Temp: 20,1°C			Tiempo espera: 30s	
	Carreras con corrección del retorno a cero								
Carga kN	Posición 0°	Posición 45°	Posición 90°	Posición 135°	Posición 180°	Posición 225°	Posición 270°	Posición 315°	Posición 360°
0	0,009722	0,009732	0,009742	0,009746	0,009749	0,009753	0,009754	0,009754	0,009755
2	0,810394	0,810395	0,810403	0,810413	0,810419	0,810414	0,810406	0,810413	0,810415
0	0,009723	0,009733	0,009738	0,009740	0,009744	0,009747	0,009746	0,009747	0,009747
0	0,009722	0,009735	0,009752	0,009750	0,009746	0,009745	0,009746	0,009747	0,009747
2	0,810395	0,810397	0,810394	0,810406	0,810416	0,810407	0,810403	0,810409	0,810411
0	0,009725	0,009731	0,009737	0,009740	0,009745	0,009745	0,009747	0,009745	0,009747

<b>Promedio</b>	0,800672	0,800663	0,800663	0,800670	0,800673	0,800664	0,800656	0,800663	0,800664
<b>Desvío</b>	0,000006	-0,000003	-0,000002	0,000005	0,000007	-0,000001	-0,000009	-0,000003	-0,000001

**Valor medio 0,800665**

**Error de reproducibilidad [1·10<sup>-6</sup>] 21**

**Incertidumbre por reproducibilidad [1·10<sup>-6</sup>] 2**



**Ilustración 23. Utilización de transductores de referencia – Z30TOP 5kN, punto 2kN.**

Como puede observarse en la tabla anterior, la reproducibilidad del mismo es excelente. Del análisis del gráfico anterior, y por la simetría observable respecto del centro de coordenadas se puede concluir que no presenta excentricidad. La buena distribución de los puntos demuestra que el posicionamiento fue repetitivo y adecuado.

Luego se utilizó un transductor HBM Z4 de 100kN de capacidad máxima, midiendo en el punto de 50kN. Los resultados son los siguientes:

**Tabla 22. Utilización de transductores de referencia – Z4 100kN, punto 50kN.**

**Transductor**      **Z4 100kN 80462**      **Punto 50kN**      Temp: 19,4°C      Tiempo espera: 30s  
Carreras con corrección del retorno a cero

Carga kN	Posición 0°	Posición 45°	Posición 90°	Posición 135°	Posición 180°	Posición 225°	Posición 270°	Posición 315°	Posición 360°
0	-0,011708	-0,011646	-0,011712	-0,011625	-0,011676	-0,011654	-0,011661	-0,011661	-0,011676
50	1,008918	1,008941	1,008910	1,008946	1,008912	1,008929	1,008923	1,008923	1,008915
0	-0,011713	-0,011682	-0,011681	-0,011663	-0,011691	-0,011677	-0,011686	-0,011686	-0,011690
0	-0,011713	-0,011743	-0,011681	-0,011654	-0,011689	-0,011676	-0,011685	-0,011685	-0,011689
50	1,008921	1,008880	1,008932	1,008929	1,008914	1,008931	1,008925	1,008925	1,008919
0	-0,011679	-0,011727	-0,011676	-0,011675	-0,011685	-0,011677	-0,011687	-0,011688	-0,011686

<b>Promedio</b>	1,020623	1,020610	1,020609	1,020592	1,020598	1,020601	1,020604	1,020604	1,020602	
<b>Desvío</b>	0,000018	0,000005	0,000004	-0,000013	-0,000006	-0,000004	-0,000001	-0,000001	-0,000002	
	<b>Valor medio 1,020605</b>									
	<b>Error de reproducibilidad [1·10<sup>-6</sup>]</b>			<b>30</b>			<b>Incertidumbre por reproducibilidad [1·10<sup>-6</sup>]</b>			<b>3</b>

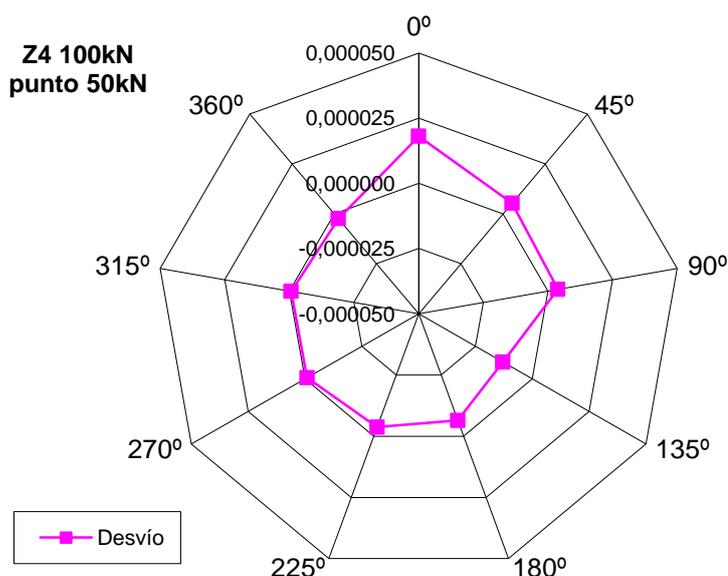


Ilustración 24. Utilización de transductores de referencia – Z4 100kN, punto 50kN.

Aquí caben los mismos comentarios que en el caso anterior. Igualmente puede observarse que los puntos de 0°, 45° y 90° están un poco por arriba del resto, esto puede deberse a deriva a corto plazo del transductor por no estar lo suficientemente precargado con anterioridad al ejercicio.

Para comparar resultados, se midió el mismo punto de 50kN, pero utilizando un transductor HBM C3H de 100kN de capacidad máxima, cuya sensibilidad a las cargas laterales es bastante mayor. Los resultados son los siguientes:

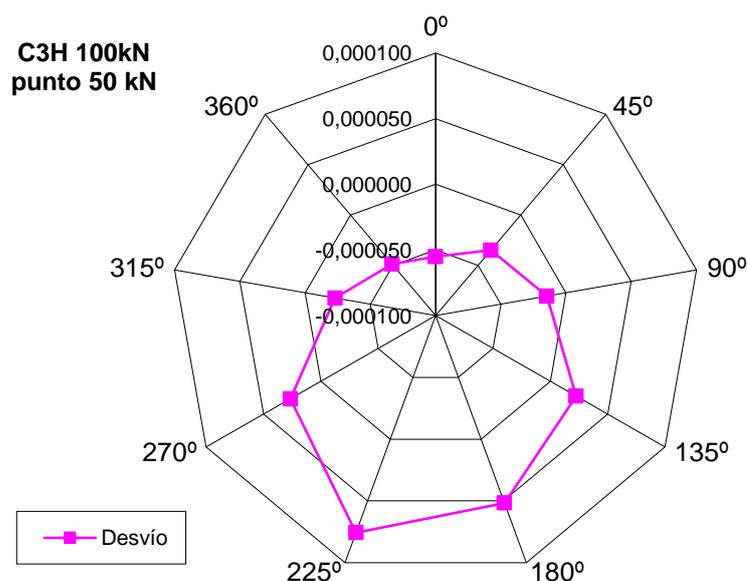
Tabla 23. Utilización de transductores de referencia – C3H 100kN, punto 50kN.

**Transductor** C3H 100kN 84162 **Punto 50kN** Temp: 20,5 a 20,7°C Tiempo espera: 30s  
Carreras con corrección del retorno a cero

Carga kN	Posición 0°	Posición 45°	Posición 90°	Posición 135°	Posición 180°	Posición 225°	Posición 270°	Posición 315°	Posición 360°
0	0,062050	0,062025	0,062022	0,062005	0,061996	0,061995	0,062005	0,062003	0,061998
50	1,080365	1,080370	1,080380	1,080406	1,080427	1,080449	1,080402	1,080354	1,080323
0	0,062054	0,062035	0,062025	0,062008	0,062011	0,062008	0,062010	0,062013	0,062007
0	0,062053	0,062035	0,062025	0,062011	0,062010	0,062012	0,062015	0,062013	0,062007
50	1,080368	1,080366	1,080378	1,080398	1,080435	1,080458	1,080415	1,080363	1,080332
0	0,062048	0,062036	0,062022	0,062013	0,062019	0,062015	0,062017	0,062016	0,062012

<b>Promedio</b>	1,018315	1,018335	1,018356	1,018393	1,018422	1,018446	1,018397	1,018347	1,018322
<b>Desvío</b>	-0,000055	-0,000035	-0,000015	0,000022	0,000052	0,000076	0,000026	-0,000023	-0,000049

**Valor medio** 1,018370  
**Error de reproducibilidad [1·10<sup>-6</sup>]** 128 **Incertidumbre por reproducibilidad [1·10<sup>-6</sup>]** 15



**Ilustración 25. Utilización de transductores de referencia – C3H 100kN, punto 50kN.**

Como puede observarse en la tabla anterior, la reproducibilidad obtenida no es del todo aceptable. Igualmente se observa una excentricidad marcada, por lo cual se puede concluir que el eje de centrado utilizado no coincidía con el eje real de la máquina. Así todo, la buena distribución de los puntos demuestra que el posicionamiento fue repetitivo.

Finalmente se utilizó un transductor HBM C4 de 20kN de capacidad máxima, midiendo en el punto de 10kN. Los resultados fueron similares a los obtenidos con el transductor Z4 de 100 kN, por tal motivo y por no agregar nueva información, no se presentan los resultados.

Cabe señalar que de mediciones llevadas a cabo en el laboratorio de fuerza del INTI en su máquina de pesos suspendidos de 1 kN, las mismas demostraban una muy buena reproducibilidad sabiendo que el posicionamiento de las pesas no era el ideal. Por consiguiente, se generaron excentricidades importantes sin evidenciarse cambios significativos en la reproducibilidad. Estas mediciones se llevaron a cabo con transductores marca HBM, modelo TOP Z30A, de 500 N y 1 kN. En 2.2.1 se muestran las especificaciones técnicas de estos transductores, donde se evidencia que los mismos poseen muy baja sensibilidad a la excentricidad y a las cargas laterales. En parte es por ello que el transductor de HBM Z30TOP de 5kN presentado anteriormente obtuvo tan buen comportamiento.

Por esto último, se recomienda que los transductores utilizados, no necesariamente deban ser poco sensibles a las cargas parásitas, pero sí es preferible que posean baja histéresis, bajo creep, y buena repetibilidad. Esto es debido a que transductores muy poco sensibles a las cargas laterales y a la excentricidad no pondrán en evidencia los efectos generados por la máquina.



### **3.1.4. Comparación internacional de la DW-FSM de 110 kN del INTI**

En esta sección se describe la intercomparación clave en 50 kN y 100 kN en la cual participó el INTI, para que junto con la definición de la magnitud utilizando la ruta B de la guía EURAMET cg-4 pueda declarar una CMC de  $2 \cdot 10^{-5}$  en la capacidad de 2 kN a 100 kN, intervalo que es desarrollado por la utilización de la máquina de pesos suspendidos de 110 kN.

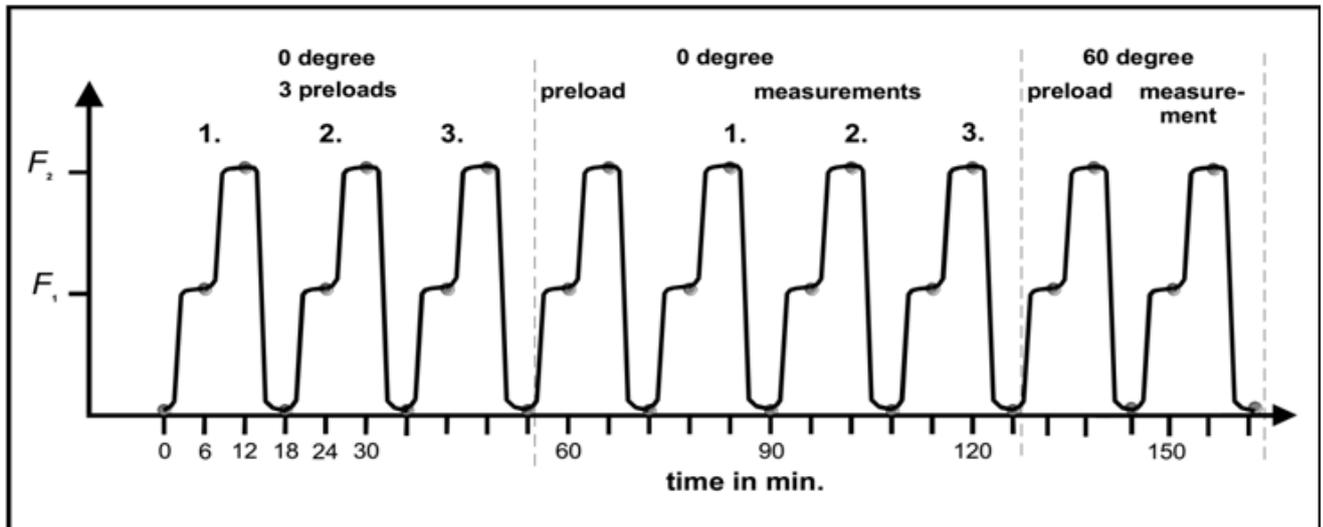
Para realizar este trabajo, debía realizarse por ejemplo una comparación bilateral con algún INM que contara con una CMC declarada equivalente o mejor a  $2 \cdot 10^{-5}$ . Luego de analizar el caso, se concluyó que lo ideal era realizar una intercomparación con el NPL de Inglaterra, que contaba con una CMC declarada de  $1 \cdot 10^{-5}$ , patrones de transferencia adecuados y debidamente estudiados para realizar este trabajo.

El propósito de una comparación clave es comparar como es definida la unidad de medición a nivel internacional. En el área de fuerza, el modo en que esto es realizado es por medio del uso de transductores de fuerza de muy alta exactitud, sujetos a similares secuencias de carga en las máquinas primarias de fuerza, siguiendo un estricto protocolo de medición y utilizando similar instrumentación.

Debido a que el NPL ya había piloteado dos comparaciones claves en los puntos de 50 kN y 100 kN, designadas oficialmente por el BIPM como CCM.F-K2.a (Scheme A) y CCM.F-K2.b (Scheme B), y si se mantenía al NPL como piloto, se utilizaban los mismos transductores de transferencia y el mismo protocolo de medición, podría considerarse a esta comparación como una extensión de la original. Por tal motivo se decidió realizar la intercomparación en estas condiciones, y de este modo la intercomparación clave fue designada por el BIPM como la CCM.F-K2.a.1.

Los participantes de la comparación fueron, el NPL de Inglaterra como piloto, el CEM de España y el INTI de Argentina. Las mediciones en NPL fueron realizadas en noviembre de 2010, marzo de 2011, noviembre de 2011 y enero de 2012. En INTI se midió en enero de 2011, mientras que en CEM se midió en diciembre de 2011. En función de este esquema, puede evidenciarse el formato de estrella de esta comparación. La misma fue realizada por dos ciclos (piloto – participante – piloto), por lo cual se puede obtener la deriva en cada ciclo. El valor tomado como referencia por el piloto es el valor medio de la medición inicial y final del ciclo, considerando independiente el comportamiento de cada ciclo en particular.

En la siguiente ilustración se muestra el esquema de carga realizado en dicha comparación:



**Ilustración 26. Comparación clave en 50 kN y 100 kN – Esquema de carga.**

El transductor de fuerza se rotó  $720^\circ$  en total. Se realizó una precarga en cada medición, como se muestra en la carrera de 60 grados. Luego se siguió girando el transductor cada  $60^\circ$  de modo de completar las dos vueltas y finalizando la medición en  $720^\circ$ , siendo en total 13 posiciones de medición. El intervalo de tiempo entre toma de lecturas fue de seis minutos, lo cual es un tiempo relativamente largo que reduce a un mínimo los errores por el efecto del creep y balanceo de las pesas.

Este tiempo es medido entre toma de lecturas, o sea incluye el tiempo que la máquina demora en ir de un escalón de carga al siguiente. Se aclara que cada máquina en función de su diseño y modo de operación tiene una rampa de carga distinta, lo cual puede influir principalmente en el comportamiento a creep del transductor.

Como la comparación realizada fue en 50 kN y 100 kN, y al ser la máquina del INTI secuencial, la misma estuvo moviéndose entre 50 kN y 100 kN durante todo el ejercicio. La operación del movimiento desde 0 hasta 50 kN demora  $37 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$ , mientras que la rampa de carga se da en aproximadamente 5 s, esto es debido a que los 50 kN ya están colgando del marco de carga, cuando el marco de trabajo sube empujando el marco de carga a través del transductor, esta demora muy poco tiempo. En el caso de ir de 50 kN a 100 kN, la máquina demora  $89 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$ , siendo en este caso necesarios unos 70 s en realizar la rampa de carga.

Debido a que el software de operación de la máquina no permite fijar el intervalo de tiempo entre lecturas, anteriormente a realizar la intercomparación se programó la secuencia y se verificó que los tiempos entre lecturas estaban en  $360 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$ . Asimismo con el uso de un transductor de referencia HBM Z4A de 100 kN se verificó la reproducibilidad de la máquina y se ajustaron los temas operativos, debido a que se contaba con muy poco tiempo para realizar el giro del transductor y su alineación en cada posición de montaje, maniobra que es realizada a mano por el operador.



La comparación fue llevada a cabo con dos transductores de 100 kN de capacidad, uno marca GTM, modelo KTN-D cuyo número de serie fue 42793, y uno marca Sensy, modelo 2715, cuyo número de serie fue 19994730004. En el caso del transductor GTM, sus características metrológicas son mejores a las presentadas en la Tabla 2. En el caso del transductor Sensy, si bien las especificaciones técnicas para ese modelo están disponibles, este transductor en particular fue realizado a pedido del NPL de Inglaterra.

El transductor GTM es de tipo membrana, o sea una membrana circular flexa con la carga y se miden las zonas de compresión y tracción de la misma, el mismo posee una muy buena simetría a lo largo de su eje de revolución. En el caso del transductor Sensy, el mismo es de tipo S, por lo cual funciona a flexión y corte, y del mismo modo se miden zonas de tracción y de compresión, y como puede observarse en la figura, no presenta simetría de revolución.



**Ilustración 27. Izq. Transductor GTM KTN-D. Der. Transductor Sensy 2715.**

Con anterioridad a la comparación, la sensibilidad a la temperatura de ambos transductores fue determinada, de modo de poder corregir la indicación para los casos en que la temperatura de medición difiera de 20 °C. Este trabajo fue llevado a cabo por el NPL.

En el caso del transductor GTM, el coeficiente de sensibilidad fue de  $-7,56 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K} \pm 4,10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ , mientras que para el transductor Sensy, el mismo fue de  $-7,17 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K} \pm 1,99 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ .

El envío de amplificadores de alta exactitud no es conveniente debido a que son muy sensibles al transporte, y con objeto de reducir la incertidumbre del amplificador que utiliza cada participante, debido a la trazabilidad que cada instituto realiza a magnitudes eléctricas, se envía una unidad de calibración, marca HBM, modelo BN100A, la cual es utilizada para determinar el desvío de cada amplificador DMP40 perteneciente a cada laboratorio respecto a dicha unidad de calibración, la cual puede considerarse muy estable en el tiempo.

Como las mediciones en los puntos de 50 kN y 100 kN están muy cercanas a 1,0 mV/V y 2,0 mV/V respectivamente, así como la señal de cero está muy cercana a 0,0 mV/V, antes y después de la



medición se determina el desvío del DMP40 respecto del BN100A en los siguientes puntos: -0,1; 0,0; 0,1 mV/V // 0,9; 1,0; 1,1 mV/V // 1,9; 2,0; 2,1 mV/V.

Se presentan a continuación los resultados para el transductor GTM en el punto de 100 kN, obtenidos por el NPL en el ciclo, con la indicación ajustada por temperatura y el valor medio del ciclo, así como los resultados obtenidos por el INTI para el mismo transductor y en el mismo punto.

**Tabla 24. Comparación clave – Valores obtenidos por NPL (piloto) – Transductor GTM, punto 100 kN.**

TrA (GTM 42793) - 100 kN			
Date	Deflection	Adjusted Deflection	Loop Value
	mV/V	mV/V	mV/V
17 Nov 2010	1.999 959	1.999 948	1.999 958
31 Mar 2011	1.999 981	1.999 968	
17 Nov 2011	1.999 993	1.999 985	1.999 982
30 Jan 2012	1.999 991	1.999 978	

**Tabla 25. Comparación clave – Valores obtenidos por INTI – Transductor GTM, punto 100 kN.**

TrA (GTM 42793) - 100 kN					
Date (Lab)	Deflection	Adjusted Deflection	Loop Value	Difference	
	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	Relative
6 Jan 2011 (INTI)	1.999 943	1.999 939	1.999 958	-0.000 019	-0.93E-05

Como puede verse, el desvío relativo es muy bueno. A continuación, y para concluir con la evaluación, se presentan los resultados corregidos a los valores del *Key Comparisson Reference Value* (KCRV), debido a que los valores medidos por el NPL deben ser corregidos a la media de las comparaciones claves llevadas a cabo con anterioridad.

**Tabla 26. Desvíos relativos en  $[1 \cdot 10^{-5}]$  respecto del KCRV.**

Laboratory	50 kN		100 kN	
	Deviation from KCRV	Expanded Uncertainty of Deviation	Deviation from KCRV	Expanded Uncertainty of Deviation
INTI	-1.5	10.2	-1.9	10.2

En la tabla anterior puede verse que los desvíos obtenidos son buenos. El alto valor presentado como incertidumbre del INTI, es debido a que para la comparación se requería declarar la CMC correspondiente al momento de la medición, que era de  $1 \cdot 10^{-4}$ . Asimismo, si se plantea el error normaliza-





## **3.2. PATRONES DE TRANSFERENCIA**

Esta sección no es tan extensa como la anterior, debido a que el presente trabajo de investigación está más enfocado a la realización de la magnitud. Si bien los patrones de transferencia juegan un papel muy importante y a veces decisivo en la definición de la misma, como consecuencia del incremento de la incertidumbre por causa de las sucesivas mediciones cuando se utiliza la caracterización (Ruta A de la EURAMET cg-4), o en la incertidumbre definida en cada máquina, cuando las mismas participan en una comparación internacional, con objeto de validar la definición a las magnitudes de base (Ruta B de la EURAMET cg-4).

En dicha guía, los cálculos están afectados básicamente por la reproducibilidad en cada máquina y la deriva temporal, así como el desvío obtenido entre ambas mediciones y su grado de equivalencia cuantificado a través del error normalizado. Obviamente en cada metodología, o sea por Ruta A o por Ruta B, la incidencia de estos factores es distinta.

Otros factores no contemplados en los cálculos de dichas metodologías pueden ser asignados al desvío obtenido entre las mediciones en las distintas máquinas participantes. Para reducir este desvío, que generalmente suma incertidumbre en forma aritmética, se plantearon las magnitudes de influencia en la realización de la magnitud en la sección 2.1.2 y 3.1.2.

La exactitud de medición alcanzada, utilizando transductores de altas características metrológicas, con las metodologías y los cuidados descritos en la sección 2.2 y 2.3, fueron suficientes para alcanzar el nivel de exactitud requerido. Igualmente se realizaron estudios sobre las magnitudes de influencia en los transductores de referencia, que son presentados en 3.2.1, así como el desarrollo y estudio de los dispositivos de carga, que son presentados en 3.2.2. No se consideró necesario agregar una sección con recomendaciones acerca de la metodología y la incidencia del operador, debido a que a lo largo del presente informe se van analizando factores y metodologías específicas que pueden ser aplicadas.

### **3.2.1. Características metrológicas de los transductores de fuerza de alta exactitud**

En la presente sección se sigue la misma secuencia que la presentada en la sección 2.2.1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, presentándose en la misma algunos estudios realizados y recomendaciones para reducir y/o corregir los efectos en los casos que esto sea posible.



### 3.2.1.1 Repetibilidad y reproducibilidad

Como se había mencionado en el caso de la **reproducibilidad**, si las condiciones son las adecuadas, los valores de reproducibilidad tenderían a los de repetibilidad.

En el caso que la reproducibilidad no sea similar a la repetibilidad, es necesario analizar los siguientes casos:

- *En la máquina de pesos suspendidos*: falla de alineación o excentricidad, tema tratado en 3.1.2 y 3.1.3.
- *Falla en el posicionamiento del transductor*. Este tema se trata en 3.2.1.4, aunque puede darse el caso de un buen posicionamiento, pero que el transductor en sí tenga problemas geométricos.
- *Falla en los dispositivos de carga*: En este caso los problemas de inclinación de la carga y excentricidad, pueden ser atribuidos a estos, temas tratados en 3.2.1.8 y 3.2.2.

En el caso de la **repetibilidad**, la falta de la misma puede estar asociada a:

- Problemas en la máquina, la cual no logra repetir las condiciones en las distintas aplicaciones de carga.
- Fallas en la metodología, siendo la más común la vinculada al esquema de cargas, donde se requiere una repetición sistemática de los ciclos y repetibilidad en los tiempos.
- Fallas en los dispositivos de carga, los cuales son inestables en su posicionamiento, y de este modo no logran mantener las condiciones extremas de carga sobre el transductor en las distintas aplicaciones de carga.
- Fallas en la estabilidad de las condiciones ambientales, sobre todo por variación de la temperatura, durante las mediciones, así como gradientes generados por derivas térmicas y en función de la inercia térmica del transductor respecto a las placas de carga de la máquina, incluyéndose la deriva del amplificador digital.

### 3.2.1.2 Temperatura, humedad y presión atmosférica

Sobre la **temperatura** hay tres aspectos a tener en cuenta:

- La temperatura promedio de medición, la cual puede ser corregida a valores de referencia sólo si se conoce en forma empírica el coeficiente de temperatura del transductor en cuestión.
- La variación de temperatura durante el ensayo, que podría ser corregida punto a punto, pero que genera una incertidumbre en la determinación exacta en un momento determinado.
- El gradiente de temperatura dentro del transductor que puede generar tensiones residuales. Este último caso es el que mayores problemas genera en la medición.



De todo esto se desprende que tanto variaciones de temperatura muy lentas como muy rápidas (siempre que sean de pequeña amplitud), no afectan significativamente a la incertidumbre debido a la temperatura.

Considerando las condiciones ambientales del laboratorio, para una estabilidad térmica de  $\pm 1$  °C, y utilizando un sistema de medición compuesto por alguno de los transductores presentados en la Tabla 2, y el amplificador HBM DMP40, presentado en la Tabla 3, la indicación puede variar hasta  $15 \cdot 10^{-6}$ .

La temperatura también afecta al instrumental asociado, siendo necesario en primera instancia determinar el coeficiente de sensibilidad del amplificador digital. En el caso del amplificador HBM DMP40 del INTI, los valores obtenidos en junio de 2015 fueron los siguientes:

**Tabla 28. Determinación de la sensibilidad térmica del amplificador HBM DMP40.**

°C	Cero [mV/V]	Fondo Escala [mV/V]	Valor Neto [mV/V]	Desvío respecto referencia [ $1 \cdot 10^{-6}$ ]	Sensibilidad térmica [ $1 \cdot 10^{-6}$ 1/K]
18	0,000157	2,000092	1,999935	-56	2,91
19	0,000159	2,000106	1,999947	-50	
20	0,000158	2,000109	1,999951	-48	
21	0,000158	2,000116	1,999958	-45	
22	0,000161	2,000122	1,999961	-43	
23	0,000160	2,000126	1,999966	-41	

Como referencia se utilizó la unidad de calibración HBM K3608 disponible en el laboratorio. Para mantener el valor de referencia estable, la misma fue mantenida en un ambiente con temperatura de  $20$  °C  $\pm$   $0,2$  °C.

En este caso, por conveniencia en la climatización de la sala, la secuencia de medición fue como se muestra en la tabla anterior, debido a la reducida deriva temporal del equipo en cuestión y a que todas las mediciones fueron realizadas dentro de las 8 h de la misma jornada.

En el caso de la determinación de la sensibilidad a la temperatura de los transductores de fuerza, los tiempos necesarios son mucho mayores debido a la gran inercia térmica de los mismos, así como la de las placas de apoyo y la estructura de la propia máquina, por lo cual para obtener un valor representativo se pueden realizar una a dos mediciones por día.

Debido a que los transductores presentan mayores derivas temporales, se requiere un cierre de las mediciones, o sea finalizar con la misma temperatura que se inició, la diferencia en los valores obte-



nidos al inicio y al final, pueden verificar la estabilidad, o ser utilizados para corregir la deriva temporal. Para ello, y en opinión del autor la secuencia de mediciones debería ser llevada en días sucesivos, en la siguiente secuencia y temperaturas: 20 °C, 18 °C, 22 °C, 20 °C. Se recomienda iniciar y finalizar en el valor medio, de modo de reducir aún más los efectos de la deriva.

Junto con la medición experimental del *span*, se recomienda realizar la medición de la variación de cero con el cambio de la temperatura, esto es útil para corregir en el caso de que el inicio y cierre de la serie de medición presente diferencias de temperatura. Si no se realiza esto, el fenómeno quedará enmascarado dentro del error de retorno a cero.

Es bueno mencionar que en los últimos años se vienen desarrollando celdas de carga digitales, las cuales cuentan con un sensor de temperatura cercano a la zona elástica de medición. Este sensor se utiliza para corregir la sensibilidad de temperatura por *span*, incluso se podría corregir por cero, aunque ello pierde interés práctico en la mayoría de las metodologías utilizadas. Si bien no es necesario calibrar el sensor de temperatura de la celda para realizar la corrección con el algoritmo correspondiente a esa familia de celdas, o incluso a ese individuo dentro de la familia, el autor del presente informe recomienda calibrar el mismo, debido a que con el sensor del transductor y con otro termómetro calibrado se podrá definir si existen gradientes térmicos entre dicha celda y el ambiente, o entre dicha celda y las placas de la máquina.

Para el caso de la **presión atmosférica**, y como se mencionó en 2.2.1.2 no hay valores de referencia. Sí se observó que transductores que viajaron por vía aérea, con la consiguiente despresurización en la zona de bodega, requirieron en ocasiones algunos días para estabilizar su indicación. Asimismo, cambios bruscos de la presión atmosférica, salvo en casos puntuales, no parecen influir sobre la indicación del transductor. Un ejemplo de este fenómeno se observó en forma indirecta en un transductor de 100 kN, marca HBM, modelo Z4A, que, al estar su carcasa muy bien sellada, y al transferirle calor sobre la parte más fina de la misma, por ejemplo, con el contacto de las manos, se puede suponer que el aire dentro de dicha cámara se calienta, presurizando así la zona interna, y obviamente aplicando una fuerza de tracción a la zona de medición. Esta suposición guarda consistencia debido a que la indicación que es positiva para compresión, disminuye. Esto mismo, pero desde otro enfoque es planteado por el fabricante que indica en el numeral 4.3 de la referencia [16] que en sus transductores TOP-Z4A de 20 kN y 50 kN de capacidad máxima, con un cambio de presión atmosférica de  $\pm 10$  hPa, puede variar la indicación de cero en aproximadamente 6 N.

Haciendo referencia a la Ilustración 7 y la Ilustración 8, y suponiendo un espesor de pared de 8mm, se puede plantear la siguiente expresión para el transductor de 50 kN:



$$\Delta F = \Delta p \cdot Area = 1000 Pa \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [(120 mm - 2 \cdot 8 mm)^2 - (55 mm)^2] \cdot 1 \cdot 10^6 \frac{mm^2}{m^2} = 6,12 N$$

Por lo que puede demostrarse la equivalencia entre el cálculo y la recomendación del fabricante. En opinión del autor, este cálculo puede resultar una buena aproximación en el caso de otros transductores de fuerza que cuenten con una buena hermeticidad.

En cuanto a la **humedad**, tampoco hay valores de referencia, y el autor de la presente no investigó el tema experimentalmente debido a la falta de equipamiento que permita un intervalo amplio de regulación de la humedad, así como la estabilidad de la misma.

### 3.2.1.3 Histéresis y creep

Para definir la magnitud por la Ruta B de la guía EURAMET cg-4, estas magnitudes prácticamente no inciden, debido a que no hay series de medición que incluyen histéresis, y el tiempo transcurrido entre dos lecturas es de 6 minutos, además que este tiempo debe ser respetado lo mejor posible, con lo cual se logra una muy buena estabilidad respecto del creep.

Los fenómenos de histéresis y creep están relacionados, por lo cual no son independientes, pero en función de cómo se definió la histéresis (diferencia entre indicación en carrera ascendente y descendente), y creep (cambio a carga constante con el tiempo), ambos fenómenos pueden ser estudiados separadamente, asignando todos los temas relacionados con la carga a la histéresis, así como todos los temas dependientes del tiempo al fenómeno creep.

Estas son fuentes de incertidumbre sistemáticas, pero la corrección de estos valores sólo es posible si los mismos son consistentes. Por ejemplo, valores de histéresis que difieran en más de un 20% a 30% entre series de medición, pueden indicar esta falta de consistencia, la cual es asignable generalmente a la metodología de medición. Algo similar sucede cuando el retorno a cero no repite, en este último caso el fenómeno puede ser asociado al creep.

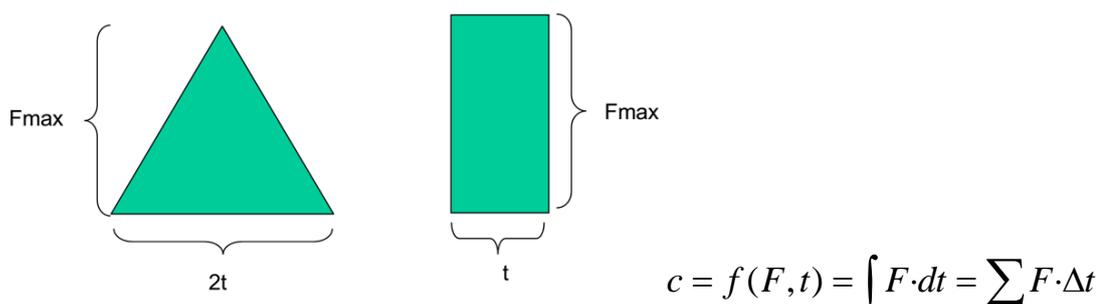
Si bien la norma ISO 376 [3] toma el valor absoluto tanto para la histéresis como para el creep, el autor de la presente tesis recomienda mantener el signo, de modo de poder corregir esta fuente de incertidumbre sistemática, en caso que sea necesario.

En el caso del creep, una idea interesante es la suposición de que el creep en el retorno a cero es una imagen espejada del creep bajo carga, si bien esto no es del todo cierto debido a que las gráficas obtenidas de mediciones reales no muestran este fenómeno, los valores máximos absolutos obtenidos sí guardan esta semejanza. Este fenómeno es aceptado por la ISO 376:11, y es recomenda-



do por el autor y otros científicos para realizar la medición de creep tanto en máquinas de pesos suspendidos como en máquinas de comparación.

Otra hipótesis de trabajo para el caso del creep, definida por el autor de la presente y aceptada por parte de colegas de otros institutos dice: “El creep depende de la historia a corto plazo de carga. El valor obtenido será similar si la integral carga-tiempo es similar.” Esquemáticamente esta hipótesis se representa de la siguiente manera:

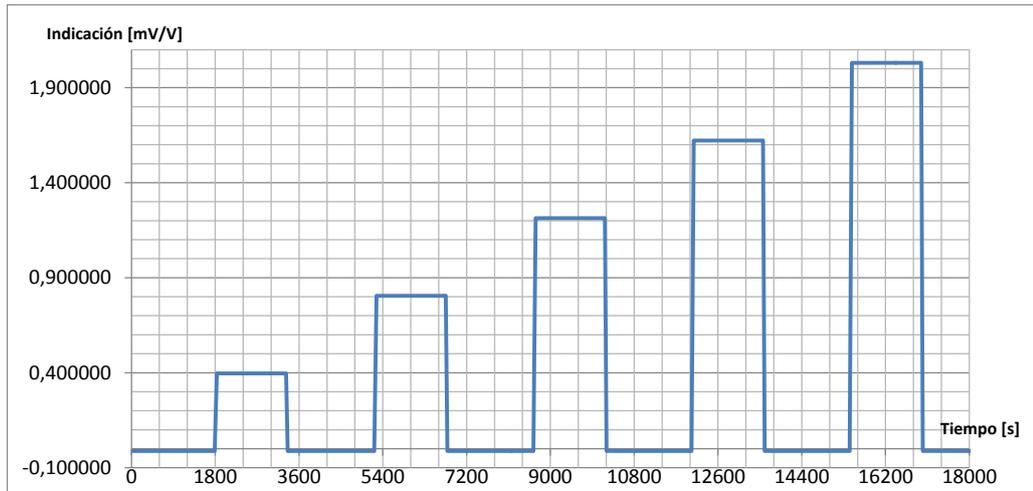


**Ilustración 28. Hipótesis del comportamiento a creep.**

Esta hipótesis es utilizada para las verificaciones intermedias de los transductores de fuerza de 2 kN y de 5 kN, realizados en la DW-FSM de 110 kN, y debido a que no se cuenta con los 10 escalones de carga que se utilizan en su calibración original, realizada en PTB, se ajusta el intervalo de tiempo entre mediciones de modo de lograr que esta integral bajo la curva sea similar, los resultados obtenidos con el uso de este concepto son substancialmente mejores que sin su consideración<sup>35</sup>. Esta hipótesis es muy aproximada, debido a que el creep no necesariamente es lineal con la carga, lo mismo sucede respecto al tiempo, debido a que el creep presenta una curva del tipo potencial y asintótica.

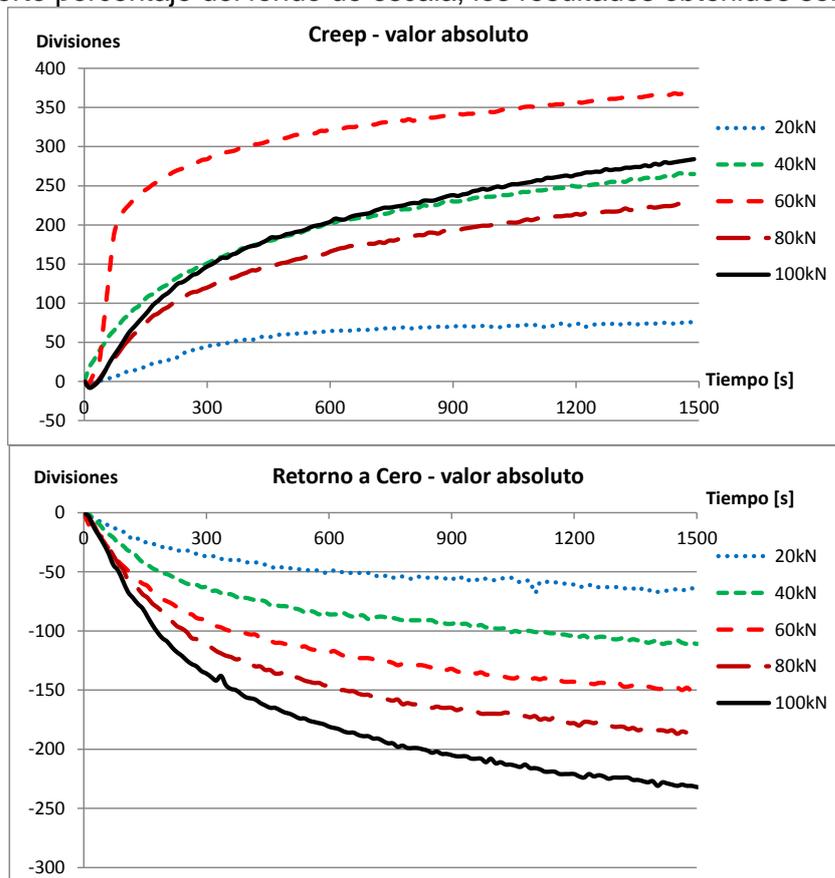
Al momento de la redacción del presente informe, se están analizando estos fenómenos. En el caso del creep, se realizó el siguiente esquema de carga para un transductor HBM Z4A de 100 kN.

<sup>35</sup> La comparación se realiza al ejecutar una precarga a fondo de escala y compararla contra el valor obtenido de una serie de medición. Aplicando el concepto indicado los resultados son equivalentes, mientras que realizando la precarga con un criterio habitual (ISO 376), suelen encontrarse desvíos relativos de hasta  $8 \cdot 10^{-5}$ .

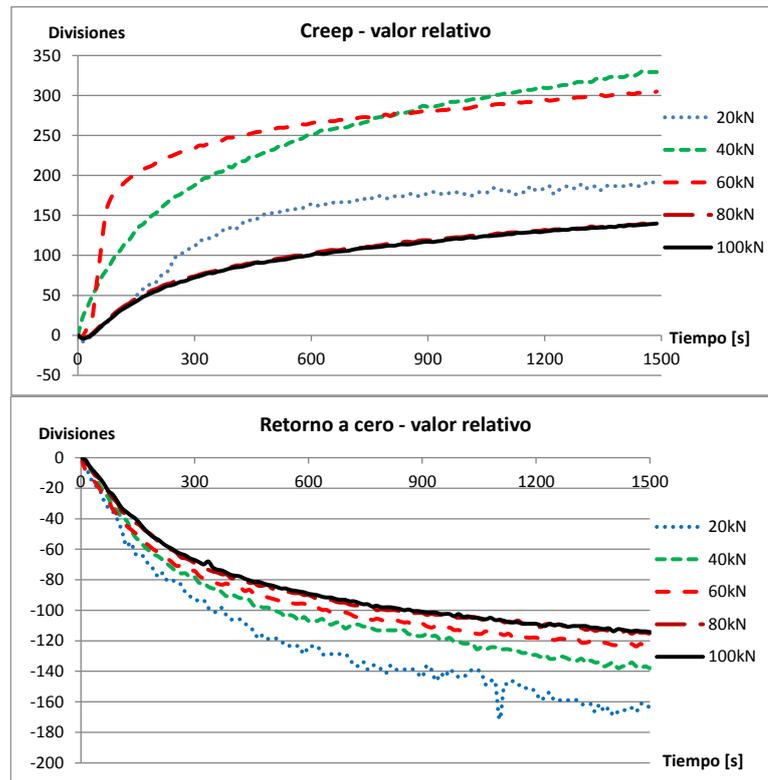


**Ilustración 29. Secuencia de carga para estudiar el fenómeno de creep.**

Para el caso del fenómeno de creep en los primeros cinco escalones de carga, o sea realizado entre carga cero y un cierto porcentaje del fondo de escala, los resultados obtenidos son los siguientes:



**Ilustración 30. Ensayo de creep – resultados obtenidos en forma absoluta.**



**Ilustración 31. Ensayo de creep – resultados obtenidos en forma relativa.**

Como puede observarse en las ilustraciones anteriores, tanto los valores relativos como los absolutos no guardan una linealidad en función de la carga de ensayo. En forma absoluta pareciera ser que los mayores valores se dan en el intervalo medio del transductor, lo mismo sucede en forma relativa, lo cual confirma este supuesto. Igualmente parece haber un comportamiento anómalo en 60 kN.

En cuanto a los valores obtenidos en el retorno, o sea la recuperación del fenómeno, se observa una cierta linealidad observando el mismo en forma absoluta, mientras que, al observarlo en forma relativa, pareciera ser que a mayor carga de ensayo menor efecto relativo del retorno a cero.

Mayores investigaciones de estos fenómenos deben ser llevadas a cabo para realizar mediciones de fuerza en máquinas de comparación con mayor confiabilidad y menor incertidumbre, debido a que en las mismas los tiempos entre lecturas no siempre pueden ser respetados. Asimismo, no siempre se realizan las mediciones hasta el fondo de escala del transductor de referencia, incidiendo esto, además en el *span* del transductor.

#### 3.2.1.4 Fuerzas transversales y momentos flectores

El uso de la articulación entre transductor y máquina permite transformar la mayor parte de los momentos flectores en cargas laterales, por lo tanto, en el caso del transductor articulado puede decirse que las componentes que predominan son las fuerzas laterales, mientras que en el caso del uso de transductores con ambas superficies planas, o sea sin articular, las componentes que predominan son los momentos flectores.



En cuanto a las **fuerzas transversales**, se considera un vector fuerza generado por la máquina que corta el eje del transductor en un punto, pero que no es paralelo, de esta manera el vector fuerza se puede descomponer en una fuerza longitudinal al eje del transductor (eje Z) y una fuerza transversal al eje del mismo, que por conveniencia se descompone en dos ejes (X e Y) ortogonales entre sí.

Estas fuerzas generan tensiones de corte respecto al eje del transductor. En el caso de un transductor de tipo columna, estas fuerzas de corte modifican la distribución de tensiones en la zona de medición. Si esta fuerza de corte es paralela a la ubicación de los *strain gage*, el fenómeno sería compensado, debido a que está integrando una zona donde estas tensiones llegan a compensarse, pero esto sucede sólo en el caso de una ubicación simétrica del mismo. En el caso que la fuerza de corte sea normal a los *strain gage*, es evidente que aparece un momento flector en esa dirección sobre el elemento elástico que será tomado por tracción y compresión en las caras respectivas donde se ubican los *strain gage*, siendo el error introducido en función de la diferente sensibilidad que tenga cada uno de estos *strain gage*. Asimismo, de las tolerancias geométricas de mecanizado y de montaje de los *strain gage*.

En el caso de un transductor tipo membrana, el corte será paralelo a la misma, y siendo la rigidez a los esfuerzos normales muy superiores a la rigidez a flexión que genera la medición, puede despreciarse los cambios que experimentan los *strain gage* adheridos en la zona superior respecto a los adheridos en la zona inferior. Por otro lado, esa fuerza de corte, genera un desplazamiento de las tensiones, que hace que los *strain gage* adheridos en la zona contrapuesta de la membrana sufran el mismo fenómeno, pero de signo contrario. Un tercer efecto aparece al flexar el eje vertical del transductor, con un análisis similar. Por lo antepuesto se puede justificar en parte porqué un transductor de tipo membrana posee una sensibilidad a las fuerzas transversales de aproximadamente un tercio de la experimentada en un transductor de tipo columna.

En cuanto a los momentos flectores, el análisis es similar, salvo que un momento flector no trae aparejado tensiones de corte, por lo cual la distribución de tensiones no se modifica de la misma manera.

Desde el punto de vista de la definición de la magnitud, si la fuerza que actúa sobre el transductor está inclinada respecto del eje del mismo un cierto ángulo  $\alpha$ , entonces la fuerza resultante es igual a la fuerza nominal multiplicada por el coseno de ese ángulo. Si este ángulo es igual o menor a cinco minutos de grado (o su inclinación equivalente de 1,5 mm/m), la fuerza resultante tiene un error menor a  $1 \cdot 10^{-6}$ . Si este mismo valor, se aplica a las especificaciones del fabricante del transductor de fuerza, suponiendo que los efectos de fuerzas transversales son lineales, y analizando que esta inclinación genera una fuerza de  $1,45 \cdot 10^{-3}$  respecto de la fuerza vertical, por aplicación del seno del ángulo de 5 minutos definido, puede realizarse el siguiente análisis:



Según la Tabla 2 y para el caso de un HBM TOP-ZA4, se indica que con una carga del 10% de la vertical se tiene un sensibilidad de  $300 \cdot 10^{-6}$ . Aplicando linealidad se llega a un error en el transductor por esta inclinación de 5 minutos de  $4,35 \cdot 10^{-6}$ , y en el caso del HBM TOP-Z30A, que posee una sensibilidad de  $1000 \cdot 10^{-6}$ , se obtiene un error de  $14,5 \cdot 10^{-6}$ . En ambos casos los valores no son para nada despreciables, siendo estos últimos valores significativamente superiores al error calculado desde el punto de vista de la definición de la unidad.

Es por ello que cuando se alinea y balancea una máquina primaria de fuerza, se busca lograr una fuerza resultante cuya inclinación respecto de la vertical sea inferior a 1 mm/m, esto es alcanzable en la mayoría de las máquinas que fueron diseñadas para ser utilizadas como máquinas primarias. La complejidad de esta alineación y balanceo depende fundamentalmente del diseño de la máquina, y del instrumental de medición disponible.

En cuanto a la **Excentricidad**, se considera un vector fuerza generado por la máquina que es paralelo al eje del transductor, pero que no está centrado respecto del mismo, debido a esta causa se generan momentos flectores parásitos sobre el transductor que dan lugar a desviaciones en la medición. Al colocar un cabezal según ISO 376, el mismo hace de articulación, y en opinión del autor, gran parte de los momentos flectores se transforman en fuerzas laterales.

Que un transductor no quede alineado respecto al eje de la máquina de fuerza se puede deber a que el mismo no está colocado de manera adecuada, o que está colocado de manera adecuada, pero que el eje de acción de la fuerza de la máquina no coincide con el eje geométrico de las placas de centrado de la máquina. El segundo caso, se resuelve con la caracterización de la máquina, que contempla todo lo expuesto en el punto 2, principalmente en el punto 2.3.

Utilizando las especificaciones del fabricante, expuestas en la Tabla 2, con una excentricidad de 1 mm, se tiene un error de  $50 \cdot 10^{-6}$ .

Cabe destacar que es muy importante la metodología de posicionamiento y rotación del transductor de fuerza. Actualmente hay dos métodos que se emplean, el primero, que es utilizado en la mayoría de las máquinas, consiste en centrar el mismo respecto de la placa cilíndrica superior que forma parte del marco de carga, la misma se realiza por medio de instrumentos de medición dimensional. El segundo método es a través de uso de pequeños orificios con pernos guía montados tanto en el plato de la máquina como en el dispositivo de carga del transductor. Esta guía puede hacerse tanto en el plato solidario al marco de carga como al plato solidario a la estructura fija de la misma. Un tercer método fue desarrollado por el autor del presente informe y se realiza utilizando niveles de alta exactitud. A continuación, se presentan los distintos métodos.

**Método 1:**

La mayoría de las máquinas cuentan con placas de centrado cilíndricas cuya superficie es completamente lisa, y de esta manera el centrado se realiza con un calibre<sup>36</sup> o micrómetro de profundidad para superficies cilíndricas. El error típico de este método es de 0,2 mm. Como la sensibilidad del transductor es de  $50 \cdot 10^{-6}$  1/mm, se tiene un error de  $10 \cdot 10^{-6}$ .

**Método 2:**

Algunas máquinas, cuentan con pequeños orificios ubicados en el eje geométrico de las placas de centrado de modo de colocar el transductor con una espiga de centrado. La ventaja de este método respecto al anterior, es que es mucho más rápido y simple operativamente, en contrapartida se requiere que el *eje geométrico*<sup>37</sup> de la máquina coincida con el *eje ficticio*<sup>38</sup> de la misma. El error típico de este método es de 0,2 mm. Como la sensibilidad del transductor es de  $50 \cdot 10^{-6}$  1/mm, se tiene un error de  $10 \cdot 10^{-6}$ . Igualmente el NPL en su investigación referenciado como [4], indica que obtienen un error en el posicionamiento de 0,1 mm con este método.

**Método 3:**

Este método se puede aplicar tanto a máquinas con placas de centrado lisas, como las que poseen orificios de centrado, en este segundo caso no se utilizará la espiga de centrado, o se utilizará una espiga de menor diámetro de manera de lograr un pre-centrado rápido para luego mejorar el centrado final. El mismo consta en colocar el transductor lo mejor centrado posible de manera dimensional, o con la espiga de menor diámetro, y luego con un nivel de dos burbujas perpendiculares de resolución 0,1 mm/m colocado sobre el marco de carga de la máquina, se sube y baja el marco de carga sobre el transductor, hasta lograr que el nivel indique lo mismo antes y después de bajar y subir el marco de carga. El error obtenido con este método, está en el orden de 0,05 mm, con lo cual se obtiene un error aproximado de  $2,5 \cdot 10^{-6}$ . Cabe destacar que esta metodología compensa en parte los errores introducidos por la falta de geometría del transductor, de la máquina y de los dispositivos de carga.

El nivel utilizado en el laboratorio es de burbuja y junto a sus accesorios tienen un peso de 18,2 N, por lo cual se utiliza sólo para el centrado y luego se retira antes de iniciar la medición. Lo ideal sería utilizar un nivel que mida en tiempo real durante la realización de las mediciones de fuerza, ya sea que forme parte del marco de carga con lo cual se requiere una muy buena estabilidad de la masa del mismo, o que mida la inclinación del marco de carga sin contacto físico.

---

<sup>36</sup> No se recomienda utilizar la varilla de profundidad de un calibre pie a coliza, debido a que la medición es de mala calidad. Como sólo se requieren valores comparativos (igual distancia en al menos 3 puntos distribuidos cada 120°), es preferible utilizar un elemento rígido y estable.

<sup>37</sup> Es el definido por el centro del plato superior de compresión (del lado del marco de carga).

<sup>38</sup> Es un eje hipotético por donde pasa la fuerza debida a las masas suspendidas, dicho de otro modo, si se coloca un transductor de geometría perfecta en dicho eje ficticio, la inclinación del marco de carga no varía.



### 3.2.1.5 No linealidad - Error de interpolación

Como se definió en 2.2.1.5, la **no linealidad** es el desvío de la indicación medida, obtenido para cargas crecientes solamente, respecto de una línea recta que pasa a través de la indicación de cero y de la indicación de carga máxima. La utilización de este tipo de recta sólo posee utilidad de aplicación en instrumentos que deban, por temas legales, indicar el valor de fuerza o de masa. Un caso típico es en las *celdas de carga*<sup>39</sup> utilizadas para pesaje, donde por ley la indicación debe ser realizada en unidades de masa. En opinión del autor, sin contar el ejemplo anterior, los casos en que puede ser aplicada la linealidad son en mediciones de exactitudes menores a por ejemplo 0,1%. Esto igualmente hay que analizarlo en cada caso en particular y en función de los resultados de calibración del instrumento en cuestión.

También se había definido al **error de interpolación** como la diferencia entre el valor medido, obtenido del promedio de las indicaciones para cargas crecientes solamente, y el valor obtenido a través del uso del polinomio de aproximación. La práctica habitual es la utilización de un polinomio de tercer grado. En opinión del autor, en una medición donde se requiera una incertidumbre mayor a  $1 \cdot 10^{-4}$ , el polinomio de tercer grado es adecuado. Nuevamente, cada caso en particular requiere ser analizado en función del certificado de calibración.

Un punto importante a analizar son las diferencias conceptuales y de resultados que se presentan en contemplar distintos tipos de polinomios de aproximación. Para ello se estudiaron certificados de institutos de primer nivel, tales como el INRiM de Italia, PTB de Alemania, CEM de España y LNE de Francia, de lo cual se concluyó que no hay un criterio generalizado en cuanto al uso de un polinomio de tercer grado con o sin término independiente.

Cabe destacar que la diferencia entre uno y otro criterio, no genera diferencias apreciables en instrumentos de alta exactitud, o sea desde el punto de vista del resultado o “cuantitativo” puede decirse que es indiferente tomar un polinomio con cruce por cero o un polinomio con término independiente. Igualmente, los especialistas que toman un criterio generalmente están muy en contra del otro criterio, lo cual puede asignarse a una gran diferencia en términos “cualitativos” o conceptuales.

El polinomio en cuestión es el siguiente:  $F_I = A \cdot I^3 + B \cdot I^2 + C \cdot I + D$

Dónde:

$F_I$	[N]	Valor de fuerza interpolado en unidades de fuerza.
$I$	[mV/V]	Valor medio de la indicación del transductor durante la calibración.
$A, B, C, D$		Constantes del polinomio. Con $D = 0$ el polinomio pasa por cero.

<sup>39</sup> Es un instrumento de características constructivas y principio de funcionamiento similar a los transductores de fuerza, pero el uso está orientado a pesaje, o sea para la medición de masa.



Conceptualmente se utiliza un polinomio de tercer grado que pasa por cero debido a que:

- Para una fuerza cero, o sea sin contacto físico entre transductor y máquina, la indicación se hace cero por tara del instrumento o por corrección posterior sobre las planillas de cálculo.
- El primer punto de calibración es el valor sin fuerza del transductor, o sea fuerza cero e indicación cero.
- Este polinomio tiende a dar un valor más conservador, debido a que absorbe algunos errores que el propio transductor posee en cargas muy bajas.

Conceptualmente se utiliza un polinomio de tercer grado que no pasa por cero debido a que:

- Durante la calibración, o por ajuste posterior, la indicación obtenida en fuerza cero será cero, pero este punto se considera como un valor de referencia y no como un punto de medición.
- El requisito de la norma ISO 376 y el criterio generalizado es tomar como intervalo de interpolación, a los valores comprendidos en el intervalo entre el primer punto bajo carga y la carga máxima de medición. Por ello no es necesario que el valor interpolado en carga cero sea cero.
- El ajuste matemático será mejor, y no influenciará a los puntos más cercanos a cero.

El autor considera más adecuado el uso de polinomios con término independiente, igualmente se recomienda que en los casos que lo ameriten se analicen las dos alternativas.

A continuación, se presentan los cálculos obtenidos con ambos criterios:

**Tabla 29. Curva de interpolación sin término independiente.**

INTERPOLACIÓN SIN TÉRMINO INDEPENDIENTE			$I_F =$	$A \cdot F^3$	$B \cdot F^2$	$C \cdot F$	$D$	
				-7,1082E-11	1,4238E-07	0,02000357	0	
F	Valores medios		Errores				Caso C (ISO 376:2011 8.2.4)	
	sin rotación X <sub>wr</sub>	con rotación X <sub>r</sub>	repetibilidad b'	reproducibilidad b	reversibilidad v	interpolación f <sub>c</sub>	W <sub>caso C</sub>	Clase
kN	mV/V	mV/V	%	%	%	%	%	
0	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	-
10	0,200050	0,200047	<b>0,0000</b>	0,005	0,085	<b>-0,0016</b>	<b>0,0121</b>	00
20	0,400110	0,400113	<b>0,0000</b>	0,002	0,057	<b>-0,0036</b>	<b>0,0129</b>	00
30	0,600225	0,600227	<b>0,0017</b>	0,002	0,045	<b>-0,0011</b>	<b>0,0110</b>	00
40	0,800395	0,800387	<b>0,0012</b>	0,002	0,036	<b>0,0026</b>	<b>0,0119</b>	00
50	1,000540	1,000530	<b>0,0000</b>	0,002	0,028	<b>0,0004</b>	<b>0,0105</b>	00
60	1,200720	1,200710	<b>0,0000</b>	0,002	0,020	<b>-0,0001</b>	<b>0,0106</b>	00
70	1,400930	1,400923	<b>0,0000</b>	0,003	0,014	<b>0,0000</b>	<b>0,0106</b>	00
80	1,601180	1,601153	<b>0,0000</b>	0,004	0,010	<b>-0,0004</b>	<b>0,0107</b>	00
90	1,801455	1,801417	<b>0,0006</b>	0,004	0,005	<b>-0,0003</b>	<b>0,0107</b>	00
100	2,001730	2,001717	<b>0,0000</b>	0,002	-	<b>0,0003</b>	<b>0,0105</b>	00

**Tabla 30. Curva de interpolación con término independiente.**



INTERPOLACIÓN CON TÉRMINO INDEPENDIENTE			$I_f =$	$A \cdot F^3$	$B \cdot F^2$	$C \cdot F$	$D$	
				-2,9138E-11	1,3483E-07	0,02000397	-5,6876E-06	
F	Valores medios		Errores				Caso C (ISO 376:2011 8.2.4)	
	sin rotación $X_{wr}$	con rotación $X_r$	repetibilidad $b'$	reproducibilidad $b$	reversibilidad $v$	interpolación $f_c$	$W_{caso C}$	Clase
kN	mV/V	mV/V	%	%	%	%	%	
0	0,000000	0,000000	-	-	-	-	-	-
10	0,200050	0,200047	<b>0,0000</b>	0,005	0,085	<b>-0,0004</b>	<b>0,0117</b>	00
20	0,400110	0,400113	<b>0,0000</b>	0,002	0,057	<b>-0,0035</b>	<b>0,0128</b>	00
30	0,600225	0,600227	<b>0,0017</b>	0,002	0,045	<b>-0,0012</b>	<b>0,0110</b>	00
40	0,800395	0,800387	<b>0,0012</b>	0,002	0,036	<b>0,0025</b>	<b>0,0118</b>	00
50	1,000540	1,000530	<b>0,0000</b>	0,002	0,028	<b>0,0004</b>	<b>0,0105</b>	00
60	1,200720	1,200710	<b>0,0000</b>	0,002	0,020	<b>-0,0001</b>	<b>0,0106</b>	00
70	1,400930	1,400923	<b>0,0000</b>	0,003	0,014	<b>0,0000</b>	<b>0,0106</b>	00
80	1,601180	1,601153	<b>0,0000</b>	0,004	0,010	<b>-0,0004</b>	<b>0,0107</b>	00
90	1,801455	1,801417	<b>0,0006</b>	0,004	0,005	<b>-0,0003</b>	<b>0,0107</b>	00
100	2,001730	2,001717	<b>0,0000</b>	0,002	-	<b>0,0003</b>	<b>0,0105</b>	00

Nota: Se tomó como CMC de la DW-FSM de 110 kN del INTI un valor de  $2 \cdot 10^{-5}$ , consistente técnicamente con la máquina, aunque aún no esté declarada ante el BIPM esta condición. Los valores en negrita se indican con un decimal más de lo adecuado, esto es al simple hecho de mostrar las pequeñas diferencias que se obtienen.

Como puede observarse, las dos alternativas dan valores consistentes, igualmente se aprecia una pequeña diferencia a favor del uso del término independiente. Cabe destacar que, salvo en los puntos de 20 kN y 40 kN, los errores de interpolación son pequeños respecto a la incertidumbre obtenida. En el caso del peor punto interpolado, o sea el de 20 kN, y sabiendo que la incidencia es cuadrática, la relación entre los cuadrados de la interpolación y la incertidumbre estándar dará el valor de incidencia de la interpolación, en este caso su incidencia asciende a 7,5%.

Asimismo, puede analizarse el comportamiento eminentemente lineal del transductor, utilizando el polinomio sin cruce por cero y si se toma como referencia el valor lineal igual a 1, se tiene que la componente cuadrática incide en aproximadamente  $6,8 \cdot 10^{-4}$ , mientras que para la componente cúbica su incidencia es de  $1,5 \cdot 10^{-5}$ , y finalmente el término independiente incide en  $3 \cdot 10^{-6}$ .

En el caso particular del laboratorio de fuerza del INTI, el criterio consensuado fue el de utilizar un polinomio con término independiente, en el cual el valor de dicho término independiente es cero. Si bien este criterio parece un juego semántico, posee las siguientes ventajas: Cumple en parte con las dos posturas, al mismo tiempo que permite verificar ambos polinomios con un mínimo de modificaciones en las planillas de cálculo, asimismo permite al usuario del certificado contar siempre con el mismo polinomio, aunque a veces se le informe un término independiente distinto de cero.

Un tema que puede ser asignado a errores de interpolación, es el caso que se da cuando el transductor de fuerza se calibra sin una tara inicial, salvo por la despreciable carga generada por el dispositivo de carga, pero que luego se monta en una máquina y sostiene una carga inicial mucho mayor.



El caso que amerita este análisis es en las máquinas de calibración por comparación cuya referencia se calibra sin tara y luego trabaja con dicha tara. En la sección 3.2.1.7, se realizará un comentario respecto a esta situación que es necesario tener en cuenta para reducir la deriva a largo plazo.

Este caso presentado recientemente, es el actual en las máquinas de comparación del INTI. En el caso particular de la máquina de comparación de 1 MN, la misma opera habitualmente con transductores de fuerza de 500 kN y 1 MN.

El marco de carga tiene un peso aproximado de 4,6 kN, y operando con el transductor de 500 kN, significa que se hace el ajuste de cero del transductor con una carga real de 4,6 kN, dado que este valor es constante, al menos durante las series de medición, no trae mayores inconvenientes.

Igualmente se hace necesario ajustar la curva de interpolación del transductor de referencia al valor de la tara, debido a que el transductor fue calibrado sin tara y la curva de interpolación fue obtenida en esa condición, puesto que, al operar con una carga adicional, debería recortarse la curva obtenida a partir del valor de la tara.

En la siguiente tabla se muestra el ejemplo de la máquina mencionada:

**Tabla 31. Error cometido al utilizar la curva de interpolación cuando la referencia posee una tara.**

$I_F =$	$A \cdot F^3$	$B \cdot F^2$	$C \cdot F$	$D$	
	2,4966E-12	-3,7168E-10	3,996701E-03	0	
Fuerza en Calibración [kN]	Indicación Interpolada [mV/V]	Fuerza uso subsiguiente [kN]	Indicación Interpolada [mV/V]	Llevado a cero [mV/V]	Diferencia $1 \cdot 10^{-6}$
0	0,000000	4,6	0,018385	0,000000	--
50	0,199834	54,6	0,218219	0,199834	-0,4
100	0,399669	104,6	0,418054	0,399669	0,0
150	0,599505	154,6	0,617890	0,599505	0,5
200	0,799345	204,6	0,817731	0,799346	0,9
250	0,999191	254,6	1,017577	0,999192	1,3
300	1,199044	304,6	1,217431	1,199046	1,8
350	1,398907	354,6	1,417295	1,398910	2,2
400	1,598781	404,6	1,617170	1,598785	2,6
450	1,798668	454,6	1,817058	1,798673	3,1
500	1,998570	504,6	2,016961	1,998577	3,5

*Nota: Transductor HBM Z4A 500 kN, calibrado en PTB año 2011.*

Como puede observarse de la tabla anterior, el efecto en este caso en particular es despreciable.



La incidencia del corrimiento de la curva de interpolación por la tara, puede estimarse considerando los factores cuadráticos y cúbicos de la ecuación. Por ejemplo, para el punto de 400 kN, puede plantearse:

$$\text{Diferencia} = \text{Tara} \cdot \left( \frac{|A \cdot F^3| + |B \cdot F^2|}{F} \right) = 4,6 \text{ kN} \cdot \left( \frac{|2,4966 \cdot 10^{-12} \cdot 400^3| + |-3,7168 \cdot 10^{-10} \cdot 400^2|}{400 \text{ kN}} \right) = 2,5 \cdot 10^{-6}$$

Para finalizar con este tema, se menciona un criterio a tener en cuenta cuando no puede medirse en el valor exacto de fuerza que se utilizó para calibrar el transductor. Este tema no responde a máquinas de pesos suspendidos, debido a que las mismas generan valores enteros de fuerza, pero sí puede suceder en las máquinas de comparación o en el uso subsecuente del instrumento.

El criterio es el siguiente: Si el valor a medir se encuentra lejos del valor de calibración se utiliza la curva de interpolación, cuya incertidumbre asociada incidirá en la incertidumbre final de medición. En el caso que se esté muy cerca del valor nominal de calibración, el error de interpolación puede ser despreciado. Este criterio lo toma la norma UNE-EN ISO 7500-1 [19], que exige tomar los valores con un corrimiento máximo del 1% respecto al valor nominal a ensayar. En el caso de calibraciones bajo la norma ISO 376:11 [3], no hay requisitos al respecto, por ello el autor de la presente investigación recomienda para mediciones con incertidumbres esperadas mayores a  $1 \cdot 10^{-4}$ , estar dentro de un intervalo de  $\pm 0,1\%$  del valor nominal a medir, este valor es razonable de alcanzar en máquinas de comparación, siendo al mismo tiempo un criterio muy conservador.

### 3.2.1.6 Instrumental asociado – Amplificador digital

Este tema fue tratado con la suficiente profundidad en la sección 2.2.1.6, y no hay comentarios importantes al respecto.

Respecto a mantener el sistema de medición conformado por el transductor con sus respectivos dispositivos de carga y el amplificador, o intercambiar el amplificador, depende de cada caso en particular, por ejemplo, no es lógico que un usuario industrial que posee un transductor de fuerza y un amplificador abra el sistema de medición, pero sí es lógico que un laboratorio acreditado que posee 10 transductores de fuerza y dos amplificadores lo haga. Obviamente es preferible calibrar los transductores con el amplificador que con mayor frecuencia se utiliza, y luego a través de la calibración “eléctrica” de los amplificadores poder contar con el grado de equivalencia entre los mismos y con ello poder intercambiarlos.

Por ejemplo el patrón Z4A de 100 kN del INTI, cuyos resultados de calibración se muestran en la Tabla 29, posee una incertidumbre media de calibración de  $1,2 \cdot 10^{-4}$ . Si luego este transductor se utiliza con otro indicador, por ejemplo un HBM DK38 calibrado con el HBM K3608, y sabiendo que la incer-



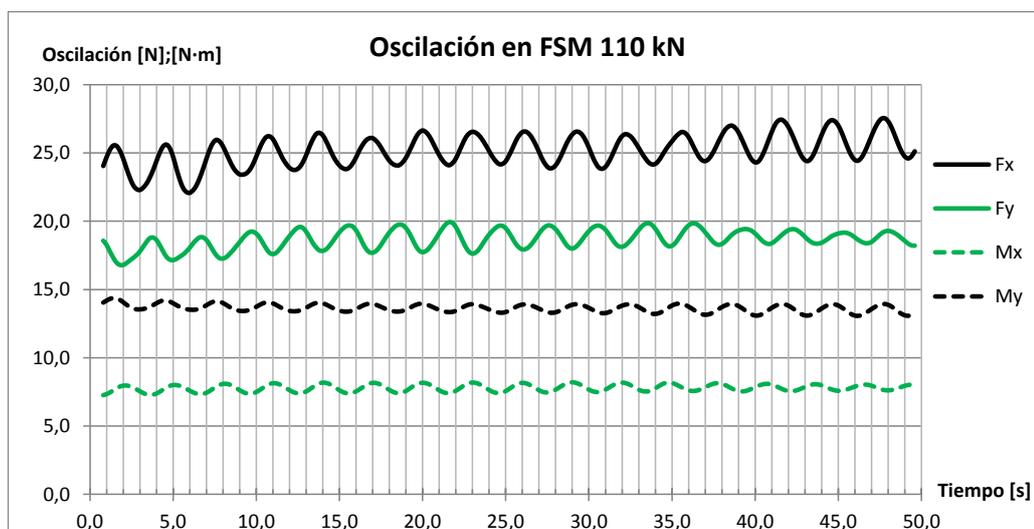
tidumbre de calibración del mismo es de  $2,5 \cdot 10^{-5}$ , despreciando otras fuentes de incertidumbre, y suponiendo para este ejemplo que el desvío entre el indicador original y el sustituto son despreciables, esta incertidumbre del amplificador será sumada en cuadratura al valor original de calibración, por lo cual se obtiene una incertidumbre del nuevo sistema de  $1,23 \cdot 10^{-4}$ , valor casi sin cambios.

Puede tomarse también como criterio que la incertidumbre de calibración del amplificador debería ser menor a un tercio de la incertidumbre de calibración del sistema completo, con lo cual la incertidumbre aumentará como máximo un 10%.

También puede nombrarse el caso de los filtros que utilizan los amplificadores digitales. Este es un tema que normalmente no se tiene en cuenta, y que por lo general no trae inconvenientes, pero es necesario analizar el sistema de medición y la máquina patrón a utilizar. Es común utilizar un filtro de 0,45 Hz a 0,90 Hz en máquinas de calibración por comparación, y un filtro de 0,22 Hz, incluso de 0,10 Hz en máquinas de pesos suspendidos. En este último caso, la libre oscilación de las pesas puede entrar en fase con la frecuencia del filtro del amplificador.

En el trabajo *Oscillating signal components of a dead-weight force-standard machine and reduction techniques* [20], donde analiza la máquina de pesos suspendidos de 498 kN del INM de Corea, determina que su máquina posee una oscilación libre cuya frecuencia es de 0,22 Hz, siendo posible en este caso que se introduzca un problema de medición si se utiliza el filtro de 0,22 Hz.

La máquina de 110 kN del INTI, posee una frecuencia de oscilación en 100 kN de aproximadamente 0,326 Hz, el mismo fue determinado a través de la oscilación de las cargas laterales y los momentos flectores obtenidos con el uso del dinamómetro de seis componentes utilizado en 3.1.3.1. Se presenta a continuación dicho análisis:



*Nota: Las componentes estáticas fueron modificadas en el gráfico para simplificar la visualización, no modificando este cambio el análisis en cuestión.*

**Ilustración 32. Oscilación libre de la DW-FSM de 110 kN en el escalón de 100 kN.**

La oscilación del sistema tendrá mayor frecuencia cuanto menor sea la carga, esto puede demostrarse por aplicación de la ecuación de péndulo simple. Se verifica con la misma la frecuencia de oscilación en 100 kN, para luego calcular en otras cargas.

$$\frac{1}{f} = T_0 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} \rightarrow f = \frac{\sqrt{g}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L}} = \frac{\sqrt{9,79688 \frac{m}{s^2}}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2,22m}} = 0,334 Hz \quad \text{Valor equivalente al anterior.}$$

Donde  $f$  es la frecuencia de oscilación,  $L$  es la longitud del péndulo, o sea desde la articulación hasta el baricentro del conjunto de pesas y  $g$  es la aceleración de la gravedad local.

Con la misma expresión y para los distintos baricentros en función de la carga aplicada, se tiene un intervalo de frecuencias de 0,33 Hz a 0,90 Hz. Por tal motivo se recomienda utilizar el amplificador digital en el filtro de 0,22 Hz, para evitar la interacción del amplificador con dicha oscilación.

Para concluir con el tema, es importante verificar que la puesta a tierra tanto de la máquina, como del instrumental asociado, incluyendo las computadoras personales que se utilizan para la adquisición de datos, o sea todo lo que esté conectado eléctricamente al transductor de fuerza, sea única y se encuentre en forma adecuada. Esto es debido a que en caso contrario habrá circulación de corrientes parásitas entre los distintos componentes, generando inestabilidad en la indicación, o un corrimiento de la misma.

### 3.2.1.7 Deriva temporal a largo plazo

Además del tiempo, las causas que inciden en la deriva temporal de un sistema de medición de fuerza pueden asociarse a los siguientes factores:

- Frecuencia y condiciones de uso.
- Condiciones de transporte, cuyo caso extremo es el transporte por vía aérea.
- Condiciones ambientales de almacenaje y de uso.

El **tiempo** es uno de los factores típicamente analizados, y las posibles correcciones surgen de un análisis considerando que el instrumento posee un comportamiento lineal.

Una mayor **frecuencia de uso** puede considerarse en algunos casos con una equivalencia de incremento del tiempo, mientras que una menor frecuencia de uso equivaldría a lo contrario. En cuanto a las **condiciones de uso**, cabe destacar la manipulación, efectos de fatiga en máquinas de ensayo y/o procesos industriales con grandes oscilaciones de carga, así como el montaje y desmontaje del instrumento.



Un caso particular a tener en cuenta es cuando se deja al transductor bajo una carga permanente, que puede ser la debida a un marco de carga en una máquina de calibración por comparación, por lo cual se recomienda dejar descargado el transductor de fuerza cuando este no está operando. Cuando se requiere realizar una medición, se le aplicará al mismo la tara durante un tiempo suficientemente largo para reducir el fenómeno de creep, así como los gradientes térmicos entre transductor y placas de carga.

En el caso de la máquina de comparación del INTI, el marco de carga tiene un peso aproximado de 4,6 kN, y cuando opera con un transductor de referencia de 500 kN, significa que la tara que soporta el transductor es menor al 1%, por lo tanto, en este caso podría llegar a desprejarse el fenómeno de deriva a largo plazo por esta situación, aunque igualmente se recomienda mantener al transductor descargado.

Las **condiciones de transporte**, o sea cambios higrotérmicos y de presión atmosférica, vibraciones y golpes, etc, también inciden sobre la deriva. Se considera como condición extrema de transporte, al envío del instrumento por vía aérea y en la bodega no presurizada del avión.

Las **condiciones ambientales** de uso afectan, pero están limitadas en tiempo. Es importante mantener los instrumentos en salas climatizadas las 24 h y los 365 días del año. Esto limitará mucho las tensiones internas que se generen por cambios de temperatura y humedad, así como reducirá los riesgos de corrosión, con la consiguiente disminución de la deriva debida a fatiga térmica.

### 3.2.1.8 Condiciones extremas de carga

Lo relativo a condiciones extremas de carga está íntimamente relacionado con la geometría del transductor y los dispositivos de carga. La geometría del transductor está fuera del alcance de la presente investigación, no así el estudio de los dispositivos de carga.

Es muy recomendable utilizar siempre los mismos dispositivos de carga en cada transductor en particular; o sea definir al instrumento como el conjunto completo que incluya los dispositivos de carga, el cable de conexión, el amplificador, y otros accesorios. Es práctica habitual el uso de un mismo dispositivo de carga en dos transductores distintos, y en opinión del autor esto no traería mayores inconvenientes en el caso que los transductores presenten la misma geometría y la misma capacidad de carga, de modo que la deformación plástica del dispositivo sea estable.

En compresión, al realizar los giros para determinar la reproducibilidad, los dispositivos de carga se giran junto al transductor, debido a que son parte del sistema de medición. Por esta razón para verificar que el dispositivo funciona adecuadamente, se puede mantener el transductor en la misma posición y verificar repetibilidad, luego realizar varias mediciones con el dispositivo de carga en distintas



posiciones, por medio de giros o por desplazamiento del huelgo hacia distintas ubicaciones. Para obtener un valor objetivo respecto del dispositivo, es necesario mantener un esquema de tiempos de carga y descarga muy estable.

En tracción, sucede lo mismo, los accesorios se giran con el transductor, a veces esto no es posible, sobre todo en máquinas de ensayo, por lo cual se recomienda analizar la incidencia del giro de los accesorios con la posición fija del transductor. También puede, dentro de ciertos límites, probarse de desenroscar varios filetes de rosca y comparar los resultados.

En este último caso la práctica recomendada es ajustar las roscas hasta hacer tope y luego retroceder un valor fijo, por ejemplo, un cuarto de vuelta. Esta posición podría dejarse marcada en forma indeleble tanto en el transductor como en el dispositivo. Dejar un dispositivo apretado con un cierto par torsional trae aparejados problemas de repetibilidad, histéresis y cambios en la curva de interpolación, debido a un cambio en las tensiones internas introducidas por dicho apriete.

#### 3.2.1.9 Toma de datos

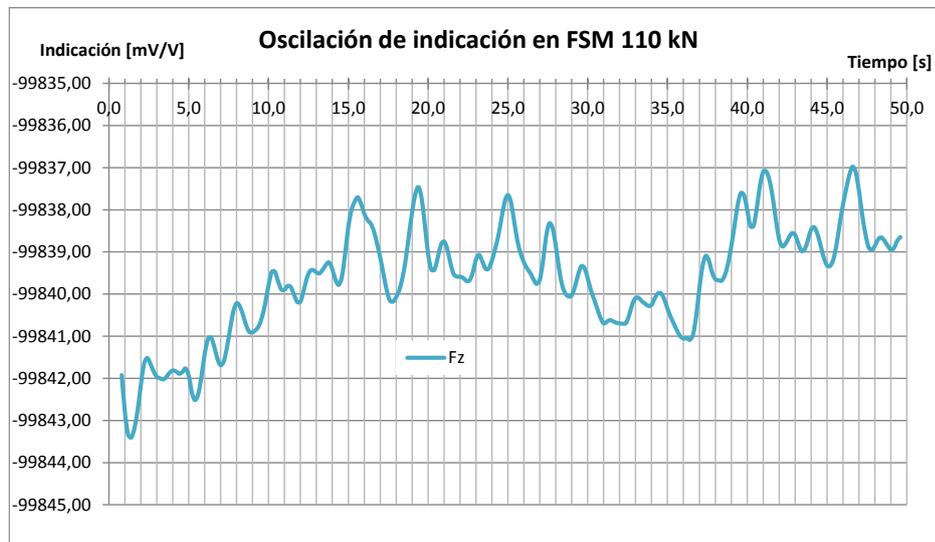
Como se mencionó en 2.2.1.9, la toma de un valor de indicación en cada punto de medición, puede no hacer evidente varios fenómenos, como ser la inestabilidad de la carga, la oscilación de las pesas de la máquina de pesos suspendidos, rozamientos entre dichas pesas, efectos dinámicos de acomodamiento de las mismas, etc. Evidentemente el registro de datos en forma continua y con una frecuencia que puede ser desde 0,5 Hz hasta 10 Hz o más, puede evidenciar varios de estos fenómenos.

La adquisición de cada dato generalmente se asocia al momento en el cual fue tomado, por lo cual se tienen las siguientes tres variables: tiempo, valor de referencia, e indicación. Al graficar y/o analizar estos datos correlacionados, puede verse si las series de mediciones fueron realizadas en forma adecuada o no. En cuanto al valor de referencia, el mismo sólo se tiene en condiciones de medición, pero puede verse mientras el equipo patrón va de un estado de carga al siguiente, fenómenos dinámicos.

En el caso del registro continuo de datos, se recomienda tomar como indicación al valor medio obtenido a través de un muestreo de como máximo cinco segundos. Este valor evidentemente será más representativo que un único valor, aunque debería tomarse como valor de resolución al valor mayor entre media división (criterio habitual) y el desvío estándar de dicho muestreo. En el caso de tomar varios valores discretos, por ejemplo, de 2 a 5 datos, también se recomienda un intervalo menor a cinco segundos, pero en este caso al contar con pocos datos, la resolución debería ser el mayor valor entre media división y la mitad del intervalo de los valores obtenidos.



Para dar un ejemplo de cálculo, se presenta la oscilación de la carga vertical del dinamómetro de seis componentes, cabe destacar que la ilustración siguiente se condice con la Ilustración 32.



**Ilustración 33. Oscilación de indicación en la FSM de 110 kN utilizando un dinamómetro de seis ejes.**

Se utiliza esta medición, debido a que dicho dinamómetro posee alta rigidez transversal y por ello es bastante sensible a la oscilación de las pesas de la máquina, con lo cual presenta una oscilación marcada en la carga. Normalmente un transductor de alta exactitud tendrá un comportamiento significativamente mejor.

Por observación del gráfico anterior, y con el criterio de tomar el valor en 30 s, según lo estipula la ISO 376, el valor obtenido sería  $-99839,6$  N, igualmente en función de la oscilación un único valor podría variar significativamente, por ejemplo, entre  $-99840,7$  N y  $-99838,3$  N. En el caso de tomar 5 valores discretos, estos podrían estar contenidos en dicho intervalo de tiempo, con un valor medio de  $-99839,5$  N y una resolución de 1,2 N. En el caso de tomar datos continuos, como es el caso del gráfico, el valor medio sería de  $-99840,0$  N con una resolución de 0,7 N.

Si bien esta última metodología parece incrementar la incertidumbre debida a la resolución, el promedio de varios valores tendrá una incidencia positiva casi directa en la incertidumbre debida a repetibilidad, así como una posible mejor incertidumbre debida a reproducibilidad, creep, error de cero, etc.

Cabe destacar, que la resolución de un sistema de medición puede ser definido por el desvío estándar o por el intervalo de valores definidos por la oscilación de la indicación, por lo cual, no siempre la resolución es la mínima división del amplificador digital. Con esto quiere hacerse notar que la resolución debería tomarse siempre que fuese posible con este criterio.



### 3.2.2. Dispositivos de carga utilizados

En la sección 2.2.2 se hizo mención a los cuidados a tener en cuenta en el uso de dispositivos de carga tanto de tracción como de compresión. En las secciones 2.2.1.8 y 3.2.1.8 también se mencionó el tema, dando algunas pautas sobre la verificación de los mismos.

En esta sección se dan algunos criterios de diseño relacionados únicamente a dispositivos de carga para compresión, esto es debido a que los transductores de referencia que se utilizan en mediciones de alta exactitud trabajan en la gran mayoría de los casos a compresión.

Cabe destacar que los criterios que se presentan a continuación están basados en el estudio de los dispositivos de carga de varios modelos de transductores de fuerza de referencia de alta exactitud. Estos dispositivos son provistos por el fabricante, siendo los criterios de diseño parte de su know-how comercial.

En la siguiente figura se muestran los dispositivos de carga que pueden utilizarse en un transductor que trabaja a compresión, para luego dar pautas de diseño de cada uno de estos elementos.

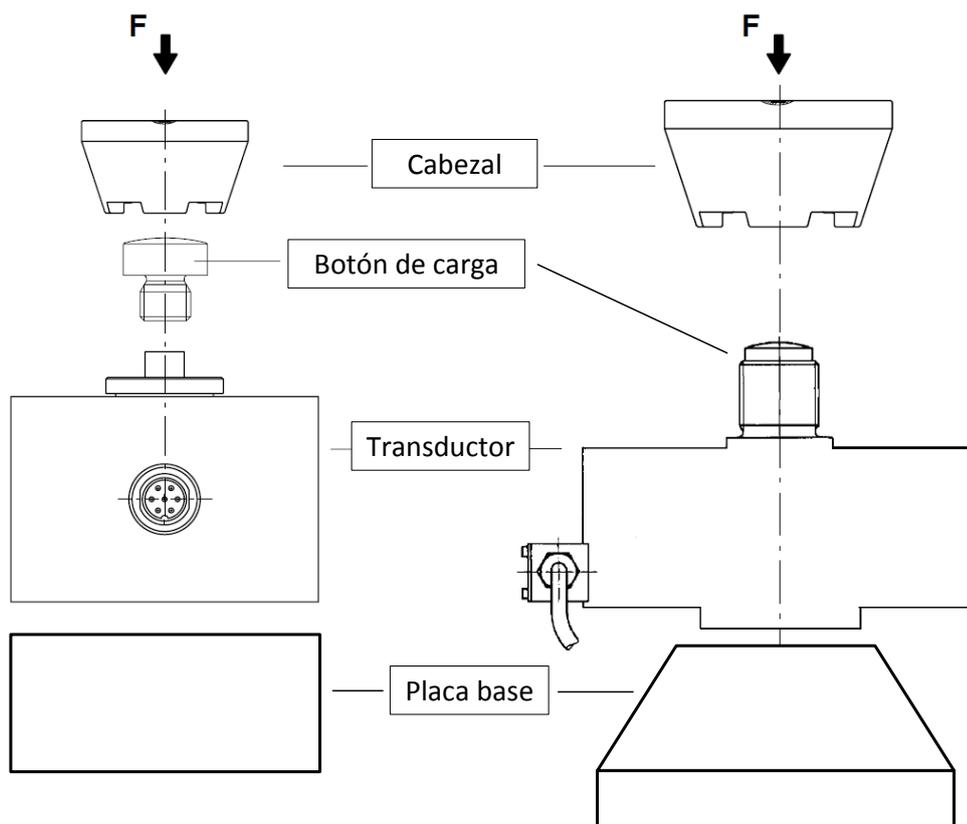
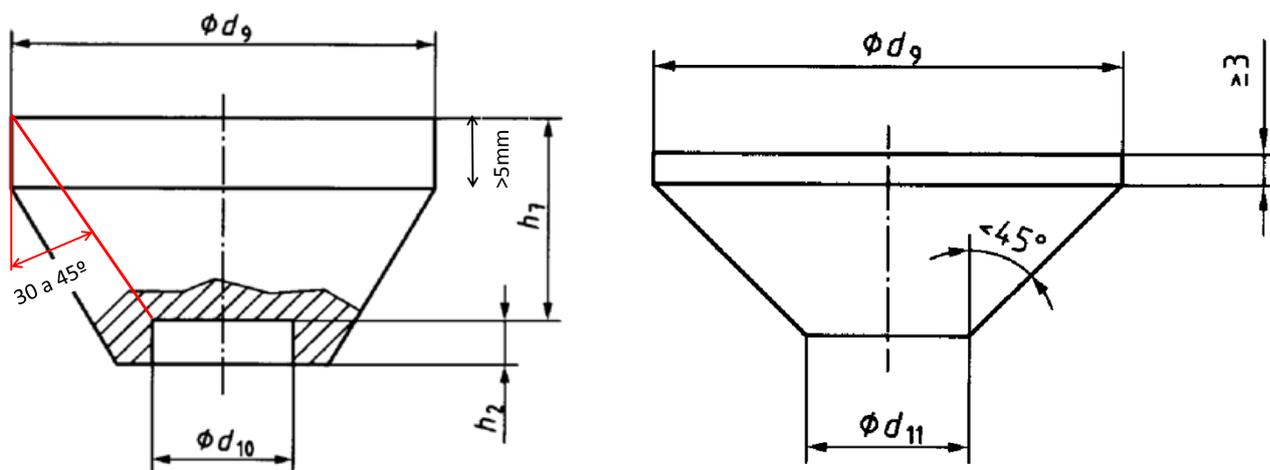


Ilustración 34. Esquema de dispositivos de carga para transductores que trabajan a compresión.

**Cabezal:**

El mismo, junto al botón de carga cumplen la función de articulación, con la cual mejoran la alineación de la carga y reducen substancialmente los momentos flectores sobre el cuerpo del transductor. Asimismo, y debido a que las tensiones de contacto entre botón de carga y cabezal son altas, este último aumenta su sección de modo de reducir las tensiones de contacto a un valor adecuado entre el cabezal del transductor y la placa de carga de la máquina.



**Ilustración 35. Cabezal de carga. Izq. Para botón de carga esférico. Der. Para botón de carga plano.**

De la ilustración anterior, pueden verse dos tipos de cabezales, el de la izquierda es el de uso típico en transductores de alta exactitud y es el que se trata en este informe. En el caso del cabezal de la derecha, se utiliza con la única función de disminuir las tensiones de contacto entre transductor y la placa de carga de la máquina, generalmente para transductores de altas capacidades y para calibración de máquinas para ensayos.

Las tensiones de contacto entre cabezal y placa de carga de la máquina, supuestas uniformes, deben ser menores a 100 MPa, este es un requisito que figura en el numeral A.4.5 de la norma ISO 376:11 [3]. El diámetro  $d_9$  de la Ilustración 35 se dimensiona para cumplir este criterio.

En cuanto a la superficie de contacto botón de carga – cabezal, y en opinión del autor, debería diseñarse de modo que las tensiones supuestas distribuidas uniformemente en toda la superficie estén en el orden de 200 MPa<sup>40</sup>, o sea el diámetro  $d_{10}$  se dimensiona con este criterio. El mismo, junto al requisito definido en el numeral A.4.1 de la norma ISO 376:11, donde pide un material con límite de fluencia de al menos 350 MPa, definen el tipo de material a utilizar.

<sup>40</sup> Aunque el material posea un límite de fluencia mayor a 350 MPa, considerar 200 MPa es un valor conservador que tendrá en cuenta un 20% de sobrecarga accidental, y la distribución no uniforme de la carga sobre la superficie, asimismo la idea es que la impronta sobre el cabezal de carga no ocupe toda la superficie (diámetro  $d_{10}$ ), de modo de poder verificar el centrado de la impronta respecto al cilindro generado por dicho diámetro.



El ángulo marcado en la figura, debería estar entre  $30^\circ$  y  $45^\circ$ <sup>41</sup>, siendo preferible este último valor. Este se realiza de modo de ayudar a la apertura y distribución de carga, aunque podría trabajarse con un cabezal con geometría cilíndrica y con ello no obtener una diferencia significativa.

La dimensión denominada  $h_2$ , es usual definirla entre 5 y 10 mm, la misma debería ser la mínima posible que asegure un buen centrado y seguridad de operación. Se prefiere que la misma sea acotada para poder reducir el huelgo entre la superficie cilíndrica del botón de carga y la del cabezal, y con ello ganar en exactitud en cuanto a la repetibilidad y reproducibilidad del posicionamiento del mismo.

La zona cilíndrica superior, es para facilitar el centrado del transductor respecto de la placa de carga de la máquina, y por esta razón se recomienda que la misma tenga una dimensión mínima de 5mm.

El diámetro  $d_{10}$ , se calcula con un huelgo diametral respecto al diámetro del botón de carga de 0,1mm a 0,2mm, esto es según recomendación de fabricantes y requisito de la norma ISO 376:11. En la mayoría de los transductores un huelgo de 0,2 mm es adecuado y es conveniente por temas prácticos, pero en el caso de transductores de alta exactitud este huelgo debería mantenerse por debajo de 0,1 mm, teniendo especial cuidado que un huelgo muy pequeño puede introducir mayores momentos flectores en el transductor, en el caso que el mismo no articule adecuadamente, debido a rozamientos contra las paredes laterales.

La última dimensión que queda definir es la que figura como  $h_7$ . Esta debería ser mayor a la mitad de la diferencia entre el diámetro  $d_{10}$  y el diámetro  $d_9$ , esto es suponiendo una apertura de la distribución de carga con un ángulo de  $45^\circ$ , criterio tomado ampliamente en la bibliografía referente a resistencia de materiales. Igualmente se recomienda una altura  $h_7$  de al menos la mitad de  $d_9$ .

Dimensionalmente queda definir las tolerancias geométricas. Para ello se recomienda un paralelismo entre las superficies horizontales, o sea entre la definida por el contacto placa de carga – cabezal y por el contacto cabezal – botón de carga, así como la planitud de ambas superficies, que deberían ser mejor que  $0,02 \text{ mm/m}$ <sup>42</sup>. Asimismo se recomienda una concentricidad mejor a  $0,05 \text{ mm}$ <sup>43</sup> entre el cilindro que genera el diámetro  $d_9$  y el que genera el diámetro  $d_{10}$ . La rugosidad superficial Ra en la superficie de contacto con la placa de carga de la máquina puede estar en el orden de  $1,6 \mu\text{m}$ , esta rugosidad no conviene que sea muy baja, debido a que si tanto el cabezal como el plato de carga de la máquina poseen rugosidades muy bajas, no permite el ingreso de aire en forma rápida cuando se descarga el transductor de fuerza, y con ello se genera una momentánea succión sobre el cabezal, el

---

<sup>41</sup> Si bien un menor ángulo trae aparejado una mejor redistribución de tensiones, también genera una mayor altura del dispositivo de carga y con ello una mayor inestabilidad, debido a que el mismo apoya sobre una superficie esférica y se alinea al momento de apoyar sobre el marco de carga de la máquina.

<sup>42</sup> Parámetro en concordancia con el “paralelismo entre ambas caras de compresión” relativa a las características geométricas de la máquina de pesos suspendidos, sección 3.1.3.

<sup>43</sup> Parámetro en concordancia con el Método 3 de centrado del transductor, sección 3.2.1.4.



cual cae luego de un breve intervalo de tiempo sobre el transductor, afectando la repetibilidad. En el caso de la zona de contacto con el botón de carga debería ser mejor que  $0,8 \mu\text{m}$ .

En cuanto a los materiales, los mismos deben poseer un límite de fluencia de al menos 350 MPa. Igualmente, un límite de fluencia muy alto, junto a una alta dureza no son recomendables, debido a que el cabezal debería poseer menor dureza y menor límite de fluencia que el botón de carga y que la placa de carga de la máquina, en el primer caso para mantener la superficie esférica del botón de carga y en el segundo para que, en caso de alguna imperfección, se dañe el cabezal y no la placa de carga de la máquina, o sea la placa de carga termina siendo el material fusible y/o de desgaste.

En el laboratorio de fuerza del INTI, el criterio es utilizar un acero SAE 4140 laminado en caliente. El mismo posee un límite de fluencia aproximado de 635 MPa, y una dureza en la escala Brinell de 270.

Tomando en cuenta este valor de límite de fluencia, y suponiendo que el material no aumenta dicho valor por trabajo plástico, la impronta que se genere en el cabezal luego de varias aplicaciones de carga será la definida por esta tensión de contacto.

Para concluir con el cabezal, se dimensiona a modo de ejemplo el cabezal para un transductor HBM Z4A de 100 kN. Por observación de la **Ilustración 7**, se tiene que el diámetro del botón es de 30 mm, se debería medir el transductor en particular, pero a modo de ejemplo se supone que el diámetro es de  $30,00 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ . Con esta dimensión se tendrá un diámetro  $d_{10}$  de  $30,10 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ . La profundidad se tomará en 10 mm de modo de asegurar un buen posicionamiento y seguridad. El ángulo quedará definido por las demás dimensiones. El diámetro  $d_9$  se calcula para una tensión de contacto de 50 MPa (a lo sumo 100 MPa según ISO 376), por lo cual será:

$$d_9 = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot \sigma_c}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ N}}{\pi \cdot 50 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}} = 0,0505 \text{ m} \cong 50 \text{ mm}$$

Con esta dimensión, puede obtenerse la altura  $h_7$ , que será igual a 25 mm.

Con el mismo criterio, se puede estimar<sup>44</sup> el diámetro de la impronta generada por las altas tensiones de contacto entre botón de carga y cabezal, para ello es necesario conocer el límite de fluencia del material, en este ejemplo se lo considera de 635 MPa, por lo cual se tiene:

---

<sup>44</sup> El cálculo presentado es estimativo debido a que lo que interesa en el cálculo es contar con un parámetro de diseño y/o verificación. Un cálculo más exacto y adecuado se debería basar en considerar las tensiones de contacto, por ejemplo, con la teoría de Hertz, considerando el material en estado elasto-plástico.



$$d_{IMPRONTA} = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot \sigma_c}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ N}}{\pi \cdot 635 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}} = 0,014 \text{ m} = 14 \text{ mm}$$

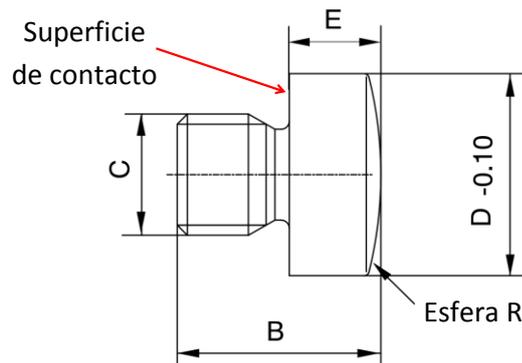
El diámetro de la impronta medida en el cabezal del transductor de fuerza de 100 kN del INTI fue de aproximadamente 16 mm, por lo cual se concluye que el cálculo ofrece una buena aproximación.

### Botón de carga:

Muchos transductores poseen este botón de carga integrado al mismo, esto sucede sobre todo en transductores que trabajan sólo a compresión, mientras que en el caso de transductores que también funcionan a tracción lo más común es que presenten botones de carga removibles.

La función del botón de carga, junto al cabezal es la de generar una articulación entre el transductor de fuerza y la máquina.

Dimensionalmente depende de la geometría del transductor de fuerza en cuestión. A continuación, se da el caso de un botón de carga para un transductor HBM Z30A de 10 kN de capacidad máxima.



**Ilustración 36. Botón de carga para transductor HBM Z30A de 10 kN.**

En el caso particular de este transductor, la recomendación es seguir las indicaciones del fabricante, igualmente aquí se dan pautas de diseño en función de los criterios del autor del presente informe.

El diámetro **D**, como se dijo debe ser 0,10mm menor que el alojamiento del cabezal. La dimensión **E**, debería tener la mitad del diámetro **D**, esto es por la apertura a 45° de la distribución de carga. La longitud **B**, debe ser tal que no haga tope, debido a que la superficie de contacto entre transductor y botón de carga es la definida por la superficie plana indicada en la **Ilustración 36**.

La superficie esférica debe ser de un amplio radio de curvatura. En este caso no hay un criterio definido de como estimarlo, pero debe ser lo suficientemente grande como para no generar muy altas tensiones de contacto con el cabezal, y lo suficientemente baja para generar el efecto de articulación. Posiblemente en relación al principio de funcionamiento del transductor en cuestión, el radio de curvatura sea el necesario para colocar el centro de dicha superficie esférica en una zona que convenga



al transductor. Con este criterio, el transductor HBM Z30A ubica el mismo por arriba de su zona central, mientras que en el caso del HBM Z4A lo ubica bastante por debajo del cuerpo del transductor. Para este ejemplo se puede tomar un radio de curvatura de 40 a 50 mm.

En cuanto a la superficie de contacto, es recomendable dimensionar o verificar que la misma presente una tensión de contacto, supuesta uniforme, menor a 200 MPa.

Las tolerancias geométricas que interesan en este caso es la concentricidad del diámetro **D** con el diámetro de la rosca **C**, para ello puede tomarse una tolerancia de 0,05mm. Asimismo el centro de la superficie esférica debe estar alineado respecto del eje definido por el diámetro **D**, mejor que 0,10mm, y por último la superficie de contacto debe ser perpendicular al eje de la superficie esférica con una tolerancia mejor a 0,10 mm/m. La rugosidad superficial Ra en la superficie de contacto puede estar en el orden de 1,6  $\mu\text{m}$ , mientras que en la superficie esférica debería ser mejor que 0,8  $\mu\text{m}$ .

En cuanto al material, el mismo debe poseer mayor dureza y límite de fluencia que el cabezal de carga. El criterio tomado en el laboratorio de fuerza del INTI, es a través del uso de acero tipo SAE 4140 tratado térmicamente. El mismo puede poseer un temple a 850 °C y un revenido de 540 °C, y con ello se obtiene un límite de fluencia aproximado de 1100 MPa y una dureza en la escala Brinell de 360. En cuanto al límite de fluencia es recomendable que el mismo sea al menos un 30% superior al que presenta el cabezal, con el único objeto que la superficie esférica mantenga su geometría sin deformación plástica.

Con todas estas consideraciones, el cálculo del botón de carga de un transductor HBM Z30A de 10 kN de capacidad máxima sería el siguiente:

Se parte del diámetro **D**, que en este caso está definido en 20mm, por lo cual la altura **E** queda en 10 mm. El radio de la superficie esférica **R** se toma en 50 mm.

#### **Placa base:**

Esta placa es suministrada por el fabricante en muy pocos modelos de transductores, generalmente acompañan a transductores de pequeñas dimensiones y que trabajan en altas cargas, o sea cuando hay altas tensiones de contacto. Asimismo, es posible que en algunos casos el fabricante haya agregado esta placa base para reducir la interacción máquina-transductor en un modelo particular de transductor de fuerza.

Esta placa base, si no es suministrada o requerida por el fabricante, es de uso opcional y cumple con las siguientes tres funciones: Reducir las tensiones de contacto en caso de ser necesario, reducir la interacción máquina-transductor, y actuar como superficie de desgaste.



Para mediciones de alta exactitud, como ser una comparación internacional, o una trazabilidad a través de la ruta A de la EURAMET cg-4 [2], es recomendable su uso.

Las pautas de diseño son similares a las ya mencionadas. Dimensionalmente, es conveniente que el diámetro exterior se corresponda con el diámetro de la placa de carga de la máquina, para simplificar las tareas de centrado, y la altura sea de al menos la mitad del diámetro de dicha placa. No es fundamental darle forma tronco-cónica, pero si es recomendable. La tolerancia geométrica a cumplir es el paralelismo de sus caras, que requiere que sea mejor a 0,02 mm/m, así como una planitud que debería ser del mismo orden de magnitud. La excentricidad pierde sentido práctico, debido a que el transductor se posiciona a través de la alineación del eje del cabezal respecto al eje de la placa de carga superior de la máquina. La rugosidad superficial no es muy importante, puede tomarse como apropiada una rugosidad Ra de 1,6  $\mu\text{m}$ .

En cuanto a los materiales, debe ser de límite de fluencia mayor a 350 MPa, siendo recomendable utilizar el mismo material que para el cabezal, o sea un SAE 4140 laminado en caliente.



## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones clasificadas en tres grupos, el primero se refiere a la definición de la unidad, basado en el estudio de las variables que la definen y a través de un estudio analítico, en tanto el segundo grupo se refiere a las magnitudes de influencia que inciden sobre la materialización de la unidad, o sea los inherentes a la máquina de pesos suspendidos, mientras que el tercer grupo se refiere a las magnitudes de influencia que inciden sobre los patrones de transferencia, así como las dispositivos de carga que estos utilizan.

En cada caso en particular, se menciona si la conclusión y/o recomendación es aplicable sólo al caso de estudio, o si por el contrario es aplicable a la generalidad de los casos. Asimismo, se plantean algunas situaciones en las cuales las conclusiones y/o recomendaciones son extrapolables a otros casos, pero en los cuales pueden esperarse resultados distintos.

### 4.1. DEFINICIÓN DE LA UNIDAD

Todo lo expuesto en la presente sección está directamente relacionado a las secciones 2.1.1 y 3.1.1, lo cual aplica al caso de definir la unidad en máquinas de pesos suspendidos, o sea apunta únicamente a este tipo de equipamiento, y a los requisitos formales para declarar la CMC del mismo.

#### **Conclusiones:**

- La determinación del valor de la masa que posee cada pesa de la máquina de pesos suspendidos (DW-FSM) de 110 kN del INTI es adecuada. Asimismo, la deriva temporal de cada una de estas pesas puede considerarse despreciable, debido a que no se evidenció corrosión, desgaste por fricción, o limaduras de material por rozamiento. En otras máquinas de pesos suspendidos, y en cuanto a las pesas, las mismas pueden ser asimiladas en función de la incertidumbre pretendida de la máquina a las clases E2, F1 y F2 de la recomendación internacional OIML R111-1 [6], dicha asimilación sería sólo respecto de la calidad geométrica, la terminación superficial y las características magnéticas.
- La gravedad local medida oportunamente en el sitio de implantación de la DW-FSM de 110 kN es coherente con las estimaciones realizadas, igualmente el valor presenta un sesgo negativo respecto a las metodologías planteadas en 3.1.1.2, lo cual puede indicar un error en la medición original, o un error en la altitud asignada al sitio de implantación, y con ello un error en las estimaciones realizadas en la presente investigación. En la generalidad de los casos, la gravedad local puede ser estimada con ecuaciones como la de Schwartz y Lindau [7] y/o utilizando sistemas de información geográfica como ser el SISProject [8], en los casos en que la incertidumbre esperada sea superior a  $2 \cdot 10^{-5}$ , mientras que para incertidumbres menores es recomendable la medición



en forma relativa o absoluta. Asimismo, los distintos métodos de estimación pueden ser utilizados para confirmar las mediciones gravimétricas.

- Respecto a la determinación de la densidad del aire, la misma es adecuada para la DW-FSM de 110 kN del INTI. En general, esta variable influye en gran medida en la magnitud, por lo cual es fundamental definir adecuadamente los intervalos de temperatura, humedad y presión atmosférica en los cuales se va a utilizar el equipamiento. Asimismo, una máquina con incertidumbres del orden de  $1 \cdot 10^{-5}$  no podrían alcanzarse sin la corrección del valor de fuerza debido a la densidad del aire en el momento de la medición.
- Respecto a la densidad de las masas construidas en acero, se puede trabajar con el valor brindado por el fabricante en todas las incertidumbres superiores a  $2 \cdot 10^{-5}$ . Para incertidumbres menores, puede ser necesario medir la densidad de los lotes representativos del material. En cuanto al aluminio, sólo es recomendable para incertidumbres superiores a  $5 \cdot 10^{-5}$ , para incertidumbres menores, es necesario medir la densidad de cada lote de fabricación, así como corregir el valor nominal por medición de la densidad del aire.
- Del análisis de la definición de la unidad, se obtuvo una incertidumbre en la fuerza generada para la DW-FSM de 110 kN de aproximadamente  $6,4 \cdot 10^{-6}$ , concluyendo que el valor es adecuado para una incertidumbre total del equipo de  $2 \cdot 10^{-5}$ . Para una DW-FSM genérica vinculada a las magnitudes de base la definición de la magnitud debe realizarse por la Ruta B de la EURAMET cg-4 [2].

**Recomendaciones:**

- En cuanto a las masas que forman parte de una máquina de pesos suspendidos, se recomienda aplicar dentro de lo posible, la recomendación OIML R111-1, para definir los materiales de diseño, terminaciones superficiales, etc.
- Respecto a la medición de la gravedad, se recomienda en el caso de la DW-FSM de 110 kN del INTI, medir nuevamente el valor por gravimetría, así como la altitud, referenciándola a puntos fijos de altimetría del IGN. Para otros casos de máquinas, se recomienda utilizar las metodologías de estimación del valor de la gravedad para aumentar la confiabilidad en las mediciones realizadas por gravimetría.
- Respecto a la densidad del aire y en el caso general, se recomienda fijar intervalos de temperatura, humedad y presión atmosférica coherentes con el trabajo cotidiano del laboratorio. En caso de mediciones con incertidumbres menores a  $2 \cdot 10^{-5}$ , puede ser útil limitar aún más el intervalo de las condiciones ambientales antedichas durante el intervalo de tiempo que duren estas mediciones, aunque es preferible medir estas variables en tiempo real y calcular la densidad en cada momento para corregir el valor nominal de la fuerza generada.



- Cuando se define la magnitud de una DW-FSM a magnitudes de base, es recomendable armar una planilla similar a la presentada como Tabla 11, donde puede simularse la incertidumbre obtenida por combinación de las cuatro variables que intervienen. Un valor lógico es tener una incertidumbre de definición total del orden de una tercera parte de la incertidumbre a declarar, de modo que el resto de la incertidumbre sea asignable a las magnitudes de influencia tanto de la máquina en cuestión, como de los transductores de transferencia utilizados para las intercomparaciones internacionales. Asimismo, la contribución a la incertidumbre por parte de cada una de estas cuatro variables, dependerá de los costos de fabricación y medición, de temas operativos, etc.

## **4.2. DEFINICIÓN DE LA UNIDAD – MAGNITUDES DE INFLUENCIA**

Todo lo expuesto en la presente sección está directamente relacionado a las secciones 2.1.2, 2.1.3, 3.1.2 y 3.1.3, y aplica al caso del análisis y corrección de las magnitudes de influencia en las máquinas de pesos suspendidos, lo cual es fundamental para reducir la incertidumbre y poder declarar una CMC adecuada.

### **Conclusiones:**

- No se evidenció problemas respecto a la atracción electrostática, magnética, ni gravitatoria en la DW-FSM de 110 kN analizada. En otras máquinas de operación secuencial es muy probable que tampoco se evidencie este tipo de problemas. Especial atención hay que prestar en el caso de máquinas de operación binaria (posicionamiento independiente de cada pesa), debido a que por contar con varias interfases entre pesas colgadas y pesas apoyadas en la estructura, los valores obtenidos pueden incrementarse considerablemente.
- El análisis de un flujo de aire a través de la DW-FSM de 110 kN del INTI no parece afectar significativamente a la medición. Debido a que esta máquina posee un cerramiento, y que el mismo evita el flujo de aire contra y entre las pesas, este fenómeno resulta depreciable. Se estima que en máquinas secuenciales también será despreciable un flujo de aire razonablemente lento (menor a 0,1 m/s), en tanto que en máquinas binarias puede ser un factor a tener en cuenta, debido a su mayor cantidad de interfases entre pesas colgando y pesas apoyadas en la estructura.
- La orientación geográfica y magnética no incide en el caso de materiales no magnéticos como son el acero inoxidable austenítico y las aleaciones de aluminio. En aleaciones magnéticas, como los aceros al carbono y los aceros de baja y mediana aleación, tampoco incide la orientación geográfica, aunque esta investigación no obtuvo conclusiones en relación al efecto que pudiera generar el campo magnético terrestre sobre estos materiales.



- Respecto a las fuerzas laterales y a los momentos flectores medidos sobre la DW-FSM de 110 kN, se concluye que los mismos son adecuados para definir una incertidumbre de  $2 \cdot 10^{-5}$ . Asimismo, las otras metodologías aplicadas, como ser la medición con niveles de alta exactitud y el uso de transductores de referencia también demuestran la aptitud de la máquina para alcanzar dicha incertidumbre. Debido a la relación obtenida entre las fuerzas laterales y la inclinación del marco de carga medida con los niveles de alta exactitud, puede mantenerse la capacidad de medición en el tiempo a través de verificaciones periódicas con el uso de dichos niveles.
- El uso de niveles de alta exactitud para verificar el estado de la DW-FSM, así como para realizar ajustes sobre la misma, muestra ser un sistema adecuado. La metodología de verificación completa definida en 3.1.3.3, es de aplicación particular a la DW-FSM de 110 kN del INTI, pero puede ser extrapolable a la mayoría de las DW-FSM, sobre todo a las de operación secuencial.
- Respecto a las fuerzas laterales y a los momentos flectores en otras DW-FSM, se obtiene la misma conclusión respecto a su incidencia sobre la incertidumbre final. El uso de dinamómetros de seis componentes es la mejor herramienta para analizar y reducir estas fuerzas y momentos, luego le sigue en utilidad, el uso de sistemas build-up, los cuales se encuentran en pleno desarrollo al momento de la escritura de la presente tesis. Asimismo, el uso de niveles de alta exactitud y transductores de referencia son un buen camino para estudiar y mejorar las características metrológicas de las DW-FSM.
- Los resultados obtenidos en la comparación internacional CCM.F-K2.a.1, sobre la DW-FSM de 110 kN son adecuados para una CMC de  $2 \cdot 10^{-5}$ . Los errores normalizados fueron de 0,57 y 0,72 para los puntos de 50 kN y 100 kN respectivamente. Igualmente pueden ser mejorada la estabilidad térmica de la sala de medición, así como el uso de instrumental y/o dispositivos que ayuden en la metodología utilizada para el centrado del transductor de referencia.
- En el caso general, la metodología de comparación internacional clave que actualmente se utiliza, es adecuada para una CMC de  $2 \cdot 10^{-5}$ , no así tanto para una CMC de  $1 \cdot 10^{-5}$ , por lo cual es necesario desarrollar mejores transductores de transferencia, reducir la interacción máquina-transductor, o incluso realizar las intercomparaciones con sistemas de seis componentes y/o sistemas build-up de alta exactitud.

**Recomendaciones:**

- Respecto a la atracción electrostática y magnética, se recomienda no tener campos eléctricos alternos en la zona de implantación de la máquina, así como evitar el contacto con fuentes magnéticas intensas en el caso de que la máquina posea material magnetizable.



- Respecto al flujo de aire contra y entre pesas, se recomienda generar un cerramiento que proteja a las mismas, asimismo se recomienda este cerramiento en la zona de medición, lo cual también contribuye a reducir el polvo y a mantener la temperatura más estable.
- Se recomienda realizar un estudio teórico y/o experimental respecto a las fuerzas que pueda generar el campo magnético terrestre sobre DW-FSM cuyas pesas puedan ser magnetizables.
- Respecto a la DW-FSM de 110 kN del INTI se recomienda investigar con sistemas build-up. Sería ideal poder modificar el software de operación de la máquina de modo de variar las velocidades de movimiento de la mesa que carga y descarga las pesas, así como poder detener la misma en cualquier posición, y con ello poder observar en mayor detalle los efectos dinámicos.
- El uso de niveles de alta exactitud mostró ser muy útil, por lo cual se recomienda la puesta en servicio de sistemas de nivelación de mayor exactitud, con medición en tiempo real para la DW-FSM de 110 kN, idealmente sin contacto, o con un bajo peso que pueda ser corregido sin aportar una incertidumbre significativa. En otras DW-FSM puede ser muy interesante incluir estos sistemas desde la concepción de la misma.
- Para otras DW-FSM, se recomienda utilizar dinamómetros de seis componentes, sistemas build-up, niveles de alta exactitud y transductores de referencia, para estudiar las fuerzas laterales y momentos flectores, todo ello en función de la disponibilidad del equipamiento involucrado. También se recomienda el uso de más de una de estas metodologías para comparar resultados. Como se hizo en la DW-FSM de 110 kN del INTI, es recomendable utilizar el dinamómetro de seis componentes, o alternativamente los sistemas build-up en contraste con niveles de alta exactitud, con el objeto de determinar las relaciones correspondientes, para luego seguir trabajando únicamente con los niveles.
- Se recomienda trabajar sobre el sistema de climatización de la sala donde se ubica la DW-FSM de 110 kN, de modo de mantener  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  durante los 365 días del año, y la posibilidad de mantener  $20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ , durante un intervalo de tiempo de al menos 24 h.
- Respecto a las comparaciones internacionales, se recomienda la verificación de la máquina a medir con dinamómetros de seis componentes, sistemas build-up, niveles de alta exactitud y/o ejercicios de giros cada  $45^\circ$  con transductores de referencia.
- Se recomienda en las comparaciones internacionales clave, el uso de los mismos transductores de transferencia de alta exactitud y los mismos protocolos de medición que actualmente se utilizan, pero con la adición de la medición con sistemas build-up, o sistemas de seis componentes. Alternativamente podría medirse la nivelación en tiempo real, con un nivel que viaje junto al resto de los patrones de referencia, y que cada instituto deba determinar la masa del mismo antes de medir.



### **4.3. PATRONES DE TRANSFERENCIA – CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS**

Todo lo expuesto en la presente sección está directamente relacionado a las secciones 2.2.1, 2.2.2, 3.2.1 y 3.2.2, y aplica a los transductores de fuerza utilizados como transferencia y/o referencia. Asimismo, por compartir el principio de funcionamiento con los transductores de fuerza en general, es aplicable en cuanto a las mediciones subsecuentes a declarar la CMC en el equipamiento.

#### **Conclusiones:**

- La repetibilidad y la reproducibilidad son variables fundamentales para lograr mediciones de fuerza de alta exactitud. La falta de reproducibilidad puede asociarse a fuerzas y momentos parásitos, los cuales pueden ser debidos al propio transductor utilizado, a sus dispositivos de carga, a problemas de metodología tales como el posicionamiento, o una secuencia poco estricta en tiempos, así como problemas provenientes de la propia máquina por temas de alineación y balanceo. Si los valores de reproducibilidad son similares a los de repetibilidad, se puede suponer con alto grado de confianza que la mayoría de estos aspectos están bajo control. Si la repetibilidad no es la adecuada, generalmente se debe a problemas de metodología y/o a los dispositivos de carga.
- La temperatura de la sala de medición es una variable fundamental a tener en cuenta y es importante mantener el intervalo de la misma en forma adecuada ( $\pm 2$  °C para CMC mayores a  $5 \cdot 10^{-5}$ ,  $\pm 1$  °C para CMC del orden de  $2 \cdot 10^{-5}$ , y  $\pm 0,5$  °C para CMC del orden de  $1 \cdot 10^{-5}$ ). Asimismo, hay que tener cuidado de no transmitirle calor al transductor de fuerza en el momento de realizar el giro, debido a que el mismo pierde la estabilidad térmica.
- No hay conclusiones contundentes respecto a la humedad y la presión atmosférica, salvo en algunos casos puntuales. Igualmente, la humedad debería mantenerse dentro de un intervalo de 40% a 60%, con el objeto de reducir los inconvenientes de corrientes estáticas y/o corrosión. Como la presión atmosférica puede incidir en el valor de cero del transductor, es útil registrar dicho valor en cada serie de medición.
- La histéresis y el creep son dos magnitudes de influencia sistemáticas que están correlacionadas entre sí. El valor de histéresis puede ser asignable en función de la carga, mientras que el creep puede asignarse a la variable tiempo. Para reducir los efectos del creep se requiere de un esquema de carga y tiempos muy bien ejecutado, preferentemente incrementando los tiempos de estabilización para toma de datos. Tiempos mayores a cuatro minutos reducen significativamente su incidencia. Respecto a la histéresis es importante realizar al menos dos carreras descendentes de modo de verificar la repetibilidad de la misma.



- Parece ser que el creep está relacionado a la integral de la carga en función del tiempo, varios ensayos demostraron que esta suposición es adecuada. Hasta tanto no se tengan resultados más contundentes al respecto, este criterio puede tomarse como una buena práctica.
- La incidencia de las fuerzas laterales y de los momentos flectores son función de la geometría, tolerancias de fabricación y de la instrumentación del transductor de fuerza, así como de las características metrológicas de la DW-FSM utilizada. Los dispositivos de carga utilizados inciden fuertemente en este aspecto, así como la metodología de posicionamiento del transductor bajo ensayo. Un método de centrado dimensional, siempre y cuando se conozca el eje real de la máquina, es adecuado en la mayoría de los casos, mientras que en mediciones de alta exactitud se obtienen mejores resultados con el uso de niveles de alta exactitud.
- Para mediciones de alta exactitud no es aplicable una ecuación lineal para el uso subsecuente del transductor. Un polinomio de tercer grado es adecuado en la mayoría de los casos y para incertidumbres por arriba de  $1 \cdot 10^{-4}$ . La diferencia entre un polinomio con o sin término independiente es en la mayoría de los casos insignificante.
- Debido a razones que en la generalidad de los casos se relacionan a temas operativos, se utiliza el sistema de medición de fuerza como un único instrumento, o en contrapartida, se abre el mismo de modo de calibrar por un lado el transductor de fuerza, y por el otro el amplificador digital. En este último caso debe agregarse una nueva fuente de incertidumbre que será pequeña si se trabaja tanto con transductores, así como con amplificadores de alta exactitud. Asimismo es necesario tener en cuenta la frecuencia del filtro del amplificador en función de la libre oscilación de la máquina, cuya estimación puede hacerse con la ecuación de péndulo simple.
- La deriva temporal a largo plazo puede depender de las siguientes variables: tiempo, frecuencia y condiciones de uso del equipo, condiciones de transporte y condiciones ambientales (sobre todo de almacenaje).
- El registro continuo de datos da un valor más confiable, asimismo pone en evidencia aspectos dinámicos de la carga, como ser impacto, vibraciones y oscilaciones de la carga. Otro aspecto positivo del mismo es que pone en evidencia la real secuencia de ensayo llevada a cabo, con lo que posibilita su estudio y la mejora de dicha secuencia.
- Respecto a los dispositivos de carga, los mismos pueden llegar a tener una gran incidencia en la exactitud de la medición. Las tolerancias dimensionales, las tolerancias de forma, incluso los materiales juegan un papel muy importante. No es buena práctica intercambiar los dispositivos de carga entre distintos transductores, y menos aún utilizar distintos dispositivos de carga para el mismo transductor. El giro del transductor se realiza en conjunto con los dispositivos, debido a que los mismos forman parte del sistema de medición. En el caso de tracción, la buena práctica



es enroscar a tope y luego retirar un cuarto de vuelta, de modo que no queden las roscas con precargas. Los dispositivos de carga son fabricados de acuerdo al Anexo A de la norma ISO 376:11 [3], así como también de acuerdo a las recomendaciones del fabricante del transductor de fuerza.

**Recomendaciones:**

- En cuanto a la repetibilidad y reproducibilidad se recomienda realizar secuencias de carga y descarga bien planificadas y ejecutadas. Así como buscar el eje real de la máquina para centrar el transductor. También dispositivos y técnicas de centrado que simplifiquen el posicionamiento del mismo. Analizar los dispositivos de carga, girando los mismos manteniendo el transductor sin mover, de modo de poder verificar que estos últimos funcionan adecuadamente.
- Se recomienda mantener una temperatura estable en la sala de medición, y debido a que generalmente los transductores de fuerza son más sensibles al cambio de la temperatura que la instrumentación asociada al mismo, se puede mejorar la estabilidad térmica en la zona de medición, por medio de un cerramiento adecuado. Asimismo, se recomienda realizar el giro del transductor bajo ensayo con cuidado de no transmitirle calor, esto puede ser por medio del uso de guantes térmicos.
- En cuanto a la humedad se recomienda mantener la sala durante todo el año dentro de un intervalo de 40% a 60%, mientras que durante la medición se recomienda mantener un intervalo de 45% a 55%. Para la presión atmosférica es interesante registrarla en cada serie de medición de modo de poder vincularla al valor de cero del instrumento bajo ensayo. Asimismo, se recomienda medir el instrumento en unidades absolutas, o sea sin realizar la tara del equipo, pudiendo de esta manera analizar la deriva del cero a corto plazo.
- Se recomienda una secuencia bien planificada y un estricto control de los tiempos entre toma de datos, cuando sea posible es recomendable ampliar el tiempo entre lecturas, siendo un buen criterio, tomar 60 s para realizar el cambio de carga y otros 60 s de espera antes de la lectura, o sea una toma de datos cada 120 s.
- Cuando se requieren mediciones de alta exactitud, se recomienda realizar las series de medición en las cuales la integral de la fuerza en función del tiempo sea similar en las distintas máquinas donde se mida el instrumento. El uso del registro en tiempo real, permite simplificar estos cálculos.
- Para reducir las fuerzas laterales y los momentos flectores, se recomienda en principio el uso de dispositivos de carga adecuados, así como conocer la posición real del eje de la DW-FSM, y por último utilizar una buena metodología de posicionamiento. Lo ideal sería tener un sistema de guía



para el cabezal del transductor, de modo de poder girar rápidamente el mismo sin salirse del eje de la máquina. Previo a la medición se verifica el posicionamiento en los distintos ángulos de montaje con la ayuda de los niveles de alta exactitud, para luego ajustar la guía a la posición adecuada y poder medir de manera más simple.

- Respecto de la deriva a largo plazo se recomienda mantener el equipamiento en la sala de medición y con condiciones ambientales estables en forma permanente, evitar y/o reducir el transporte por vía aérea en bodega no presurizada, utilizar un buen embalaje que lo proteja de golpes, vibraciones, cambios bruscos de temperatura y de presión atmosférica, así como de la humedad. Puede ser recomendable realizar verificaciones antes y después de enviar el equipo por vía aérea. Asimismo, es recomendable darle un uso continuo al equipamiento, incluso realizar algunas precargas cada cierto tiempo, en caso que el equipo no se esté utilizando.
- Se recomienda realizar mediciones con registro continuo de datos para analizar los efectos dinámicos y la inestabilidad de la lectura. Esto podría llevarse a cabo en las distintas máquinas, con los distintos operadores y con los transductores y amplificadores que sea conveniente. Si este estudio muestra un comportamiento adecuado, no sería necesario repetirlo en el futuro para esas condiciones de medición.
- En cuanto a los dispositivos de carga, se recomienda un diseño adecuado, y una verificación dimensional una vez construido. Luego es recomendable una verificación funcional, esto es una vez verificada la repetibilidad en la medición, se gira el dispositivo de modo de verificarlo en distintas posiciones angulares y tratando de desplazarlo en función del huelgo que el mismo tenga, incluso quitarlo y colocarlo nuevamente. Si la repetibilidad no es buena con esta recomendación, es necesario reparar o construir un nuevo dispositivo.



## 5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A continuación, se presentan, a criterio del autor, líneas futuras de investigación que podrían suceder a la presente, las mismas pueden ser llevadas a cabo tanto por parte del laboratorio de fuerza del INTI, como por parte de otros institutos nacionales de metrología.

### **Materialización de la magnitud fuerza en máquinas de calibración por comparación:**

Todo lo analizado referente a patrones de transferencia, descrito en las secciones 2.2 y 3.2, así como las magnitudes de influencia en la realización de la magnitud, descrito en las secciones 2.1.2 y 3.1.2 es extrapolable a la materialización de la magnitud fuerza en máquinas de calibración por comparación. La mejor incertidumbre esperada en este tipo de equipamiento es de  $2 \cdot 10^{-4}$ , valor sólo alcanzable si se analizan todas las magnitudes de influencia y se corrigen los errores sistemáticos.

Para ello es necesario investigar con mayor profundidad:

- *La incidencia de las fuerzas laterales y los momentos flectores*, a través del uso de dinamómetros de seis componentes, sistemas build-up y transductores de referencia, temas presentados en las secciones 3.1.3.1, 3.1.3.2, 3.1.3.4. En estas máquinas no es aplicable el uso de niveles de alta exactitud como se planteó en la sección 3.1.3.3, debido a que la desalineación de la fuerza es absorbida por la deformación diferencial de la estructura de la máquina.
- Una buena *repetibilidad y reproducibilidad*, que serán consecuencia del ítem anterior, así como de una buena metodología de medición que incluya un buen centrado del instrumento a calibrar y un esquema de cargas y de tiempos estricto.
- Mejor conocimiento de la *histéresis y del creep* del transductor de referencia, sobre todo a cargas parciales, así como un *estudio de deriva* y una metodología de verificaciones intermedias adecuada.
- Y por último *reducir la interacción máquina-transductor*, así como el uso de *dispositivos de carga adecuados* y verificados.

La trazabilidad en este tipo de equipos se logra por la metodología planteada en la Ruta A de la guía EURAMENT cg-4 [2], o sea se obtiene la trazabilidad a otras máquinas. Dentro de esta metodología, hay dos caminos posibles, el más utilizado es a través del uso de un transductor de referencia y al menos tres transductores de transferencia, los cuales fueron previamente calibrados en la misma máquina primaria, para luego propagar incertidumbre y obtener un desvío que se sumará aritméticamente a la incertidumbre propagada, esto se realiza una única vez, para luego calibrar periódicamente el transductor de referencia. Esta es la metodología utilizada en el laboratorio de fuerza del INTI.



El otro camino es a través del uso de al menos tres transductores de transferencia, que se utilizarán para calibrar en forma periódica la máquina, la cual cuenta con su propio transductor. Generalmente en este caso la incertidumbre propagada es mayor, pero no existe desvío debido a que el transductor perteneciente a la máquina no posee calibración previa.

Todos estos temas, junto a esta última metodología de trazabilidad serán estudiadas por el grupo de trabajo del laboratorio de fuerza del INTI para su máquina de comparación de 200 kN y 1 MN.

### **Utilización de sistemas build-up:**

Un sistema de múltiples transductores funcionando en paralelo (build-up), es normalmente utilizado para amplificar la escala primaria de fuerza. Asimismo como se presentó en la sección 3.1.3.2, este tipo de equipo puede ser utilizado para determinar las cargas laterales. Actualmente se está investigando la metodología para medir los momentos flectores, cuya propuesta se presentó en el último párrafo en la sección 3.1.3.2.

También en este caso lo analizado en las secciones 2.2 y 3.2, referente a patrones de transferencia, así como lo analizado en 2.1.2 y 3.1.2, referente a las magnitudes de influencia en la realización de la magnitud, son extrapolables a la trazabilidad y medición con el uso de este tipo de equipamiento.

En el caso del laboratorio de fuerza del INTI, se inició con el estudio de estos sistemas para amplificar la escala desde 110 kN a 330 kN en una primer etapa, y luego hasta 1 MN en una segunda etapa. Una vez materializada la primera etapa de 330 kN podrán estudiarse las fuerzas laterales y los momentos flectores, tanto en la DW-FSM de 110 kN como en las máquinas de comparación actuales, con la metodología que se mencionó anteriormente.

Partiendo de la DW-FSM de 110 kN con una CMC de  $2 \cdot 10^{-5}$ , en la etapa de 330 kN, se espera una incertidumbre en la transferencia mejor a  $1 \cdot 10^{-4}$ , o sea el valor generado por el build-up de 330 kN montado en la máquina de comparación, para luego tener una CMC de  $2 \cdot 10^{-4}$  en dicha máquina en forma permanente. Asimismo, en la segunda etapa de 1 MN, se espera una incertidumbre en la transferencia mejor a  $2 \cdot 10^{-4}$ , para luego tener una CMC de  $3 \cdot 10^{-4}$  en dicha máquina.

**Otros posibles temas de investigación:**

- Como se mencionó en la sección 3.2.2, la presente investigación estuvo enfocada principalmente a mediciones en compresión. Si bien se obtienen resultados muy buenos en las mediciones realizadas en tracción, puede estudiarse el tema de la alineación inicial de la máquina de pesos suspendidos, así como todo lo referente a condiciones extremas de carga y dispositivos de carga. Posiblemente a futuro pueda obtenerse tan buena incertidumbre de transferencia en tracción como lo es actualmente en compresión, y con ello sean viables comparaciones internacionales donde se combinen ambos tipos de solicitaciones.
- Las metodologías de medición difieren bastante entre una comparación clave, una trazabilidad por Ruta A de la EURAMET cg-4 [2], así como la calibración de transductores de fuerza según ISO 376:11 [3], o incluso la calibración de máquinas para ensayo según ISO 7500-1 [19]. Si bien la incertidumbre se incrementa notablemente de un caso a otro, el mismo tipo de sistema de medición de fuerza se está utilizando con metodologías muy diferentes, aun sabiendo que los mismos son sensibles a los esquemas de carga y de tiempo, así como a las fuerzas y momentos parásitos. Una posibilidad de investigación sería analizar cuál es la incidencia del cambio de metodología sobre los transductores que normalmente se utilizan en estas distintas condiciones.
- Varias de las magnitudes de influencia atribuidas a los patrones de transferencia que fueron presentadas, tales como la histéresis, el creep, las condiciones extremas de carga, la deriva temporal, etc, podrían ser estudiadas en mayor profundidad y particularmente en los transductores utilizados actualmente donde se requiera reducir la incertidumbre de transferencia.



## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JCGM 100:2008, "Evaluación de datos de medición - Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida," traducción del Centro Español de Metrología, 2008.
- [2] EURAMET cg-4, "Uncertainty of Force Measurements," , European Association of National Metrology Institutes, Versión 2.0 - 03-2011.
- [3] UNE-EN ISO 376, "Materiales Metálicos. Calibración de los instrumentos de medida de fuerza utilizados para la verificación de las máquinas de ensayo uniaxial.," , Octubre de 2011.
- [4] Liam Maybank, Andy Knott, David Elkington, "Guide to the Uncertainty of Force Measurement," , National Physical Laboratory, April 1999.
- [5] VIM, "Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados," , Centro Español de Metrología, 3ª edición 2012.
- [6] OIML R 111-1, "Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 1: Metrological and technical requirements," , International Organization of Legal Metrology, Edition 2004 (E).
- [7] Roman Schwartz, Andreas Lindau, "The new gravity zone concept in Europe for weighing instruments under legal control," , IMEKO TC3 and TC4 Conferences, September 2002, Zagreb, Croatia.
- [8] Andreas Lindau. (2007) Gravity Information System PTB. [Online]. <http://www.ptb.de/cartoweb3/SISproject.php>
- [9] R. S. Davis, "Equation for the Determination of the Density of Moist Air. CIPM(1981/91)," *Metrologia*, vol. 29, pp. 67-70.
- [10] Tom Bartel, "Uncertainty in NIST Force Measurements," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 110, no. 6, 2005.
- [11] Giancarlo D'Agostino et al, "Influence of the Mutual Gravitational Attraction in a Set of Masses of Deadweight Machines," , XIX IMEKO World Congress, September 2009, Lisbon, Portugal.
- [12] Danilo Quagliotti, Alessandro Germak, Fabrizio Mazzoleni, "Influence of Aerodynamic Effects in Deadweight Machines," , IMEKO TC3, TC5 and TC22 Conferences, November 2010, Pattaya, Chonburi, Thailand.
- [13] Carlo Marinari, "Evaluation of the Main Metrological Characteristics of the CENAM 150 kN Deadweight Force Standard Machine by Using the INRIM 100 kN Six-component Dynamometer," , INRIM Document R.T. 62, Torino, Italia, Junio de 2007.
- [14] Y. K. Park, D. I. Kang, "Evaluation of Force Standard Machines using Build-up System," , IMEKO TC3, TC5 and TC22 Conferences, November 2010, Pattaya, Chonburi, Thailand.
- [15] Y. K. Park et al, "A Proposal for an Evaluation Method of Force Standard Machines by Using Build-up System," , IMEKO TC3 and TC4 Conferences, February 2005, Cairo, Egypt.
- [16] "Force Transfer Standard - TOP Transfer Z30A / Z4A - Mounting Instructions - HBM. A2212-1.0 de/en," HBM, Darmstadt, Germany,.
- [17] Instituto Geográfico Nacional, "Red Argentina de Gravimetría Absoluta - Punto RAGA IGN0," , Buenos Aires, Argentina, Marzo de 2014.
- [18] Andreas Lindau, "Investigation in the local gravity field of a force laboratory of PTB," , IMEKO TC3 and TC4 Conferences, September 2002, Zagreb, Croatia.
- [19] UNE-EN ISO 7500-1, "Materiales Metálicos. Verificación de máquinas de ensayos uniaxiales estáticos. Parte 1: Máquinas de ensayo de tracción/compresión. Verificación y calibración del sistema de medida de fuerza.," , Setiembre de 2016.
- [20] Yon-Kyu Park, Dae-Im Kang, "Oscillating signal components of a dead-weight force-standard machine and reduction techniques," *Measurement Science Technology*, no. 10, pp. 748-754, 1999.



## **BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

### **Publicaciones en Congresos Internacionales**

Ferrero Carlo et al "Investigation of parasitic components in PTB's 2MN deadweight machine by using the INRIM six-component dynamometer", *XVIII IMEKO World Congress*, Río de Janeiro, Brasil, Sept. 2006.

Jain Kamlesh K. y otros, "Realization of forces (2N-20N) by primary method", *IMEKO 20th TC3, 3rd TC16, 1st TC22*, Merida, Méjico, Nov. 2007.

Leitz Sara et al, "Investigation and calibration of a force vector sensor with a calibration artefact", *XIX IMEKO World Congress*, Lisbon, Portugal, Sept. 2009.

Lietz Sara et al, "A new six-component force vector sensor – first investigations", *IMEKO 20th TC3, 3rd TC16, 1st TC22*, Merida, Mexico, Nov. 2007.

Marinari Carlo et al, "Static and dynamic evaluation of the CENAM (Mexico) primary force standard machine by means of the INRIM (Italy) 100 kN six-component dynamometer", *IMEKO 20th TC3, 3rd TC16, 1st TC22*, Merida, Mexico, Nov. 2007.

Marinari Carlo, "Evaluation of static and dynamic parasitic components on the INRiM 1 MN primary force standard machine by means the 500 kN six-component dynamometer", *XIX IMEKO World Congress*, Lisbon, Portugal, Sept. 2009.

Park Yon-Kyu y Kang Dae-Im, "Oscillating signal components of a dead-weight force-standard machine and reduction techniques", *Measurements Science Technology*. N° 10 (1999), pp 748-754.

Savarin Alejandro et al, "Improvement of metrological characteristics of INTI's 110 kN force standard machine by using the CENAM's six-component dynamometer for static and dynamic evaluation", *XIX IMEKO World Congress*, Lisbon, Portugal, Sept. 2009.

Sawla Amritlal, "*Uncertainty Scope of the force calibration machines*", PTB, Braunschweig, Germany, sin fecha.

### **NORMAS Y RECOMENDACIONES INTERNACIONALES**

BIPM, *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the "Guide to the expresión of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, 1<sup>st</sup> edition, catalogued as JCGM 101:2008, BIPM, France.

EA, EAL-G22, *Uncertainty of Calibration Results in Force Measurements*, 1<sup>st</sup> edition, European co-operation for Accreditation, August 1996. *Corresponde a la version anterior a la EURAMET cg-4*

OIML R 60, *Metrological regulation for load cells*, International Organization of Legal Metrology, edition 2000 (E), OIML, France, 2008.



**UNSAM**

INSTITUTO DE  
LA CALIDAD  
INDUSTRIAL

*Análisis y reducción de las magnitudes de influencia en máquinas primarias de fuerza de pesos suspendidos.*

## LIBROS

GTM GmbH, *Documentation K-NME 110 kN – Drawings, serie N° 1079*, GTM Testing and Metrology GmbH, Bickenbach, Germany, 2001.

GTM GmbH, *Operation Manuals and Technical Documents for the 110 kN Force-Standard-Machine 1/2*, GTM Testing and Metrology GmbH, Bickenbach, Germany, 2001.

Karl Hoffmann, *An Introduction to Measurements using Strain Gages*, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Germany, 1989.

Schicker Rainer y Wegener Georg, *Measuring Torque Correctly*, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Germany, 2002. ISBN 3-00-008945-4.

Weiler W., Sawla A., *Force Standard Machines of the National Institutes for Metrology (catalogado como PTB-Me-22)*, PTB-Bericht, Braunschweig, Alemania, Ago. 1978. ISSN 0341-6720.

## PÁGINAS WEB RECOMENDADAS

CENAM, *División de Fuerza y Presión. - Centro Nacional de Metrología*. [Online].

<http://www.cenam.mx/fyp/fypt.html>

Centro Español de Metrología. *Centro Español de Metrología: CEM*. [Online].

<http://www.cem.es/>

GTM GmbH. *Startseite: GTM GmbH - Defining Precision*. [Online].

<http://www.gtm-gmbh.com/de/startseite.html>

HBM GmbH. *HBM Test and Measurement: Transducers, Load Cells, DAQ*. [Online].

<http://www.hbm.com/>

National Physical Laboratory (NPL). *National Physical Laboratory*. [Online]

<http://www.npl.co.uk/>

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), *1.21 Realization of Force - PTB.de*. [Online].

<https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-12/ag-121.html>.