



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES A TENSIÓN DE LA MALLA DE ALAMBRE SOLDADO DISPONIBLE EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Alejandro Rico¹, Julián Carrillo² y Sergio M. Alcocer³

RESUMEN

En estudios experimentales previos se ha reportado que las mallas de alambre soldado no cumplen con los requisitos a tensión que estipulan las normas mexicanas correspondientes. Por lo tanto, se desarrolló un programa de investigación experimental para estudiar las propiedades a tensión de las mallas de alambre soldado disponibles en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Se seleccionaron los tipos de malla más empleados en la construcción de estructuras de concreto. A partir del análisis estadístico de las propiedades medidas, se presentan y discuten los parámetros de resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión, alargamiento, reducción de área y deformación última a tensión. Asimismo, se proponen modificaciones a las normas mexicanas vigentes.

ABSTRACT

Previous experimental studies reveal that meshes do not fulfill the tensile properties specified in Mexican materials standards. Therefore, aimed at studying the tensile properties of welded wire mesh available in the Metropolitan Area of Mexico City, an experimental research program was developed. Most used mesh types in construction of concrete structures were selected. Based on statistical analysis of the measured properties, the following parameters are reported and discussed: yield stress, ultimate stress, elongation, reduction of area, as well as ultimate tensile deformation. Modifications to the current Mexican materials standards are also proposed.

INTRODUCCIÓN

La malla de alambre soldado estirado en frío es un material que brinda grandes beneficios a la industria de la construcción. Por ejemplo, disminuye el costo de habilitación del refuerzo y proporciona a los elementos el refuerzo necesario. Este material se utiliza como refuerzo de concreto para la construcción de muros, losas, pisos industriales y pavimentos. Varios estudios experimentales se han desarrollado para estudiar el comportamiento de los elementos de concreto reforzados con malla de alambre soldado. Algunos de estos estudios han reportado propiedades mecánicas del material de refuerzo, que podrían ser menores que las propiedades mínimas estipuladas en las normas correspondientes. Para verificar el cumplimiento de las especificaciones incluidas en las normas mexicanas vigentes, se llevó a cabo una investigación experimental tendiente a caracterizar las propiedades a tensión de la malla de alambre soldado disponible en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

En este artículo se presentan y discuten los resultados experimentales asociados al comportamiento a tensión de los tipos de malla más empleados en la construcción de estructuras de concreto. En el programa experimental se seleccionaron cinco empresas que comercializan malla de alambre soldado en la ZMCM. La definición del tipo y cantidad de pruebas, así como los procedimientos de ensayos, se realizaron siguiendo los lineamientos de las normas mexicanas correspondientes. Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de

¹ ExBecario de Ingeniería Civil, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México, D.F. & Coordinador de Desarrollo, Empresas ICA. alejandro-rico-celis@hotmail.com

² Candidato a Doctor en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México, D.F., & Profesor Asistente, Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá, Colombia. wcarrillo@umng.edu.co

³ Profesor Investigador, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México, D.F. salcocerm@ii.unam.mx

Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En general, las pruebas de tensión se realizaron con la intención de medir los parámetros necesarios para caracterizar la curva esfuerzo–deformación del material. En el programa experimental también se midieron los parámetros especificados para caracterizar la capacidad de deformación, tales como el alargamiento y la reducción de área transversal en la ruptura. A partir de análisis estadístico de las propiedades medidas, se presentan y discuten los parámetros de resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión, alargamiento, reducción de área y deformación última a tensión.

ANTECEDENTES

En estudios experimentales previos (Flores, 2003 y Carrillo, 2010) se ha indicado que los elementos de concreto reforzados utilizando malla de alambre soldado (comúnmente conocida como malla electrosoldada), desarrollaron capacidad de deformación significativamente menor que la medida en elementos reforzados utilizando barras corrugadas convencionales. Durante la caracterización de las mallas de alambre soldado en dichos estudios, se observó que el porcentaje de alargamiento fue menor que el mínimo especificado y, que durante las pruebas a tensión existe una tendencia a que la fractura del alambre se origine justo en el sitio de soldadura de los alambres. Estos resultados son un indicio de que las mallas empleadas en dichos estudios podrían no ser adecuadas para su utilización en el refuerzo de elementos sometidos a acciones sísmicas.

El proyecto de investigación de Carrillo (2010), estuvo dirigido a evaluar el comportamiento a cortante de muros de concreto reforzado. En dicho estudio se observó que los especímenes reforzados utilizando malla de alambre soldado, exhibieron capacidad de deformación limitada. Los análisis de estos estudios mostraron que la capacidad de deformación en los especímenes utilizados está relacionada con el comportamiento frágil del acero de refuerzo empleado. Durante la caracterización del material se observó que los parámetros de ductilidad característicos del material, tales como el porcentaje de alargamiento y la deformación última, no fueron los esperados. En la figura 1 se muestran las curvas esfuerzo–deformación promedio a tensión de alambres de malla 6×6-8/8 y de barras corrugadas de 9.5 mm de diámetro, reportadas en dicho estudio. Como se observa en la Figura 1, las capacidades de resistencia y de deformación de los alambres de malla y las barras de acero corrugadas difieren apreciablemente.

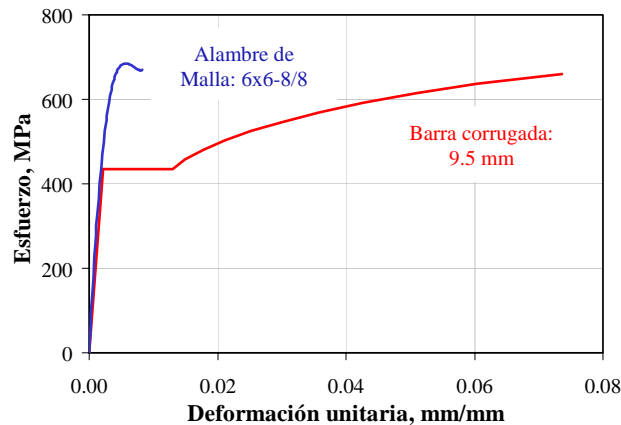


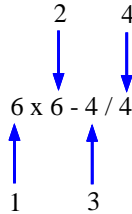
Figura 1 Curvas esfuerzo–deformación del acero de refuerzo utilizado por Carrillo (2010)

Adicionalmente, Flores (2003) reporta un valor promedio de alargamiento igual a 1.5%, para los alambres de malla 6×6–4/4 utilizados en el refuerzo de muros diafragma de bloque de mampostería. Asimismo, en el estudio experimental de Marcelino (2004), se indica un alargamiento promedio igual a 1.03%, para los alambres de malla 6×6–6/6. Los valores de alargamiento reportados son notoriamente menores que el 6% especificado en la norma NMX-B-253 (2006). Esta situación promueve la revisión de las propiedades de alargamiento de las mallas, así como la metodología que siguen algunos laboratorios en la obtención de este parámetro. Respecto al alargamiento, Dove (1983) indica que la prueba de doblado y la prueba de reducción de área son los procedimientos adecuados para evaluar la ductilidad. De igual forma, la norma ASTM A-82 (2001) utiliza únicamente los parámetros reducción de área y prueba de doblado (se excluye al alargamiento).



PROGRAMA EXPERIMENTAL

En el programa experimental se seleccionaron cinco empresas que comercializan malla de alambre soldado en la ZMCM. Para cada marca se estudiaron los cuatro tipos de malla de alambre soldado más utilizados en la construcción de estructuras de concreto; es decir, los tipos 6x6-4/4, 6x6-6/6, 6x6-8/8 y 6x6-10/10. En la tabla 1 se indican los diámetros nominales y áreas transversales para los alambres estudiados. A continuación se describe su nomenclatura:



donde el dígito 1 representa la separación de alambres longitudinales en pulgadas, el dígito 2 simboliza la separación de alambres transversales en pulgadas, el dígito 3 indica el calibre de alambres longitudinales y el dígito 4 representa al calibre de alambres transversales (tabla 1).

Tabla 1 Propiedades nominales de alambres

Calibre	Diámetro del alambre (mm)	Área del alambre (mm ²)
4	5.72	25.69
6	4.88	18.70
8	4.11	13.26
10	3.43	9.24

DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE PRUEBAS Y REQUISITOS MÍNIMOS ESPECIFICADOS

La definición del tipo y cantidad de pruebas se realizó de acuerdo con lo especificado en las normas mexicanas NMX-B-253 (2006) y NMX-B-290 (2006). También se revisaron publicaciones anteriores relacionadas con la caracterización del acero de refuerzo (Rodríguez y Botero, 1996). Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Para cada tipo y marca de malla se realizaron seis pruebas de tensión. En la tabla 2 se señalan las cinco marcas y los tipos de malla que fueron estudiados. Para mantener la confidencialidad de los fabricantes, las empresas no se identificaron con su nombre comercial. En la tabla 3 se muestran los requisitos mínimos especificados en dichas normas, asociados a los valores promedio de las muestras ensayadas. De acuerdo con la norma NMX-B-290 (2006), ninguna probeta debe generar de manera individual un resultado inferior al 80% de los valores indicados en la tabla 3, cuyos valores se muestran en la tabla 4.

Tabla 2 Productores y tipos de malla estudiados

Marcas	Tipos de malla
A, C, E, G, H	6x6 - 4/4
	6x6 - 6/6
	6x6 - 8/8
	6x6 - 10/10

Tabla 3 Requisitos mecánicos

Parámetros de resistencia de los alambres	Resistencia a la tensión	559 MPa
	Esfuerzo de fluencia	490 MPa
Parámetros de ductilidad de los alambres	Alargamiento en 10 diámetros	6%
	Reducción de área	30%

Es importante señalar que de acuerdo con un estimado de la producción del material en la ZMCM, un análisis estadístico exhaustivo de las propiedades de las mallas debería incluir el ensaye de más de 10,000 probetas anuales. Este requerimiento es responsabilidad directa de los productores de las mallas. En este informe se analizan los ensayos de 120 probetas de mallas. Sin embargo, se considera que los resultados aquí reportados son una herramienta útil para caracterizar las tendencias de las propiedades mecánicas de las mallas de alambre soldado comercializado en la ZMVM.

Tabla 4 Valores mínimos a tensión de cada probeta individual

Resistencia mínima a la tensión	447 MPa
Esfuerzo mínimo a la fluencia	392 MPa
Alargamiento mínimo en 10 diámetros	4.8 %
Reducción mínima de área	24 %

Nota: ⁽¹⁾Valores equivalentes al 80% de aquellos indicados en la tabla 3

DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DE PROBETAS

El proceso de obtención de las probetas para las pruebas (técnica de corte, medidas, etc.), se efectuó conforme a los lineamientos de las normas NMX-B-253 (2006) y NMX-B-290 (2006). La longitud de las probetas para los ensayos de tensión fue igual a 300 mm y, de esta manera, el empalme de alambre se localizó en la parte central de la probeta (figura 2). La longitud libre entre mordazas de las probetas ensayadas a tensión, fue aproximadamente igual a 180 mm, con un empalme transversal en la parte central de la probeta. Para cortar las probetas se utilizó una cizalla convencional. Fue necesario evitar maltratos, doblados y óxido antes de las pruebas. De acuerdo con la norma correspondiente, para que las probetas obtenidas fueran representativas del ancho completo de la malla, estas se obtuvieron de los extremos y de las partes centrales de las muestras de malla.



Figura 2 Probetas típicas ensayadas a tensión (acotaciones en mm)

DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

Las pruebas se llevaron a cabo siguiendo los lineamientos de las normas NMX-B-253 (2006), NMX-B-290 (2006) y NMX-B-172 (1988). En general, las pruebas de tensión se realizaron con la intención de medir los parámetros necesarios para caracterizar la curva esfuerzo-deformación del material. En el programa experimental también se midieron los parámetros especificados en las normas para caracterizar la capacidad de deformación, tales como el alargamiento y la reducción de área transversal en la ruptura (figuras 3(a) y 3(b), respectivamente). De acuerdo con la norma ASTM-A-370 (2009), el alargamiento se debe medir en la zona de falla de la probeta. Sin embargo, para propósitos de comparación con varios estudios reportados en la literatura; por ejemplo, Flores (2003) y Marcelino (2004), las mediciones de alargamiento se realizaron fuera de la zona de falla de la probeta. El registro de desplazamientos durante las pruebas de tensión se obtuvo utilizando una cámara óptica y LED's infrarrojos. Los desplazamientos se midieron en cuatro sitios distintos dentro de la parte central de la probeta y, por lo tanto, las deformaciones se calcularon entre los LED's 1-2, 2-3 y 3-4 (figuras 3(c) y 3(d)). Las deformaciones aquí presentadas corresponden al promedio de las tres deformaciones calculadas.

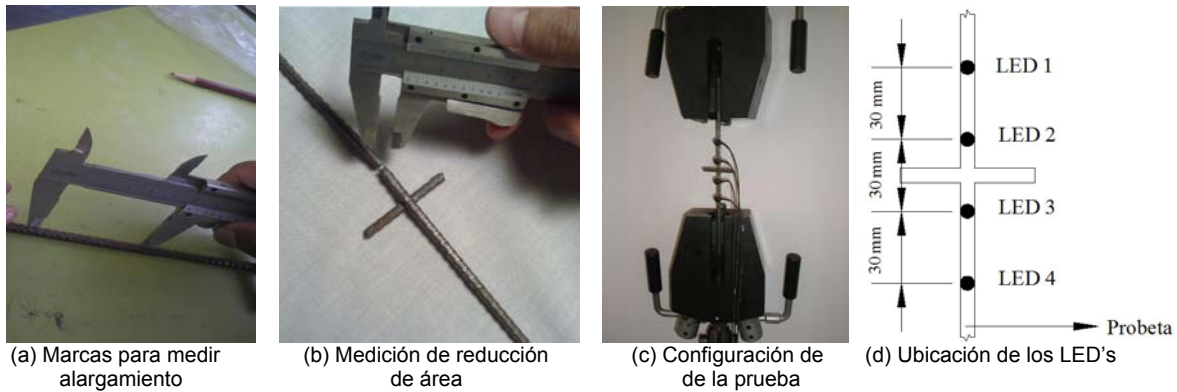


Figura 3 Prueba de tensión de una probeta (marca A, 6x6–8/8)

Los valores de esfuerzo (f_j) y deformación (ε_j), se calcularon utilizando las ecs. 1 y 2, respectivamente.

$$f_j = \frac{F_j}{A_n} \quad (1)$$

$$\varepsilon_j = \frac{|L_i - L_j|}{L_i} \quad (2)$$

donde F_j es la fuerza en el instante j , A_n es el área nominal, L_i es la longitud inicial y L_j es la longitud en el instante j . Los valores de alargamiento (Alr), se calcularon de acuerdo con la ec. 3.

$$Alr(\%) = \frac{x}{a} \quad (3)$$

donde a es la longitud calibrada, igual a 10 veces el diámetro de la probeta (figura 3(a)) y x es la longitud final de la longitud a . Las marcas de la longitud calibrada se realizaron empleando un punzón y procurando que las marcas quedaran sobre las corrugaciones. Los valores de x y a se midieron utilizando un calibrador Vernier con precisión de 0.05 mm. La reducción de área (Ra) se calculó a partir de la ec. 4.

$$Ra (\%) = \frac{D_f}{D_i} \times 100 \quad (4)$$

donde D_i es el diámetro inicial de la probeta, correspondiente al diámetro nominal del alambre que especifica la norma NMX-B-253 (2006). Al finalizar la prueba, se determinó el diámetro de la probeta fracturada (D_f) en la zona de falla, utilizando el promedio de tres mediciones y, de esta manera, aproximar el área reducida a un círculo. Luego, se obtuvo el cociente entre D_f y D_i . Para obtener estos valores se empleó el calibrador Vernier mencionado anteriormente (figura 3(b)).

EQUIPO EMPLEADO

Para la aplicación de la carga durante las pruebas de tensión, se utilizó una máquina servo hidráulica (universal) de tensión–compresión (figura 4(a)). La adquisición de datos se realizó utilizando un ordenador conectado a un equipo de adquisición de datos (figura 4(b)). En la tabla 5 se indican las características principales de los equipos utilizados. Para la sujeción de las probetas se emplearon mordazas tipo Templin, las cuales se ilustran en la figura 3(c). Después de realizar varias pruebas utilizando seis tipos de mordazas diferentes, se concluyó que las mordazas tipo Templin son las más adecuadas para ensayar los alambres de malla. En general, este tipo de mordazas consisten en un sistema mecánico de resortes que empujan las caras

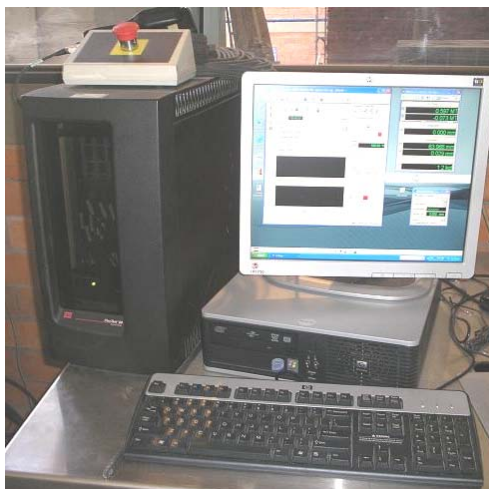
hacia la probeta durante la sujeción de los alambres. En las figuras 3(a) y 3(b) se ilustra el calibrador vernier que se utilizó para medir alargamiento y reducción de área. Este calibrador tiene una precisión de 0.05 mm y 200 mm de longitud.

Tabla 5. Características principales de los equipos

Equipo Característica	Dispositivo de carga	Adquisición de datos (Carga)	Adquisición de datos (LED's)	Cámara óptica
Marca	MTS	MTS	Metris	Metris
Modelo	810	Flextest 60	-----	Kripton K 600
Capacidad	250 kN	4 canales de datos	20 leds	1 μm de precisión
Velocidad	1 m/s	10 Hz – 500 Hz	10 Hz – 1,000 Hz	-----



(a) Máquina servo-hidráulica



(b) Adquisición de datos



(c) Cámara óptica

Figura 4 Equipo de utilizado para las pruebas a tensión

Para registrar los incrementos de desplazamiento entre los puntos de medición, se utilizó un sistema de medición óptico Metris K600. El sistema utiliza sensores óptico-eléctricos (LED, Light-Emitting Diode, por sus siglas en inglés, o diodo emisor de luz), que permiten obtener el registro de la posición tridimensional de un punto objetivo definido sobre la probeta. Los LED's fueron adheridos a las probetas utilizando adhesivo silicón convencional. Cada LED se conectó a un sistema de cámara (figura 4(c)). En general, el equipo mide los desplazamientos al captar la luz infraroja de los LED's. La cámara óptica tiene una precisión que depende principalmente de la cantidad de luz, la frecuencia de muestreo y el número de LED's utilizados.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

Para el análisis estadístico de los datos medidos se utilizaron cuatro parámetros comúnmente conocidos: el promedio (X), la desviación estándar (S), el coeficiente de variación (CV) y el percentil 2 ($P2$), los cuales se definen a partir de las ecs. 5 a 8, respectivamente.

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2} \quad (6)$$

$$CV(\%) = \frac{S}{X} \times 100\% \quad (7)$$



donde x_i es el valor iésimo de la muestra y n es el número de datos de la muestra. Los reglamentos de diseño especifican valores mínimos para verificar la calidad de los materiales; de forma similar lo hacen NTC-C (2004) y NTC-M (2004). En este estudio se reportan valores correspondientes al percentil 2 ($P2$) (ec. 8). Este valor pretende limitar a 2%, la probabilidad de que la propiedad mecánica estudiada sea menor que el valor especificado.

$$P2 = -2.05S + X \quad (8)$$

RESULTADOS OBTENIDOS

En la figura 5 se muestra una curva característica esfuerzo–deformación de los alambres estirados en frío. En esta gráfica, f_y es el esfuerzo de fluencia, ϵ_y es la deformación correspondiente al esfuerzo f_y , f_u es el esfuerzo resistente a la tensión y, ϵ_u es la deformación correspondiente al esfuerzo f_u .

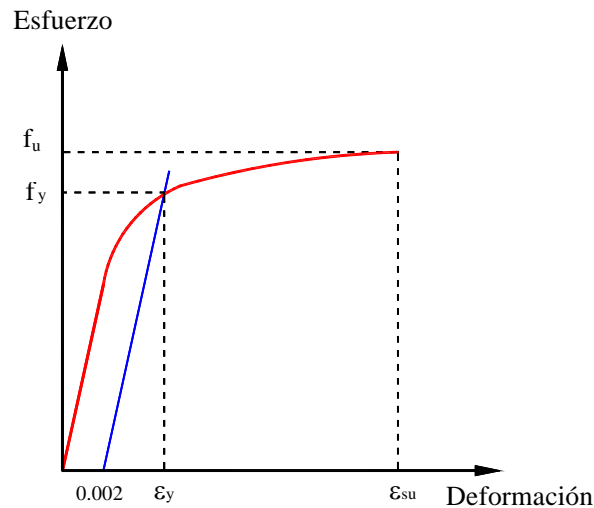


Figura 5 Caracterización de la de las curva esfuerzo - deformación

Los esfuerzos resistentes a tensión (f_u), se calcularon como la carga máxima registrada dividida por el área nominal del alambre (tabla 1). Para calcular los esfuerzos de fluencia (f_y), se empleó el método de deformación permanente (para deformación igual a 0.2%). A partir de las curvas esfuerzo–deformación de cada probeta, se pueden estimar las deformaciones asociadas a f_y y a f_u . Debido a que la deformación ϵ_u , la reducción de área y el alargamiento no son parámetros de diseño estructural, los valores presentados corresponden al promedio de la muestra. En las tablas 6 a 9 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tensión. Como se indica en las notas de dichas tablas, en algunas probetas no fue posible medir la reducción de área de forma adecuada, ya que las rupturas en la soldadura no permitieron registrar claramente las mediciones. En las tablas también se indica el promedio mínimo (X_{min}) exigido por las normas (tabla 4). La norma correspondiente indica que no se deben reportar mediciones de reducción de área, cuando la medición no se puede obtener adecuadamente. En la tabla 10 se muestran los resultados consolidados de las pruebas de tensión.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los resultados experimentales obtenidos hasta el momento, se indican las siguientes observaciones:

COMPORTAMIENTO OBSERVADO

De acuerdo con la norma NMX-B-253 (2006), el promedio de los valores de todas las probetas debe ser mayor o igual que los valores ilustrados en la tabla 3. Teniendo en cuenta dichos valores y los límites establecidos para cada probeta individual en la tabla 4, se hacen las siguientes observaciones:

- Respecto al alargamiento (medición del alargamiento fuera de la zona de falla de la probeta):
 - Para todas las probetas, los alargamientos medidos fueron menores que 4.8%
 - Los valores de alargamiento de cada probeta variaron entre el 13% y 80% del alargamiento mínimo indicado en las normas correspondientes
 - Aunque el valor mínimo especificado del alargamiento es igual al 6%, los valores promedio para los consolidados de las pruebas de tensión variaron entre 1.6% y 2.6%
 - Los coeficientes de variación para los consolidados de las pruebas de tensión fueron significativamente altos, es decir, varían entre 42.8% y 75.5%
- Para el caso de las pruebas de tensión que presentaron fallas en la soldadura:
 - De las 120 probetas ensayadas a tensión, se observaron 17 fallas en soldadura (14.2%), y de las 60 probetas de calibres 8 y 10 ensayadas a tensión, 14 fueron fallas en soldadura (23.3%). Para el caso de las mallas con alambres calibre 10 (el más delgado), se observaron 9 fallas en soldadura en un total de 30 probetas ensayadas (30%)
 - En la soldadura de las mallas 6×6–10/10 y 6×6–6/6 de la marca C, se presentaron seis rupturas; en la soldadura de las mallas 6×6–10/10 y 6×6–8/8 de la marca E se presentó un total de cuatro rupturas; en la soldadura de la malla más delgada de la marca I, se presentaron dos rupturas; en tres mallas de la marca G se presentaron rupturas en soldadura, de las cuales dos sucedieron en mallas 6×6–10/10 y una en la malla 6×6–8/8
 - En general, las fallas en la soldadura se presentaron en los calibres 10 y 8 (los más delgados) de las marcas E, I, G y A. Para la marca C, se presentaron en los calibres 10 y 6
- Los criterios estipulados de reducción de área no se cumplieron en los siguientes casos:
 - En lo referente a probetas individuales: una probeta de malla 6×6–10/10 marca E, una probeta de malla 6×6–8/8 marca I, una probeta de malla 6×6–8/8 marca G y una probeta de la malla 6×6–8/8 marca E. Estas probetas reportaron reducciones de área menores que el 24% especificado en la tabla 4
 - Los lotes de malla 6×6–8/8 de la marca G reportaron un promedio de reducción de área menor que el 30%; lo cual no es permitido
 - Los promedios para los consolidados de estos datos (tabla 10) variaron entre 37% y 45%. Adicionalmente, los coeficientes de variación fueron elevados, es decir, mayores que 18.5% y, en algunos casos, alcanzaron valores cercanos al 60%

Tabla 6 Resultados de las pruebas tensión para la malla tipo 6×6 – 4/4

Propiedad Mecánica	Marca	X	S	CV(%)	Consolidado
f_y (MPa) [$X_{\min} = 490$ MPa]	A	593	25	4.1	X = 599 MPa CV = 14.1 % P2 = 426 MPa
	C	516	12	2.3	
	E	541	7	1.4	
	I	738	45	6.1	
	G	592	50	8.5	
f_u (MPa) [$X_{\min} = 559$ MPa]	A	680	10	1.4	X = 667 MPa CV = 13.0 % P2 = 489 MPa
	C	561	9	1.5	
	E	636	8	1.2	
	I	811	15	1.8	
	G	628	49	7.9	
ϵ_u	A	0.0275	0.0024	8.7	X = 0.0297 CV = 40.52 %
	C	0.0335	0.0058	17.2	
	E	0.0457	0.0099	21.8	
	I	0.0182	0.0024	13.5	
	G	0.0245	0.0124	50.8	
R_a (%) [$X_{\min} = 30$]	A	46.5	3.03	6.5	X = 45.0 % CV = 18.5 %
	C	52.7	4.42	8.4	
	E	45.3	5.05	11.2	
	I	35.7	11.29	31.6	
	G	46.4	6.58	14.2	
Alr (%) [$X_{\min} = 6$]	A	1.8	1.15	62.9	X = 2.6 % CV = 42.8 %
	C	3.2	0.47	14.6	
	E	3.5	0.63	18.0	
	I	2.6	1.34	52.6	
	G	2.0	0.78	39.7	



Tabla 7 Resultados de las pruebas tensión para la malla tipo 6x6 – 6/6

Propiedad Mecánica	Marca	X	S	CV (%)	Consolidado
f_y (MPa) [$X_{\min} = 490$ MPa]	A	687	21	3.0	X = 608 MPa CV = 11.2 % P2 = 469 MPa
	C	532	20	3.8	
	E	552	12	2.2	
	I	589	16	2.7	
	G	682	22	3.2	
f_u (MPa) [$X_{\min} = 559$ MPa]	A	729	20	2.7	X = 659 MPa CV = 9.3 % P2 = 533 MPa
	C	580	30	5.3	
	E	616	13	2.2	
	I	652	9	1.4	
	G	720	16	2.2	
ϵ_u	A	0.0229	0.0020	8.8	X = 0.0196 CV = 22.1 %
	C	0.0165	0.0040	24.4	
	E	0.0203	0.0023	11.5	
	I	0.0211	0.0045	21.2	
	G	0.0171	0.0053	31.0	
R_a (%) [$X_{\min} = 30$]	A	46.7	7.21	15.2	X = 45.5 % CV = 59.9 %
	C	39.8	8.56	21.5	
	E	42.8	5.37	12.6	
	I	56.4	3.43	6.1	
	G	41.9	8.33	19.9	
Alr (%) [$X_{\min} = 6$]	A	1.8	0.71	40.8	X = 1.9 % CV = 59.9 %
	C	2.4	1.33	56.3	
	E	2.3	1.35	57.7	
	I	1.6	0.86	53.6	
	G	1.5	1.37	93.2	

Tabla 8 Resultados de las pruebas tensión para la malla tipo 6x6 – 8/8

Propiedad Mecánica	Marca	X	S	CV (%)	Consolidado
f_y (MPa) [$X_{\min} = 490$ MPa]	A	712	7	1.0	X = 636 MPa CV = 15.1 % P2 = 439 MPa
	C	504	12	2.5	
	E	547	82	15.0	
	I	690	70	10.1	
	G	720	29	4.0	
f_u (MPa) [$X_{\min} = 559$ MPa]	A	771	5	0.7	X = 692 MPa CV = 14.9 % P2 = 481 MPa
	C	543	10	1.8	
	E	614	37	6.1	
	I	759	39	5.1	
	G	786	20	2.6	
ϵ_u	A	0.0256	0.0025	9.8	X = 0.0199 CV = 38.8 %
	C	0.0269	0.0063	21.3	
	E	0.0134	0.0040	30.0	
	I	0.0131	0.0041	40.0	
	G	0.0188	0.0023	12.3	
R_a (%) [$X_{\min} = 30$]	A	44.3	2.84	6.4	X = 37.0 % CV = 37.9 %
	C	54.7	3.58	6.6	
	E	34.7 ⁽¹⁾	8.32	24.0	
	I	30.0	10.06	33.7	
	G	28.2	7.80	27.6	
Alr (%) [$X_{\min} = 6$]	A	1.7	1.31	76.6	X = 1.73 % CV = 65.3 %
	C	2.6	0.75	28.7	
	E	2.7	1.09	40.7	
	I	1.2	0.60	49.7	
	G	0.9	0.48	55.4	

Nota: ⁽¹⁾ En una de las probetas no fue posible medir R_a

Tabla 9 Resultados de las pruebas tensión para la malla tipo 6x6 – 10/10

Propiedad Mecánica	Marca	X	S	CV (%)	Consolidado
f_y (MPa) [$X_{\min} = 490$ MPa]	A	586	55	9.3	X = 603 MPa CV = 11.0 % P2 = 467 MPa
	C	566	22	3.8	
	E	533	47	8.9	
	I	647	38	5.9	
	G	682	30	4.4	
f_u (MPa) [$X_{\min} = 559$ MPa]	A	652	35	5.3	X = 652 MPa CV = 10.9 % P2 = 507 MPa
	C	602	37	6.2	
	E	573	48	8.3	
	I	687	27	4.0	
	G	747	23	3.1	
ϵ_u	A	0.0173	0.0069	39.7	X = 0.0173 CV = 32.3 %
	C	0.0181	0.0063	34.7	
	E	0.0161	0.0053	33.0	
	I	0.0146	0.0056	38.7	
	G	0.0205	0.0034	16.6	
Ra (%) [$X_{\min} = 30$]	A	46.2	4.01	8.7	X = 42.5 % CV = 33.7 %
	C	50.9	5.77	11.3	
	E	34.1	6.55	19.2	
	I	52.8 ⁽¹⁾	10.81	20.5	
	G	46.6	4.53	9.8	
Alr (%) [$X_{\min} = 6$]	A	2.3	0.43	18.7	X = 1.6 % CV = 75.5 %
	C	2.5	2.13	85.9	
	E	0.8	0.37	46.8	
	I	1.2	0.82	65.9	
	G	1.2	0.53	44.6	

Nota: ⁽¹⁾ En dos probetas no fue posible medir Ra .

Tabla 10 Consolidados de las pruebas de tensión

Propiedad Mecánica	6 x 6 – 4 / 4	6 x 6 – 6 / 6	6 x 6 – 8 / 8	6 x 6 – 10 / 10
f_y (MPa) [$X_{\min} = 490$ MPa]	X = 599 MPa CV = 14.1 % P2 = 426 MPa	X = 608 MPa CV = 11.2 % P2 = 469 MPa	X = 636 MPa CV = 15.1 % P2 = 439 MPa	X = 603 MPa CV = 11.0 % P2 = 467 MPa
f_u (MPa) [$X_{\min} = 559$ MPa]	X = 667 MPa CV = 13.0 % P2 = 489 MPa	X = 659 MPa CV = 9.3 % P2 = 533 MPa	X = 692 MPa CV = 14.9 % P2 = 481 MPa	X = 652 MPa CV = 10.9 % P2 = 507 MPa
ϵ_u	X = 0.0297 CV = 40.5 %	X = 0.0196 CV = 22.1 %	X = 0.0199 CV = 38.8 %	X = 0.0173 CV = 32.3 %
Ra (%) [$X_{\min} = 30$]	X = 45.0 % CV = 18.5 %	X = 45.5 % CV = 59.9 %	X = 37.0 % CV = 37.9 %	X = 42.5 % CV = 33.7 %
Alr (%) [$X_{\min} = 6$]	X = 2.6 % CV = 42.8 %	X = 1.9 % CV = 59.9 %	X = 1.7 % CV = 65.3 %	X = 1.6 % CV = 75.5 %

- Respecto al esfuerzo último y al esfuerzo de fluencia:
 - De manera individual, todas probetas cumplieron con los valores de f_y y f_u especificados en la tabla 4
 - A excepción de los lotes de malla 6x6-8/8 de la marca C, todos los lotes cumplen con el criterio de f_y estipulado en la norma mexicana correspondiente. Los lotes que no cumplen, reportaron un promedio de esfuerzo último menor que 559 MPa
 - Al analizar los resultados por lotes, todos cumplieron con el criterio de f_u especificado por las normas correspondientes
 - Los promedios para los consolidados de los datos (tabla 10), variaron entre 599 MPa y 636 MPa para el caso de f_y , y, entre 652 MPa y 692 MPa para el caso de f_u
 - Los coeficientes de variación para los consolidados de los datos (tabla 10), se mantuvieron entre 9.3% y 15.1%, lo cual se considera aceptable.



IMPLICACIONES EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL

- De acuerdo con Meli (2008), los reglamentos de construcción a nivel mundial pretenden “limitar a valores entre 0.01 y 0.02, la probabilidad de que el esfuerzo de fluencia de un elemento de refuerzo estructural sea menor que el especificado”. A estos valores se les conoce como esfuerzos nominales del material de acuerdo con su grado y calidad. En la tabla 11 se comparan los valores obtenidos del Percentil 2 ($P2$) que se indica en la tabla 10, con el esfuerzo de fluencia mínimo especificado en NTC-C (2004), el cual es igual a 490 MPa. El esfuerzo último $P2$ también se compara con el esfuerzo último estipulado en NTC-C (2004), el cual es igual a 559 MPa. En la tabla 11 se observa que los esfuerzos asociados al $P2$, siempre fueron menores que los esfuerzos nominales (490 MPa y 559 MPa); es decir, aproximadamente 10% menores que los nominales (ver resultados de fórmulas $1-(f_y P2 / 490)$ y $1-(f_u P2 / 559)$)

Tabla 11 Comparación de esfuerzos mínimos especificados con esfuerzos obtenidos del P2

Malla	6 × 6 – 4 / 4	6 × 6 – 6 / 6	6 × 6 – 8 / 8	6 × 6 – 10 / 10
$f_y P2$ (MPa)	426	469	439	467
$f_u P2$ (MPa)	489	533	481	507
$1-(f_y P2 / 490)$	13.1 %	4.3 %	10.4 %	4.7 %
$1-(f_u P2 / 559)$	12.5 %	4.7 %	14.0 %	9.3 %

- De acuerdo con el Eurocódigo (EC2, 2004), en la tabla 12 se presentan los valores mínimos del Percentil 10 ($P10$), para los parámetros k (f_u/f_y) y ϵ_u . Para estructuras de concreto reforzado sometidas a acciones sísmicas, en este reglamento se recomienda utilizar aceros tipo B ó C, de acuerdo con la amenaza sísmica. Para resultados obtenidos experimentalmente, el Percentil 10 ($P10$) se puede calcular por medio de la ec. 9. En la tabla 13 se muestran los valores obtenidos con la ec. 9 para los parámetros k y ϵ_u , asociados a las mallas aquí estudiadas. De acuerdo con la información reportada en las tablas 12 y 13, las mallas aquí estudiadas no cumplen con los requisitos establecidos por el Eurocódigo.

$$P10 = -1.28S + X \quad (9)$$

Tabla 12 Percentil 10 de los valores mínimos para k y ϵ_u de mallas de refuerzo según el Eurocódigo 2

Tipo de Acero	$k = f_u / f_y$	ϵ_u (%)
A	≥ 1.05	≥ 2.5
B	≥ 1.08	≥ 5.00
C	≥ 1.15 < 1.35	≥ 7.50

Tabla 13 Valores obtenidos de k y ϵ_u

Parámetro	Malla	X	S	P10
$k = f_u / f_y$	6×6 – 4/4	1.12	0.05	1.05
	6×6 – 6/6	1.09	0.03	1.04
	6×6 – 8/8	1.09	0.07	1.00
	6×6 – 10/10	1.08	0.06	1.01
ϵ_u (%)	6×6 – 4/4	2.97	1.20	1.43
	6×6 – 6/6	1.96	0.43	1.41
	6×6 – 8/8	1.99	0.77	1.00
	6×6 – 10/10	1.73	0.56	1.01

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REQUISITOS ESTABLECIDOS EN LAS NORMAS

Los alambres de mayor diámetro cumplen la mayoría de los requisitos de reducción de área, resistencia y falla en la soldadura, especificados en las normas mexicanas correspondientes. Sin embargo, el tipo de malla 6×6–10/10 utiliza los alambres más delgados y es el que presenta mayor número de contravenciones. De acuerdo con información proveniente de comerciantes del producto, este tipo de malla (6×6–10/10) representa

aproximadamente el 60% de las ventas de malla de alambre soldado en ferreterías. Teniendo en cuenta el grado de su utilización y el número de “incumplimientos” observados en las mallas delgadas, es necesario verificar exhaustivamente el cumplimiento de la norma y, de esta manera, tomar las medidas de ajuste necesarias en el proceso de su elaboración. En lo referente a los requisitos a tensión se concluye lo siguiente:

- Los parámetros de resistencia f_y y f_u mostraron los siguientes porcentajes de cumplimiento:
 - 100% en los valores individuales de f_y y f_u señalados en la tabla 4
 - 95% en los valores promedio de f_u (los lotes de la malla 6×6 – 8/8 de la marca C no cumplieron)
 - 100% en los valores promedio de f_y en todas las mallas de las marcas A, C, E, G e I
 - Las marcas A, E, I y G cumplieron completamente con estos parámetros
- Con relación al parámetro de reducción de área, los porcentajes de cumplimiento fueron:
 - 96.6% de cumplimiento de las probetas individuales de las mallas 6×6 – 10/10 (no cumplió una probeta de la marca E)
 - 90% para las probetas individuales de las mallas 6×6–8/8 (no cumplieron: una probeta de la marca E, una probeta de la marca I y una probeta de la marca G)
 - 100% para las probetas individuales de las mallas 6×6–6/6 y 6×6–4/4
 - 95% en los valores promedio de reducción de área (los lotes de malla 6×6–8/8 de la marca G no cumplieron)
 - Las marcas A y C cumplieron totalmente este parámetro
- Para el caso del parámetro de alargamiento medido fuera de la zona de falla de la probeta (tal como se lleva a cabo en varios estudios reportados en la literatura), en ninguna marca y en ningún calibre se observaron valores superiores al 4%. Sin embargo, es necesario que el procedimiento se lleve a cabo siguiendo los lineamientos de la norma ASTM-A-370; es decir, midiendo el alargamiento en la zona de falla de la probeta.

PROPIEDADES MECÁNICAS A TENSIÓN

1. Los percentiles 2 (P_2) correspondientes a f_y y f_u en las mallas, son menores que los valores considerados por las NTC-C (2004), aproximadamente entre 5% y 14% menores (tabla 11). La menor resistencia se observó en las mallas de calibres 8 y 4
2. Los valores de los parámetros de ductilidad medidos en esta investigación, no cumplieron con los valores estipulados en el EC2 (2004), asociados a aceros de refuerzo tipos A, B ó C
3. Respecto a la deformación última, ϵ_u , se observó que su valor tiende a disminuir a medida que se reduce el diámetro de los alambres.

CONTENIDO DE LAS NORMAS

1. Se observaron casos en donde las probetas reportaron límites de fluencia 63% mayores que el valor mínimo especificado de 490 MPa (se midieron valores cercanos a 800 MPa). Por lo tanto, se recomienda especificar límites superiores a las propiedades de resistencia. Un aumento pronunciado en la resistencia puede estar relacionado con la disminución de la ductilidad del material y, por lo tanto, aumentar su fragilidad (Bachmann, 2000)
2. Las normas mexicanas deben especificar tanto la cantidad mínima de mediciones de diámetros que se deben incluir para calcular la reducción de área, así como un procedimiento claro para su medición. En esta investigación se consideraron tres medidas del diámetro final en la ruptura
3. De acuerdo con Dove (1983), la prueba de doblado y la prueba de reducción de área son los procedimientos adecuados para evaluar la ductilidad. La norma ASTM-A-82 (2001) utiliza únicamente el parámetro de la reducción de área y la prueba de doblado (excluye al alargamiento).



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del personal del Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM, durante la realización de ensayos, en especial al técnico Raymundo Mondragón Colín y al Ing. Eddy Grandry Carrien. El contenido de este artículo representa exclusivamente la opinión de los autores.

REFERENCIAS

ASTM-A-370 (2009), **“Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”**, American Society of Testing Materials, Estados Unidos de América, Diciembre 2009, p. 37.

Bachmann H. (2000), **“Problems relevant to poor ductility properties of European reinforcing steel”** Memorias de la XII Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Nueva Zelanda, pp. 1- 2.

Carrillo J. (2010), **“Evaluación del comportamiento al cortante de muros de concreto para vivienda por medio de ensayos dinámicos”**, Tesis de Doctorado (En proceso), Universidad Nacional Autónoma de México, Noviembre 2010.

Dove, A.B. (1983), **“Some observations on the physical properties of wire for plain and deformed welded wire fabric”**, ACI Journal, Estados Unidos de América, Septiembre - Octubre 1983, pp. 424-429.

Eurocódigo 2 – EC2 (2004), **“Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1)”**, Comité Europeo de Normalización, CEN, Bélgica, Diciembre 2004, p. 205

Flores, L. (2003), **“Evaluación experimental de marcos con muro diafragma de bloque reforzados con recubrimiento de concreto”**, Tesis Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Diciembre 2003, pp. 106-107.

Marcelino, J. (2004), **“Comportamiento ante cargas laterales de muros de tabicón de concreto rehabilitados con malla de alambre soldado y recubrimiento de mortero”**, Tesis Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Diciembre 2004, pp. 95-96.

Meli, R. (2008), **“Diseño estructural”**, Editorial Limusa – Noriega, 2ª ed., México, Diciembre 2008, p. 90.

NMX-B-172 (1988), **“Métodos de prueba mecánicos para productos de acero”**, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial – Dirección General de Normas, México, Junio 1988, pp. 11 – 16.

NMX-B-253 (2006), **“Alambre de acero liso o corrugado para refuerzo de concreto – especificaciones y métodos de prueba.”**, Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero, México, Marzo 2007, 8 pp.

NMX-B-290 (2006), **“Malla electrosoldada de acero liso o corrugado, para refuerzo de concreto – especificaciones y métodos de prueba”**, Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero, México, Marzo 2007, 10 pp.

NTC-C (2004), **“Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto”**, Reglamento de Construcciones Distrito Federal, México, Octubre 2004, p. 13 y 32.

NTC-M (2004), **“Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería”**, Reglamento de Construcciones Distrito Federal, México, Octubre 2004, pp. 104 - 105.

Rodríguez, M. y Botero, J.C. (1996), **“Aspectos del comportamiento sísmico de estructuras de concreto reforzado considerando las propiedades mecánicas de aceros de refuerzo producidos en México”**, Series del Instituto de Ingeniería No. 575, UNAM, México, Enero 1996, pp.3-4.