

BOLETÍN TÉCNICO
DGST No. 1/2021

Importancia de la calibración de las máquinas de fuerza para el ensaye de materiales de construcción

En la construcción de las obras viales, en las que se emplea todo tipo de materiales, es necesario tener el control de calidad de todos los insumos que se emplean, mediante métodos de prueba normalizados para determinar las dimensiones, la masa, el volumen y otras características físicas y mecánicas de cada material. Esto exige el empleo de equipos e instrumentos de medición certificados que cuenten con la precisión para cada prueba en particular.

En la construcción de las obras viales es necesario asegurar que los equipos para la evaluación de los materiales empleados operen bajo las condiciones metrológicas requeridas en los métodos de pruebas para el ensaye de éstos.

Las pruebas con las que se evalúa la calidad de los materiales empleados en las obras de ingeniería requieren equipos e instrumentos en buen estado de funcionamiento y condiciones metrológicas adecuadas para obtener resultados confiables. Durante su uso, los equipos e instrumentos sufren desgastes normales, lo que provoca la variación en su funcionamiento, por ende, en sus condiciones metrológicas, obligando con ello a crear programas de mantenimiento y calibración para mantener su trazabilidad con los patrones nacionales.

Los métodos de prueba establecen los requisitos que deben cumplir los equipos que intervienen en los ensayos, como es el caso de la Normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en la que se indica que los equipos para la ejecución de pruebas estarán

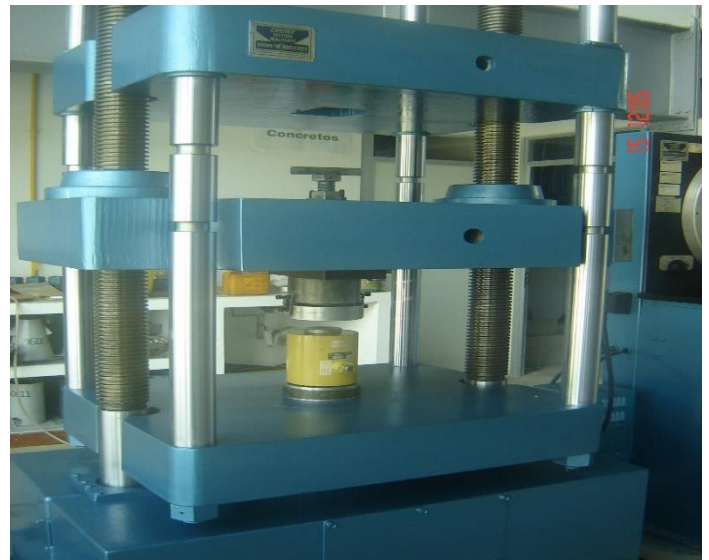


FIGURA 1. Calibración de Máquina Universal *Forney*

en condiciones de operación, calibrados, limpios y completos en todas sus partes.

La Ley de Infraestructura de la Calidad, en vigor a partir del 1 de julio de 2020 y que abroga la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, establece los lineamientos para la elaboración de las Normas Mexicanas, que son de carácter voluntario y en este marco legal se circunscribe la Norma Mexicana NMX-CH-7500-1-IMNC-2008, *Verificación de máquinas uniaxiales para ensayo - Máquina para ensayo a tracción o compresión - verificación y calibración del sistema de medición de fuerza*, que contiene los requisitos de calibración que deberán cumplir las máquinas de aplicación y medición de fuerza empleadas para el ensaye de materiales de construcción. Asimismo, los patrones

de fuerza requeridos para calibrar las máquinas deberán cumplir con los requisitos de la Norma Mexicana NMX-CH-376-IMNC-2008, *Instrumentos de medición-Calibración de instrumentos de medición de fuerza empleados para la verificación de máquinas de ensayo uniaxiales*.



FIGURA 2. Celdas Patrón

TRAZABILIDAD. Propiedad del resultado de una medición por la cual se puede establecer una referencia determinada a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones, teniendo todas las incertidumbres determinadas.

CALIBRACIÓN. Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un instrumento de medición y los valores correspondientes de un patrón de referencia.

con un certificado o informe de calibración que garantice su trazabilidad a los patrones nacionales y deberán cumplir con los requisitos de la Norma Mexicana NMX-CH-376-IMNC-2008.

Antes de iniciar con la calibración de la máquina es necesario realizar una inspección general de ésta en cuanto a su funcionamiento y sus componentes, ya que sólo puede realizarse la calibración si la máquina se encuentra en buenas condiciones de funcionamiento, lo cual puede lograrse con un servicio de mantenimiento previo.

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

1. Determinar la resolución relativa del indicador de fuerza de la máquina. Cuando el sistema de indicación es analógico se utiliza la Ecuación 1 para la realización de los cálculos correspondientes.

$$a = \frac{r}{F}$$

Ecuación 1

En donde:

a = resolución relativa
 r = resolución del indicador
 F = Fuerza aplicada.

Las máquinas en los laboratorios de prueba que participan de forma más común en el control de calidad y verificación de calidad en las obras de carretera son: las máquinas universales con sistemas de indicación multiescalar y capacidades de cien (100) y ciento cincuenta (150) toneladas, para el ensaye de los diferentes tipos de aceros; las prensas para el ensaye de cilindros de concreto hidráulico, con capacidad para ciento veinte (120) toneladas; las prensas para la prueba de CBR y estabilidad Marshall, con sistema de indicación mediante anillos de carga de cinco (5) toneladas de capacidad, empleadas en las áreas de terracerías y pavimentos y mezclas asfálticas, respectivamente. Las máquinas que cuentan con más de una escala de medición, como las universales, deben calibrarse para cada una de sus escalas.

La calibración se debe realizar en cada uno de los intervalos de fuerza que se usen. Si la máquina tiene varios sistemas de aplicación o medición de fuerza, se deben considerar como una máquina separada.

Los instrumentos empleados como patrón para la calibración pueden ser celdas de carga, anillos de carga, cápsulas de mercurio, etc. Deberán contar

La resolución se considera como la relación que hay entre el ancho de la aguja y la distancia de centro a centro entre dos marcas adyacentes de la graduación (una división mínima de la escala). Las relaciones recomendadas son 1:2, 1:5, y 1:10. Cuando la escala es digital se considera como el incremento del número del último dígito en el indicador.



- Montar el equipo patrón sobre la platina de la máquina para eliminar el efecto de pandeo, verificando que cuente con rótula.
- Acondicionar la temperatura de la máquina y la del patrón a la temperatura ambiente del laboratorio, la cual debe oscilar entre los 10°C y los 35°C, por un periodo de cuando menos 60 minutos. Esto debe ser registrado en el informe de calibración.
- Acondicionar la máquina y el equipo patrón aplicando tres precargas de cero hasta la carga máxima. Puede realizarse cualquiera de los dos procedimientos siguientes:
 - Aplicar la fuerza fijando la lectura del equipo patrón y leer en el indicador de la máquina (se dice que “el equipo patrón rige”).
 - Aplicar la fuerza fijando la lectura de la máquina y leer en el indicador del equipo patrón (se dice que “la máquina rige”).

- Aplicar y registrar tres series de mediciones con incremento de fuerza, por lo menos con cinco fuerzas en cada una, uniformemente distribuidas en un intervalo entre el 20% y el 100% del alcance de medición de la máquina, girando el patrón después de cada serie, con un ángulo de 120° o mayor. De ser posible, se realiza el registro de las lecturas como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1. Registro de lecturas de la máquina y del patrón de calibración

LECTURAS DEL EQUIPO PATRÓN	LECTURAS DE LA MÁQUINA			
	Serie 1 (0°)	Serie 2 (120°)	Serie 3 (240°)	Promedio
	kN	kN	kN	kN
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
98,07	98,07	98,07	98,07	98,07
196,1	196,1	195,2	195,2	195,5
294,2	293,2	293,2	294,2	293,5
392,3	391,3	391,3	391,3	391,3
490,3	489,4	490,3	489,4	489,7
588,4	588,4	588,4	588,4	588,4
686,5	685,5	685,5	685,5	685,5
784,5	783,6	783,6	783,6	783,6
882,6	881,6	881,6	882,6	881,9

- Analizar y reportar los resultados de la calibración calculando los errores relativos de exactitud y de repetibilidad, así como la resolución relativa, como se ve en la Tabla 2, comparando los resultados con los requisitos que establece la norma mexicana NMX-CH-7500-1-IMNC-2008, *Verificación de máquinas uniaxiales para ensayo - Máquina para ensayo a tracción o compresión - verificación y calibración del sistema de medición de fuerza*, indicados en la Tabla 3.

TABLA 2. Registro de lecturas correspondientes a la Escala de 980,7 kN, Resolución 0,613 kN y Patrón de Carga de 300 kN y 1000 kN

LECTURA DEL EQUIPO PATRÓN	LECTURAS DE LA MÁQUINA				ERRORES RELATIVOS		Resolución relativa
	Serie 1 (0°)	Serie 2 (120°)	Serie 3 (240°)	Prom.	Exactitud	Repetibilidad	
	kN	kN	kN	kN	%	%	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
98,07	98,07	98,07	98,07	98,07	0,00	0,00	0,63
196,1	196,1	195,2	195,2	195,5	-0,33	0,50	0,31
294,2	293,2	293,2	294,2	293,5	-0,22	0,33	0,21
392,3	391,3	391,3	391,3	391,3	-0,25	0,00	0,16
490,3	489,4	490,3	489,4	489,7	-0,13	0,20	0,13
588,4	588,4	588,4	588,4	588,4	0,00	0,00	0,10
686,5	685,5	685,5	685,5	685,5	-0,14	0,00	0,09
784,5	783,6	783,6	783,6	783,6	-0,13	0,00	0,08
882,6	881,6	881,6	882,6	881,9	-0,07	0,11	0,07

TABLA 3. Valores de los errores relativos del sistema de medición con los que se caracteriza un intervalo

CLASE DE MÁQUINA	MÁXIMO VALOR PERMISIBLE DE ERROR RELATIVO, %				(D)
	(A)	(B)	(C)	Cero fo	
	q	b			a
0,5	±0,5	0,5	±0,75	±0,05	0,25
1	±1,0	1,0	±1,50	±0,10	0,50
2	±2,0	2,0	±3,00	±0,20	1,00
3	±3,0	3,0	±4,50	±0,30	1,50

- (A) = Exactitud
(B) = Repetibilidad con cambio de posición
(C) = Reversibilidad
(D) = Resolución relativa



EJEMPLOS DE CÁLCULOS DE LA RESOLUCIÓN RELATIVA Y DE LOS ERRORES RELATIVOS DE EXACTITUD Y DE REPETIBILIDAD

EJEMPLO 1. Máquina universal con capacidad de 980,7 kN, marca *Shimadzu* con 5 escalas (49, 98, 245, 490 y 981 kN).

Se realizó la calibración en 10 puntos con incremento equivalente al 10% del alcance de medición de la escala de la máquina presentados en la Tabla 1.

El cálculo de los errores relativos de exactitud, de repetibilidad y de resolución, se obtiene de acuerdo con lo establecido en la norma NMX-CH-7500-1-IMNC-2008 y con las Ecuaciones 2, 3 y 4, registrando los resultados de estos cálculos como se muestra en la Tabla 2.

Aplicando:

$$q = \frac{F_i - F}{F} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde:

q = error relativo de exactitud, %.

F_i = Lecturas de la máquina, unidad de fuerza.

F = Lecturas del patrón, unidad de fuerza.

$$b = \frac{F_{max} - F_{min}}{\bar{F}} \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

b = error relativo de repetibilidad, %.

F_{max} = Lectura máxima de la máquina en cada punto, unidad de fuerza.

F_{min} = Lectura mínima de la máquina en cada punto, unidad de fuerza.

$\bar{F}$ = Lectura promedio de la máquina en cada punto, unidad de fuerza.

$$a = \frac{r}{\bar{F}} \times 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde:

a = resolución relativa.

r = resolución del indicador.

$\bar{F}$ = Fuerza en el punto bajo consideración.

Se realiza el resumen de resultados de todas las lecturas de la calibración de las diferentes escalas. Para este ejemplo se registran los resultados obtenidos de las 5 escalas con las que cuenta la máquina universal como se presenta en la Tabla 4.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los errores de exactitud y repetibilidad satisfacen los requisitos establecidos en la Tabla 3 para una máquina clase 1; sin embargo, el valor de la resolución relativa en las escalas de 980,7 kN, 490,3 kN, 98,07 y 49,03 kN, es superior al valor especificado de 0,5%. Para este caso, hay dos posibles soluciones, uno es clasificarlas como clase 2 en vez de 1; y la otra, es mantenerla en la clase 1, especificando en el informe que el intervalo calibrado aprobado es de 9,81 kN a 44,05 kN. Esto se sustenta en que en ese intervalo la máquina no tiene prácticamente uso, además de que la norma NMX-CH-7500-1-IMNC-2008, *Verificación de máquinas uniaxiales para ensayo-Máquina para ensayo a tracción o compresión-Verificación y calibración del sistema de medición de fuerza*, permite realizar la calibración de la máquina a partir del punto correspondiente al 20% del valor máximo de la escala.

TABLA 4. Resumen de resultados de la calibración de una máquina universal de 980,7 kN de capacidad

ESCALA	ERROR RELATIVO DE		RESOLUCIÓN RELATIVA
	Exactitud	Repetibilidad	
	%	%	%
49,03 kN	-0,33	0,29	0,63
98,07 kN	-0,33	0,29	0,62
245,2 kN	-0,40	0,33	0,50
490,3 kN	-0,17	0,25	0,62
980,7 kN	-0,33	0,50	0,63

EJEMPLO 2. Prensa para la prueba de CBR de accionamiento eléctrico, con sistema de medición de anillo de carga, alcance de medición de 29,42 kN y resolución de 0.00461 kN, con una escala única.

Se realizó la calibración en 10 puntos con incremento equivalente al 10% del alcance de medición de la escala de la máquina. Los pasos que se requieren realizar para este tipo de prensas son los siguientes:



1. Acondicionar la prensa junto con el patrón de fuerza que se empleará para realizar la calibración.
2. Colocar el patrón de fuerza (celda de carga) centrándola con el eje de carga de la prensa.
3. Aplicar tres series de precargas, desde cero hasta la carga máxima acordada para la calibración de la prensa.

TABLA 5. Determinación de la Constante de Calibración

LECTURAS DEL PATRÓN (LP)	Lecturas de la prensa			Promedio (Lm)	Constante LP/Lm
	Serie 1 (0°)	Serie 2 (120°)	Serie 3 (240°)		
(kN)	(uni)	(uni)	(uni)	(uni)	kN/uni
0	0	0	0	0	
2,94	63,4	63,4	63,4	63,4	0,0464
5,88	128,6	128,2	128,6	128,5	0,0458
8,83	192,0	191,8	192,0	191,9	0,0460
11,77	254,2	254,0	254,2	254,1	0,0463
14,71	321,5	321,0	321,5	321,3	0,0458
17,65	387,6	387,0	387,6	387,4	0,0456
20,59	451,2	450,5	451,2	451,0	0,0457
23,54	516,0	515,8	516,0	515,9	0,0456
26,48	582,8	582,0	582,8	582,5	0,0455
29,42	649,0	648,0	649,0	648,7	0,0454
			Constante de Calibración		0,0458

4. Elaborar una tabla con los valores de lecturas de la prensa correspondiente a cada lectura del patrón, como se muestra en las primeras 4 columnas de la Tabla 5.
5. Calcular el promedio de lecturas de la prensa en cada punto calibrado, registrándolo como se muestra en la quinta columna de la Tabla 5.
6. Calcular la constante de calibración promedio, dividiendo la lectura del patrón entre la lectura de la prensa para cada uno de los puntos evaluados, promediando los 10 valores determinados y registrándolos como se presentan en la última columna de la Tabla 5.
7. Convertir las lecturas de la prensa en unidad de fuerza, multiplicando esta lectura por la constante de calibración.
8. Calcular el error de exactitud utilizando la Ecuación 5. En caso de que los resultados sean

mayores al 1%, se procederá a determinar una ecuación lineal o de segundo grado. La constante o cualquiera de las ecuaciones con la que se obtengan errores de exactitud menores o iguales al 1%, es la que servirá para convertir las lecturas de la prensa a unidad de fuerza.

$$q = \frac{(Lm - Lp)}{Lp} \times 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde:

q = error de exactitud.
 Lm = Lectura de la máquina.
 Lp = Lectura del Patrón.

De igual manera, se obtiene la ecuación lineal y la ecuación de segundo grado determinada con los resultados de la calibración, obteniendo para este ejemplo la Ecuación 6 y la Ecuación 7, respectivamente.

$$y = 0.0453x + 0.1338 \quad \text{Ecuación 6}$$

$$y = -1.4694E^{-6}x^2 + 4.6316E^{-2}x - 9.705E^{-4} \quad \text{Ecuación 7}$$

TABLA 6. Cálculo del error de exactitud para definir el uso de constante o ecuación

LECTURAS DEL PATRÓN (LP)	PROMEDIO (LM)	CÁLCULO PARA SELECCIONAR CONSTANTE O ECUACIÓN					
		Constante		Ecuación lineal		Ecuación 2° grado	
(kN)	(uni)	kN	q (%)	kN	q (%)	kN	q (%)
2,94	63,4	2,90	-1,32	3,01	2,17	2,93	-0,42
5,88	128,5	5,88	-0,02	5,95	1,18	5,92	0,69
8,83	191,9	8,79	-0,42	8,83	0,03	8,83	0,10
11,77	254,1	11,64	-1,11	11,65	-1,04	11,67	-0,79
14,71	321,3	14,71	0,03	14,69	-0,13	14,73	0,14
17,65	387,4	17,74	0,50	17,68	0,18	17,72	0,39
20,59	451,0	20,65	0,28	20,56	-0,15	20,59	-0,03
23,54	515,9	23,63	0,38	23,51	-0,13	23,50	-0,14
26,48	582,5	26,68	0,75	26,52	0,17	26,48	0,01
29,42	648,7	29,70	0,97	29,52	0,33	29,42	0,02



Como se muestra en la Tabla 6, se realiza el cálculo del error de exactitud para definir el uso de constante o ecuación.

Los resultados indican que los errores menores del 1% se obtienen con la ecuación de segundo grado.

- Convertir las lecturas de la prensa a unidades de fuerza empleando la Ecuación 7, con la que se obtienen errores menores al 1%, como se muestra en la Tabla 7.

TABLA 7. Conversión de lecturas de la prensa a unidades de fuerza con la ecuación seleccionada

LECTURAS DEL PATRÓN (LP)	LECTURAS DE LA PRENSA				LECTURAS DE LA PRENSA			
	Serie 1 (0°)	Serie 2 (120°)	Serie 3 (240°)	Prom.	Serie 1 (0°)	Serie 2 (120°)	Serie 3 (240°)	Prom.
	(kN)	(uni)	(uni)	(uni)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,94	63,4	63,4	63,4	63,4	2,93	2,93	2,93	2,93
5,88	128,6	128,2	128,6	128,5	5,93	5,91	5,93	5,92
8,83	192,0	191,8	192,0	191,9	8,84	8,83	8,84	8,83
11,77	254,2	254,0	254,2	254,1	11,68	11,67	11,68	11,67
14,71	321,5	321,0	321,5	321,3	14,74	14,72	14,74	14,73
17,65	387,6	387,0	387,6	387,4	17,73	17,70	17,73	17,72
20,59	451,2	450,5	451,2	451,0	20,60	20,57	20,60	20,59
23,54	516,0	515,8	516,0	515,9	23,51	23,50	23,51	23,50
26,48	582,8	582,0	582,8	582,5	26,49	26,46	26,49	26,48
29,42	649,0	648,0	649,0	648,7	29,44	29,39	29,44	29,42

- Calcular los errores de exactitud y de repetibilidad de la calibración, así como la resolución relativa de la prensa, como se presenta en la Tabla 8.

En la Tabla 9 se aprecia que, de acuerdo con los resultados obtenidos, la máquina satisface los requisitos establecidos en la Tabla 3 como clase 1, correspondiente a la norma NMX-CH-7500-1-IMNC-2008, *Verificación de máquinas uniaxiales para ensayo - Máquina para ensayo a tracción o compresión - Verificación y calibración del sistema de medición de fuerza*.

Las máquinas universales por sus características de construcción y operación, así como por su sistema

de indicación, cumplen satisfactoriamente con los requisitos establecidos para máquinas clase 1, de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-CH-7500-1-IMNC-2008, *Verificación de máquinas uniaxiales para ensayo - Máquina para ensayo a tracción o compresión - Verificación y calibración del sistema de medición de fuerza*; asimismo, las prensas con anillos de carga con capacidad para 5000 kg.

TABLA 8. Resultados de errores de exactitud, de repetibilidad y de resolución relativa

LECTURAS DEL PATRÓN (LP)	LECTURAS DE LA PRENSA				(A)	(B)	(C)
	Serie 1 (0°)	Serie 2 (120°)	Serie 3 (240°)	Prom.			
(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	%	%	%
0	0	0	0	0	--	--	--
2,94	2,93	2,93	2,93	2,93	-0,42	0,00	0,16
5,88	5,93	5,91	5,93	5,92	0,69	0,31	0,08
8,83	8,84	8,83	8,84	8,83	0,10	0,10	0,05
11,77	11,68	11,67	11,68	11,67	-0,79	0,08	0,04
14,71	14,74	14,72	14,74	14,73	0,14	0,15	0,03
17,65	17,73	17,70	17,73	17,72	0,39	0,15	0,03
20,59	20,60	20,57	20,60	20,59	-0,03	0,15	0,02
23,54	23,51	23,50	23,51	23,50	-0,14	0,04	0,02
26,48	26,49	26,46	26,49	26,48	0,01	0,13	0,02
29,42	29,44	29,39	29,44	29,42	0,02	0,15	0,02

(A) = Error de exactitud
(B) = Error de repetibilidad
(C) = Resolución relativa

TABLA 9. Resumen de resultados

INTERVALO 2,94 A 29,42 KN	ERRORES RELATIVOS DE		RESOLUCIÓN RELATIVA
	exactitud %	repetibilidad %	
Mínimo	-0,79	0,00	0,02
Máximo	0,69	0,31	0,16

Para mantener las máquinas en condiciones de operación y sus mediciones trazables al patrón nacional, es necesario someterlas a un programa de mantenimiento y calibración establecido de acuerdo con las condiciones de uso.

La calibración de las máquinas universales se realizará cada año como máximo, o por cada 40,000



pruebas de compresión; 12,000 para pruebas de tensión y 2,000 para el caso de prensas con anillo de carga.

Se deberá calibrar la máquina después de una reparación o ajustes en los mecanismos de medición, o cada vez que se cambie de sitio o exista duda de la exactitud de los resultados, sin importar cuándo se haya efectuado la última calibración.

REFERENCIAS

Norma Mexicana **NMX-CH-7500-1-IMNC-2008**, *Verificación de máquinas uniaxiales para ensayo - Máquina para ensayo a tracción o compresión - Verificación y calibración del sistema de medición de fuerza*. Instituto Mexicano de Normalización A. C., México. 2008.

Norma Mexicana **NMX-CH-376-IMNC-2008**, *Instrumentos de medición - Calibración de instrumentos de medición de fuerza empleados para la verificación de máquinas de ensayo uniaxiales*. Instituto Mexicano de Normalización A. C., México. 2008.

Normativa para la Infraestructura del Transporte. **N-CAL-2-05-001/05**, *Aprobación de Laboratorios*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México. 2004.

Normativa para la Infraestructura del Transporte. **M-MMP-2-02-058/04**, *Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México. 2004.