

Ministerio de Industria
Presidencia de la Nación



Metrología en FUERZA Incertidumbre en Mediciones de FUERZA s/EURAMET cg-04



Ing. Alejandro Savarin
INTI – Física y Metrología
Jefe de Laboratorio de Fuerza



FUERZA – Incertidumbre en Mediciones de FUERZA.

Temario

- Máquina Patrón Nacional de Fuerza (FSM)
 - Pesos Suspendidos (DW-FSM)
 - Amplificación Hidráulica o por Palanca (HT-FSM / LT-FSM)
 - Sistemas de múltiples transductores (BU-FSM)
- Máquinas de Calibración de Fuerza (FCM)
- Transductores de Fuerza
 - Según ISO 376:11
 - Según Otros Procedimientos (EURAMET 6.2)
- Uso subsecuente (ISO 376:11 C.2 – EURAMET 7.1)
- Máquinas para Ensayos s/ISO 7500-1



MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA (FSM)

Definición:

Son aquellas que definen la magnitud.

Ruta A: *Obtienen su trazabilidad directamente a patrones de transferencia calibrados en máquinas patrón nacional de fuerza.*

La mayoría de los casos. Generalmente los patrones de referencia son trazados externamente.

Ruta B: *Trazabilidad directa a las magnitudes fundamentales M , L , T .*

Típico en DW-FSM. Aplicable, con ciertos recaudos, a máquinas que puedan ser trazadas internamente.

Sólo la pueden aplicar los NMi's.

MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA (FSM)

Tipos de FSM:

- Pesos Suspendidos (DW-FSM)
Pesos suspendidos directamente en el campo gravitatorio.
- Amplificación Hidráulica o por Palanca (HT-FSM / LT-FSM)
Pesos suspendidos amplificados por un sistemas pistón-cilindro hidráulicos o por palanca.
- Sistemas de múltiples transductores (BU-FSM)
Máquina tipo “comparadora” donde 2 o más transductores de fuerza trabajan en paralelo.

MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA – DW-FSM

Pesos Suspendidos: Utiliza masas suspendidas directamente en el campo gravitatorio. Según la 2^{da} ecuación de Newton y el principio de Arquímedes.

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

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

Considerar la variación temporal de las variables.

- ρ_a es f() de [Temp, HR, Patm], varía repentinamente.
- m posee deriva a largo plazo por desgaste, contaminación, estabilidad de la superficie.

Hay ecuaciones modificadas cuando se utiliza la masa convencional m_c , en lugar del valor verdadero de la masa.



MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA – DW-FSM

Considerar también:

- Efectos magnéticos, electroestáticos, aerodinámicos.
 - Máquinas con marco contrapesado por palanca, o sistemas guiados, etc. considerar el rozamiento y/o el desequilibrio.
 - Desalineación (Excentricidad, Verticalidad, etc).
 - Flexibilidad / Rigidez de la estructura.
 - Cargas laterales y momentos flectores y torsor.
- } Afectan al transductor, no se incorporan a la CMC de la FSM

Incertidumbres Alcanzadas:

- Unos pocos Institutos $1 \cdot 10^{-5}$, otros tantos $2 \cdot 10^{-5}$.
- Valor práctico técnica y económicamente $1 \cdot 10^{-4}$.

MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA – DW-FSM - EJEMPLO

EJEMPLO RUTA A (EAL G22):

Valores obtenidos con la máquina de carga directa PTB (Fecha: 25-11-2002)

F_{FSM} (PTB)	X_{0°	X_{90°	X_{180°	X_{270°	X_{FSM}
kN	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V
50	1,02070	1,02071	1,02070	1,02069	1,02070
60	1,22492	1,22493	1,22490	1,22491	1,22492
70	1,42914	1,42916	1,42913	1,42913	1,42914
80	1,63339	1,63340	1,63339	1,63338	1,63339
90	1,83766	1,83767	1,83767	1,83764	1,83766
100	2,04196	2,04197	2,04193	2,04191	2,04194
90	1,83775				
80	1,63355				
70	1,42936				
60	1,22517				
50	1,02099				
F_{FSM} (PTB)	Histéresis		spread	$w(F_{FSM})$	
50	0,00029		0,00002	4,00E-06	
60	0,00025		0,00003	5,27E-06	
70	0,00022		0,00003	4,95E-06	
80	0,00016		0,00002	2,50E-06	
90	0,00009		0,00003	3,85E-06	
100			0,00006	6,74E-06	

MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA – DW-FSM - EJEMPLO

Valores obtenidos de la maquina de carga directa INTI (Fecha:05-09-2003)

F_{FSM} (INTI)	X_{0°	X_{90°	X_{180°	X_{270°	$X_{FSM-INTI}$	
kN	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	
50	1,02071	1,02069	1,02069	1,02069	1,02070	
60	1,22494	1,22489	1,22491	1,22491	1,22491	
70	1,42917	1,42911	1,42913	1,42913	1,42914	
80	1,63342	1,63336	1,63339	1,63339	1,63339	
90	1,83770	1,83764	1,83767	1,83767	1,83767	
100	2,04199	2,04193	2,04194	2,04194	2,04195	
90	1,83768					
80	1,63347					
70	1,42926					
60	1,22507					
50	1,02090					
F_{FSM} (INTI)	Histéresis	$\Delta_{Hys\ FSM-INTI}$	spread	$w(F_{FSM-INTI})$	$\Delta_{Rel\ Dev}$	$\Delta_{Drift-Tra\ Std}$
50	0,00019	-9,80E-05	0,00002	4,90E-06	4,45E-05	-8,82E-05
60	0,00013	-9,80E-05	0,00005	8,42E-06	4,14E-05	-7,76E-05
70	0,00009	-9,10E-05	0,00006	8,80E-06	4,06E-05	-7,87E-05
80	0,00005	-6,73E-05	0,00006	7,50E-06	4,37E-05	-7,81E-05
90	0,00002	-3,81E-05	0,00006	6,66E-06	4,58E-05	-7,21E-05
100			0,00006	6,63E-06	4,21E-05	-6,86E-05

MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA – DW-FSM - EJEMPLO

Escalón de carga:	50	kN						
Fuentes de Incertidumbre	Estimado	Unidades	a	Distribución	Incertidumbre Standard Relativa	Coficiente de Sensibilidad	Contribución de la Incertidumbre	Contribución %
m	5104,445	kg	1.11-99.004PTB	Rectangular	2,15E-06	1	2,15E-06	0,28
g_{loc}	9,796884	m/seg ²	IGM	Rectangular	2,04E-07	1	2,04E-07	0,00
ρ_L	1,200	kg/m ³	1.11-99.004PTB	Rectangular	2,00E-02	1,53E-04	3,06E-06	0,55
ρ_m	7850	kg/m ³	1.11-99.004PTB	Rectangular	3,18E-03	1,53E-04	4,87E-07	0,01
$\Delta_{Realización}$	0	kN	0527 PTB 02	Normal	1,00E-05	1	1,00E-05	5,94
F_{FSM}	50	kN		Normal	4,00E-06	1	4,00E-06	0,95
$F_{FSM-INTI}$	50	kN		Normal	4,90E-06	1	4,90E-06	1,42
$\Delta_{Hys\ FSM-INTI}$	0	kN	4,90E-05	Rectangular	2,83E-05	1	2,83E-05	47,49
$\Delta_{Drift-Tra\ Std}$	0	kN	4,41E-05	Rectangular	2,55E-05	1	2,55E-05	38,46
$\Delta_{Rel\ Dev}$	0	kN	2,22E-05	Triangular	9,08E-06	1	9,08E-06	4,89
$F_{FSM-INTI}$	50	kN					4,10E-05	100,00
Incertidumbre expandida $W = k * w (F_{FSM-INTI})$ para $k=2$							8,21E-05	
Error normalizado E_n relativo a W							0,54	
Mejor capacidad de medición especificada W_{bmc}							1,00E-04	
Error normalizado E_n relativo a la mejor capacidad de medición							0,44	



MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA – DW-FSM - EJEMPLO

$F_{\text{FSM-INTI}}$	$\Delta_{\text{Rel Dev}}$	W	$E_n = \Delta_{\text{Rel Dev}} / W$	W_{bmc}	$E_{n-\text{bmc}} = \Delta_{\text{Rel Dev}} / W_{\text{bmc}}$
kN					
50	4,45E-05	8,21E-05	0,54	1,00E-04	0,44
60	4,14E-05	7,96E-05	0,52	1,00E-04	0,41
70	4,06E-05	7,72E-05	0,53	1,00E-04	0,41
80	4,37E-05	6,76E-05	0,65	1,00E-04	0,44
90	4,58E-05	5,71E-05	0,80	1,00E-04	0,46
100	4,21E-05	5,18E-05	0,81	1,00E-04	0,42



MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA – HT-FSM

Amplificación Hidráulica: Utiliza una DW-FSM que amplifica su capacidad con dos conjuntos pistón-cilindro hidráulicos.

Incertidumbres (para Ruta B):

- DW-FSM (punto anterior).
- Dimensiones de ambos conjuntos pistón-cilindro.
- Diferencias de presión en el circuito.
- Efecto de la temperatura. Gradientes, cambio de viscosidad, expansión térmica.
- Distorsión elásticas de los conjuntos pistón-cilindro en $f()$ de la carga.
- Fricción – Histéresis.
- Ajuste de la fuerza inicial.
- Inestabilidad en el sistema de control.
- Variación del área efectiva en $f()$ de la posición de trabajo.



MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA – HT-FSM

Incertidumbres (para Ruta A):

La trazabilidad puede realizarse por transductores de transferencia. En algunos casos las incertidumbres de este modo son menores al caso anterior.

Si los “transfers” son calibrados internamente con FSM, puede utilizarse la Ruta B.

MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA – LT-FSM

Amplificación por Palanca: Utiliza una DW-FSM que amplifica su capacidad con una o un conjunto de palancas.

Incertidumbres (para Ruta B):

- DW-FSM (punto anterior).
- Dimensiones del sistema de palancas.
- Efecto de la temperatura en el sistema de brazos, diferente geometría, gradientes.
- Distorsión elástica del/los brazos de palanca en $f()$ de la carga.
- Inestabilidad en el sistema de control.
- Alineación de la fuerza respecto al eje del transductor.
- Reproducibilidad de las partes móviles.
- Desgaste, estabilidad de las cuchillas, **tensiones residuales en membranas.**
- **Fricción - Histéresis.**

NOTA: Mismo criterio de Ruta A que en amplificación hidráulica.



MÁQUINA PATRÓN NACIONAL DE FUERZA – BU-FSM

Múltiples Transductores: Utiliza 2 o más transductores en paralelo.

Incertidumbres (para Ruta B):

- Calibración individual de los transductores (apartado 6).
- Uso subsecuente de los transductores (apartado 7.1).
- Alineación de los transductores respecto al “eje de medición”.
- Estabilidad del sistema de control y metodología de adquisición de datos.
- **Interacción entre transductores por cargas laterales, desalineación.**

NOTA: La Ruta A no tendría sentido.

MÁQUINA DE CALIBRACIÓN DE FUERZA – FCM

MÁQUINAS DE CALIBRACIÓN DE FUERZA: Las mismas pueden ser las nombradas anteriormente, que son trazados por Ruta A.

Valor práctico de CMC $1 \cdot 10^{-4}$, puede lograrse $5 \cdot 10^{-5}$.

Table 5.1: Typical force calibration machine CMCs

Type of machine	Typical range of CMCs (expanded relative uncertainty)
Deadweight	5×10^{-5} to 1×10^{-4}
Hydraulic amplification	1×10^{-4} to 5×10^{-4} $1 \cdot 10^{-4}$
Lever amplification	1×10^{-4} to 5×10^{-4} $1 \cdot 10^{-4}$
Comparator with one or three reference force transducers	5×10^{-4} to 5×10^{-3} $2 \cdot 10^{-4}$

Con corrección en todas
las componentes
sistemáticas

MÁQUINA DE CALIBRACIÓN DE FUERZA – FCM

TRAZABILIDAD: Puede ser por Ruta A o Ruta B.

Ruta A:

- La CMC inicial se determina calibrando la referencia y al menos 3 transfers, se propagan las incertidumbres s/apartado 5.2
- La CMC se mantiene con la recalibración de la referencia, y por intercomparaciones.

RUTA B:

- La CMC inicial se determina al SI s/apartado 4.1, y se demuestra con intercomparación (no hay propagación de incertidumbre, se demuestra compatibilidad).
- La CMC se mantiene por intercomparaciones y verificaciones “funcionales”.



MÁQUINA DE CALIBRACIÓN DE FUERZA – FCM

DETERMINACIÓN DE LA CMC s/apartado 5.2:

1. Selección 3 a 5 Transfers (se utilizar arriba del 40% FS). Amplificadores de 200.000 ó más cuentas.
2. Su calibración en XX-FSM, mínimo 3 posiciones, incluir histéresis, repetir al menos una vez en la misma posición → “metodología” ISO 376. **También calibración de la referencia.**
3. Calibración en la FCM en cuestión, con misma metodología.
4. Recalibración en la XX-FSM. (para evaluar Drift).
5. Determinar el desvío relativo entre los valores obtenidos en la XX-FSM y la FCM.

Nota: Para evaluar el Drift, se pueden realizar 2 mediciones en la FCM y 1 en la XX-FSM.

MÁQUINA DE CALIBRACIÓN DE FUERZA – FCM

QUE EVALUAR ANTES DE INICIAR ESTE PROCESO:

1. Linealidad de la máquina. ¿Es lineal? → pocos puntos, muchas repeticiones. Si no es lineal, ¿Se puede corregir?
2. Repetibilidad. ¿No repite? → Encontrar la causa!
3. Reproducibilidad. ¿No reproduce? → Ver paralelismo de placas, horizontalidad, planitud, etc, y Encontrar el eje!
4. Inestabilidad de lectura → mejorar la estabilidad o buscar metodologías que la reduzcan, p.ej. Lectura en tiempo real de referencia y transfer, (utilizar Kts)
5. Condiciones ambientales. ¿Se cumple la estabilidad térmica?
6. Protocolo de medición. Tiempos. Ejemplo: En la FCM se tarda mucho en lograr la estabilidad de medición → ¿Puedo pedir mayores tiempos en la calibración en la FSM?

MÁQUINA DE CALIBRACIÓN DE FUERZA – FCM

Table 5.2: Examples of expanded relative uncertainty of reference values

	National force standard machine type			
	Deadweight > 2 kN	Deadweight < 2 kN	Lever amplification	Hydraulic amplification
$w(F_{\text{nfsm}})$	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}
W_{nfsm}	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}
$w(X)$	0.3×10^{-5}	0.5×10^{-5}	0.8×10^{-5}	1.7×10^{-5}
W_{ts}	2.1×10^{-5}	2.2×10^{-5}	1.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}
a_{drift}	3.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}
$w(D)$	1.2×10^{-5}	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	4.1×10^{-5}
W_{rv}	3.2×10^{-5}	4.7×10^{-5}	1.1×10^{-4}	2.2×10^{-4}

MÁQUINA DE CALIBRACIÓN DE FUERZA – FCM

Table 5.3: Examples of the calibration and measurement capability W_{CMC} for different force calibration machines

	Deadweight > 2 kN	Deadweight < 2 kN	Lever or hydraulic amplification	Comparator
W_{ref_tra}	—	—	—	3×10^{-4}
W_{ref_instab}	—	—	—	2×10^{-4}
W_{rv}	3.2×10^{-5}	4.7×10^{-5}	1.1×10^{-4}	2.2×10^{-4}
$w(d_{fcm})$	3.3×10^{-6}	3.3×10^{-6}	8.3×10^{-6}	1.7×10^{-5}
Δd_{max}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}
W_{CMC}	8.3×10^{-5}	1.5×10^{-4}	4.1×10^{-4}	9.2×10^{-4}

MÁQUINA DE CALIBRACIÓN DE FUERZA – FCM

2 EJEMPLOS:

1. Caracterización/Trazabilidad de una FSM de 1kN por Ruta A.
Se calibraron las masas, se conoce la gravedad local. Máquina lineal.

[VER Archivo PDF/EXCEL](#)

1. Caracterización/Trazabilidad de una FCM de 10kN por Ruta A.

La máquina es lineal por su método constructivo, igualmente se puede demostrar con 2 transductores calibrados en 10 puntos y realizando varias mediciones. Luego la trazabilidad se hace en pocos puntos.

[VER Archivo PDF/EXCEL](#)

TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

TRANSDUCTORES s/ISO 376:11 – Condiciones:

1. Asegurar la axialidad y evitar la interacción entre transductor y dispositivos. 7.1.3
2. Condiciones ambientales: 18°C a 28°C, $\pm 1^\circ\text{C}$ (en cada carrera) 7.4.3

Table 2 — Characteristics of force-proving instruments

Class	Relative error of the force-proving instrument						Expanded uncertainty of applied calibration force (95 % level of confidence) %
	of reproducibility	of repeatability	%				
	b	b'	of interpolation f_c	of zero f_0	of reversibility v	of creep c	
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	$\pm 0,10$

TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

ERRORES 7.5

Reproducibilidad (b) 7.5.1

$$b = \left| \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\bar{X}_r} \right| \cdot 100$$

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

Repetibilidad (b') 7.5.1

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\bar{X}_{wr}} \right| \cdot 100$$

$$\bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

Interpolación (f_c) 7.5.2

$$f_c = \frac{\bar{X}_r - X_a}{X_a} \cdot 100$$

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \cdot 100$$

Cero (f_0) 7.5.3

Reversibilidad (v) 7.5.4

$$v_1 = \left| \frac{X'_4 + X_3}{X_3} \right| \cdot 100$$

$$v_2 = \left| \frac{X'_6 + X_5}{X_5} \right| \cdot 100$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Creep (c) 7.5.5

$$c = \left| \frac{i_{300} + i_{30}}{X_N} \right| \cdot 100$$

Conviene no tomar
Valor Absoluto!

TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

TRANSDUCTORES s/ISO 376:11 – Fuentes de Incertidumbre:

Incertidumbres en unidad de Fuerza

$$u_C = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2}$$

$$U = k \cdot u_C = 2 \cdot u_C$$

$$W = \frac{U}{F}$$

Incertidumbres relativas

$$w_C = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2}$$

$$W = k \cdot w_C = 2 \cdot w_C$$

$$U = W \cdot F$$

TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

.w ₁	<i>Certificado!</i>				
.w ₂	<i>Reproducibilidad</i>		$w_2 = \frac{1}{ \bar{X}_r } \cdot \sqrt{\frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1,3,5} (X_i - \bar{X}_r)^2} = \frac{\text{desvest}(X_i)}{\sqrt{3} \cdot \bar{X}_r }$		
.w ₃	<i>Repetibilidad</i>		$w_3 = \frac{b'}{100 \cdot \sqrt{3}}$	$w_4 = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \frac{r}{F}$	
.w ₄	<i>Resolución</i>				
.w ₅	<i>Creep</i>		$w_5 = \frac{c}{100 \cdot \sqrt{3}}$	$w_5 = \frac{v}{100 \cdot 3 \cdot \sqrt{3}}$	Si no se ensaya
.w ₆	<i>Deriva del cero</i>		$w_6 = \frac{f_0}{100}$		
.w ₇	<i>Temperatura</i>		$w_7 = K \cdot \frac{\Delta T}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$		Normalmente no se considera
.w ₈	<i>Interpolación</i>		$w_8 = \left \frac{\bar{X}_r - X_a}{\bar{X}_r} \right $		Método de la desviación (Existe método residual)

TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

Table 9.2: Limits for the expanded relative uncertainty for different classes of EN 10002-3

	min.	max.	
Class 00	W_{bmc}	0,06 %	EA-10-04 (ex EAL G22)
Class 0.5	0,06 %	0,12 %	
Class 1	0,12 %	0,24 %	
Class 2	0,20 %	0,45 %	

Table 6.1: Worst-case relative expanded uncertainties for instruments classified to ISO 376

Class	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_8	Relative expanded uncertainty
	EURAMET cg-04 (para ISO 376:11)							
00	0.005 %	0.017 %	0.014 %	0.010 %	0.014 %	0.012 %	0.025 %	0.08 %
0.5	0.010 %	0.033 %	0.029 %	0.020 %	0.029 %	0.025 %	0.050 %	0.16 %
1	0.025 %	0.067 %	0.058 %	0.041 %	0.058 %	0.050 %	0.100 %	0.32 %
2	0.050 %	0.133 %	0.115 %	0.082 %	0.115 %	0.100 %	0.200 %	0.64 %

Ahora no hay limitación de incertidumbre mínima por clase!



TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

Temp. Inicial 20,200000

	Precarga 0°	Precarga 0°	Precarga 0°		Creep
Valor inicial de cero [kN]	0,000000	0,000000	0,000000	i_{30}	2,001630
Valor a Capacidad Máxima [kN]	100,287000	100,277000	100,272000	i_{300}	2,001740
Valor final de cero [kN]	-0,001000	0,001000	0,000000	Error de creep [%]	0,0001

Puntos de medición	Valor de referencia	Valor indicado por el instrumento a calibrar en las carreras de medición					
		CARRERA 1 POSIC. 0°	CARRERA 2 POSIC. 0°	CARRERA 3 POSIC. 120°	CARRERA 4' POSIC. 120°	CARRERA 5 POSIC. 240°	CARRERA 6' POSIC. 240°
	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
0	0	0,000000	0,000000	0,000000		0,000000	
1	10	10,028000	10,023000	10,017000	10,020000	10,012000	10,013000
2	20	20,051000	20,031000	20,031000	20,034000	20,022000	20,024000
3	30	30,051000	30,016000	30,042000	30,046000	30,033000	30,035000
4	40	40,011000	40,020000	40,047000	40,059000	40,042000	40,043000
5	50	50,077000	50,036000	50,069000	50,067000	50,051000	50,048000
6	60	60,093000	60,052000	60,074000	60,073000	60,058000	60,051000
7	70	70,138000	70,098000	70,091000	70,085000	70,067000	70,055000
8	80	80,162000	80,116000	80,105000	80,097000	80,075000	80,066000
9	90	90,180000	90,126000	90,123000	90,115000	90,088000	90,082000
10	100	100,223000	100,177000	100,140000		100,098000	
Indicación de cero [kN]		0,009000	0,004000		0,001000		-0,001000
Temperatura [°C]		20,6	20,7		21,0		20,6

Señal de cero 0,162480



TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

DETERMINACIÓN DE LOS ERRORES RELATIVOS

Fuerza de referencia F_N kN	Promedio carreras 1, 3, 5 X_r kN	Promedio carreras 1, 2 X_{wr} kN	Error relativo de reproducibilidad b %	Error relativo de repetibilidad b' %	Error relativo de interpolación f_c %	Error relativo de cero f_o %	Error relativo de reversibilidad v %	Error relativo de creep c %	Clase por Fuerza mínima
0	0,0000	0,0000							
10	10,0190	10,0255	0,160	0,050	0,052	0,009	0,020	0,000	00
20	20,0347	20,0410	0,145	0,100	0,041	0,009	0,012	0,000	00
30	30,0420	30,0335	0,060	0,117	0,011	0,009	0,010	0,000	00
40	40,0333	40,0155	0,090	0,022	-0,043	0,009	0,016	0,000	00
50	50,0657	50,0565	0,052	0,082	0,004	0,009	-0,005	0,000	00
60	60,0750	60,0725	0,058	0,068	-0,004	0,009	-0,007	0,000	00
70	70,0987	70,1180	0,101	0,057	0,008	0,009	-0,013	0,000	00
80	80,1140	80,1390	0,109	0,057	0,004	0,009	-0,011	0,000	00
90	90,1303	90,1530	0,102	0,060	-0,001	0,009	-0,008	0,000	00
100	100,1537	100,2000	0,125	0,046	-0,002	0,009	-	0,000	00



TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

DETERMINACIÓN DE LAS CLASES DE EXACTITUD SEGÚN ISO 376:2011

Clase según ISO 376:2011 Caso C

Fuerza de referencia F_N kN	de reproducibilidad b	de repetibilidad b'	de interpolación f_c	de cero f_o		de creep c	Incertidumbre expandida de referencia	Clase por Fuerza mínima	Clase según ISO 376 CASO C
0	00	00	00	00		00	00		
10	1	0.5	1	00		00	00	00	1
20	1	1	0.5	00		00	00	00	1
30	0.5	2	00	00		00	00	00	2
40	0.5	00	0.5	00		00	00	00	0.5
50	0.5	1	00	00		00	00	00	1
60	0.5	1	00	00		00	00	00	1
70	1	1	00	00		00	00	00	1
80	1	1	00	00		00	00	00	1
90	1	1	00	00		00	00	00	1
100	1	0.5	00	00		00	00	00	1

TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

Clase según ISO 376:2011 Caso D

Fuerza de referencia F_N kN	de reproducibilidad b	de repetibilidad b'	de interpolación f_c	de cero f_o	de reversibilidad v		Incertidumbre expandida de referencia	Clase por Fuerza mínima	Clase según ISO 376 CASO D
0	00	00	00	00	-		00	-	
10	1	0.5	1	00	00		00	00	1
20	1	1	0.5	00	00		00	00	1
30	0.5	2	00	00	00		00	00	2
40	0.5	00	0.5	00	00		00	00	0.5
50	0.5	1	00	00	00		00	00	1
60	0.5	1	00	00	00		00	00	1
70	1	1	00	00	00		00	00	1
80	1	1	00	00	00		00	00	1
90	1	1	00	00	00		00	00	1
100	1	0.5	00	00	-		00	00	1

TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

INCERTIDUMBRE, CÁLCULO DE LA...

Fuerza de referencia	standard de la referencia	reproducibilidad	repetibilidad	resolución	creep	cero	temperatura	interpolación	reversibilidad	combinada standard con creep	combinada standard con reversibilidad
F_N	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_{rev}	W_c	W_c
kN	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,005	0,0472	0,0288	0,0041	0,0000	0,0090	0,0003	0,0521	0,0115	0,0768	0,0776
20	0,005	0,0428	0,0576	0,0020	0,0000	0,0090	0,0003	0,0410	0,0072	0,0833	0,0836
30	0,005	0,0173	0,0673	0,0014	0,0000	0,0090	0,0003	0,0114	0,0058	0,0712	0,0714
40	0,005	0,0281	0,0130	0,0010	0,0000	0,0090	0,0003	0,0434	0,0094	0,0543	0,0551
50	0,005	0,0154	0,0473	0,0008	0,0000	0,0090	0,0003	0,0045	0,0029	0,0510	0,0511
60	0,005	0,0168	0,0394	0,0007	0,0000	0,0090	0,0003	0,0038	0,0038	0,0442	0,0444
70	0,005	0,0297	0,0329	0,0006	0,0000	0,0090	0,0003	0,0083	0,0074	0,0463	0,0469
80	0,005	0,0318	0,0331	0,0005	0,0000	0,0090	0,0003	0,0041	0,0061	0,0473	0,0477
90	0,005	0,0297	0,0346	0,0005	0,0000	0,0090	0,0003	0,0011	0,0045	0,0468	0,0470
100	0,005	0,0367	0,0265	0,0004	0,0000	0,0090	0,0003	0,0018	-	0,0464	0,0464



TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

ANEXO B:

- *Ensayo de Sobrecarga:* 4 precargas al $110 \pm 2\%$, duración 60 a 90s.
Generalmente antes de la puesta en servicio
- *Verificación de interacción transductor – placas de carga (compresión):*
3 placas: plana, cóncava y convexa. Cavidad $1,0 \pm 0,1$ en 1000 del radio –
Dureza 400 a 650 HV 30. Se aplica fuerza máxima y mínima. Se compara
plana con cóncava y plana con convexa.

Table B.1 — Maximum permissible difference for the mean deflection

Class	Maximum permissible difference, %	
	at maximum force	at minimum force
00	0,05	0,1
0,5	0,1	0,2
1	0,2	0,4
2	0,4	0,8

Las superficies cóncavas y convexas representan las “tolerancias” de planitud, el transductor se apoya con sus placas originales sobre estas.

TRANSDUCTORES S/ ISO 376:11

ANEXO B:

- *Señal de Cero:* Su variación indicaría deformación plástica debido a sobrecarga. La deriva permanente indica influencia de la humedad en la base de los “strain gages”, o problemas de adherencia del mismo.
- *Corrección debido a Temperatura:*
Aplica a equipos sin salida eléctrica. Anillos dinamométricos. En transductores de fuerza se puede aplicar la ecuación, si se midió la constante K.

$$I_C = I_0 \cdot [1 + K(t - t_{REF})]$$

No se recomienda para corregir la temperatura de calibración.



TRANSDUCTORES – OTROS PROCEDIMIENTOS

SEGÚN OTROS PROCEDIMIENTOS:

- Las posibles fuentes de incertidumbre son las correspondientes a ISO 376.
- En el caso de ASTM E74, consultar la norma.
- En casos especiales, pueden no ser relevantes las incertidumbres o errores debido a reproducibilidad, histéresis, etc. Incluso el valor de referencia, como es el caso de la recomendación OIML R60 (celdas de carga para metrología legal). Aquí interesa la Repetibilidad, Estabilidad de la indicación y resolución.

TRANSDUCTORES – USO SUBSECUENTE

USO SUBSECUENTE:

1. Calibración → Certificado
2. Resolución (w_4)
3. Reversibilidad (w_{rev})
4. Deriva temporal (w_{Drift})
5. ≠ Temperatura
6. ≠ Carga final

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

$$w_{REV} = \frac{v}{100 \cdot \sqrt{3}}$$

Estimación!

$$w_{Drift} = \frac{a_{drift}}{\sqrt{3}}$$

$$w_7 = K \cdot (T - T_{Cal}) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

K conocido! y
corregido
s/B.4 ISO

- Opción 1 - ISO 376:11 B.2
- Opción 2 – Realizar ensayos a ≠ cargas

TRANSDUCTORES – USO SUBSECUENTE

USO SUBSECUENTE:

7. \neq Componentes parásitas \rightarrow girar el transductor (reproducibilidad)
8. \neq Esquema de tiempo de carga \rightarrow realizar ensayos, modificar esquema
9. “Linearización” la curva de interpolación \rightarrow evaluar diferencia entre lineal y valores obtenidos y/o interpolados
10. Cambio de amplificador \rightarrow analizar ambos certificados de calibración
11. Factor dinámico de las cargas \rightarrow ???



MÁQUINAS PARA ENSAYOS S/ISO 7500-1

MÁQUINAS PARA ENSAYOS - ISO 7500-1:

Modos de Calibración:

- “Fuerza constante Indicada” (de la máquina) → Analizamos este
“buscar el valor nominal en el equipo de menor resolución, reduce su incertidumbre, pues mejora el redondeo”.
- “Fuerza constante Verdadera” (del transductor) → Consultar norma.

Anexo D (ISO 7500-1), 7.2 (EURAMET)

MÁQUINAS PARA ENSAYOS S/ISO 7500-1

$$W_{STD} = \sqrt{W_{CAL}^2 + W_{TEMP}^2 + W_{DRIFT}^2 + W_{APPROX}^2}$$

Ver uso Subsecuente 

W_{STD}	Total del Transductor
W_{CAL}	Calibración
W_{TEMP}	Temperatura
W_{DRIFT}	Deriva
W_{APPROX}	Aproximación a la interpolación

$$W = k \cdot w_C = 2 \cdot \sqrt{W_{REP}^2 + W_{RES}^2 + W_{STD}^2}$$

W_{REP}	Repetibilidad
W_{RES}	Resolución

Ambas similares a ISO 376:11

$$W_{REP} = \frac{desvest(Xi)}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Xr}|}$$

$$W_{RES} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{a}{F}$$

$$w'_C = \sqrt{2} \cdot w_C$$

Incertidumbre con histéresis, sólo multiplica por raíz(2), se podría calcular mejor, pero convendría realizar 2 carreras descendentes.

MÁQUINAS PARA ENSAYOS S/ISO 7500-1 - EJEMPLO

Precargas

	kN	kN	kN
Valor inicial de cero	0,00	0,00	0,00
Valor a Fondo de escala	4000,00	4000,00	4000,00
Valor final de cero	-0,10	-0,09	-0,05

Carreras

Máquina Nominal	Máquina kN	Referencia	Máquina	Referencia	Máquina	Referencia	Máquina	Referencia
0,0	0,0	0,00000	0,0	0,00000	0,0	0,00000	0,0	0,00000
1500,0	1388,0	0,57447	1423,0	0,58776	1500,0	0,61832	1567,0	0,64735
2000,0	2000,0	0,82581	1933,6	0,79726	2000,0	0,82391	1860,8	0,76813
2500,0	2430,2	1,00280	2500,0	1,03038	2500,0	1,02869	2362,4	0,97438
3000,0	3000,0	1,23640	3000,0	1,23499	3000,0	1,23391	2960,0	1,22470
3500,0	3433,0	1,41417	3400,0	1,39962	3500,0	1,43996	3340,0	1,37996
4000,0	3906,0	1,61195	3950,0	1,62530	4000,0	1,64513	4000,0	1,64513
	0,2		0,6				0,2	

Temperatura °C

17,5

18,0

18,9

MÁQUINAS PARA ENSAYOS S/ISO 7500-1 - EJEMPLO

Referencia

$$W_{STD} = \sqrt{W_{CAL}^2 + W_{TEMP}^2 + W_{DRIFT}^2 + W_{APPROX}^2}$$

Valor indicado por la máquina	Valor de referencia	Incertidumbre de la referencia	Incertidumbre standard	Incertidumbre standard por drift	Incertidumbre standard por temperatura	Incertidumbre standard por resolución	Incertidumbre standard combinada
kN	mV/V	%	w(F _{RefTra})	w(Drift _{RefTra})	w(Temp _{RefTra})	w resolución	w(F _{refv})
0,0	0,00000		0,000	0,0058	0,0083	-	-
1500,0	0,61703	0,120	0,060	0,0058	0,0083	0,0008	0,1217
2000,0	0,82138	0,120	0,060	0,0058	0,0083	0,0006	0,1217
2500,0	1,02523	0,060	0,030	0,0058	0,0083	0,0005	0,0633
3000,0	1,22867	0,060	0,030	0,0058	0,0083	0,0004	0,0633
3500,0	1,43179	0,060	0,030	0,0058	0,0083	0,0003	0,0633
4000,0	1,63468	0,000	0,000	0,0058	0,0083	0,0003	0,0202

Valores corregidos					Verif. De los accesorios	
Valores indicados por la máquina	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 3'	Serie 4	Serie 5
	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V	mV/V
0,0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		
1500,0	0,62082	0,61956	0,61832	0,61967		
2000,0	0,82581	0,82464	0,82391	0,82559		
2500,0	1,03160	1,03038	1,02869	1,03113		
3000,0	1,23640	1,23499	1,23391	1,24125		
3500,0	1,44177	1,44079	1,43996	1,44607		
4000,0	1,65074	1,64587	1,64513	1,64513		



MÁQUINAS PARA ENSAYOS S/ISO 7500-1 - EJEMPLO

ISO 7500-1 - Sin considerar la verificación de accesorios					
<i>F_i</i>	<i>F</i>	<i>q</i>	<i>b</i>	<i>u</i>	<i>a</i>
Valor indicado por la máquina	Valor de referencia	Error relativo indicación Series 1 - 2 - 3	Error relativo de repetibilidad	Error relativo de reversibilidad	Resolución relativa
kN	kN	%	%	%	%
0,0	-	-	-	-	-
1500,0	1506,17	-0,41	0,40	0,22	0,003
2000,0	2008,29	-0,41	0,23	0,20	0,003
2500,0	2512,18	-0,48	0,28	0,24	0,002
3000,0	3015,71	-0,52	0,20	0,59	0,002
3500,0	3522,13	-0,63	0,13	0,42	0,001
4000,0	4030,75	-0,76	0,34	0,00	0,001

Matriz de selección de clase

Valor indicado por la máquina	Incertidumbre del patrón	Error relativo de indicación	Error relativo de repetibilidad	Error relativo de reversibilidad	Resolución relativa	Clase de la máquina según ISO-7500-1
0,0	-	-	-	-	-	
1500,0	1	1	0,5	0,5	0,5	1
2000,0	1	1	0,5	0,5	0,5	1
2500,0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1
3000,0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1
3500,0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1
4000,0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1

MÁQUINAS PARA ENSAYOS S/ISO 7500-1 - EJEMPLO

Valor indicado por la máquina	Repetibilidad Series 1 - 2 - 3	Resolución	Incertidumbre combinada standard	Incertidumbre expandida (k=2)	Incertidumbre expandida con carga decreciente	Clase de la máquina según ISO-7500-1
kN	W_{REP}	W_{RES}	W_{STD}	W	W'	
0,0	-	-	-	-		
1500,0	0,1167	0,0010	0,1316	0,2633	0,3723	1,0
2000,0	0,0671	0,0007	0,0906	0,1812	0,2562	1,0
2500,0	0,0820	0,0006	0,0879	0,1757	0,2485	1,0
3000,0	0,0584	0,0005	0,0664	0,1328	0,1878	1,0
3500,0	0,0363	0,0004	0,0482	0,0963	0,1362	1,0
4000,0	0,1068	0,0004	0,1073	0,2146	0,3036	1,0

Ministerio de Industria
Presidencia de la Nación



MUCHAS GRACIAS

Dirección: Av. General Paz 5445 (CP 1650)
San Martín, Buenos Aires, Argentina

Teléfono +5411 4724 - 6200

E-mail: asavarin@inti.gov.ar

Octubre de 2014

