



Serie
INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO

Publicación arbitrada

ISBN 970-32-0196-2



Las *Series del Instituto de Ingeniería* describen los resultados de algunas de las investigaciones más relevantes de esta institución. Con frecuencia son trabajos *in extenso* de artículos que se publican en revistas especializadas, memorias de congresos, etc.

Cada número de estas *Series* se edita con la aprobación técnica del Comité Editorial del Instituto, basada en la evaluación de árbitros competentes en el tema, adscritos a instituciones del país y/o el extranjero.

Actualmente hay tres diferentes *Series del Instituto de Ingeniería*:

Serie Investigación y Desarrollo

Incluye trabajos originales sobre investigación y/o desarrollo tecnológico. Es continuación de la Serie Azul u Ordinaria, publicada por el Instituto de Ingeniería desde 1956, la cual actualmente tiene nueva presentación y admite textos en español e inglés.

Serie Docencia

Está dedicada a temas especializados de cursos universitarios para facilitar a estudiantes y profesores una mejor comprensión de ciertos temas importantes de los programas de estudio.

Serie Manuales

Abarca manuales útiles para resolver problemas asociados con la práctica profesional o textos que describen y explican el estado del arte o el estado de la práctica en ciertos temas. Incluye normas, manuales de diseño y de laboratorio, reglamentos, comentarios a normas y bases de datos.

Las *Series del Instituto de Ingeniería* pueden consultarse gratuitamente desde la dirección electrónica del Instituto (II UNAM), <http://www.ii.unam.mx> (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarnpublicacion.aspx>) y pueden grabarse o imprimirse en formato PDF desde cualquier computadora.

Propiedades mecánicas de la malla de alambre soldado disponible en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

SID/669

Propiedades mecánicas de la malla de alambre soldado disponible en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

ISBN 978-607-02-2178-1

Alejandro Rico
Julián Carrillo
Sergio M Alcocer

SID/669
MAYO 2011

Edición final y corrección idiomática
Olivia Gómez Mora

Cotejo
Gabriel Sánchez Domínguez

Impresión
Unidad de Promoción y Comunicación

INSTITUTO DE INGENIERÍA
Unidad de Promoción y Comunicación
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria
Coyoacán, 04510, México, DF

D.R.© UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2011
Instituto de Ingeniería, Ciudad universitaria, CP 04510, México, DF
1ra ed, 30 de mayo, 2011
ISBN 978-607-02-2178-1

Propiedades mecánicas de la malla de alambre soldado disponible en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Alejandro Rico*
Julián Carrillo**
Sergio M Alcocer***

* Exbecario, Instituto de Ingeniería, UNAM; coordinador de desarrollo, ICA, México

** Asistente de investigación, Instituto de Ingeniería, UNAM; profesor asistente,
Universidad Militar de Nueva Granada, Colombia

*** Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM

RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
NOTACIÓN	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. FABRICACIÓN DE LAS MALLAS DE ALAMBRE SOLDADO	7
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	11
4.1 Selección de los productores de malla	12
4.2 Definición de los tipos de pruebas y requisitos mínimos especificados	13
4.3 Muestreo, dimensiones y características de las probetas	14
4.4 Descripción de las pruebas	15
4.4.1 Prueba de tensión	15
4.4.2 Prueba de cortante de soldadura	18
4.4.3 Prueba de doblado	18
4.5 Equipo empleado	18
4.6 Procesamiento de la información obtenida	20
5. RESULTADOS OBTENIDOS	23
5.1 Pruebas de tensión	23
5.2 Pruebas de cortante de soldadura	29
5.3 Pruebas de doblado	30
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
6.1 Comportamiento observado	31
6.2 Implicaciones en el diseño estructural	35
6.3 Método y procedimiento de ensaye	38
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
7.1 Requisitos establecidos en las normas correspondientes	43
7.2 Tipos de falla	45
7.3 Propiedades mecánicas a tensión que fueron medidas	45
7.4 Contenido de las normas referentes a las pruebas mecánicas	46
7.5 Recomendaciones para futuros estudios	48
8. RECONOCIMIENTOS	51
9. REFERENCIAS	53

RESUMEN

En estudios experimentales previos donde se ha investigado el comportamiento sísmico de elementos de concreto reforzado con malla de alambre soldado, se ha reportado que las mallas utilizadas no cumplen con los requisitos mecánicos que estipulan las normas mexicanas correspondientes. Por tanto, se desarrolló un programa de investigación para estudiar las propiedades mecánicas de las mallas de alambre soldado disponibles en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Las probetas provienen de los cuatro tipos de mallas más empleadas en la construcción de estructuras de concreto en México. Las mallas fueron fabricadas por las cinco empresas más representativas en la zona. Para cada fábrica, las probetas ensayadas se obtuvieron de tres lotes de producción. A partir del análisis estadístico de las propiedades medidas, se presentan y discuten los parámetros experimentales de esfuerzo y deformación a la fluencia, resistencia y deformación última a la tensión, alargamiento, reducción de área, resistencia al cortante de soldadura y prueba de doblado. Se estudia la interacción entre el porcentaje de fallas ocurridas en la soldadura durante la prueba a tensión y la fuerza cortante resistente de la soldadura. Adicionalmente, se proponen curvas esfuerzo-deformación de las mallas de alambre soldado. Por último, se hacen recomendaciones para mejorar los métodos de ensaye y se proponen parámetros apropiados para caracterizar la ductilidad de las mallas.

ABSTRACT

Previous experimental studies where seismic behavior of concrete elements reinforced using welded wire meshes has been investigated, reveal that meshes do not full fit the mechanical properties specified in Mexican material standards. Therefore, aimed at studying the mechanical properties of welded wire mesh available in the Metropolitan Area of Mexico City, an experimental research program was developed. The samples were obtained from the four most used meshes types in the construction of concrete structures in Mexico. The meshes come from the five more representative manufacturers in the zone. For every manufacturer, samples were obtained from three different lots. Based on the statistical analysis of the measured mechanical properties, the following experimental parameters are reported and discussed: yield stress and yield deformation, ultimate strength and ultimate deformation, elongation, reduction of area, shear strength of welding and bending test. The interaction between the number of ruptures in the welding zone during tensile tests, and the shear force resisted by the welding is studied. Stress-strain curves of welded wire meshes are also proposed. Finally, recommendations aimed at improving the standard test methods are pointed out, and suitable parameters for characterizing the ductility of the meshes are proposed.

NOTACIÓN

a	longitud calibrada, igual a diez veces el diámetro de la probeta
Alr	alargamiento
A_n	área nominal del alambre
CV	coeficiente de variación
d_f	diámetro final del alambre (después del estiramiento)
D_f	diámetro de la probeta fracturada en la zona de falla
d_i	diámetro inicial del alambre
D_i	diámetro inicial de la probeta
ε	deformación en mm/mm
ε_j	deformación en el momento j
E_s	módulo elástico del material, igual a 206010 MPa
ε_u	deformación correspondiente al esfuerzo f_u
ε_y	deformación correspondiente al esfuerzo f_y
f	esfuerzo en MPa
F	fuerza de tensión aplicada al alambre
f_j	esfuerzo en el momento j
F_j	fuerza en el instante j
f_u	esfuerzo resistente a la tensión
f_y	esfuerzo convencional de fluencia
k	parámetro de ductilidad igual a f_u/f_y
L_f	longitud final de la longitud calibrada al inicio de la prueba
L_i	longitud calibrada al inicio de la prueba
L_j	longitud en el instante i
n	número de datos de la muestra
$P2$	percentil 2 de los valores de la muestra
$P10$	percentil 10 de los valores de la muestra
Ra	reducción de área
S	desviación estándar
x	longitud final de la longitud a
$\bar{X}$	promedio
x_i	valor i -ésimo de la muestra
$X_{\min}$	promedio mínimo estipulado en las normas correspondientes

1. INTRODUCCIÓN

La malla de alambre soldado estirado en frío es un material que brinda importantes 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, pavimentos, entre otros. Varios estudios experimentales se han desarrollado para conocer 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 mínimas estipuladas en las normas correspondientes. Para verificar el cumplimiento de las especificaciones estipuladas por las normas mexicanas vigentes, se llevó a cabo una investigación experimental tendiente a caracterizar las propiedades mecánicas 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 mecánico de los tipos de malla más empleados en la construcción de estructuras de concreto en México.

En el programa experimental se incluyeron pruebas de tensión, fuerza cortante de soldadura y doblado. Para obtener las probetas de ensaye, 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 ensaye se realizaron siguiendo los lineamientos de las normas mexicanas correspondientes. Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En general, en el artículo se presentan resultados de resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión, alargamiento, reducción de área, deformación última a la tensión, cortante resistente de soldadura y resultados de la prueba de doblado.

Este estudio permitió verificar, para cada marca y tipo de malla, el cumplimiento de los lineamientos especificados en las normas mecánicas correspondientes, así como los resultados que algunas investigaciones han publicado para el parámetro del alargamiento. Se describe el comportamiento observado durante las pruebas y se proponen curvas esfuerzo-deformación del material para ser empleadas durante el proceso de diseño. Asimismo, se analizaron los métodos de prueba de algunos laboratorios donde se llevan a cabo este tipo de ensayos. Por último, se proporcionan recomendaciones acerca de los métodos de prueba, en especial sobre los destinados a caracterizar la capacidad de ductilidad del material.

2. ANTECEDENTES

En estudios experimentales previos (Flores, 2003, y Carrillo, 2010), se ha indicado que los elementos de concreto reforzados que utilizan 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 utilizadas en esos estudios podrían no ser adecuadas para su utilización en el refuerzo de elementos sometidos a acciones sísmicas que generan demandas de desplazamiento importantes.

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 con malla de alambre soldado exhibieron capacidad de deformación limitada. El análisis de los resultados indicó que la capacidad de deformación de los muros estuvo relacionada con el comportamiento frágil del acero de refuerzo empleado. Durante la caracterización del material se vio que los parámetros de ductilidad característicos del material, tales como el porcentaje de alargamiento y la deformación última, no fueron los esperados. En la fig 2.1 se muestran las curvas esfuerzo-deformación promedio a tensión de alambres de malla $6 \times 6-8/8$ y de barras corrugadas de 9.5 mm de diámetro, reportadas por Carrillo (2010). Como se observa en la fig 2.1, las capacidades de resistencia y de deformación de los alambres de malla y de las barras de acero corrugadas difieren significativamente.

En otros programas experimentales en México, también se han caracterizado especímenes de malla de alambre soldado de diferentes diámetros. Por ejemplo, Flores

(2003) reporta un valor promedio de alargamiento de 1.5% para los alambres de malla $6 \times 6 - 4/4$, los cuales se utilizaron como refuerzo de muros diafragma de bloque de mampostería. Adicionalmente, en el estudio de Marcelino (2004) se indica un alargamiento promedio de 1.03% para los alambres de malla $6 \times 6 - 6/6$. Los valores de alargamiento reportados son notoriamente menores del 6% especificado en la norma NMX-B-253 (2006). En estudios experimentales llevados a cabo en Suramérica, también se han detectado alargamientos menores de 6%. Por ejemplo, en Perú, Bartolomé *et al* (2008) reportan un valor promedio de elongación de 2.2% para las mallas de alambre soldado Q128 (alambres de 7 mm de diámetro y 300 mm de separación) y Q257 (alambre de 7 mm de diámetro y 150 mm de separación).

De igual forma, otros estudios a nivel mundial han señalado la capacidad limitada de ductilidad de elementos de concreto reforzado utilizando mallas de alambre soldado. Por ejemplo, en Canadá, Ali-Mirza y MacGregor (1981) estudiaron el comportamiento de losas de concreto reforzado y observaron que los elementos reforzados con mallas no desarrollaron la misma ductilidad que las losas reforzadas con barras convencionales. En el estudio de Riva y Franchi (2001) se indica que los alambres estirados en frío no desarrollan la ductilidad necesaria para aplicaciones de diseño sísmico en muros de concreto, a diferencia de los alambres trefilados en caliente, donde se observó un comportamiento dúctil adecuado.

Contrario al comportamiento de barras corrugadas convencionales, las pruebas de tensión realizadas directamente en las mallas de alambre soldado revelan límites de fluencia no bien definidos. En Europa, Bachmann (2000) observó un comportamiento similar para barras de refuerzo convencional con diámetros menores de 16 mm. Es importante señalar que en Europa, este tipo de barras se obtienen a partir de estirar en frío o en caliente, las barras de mayor diámetro. Este mismo procedimiento se lleva a cabo para los alambres de la malla de alambre soldado, los cuales se derivan del estiramiento en frío del alambrón (cuyo diámetro es mayor que el de los alambres para malla).

Respecto a la evaluación del alargamiento como prueba de ductilidad, Dove (1983) indica que las pruebas de doblado y de reducción de área son los procedimientos adecuados para evaluar la ductilidad. Dove (1983) afirma que el alargamiento en los alambres estirados en frío no es un parámetro adecuado para evaluar la ductilidad de los mismos, debido principalmente a que éstos provienen de acero bajo al carbón estirado en frío.

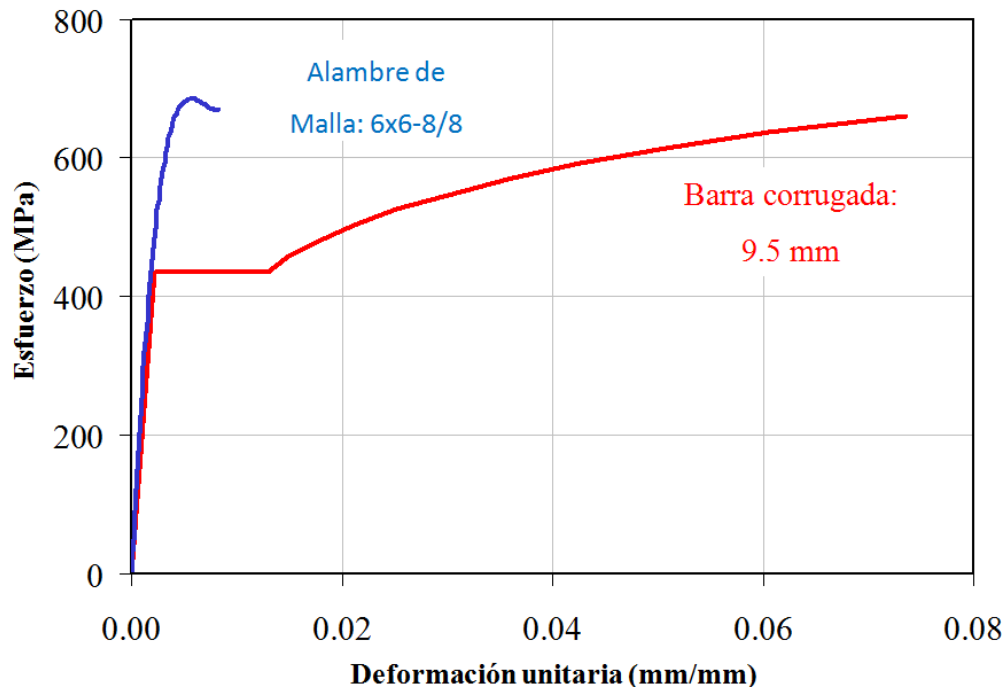


Fig 2.1 Curvas esfuerzo-deformación del acero de refuerzo utilizado por Carrillo (2010)

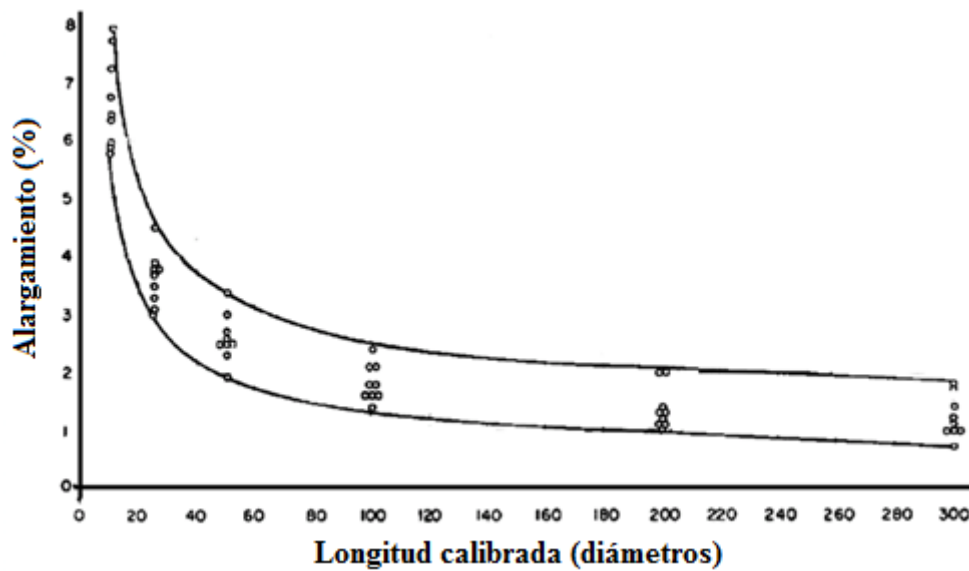


Fig 2.2 Variación del alargamiento en términos de longitud libre entre mordazas (Dove, 1983)

En la fig 2.2 se muestran curvas donde el alargamiento varía en función de la longitud libre entre mordazas (también referida por Dove como longitud calibrada).

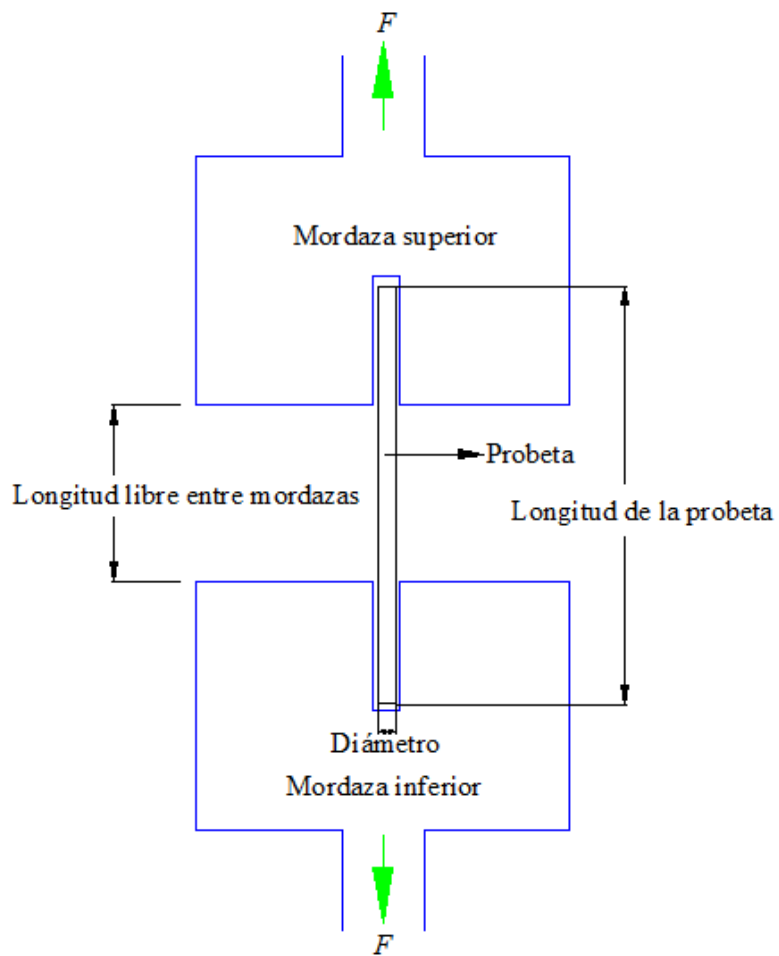


Fig 2.3 Ilustración de la longitud libre entre mordazas

La fig 2.3 ilustra el concepto de longitud libre entre mordazas.

Por otro lado, la norma ASTM-A-82 (2001) utiliza únicamente los parámetros de reducción de área y prueba de doblado (se excluye al alargamiento) para evaluar la capacidad de deformación de los alambres. En las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente (NSR-98, 1998), la caracterización de la malla de alambre soldado se debe hacer de acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM-A-82. Esto indica que en algunos países latinoamericanos, como en Colombia, también se excluye al parámetro del alargamiento de la caracterización de las mallas de alambre soldado.

3. FABRICACIÓN DE LAS MALLAS DE ALAMBRE SOLDADO

Los alambres de las mallas son un derivado del alambrón colado. El alambrón se estira en frío hasta alcanzar el diámetro deseado del alambre. El proceso mecánico se puede explicar a partir de la fig 3.1.

En la figura, L_i representa la longitud calibrada al inicio de la prueba, d_i es el diámetro inicial del alambrón. Luego de aplicar una fuerza F , el alambrón se reduce a un diámetro d_f y, la longitud calibrada se aumenta hasta L_f . Durante la aplicación de la fuerza F , un sistema de poleas y dados mecánicos aplican fuerzas de compresión al alambre para garantizar su reducción de diámetro (figs 3.2a y b). Este proceso genera un corrimiento en la curva esfuerzo-deformación del material original (fig 3.1b).

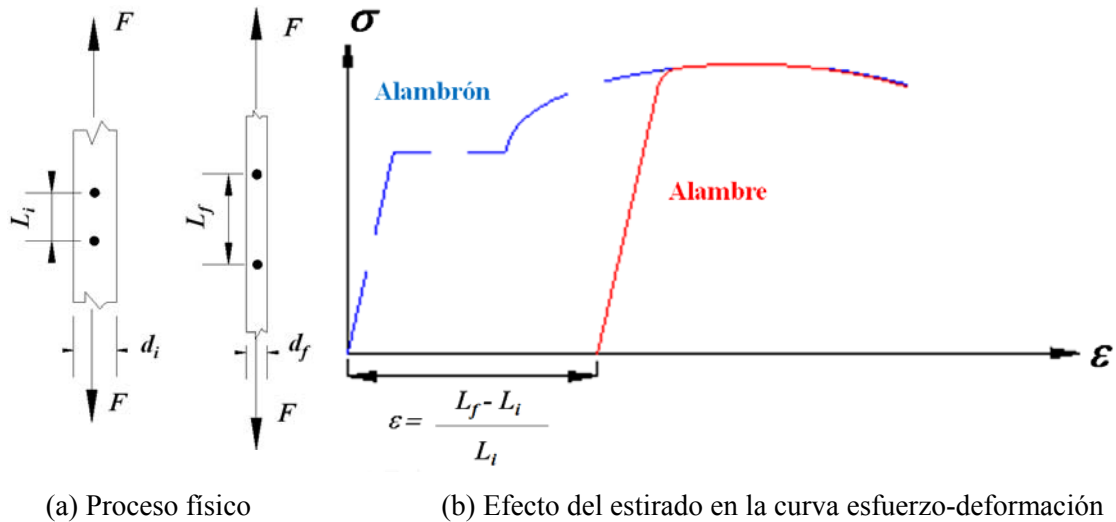


Fig 3.1 Proceso de estirado de los alambres



(a) Máquina para estirado de alambres



(b) Poleas y dados para corrugaciones



(c) Máquina de cortado y soldado de alambres



(d) Enrollado de mallas

Fig 3.2 Fotografías del proceso de fabricación de mallas de alambre soldado

Tal como lo señala Bachmann (2000) y como se observa en la fig 3.1b, al estirar el material se aumenta el esfuerzo convencional de fluencia del acero (f_y), pero al mismo tiempo, se reduce la capacidad de deformación del material.

Para crear las corrugaciones en los alambres, los moldes de corrugación aprovechan la temperatura que se genera por el reacomodamiento de los cristales del acero durante el estiramiento del material. Sin embargo, también se producen alambres lisos (sin corrugaciones). Luego, se procede a cortar los alambres transversales para que otra máquina se encargue de soldar dichos alambres a los alambres longitudinales (fig 3.2c). Finalmente, es común que el producto se enrolle y sea preparado para su comercialización (fig 3.2d).

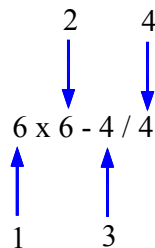
De acuerdo con las necesidades de cada proyecto, frecuentemente las constructoras requieren cortes específicos de malla de alambre soldado a la medida de los proyectos. En esta situación, se puede solicitar a una fábrica que la malla se corte a la medida. La utilización de mallas de alambre soldado a la medida facilita la construcción de estructuras en forma industrial.

Existen empresas que en poco más de tres meses logran terminar la construcción de los elementos estructurales de conjuntos habitacionales completos, empleando técnicas de prefabricación y optimación industrial.

El uso de este material se encuentra reglamentado en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-C, 2004) y de Mampostería (NTC-M, 2004). Para propósitos de diseño, dichas normas permiten utilizar un límite de fluencia de los alambres (f_y) de 490 MPa.

4. 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 en México, es decir, los tipos $6 \times 6 - 4/4$, $6 \times 6 - 6/6$, $6 \times 6 - 8/8$ y $6 \times 6 - 10/10$. En la tabla 4.1 se indican los diámetros nominales y áreas transversales de los alambres estudiados y a continuación se describe su nomenclatura:



donde el dígito 1 representa la separación de alambres longitudinales en pulgadas, el 2 simboliza la separación de alambres transversales en pulgadas, el 3 indica el calibre de los alambres longitudinales, y el 4 representa el calibre de los alambres transversales (tabla 4.1).

TABLA 4.1 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

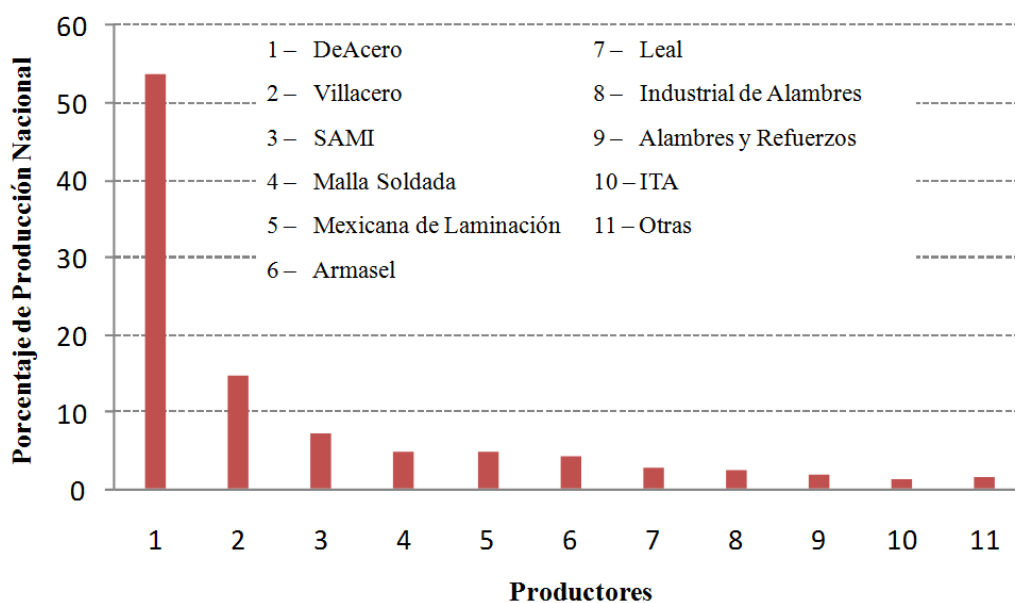


Fig 4.1 Estadísticas nacionales de alambre y castillo soldado en 2006

4.1 Selección de los productores de malla

Inicialmente, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de todos productores de malla de alambre soldado nacional. En la fig 4.1 se muestran las estadísticas de la producción nacional reportadas por la COFEMER (2006), las cuales sirvieron de base para seleccionar a los productores de las mallas que se estudiaron.

En la tabla 4.2 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.

TABLA 4.2 PRODUCTORES Y TIPOS DE MALLA ESTUDIADOS

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

4.2 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 relacionadas con la caracterización del acero de refuerzo (Rodríguez y Botero, 1996). Los ensayos se hicieron en el Laboratorio de Materiales del II UNAM. Para verificar el cumplimiento de las propiedades mecánicas especificadas en las normas vigentes, se realizaron pruebas de tensión, doblado y cortante de soldadura. Para cada tipo y marca de malla, se realizaron seis pruebas de tensión, seis de cortante de soldadura y seis de doblado. En la tabla 4.3 se resumen las pruebas realizadas.

TABLA 4.3 TIPO Y CANTIDAD DE PRUEBAS

Tipo de prueba	Descripción	Subtotal
Tensión	5 marcas $\times$ 6 ensayos $\times$ 4 tipos de malla	120
Cortante de soldadura	5 marcas $\times$ 6 ensayos $\times$ 4 tipos de malla	120
Doblado	5 marcas $\times$ 6 ensayos $\times$ 4 tipos de malla	120
Total de ensayos		360

Las probetas de cada una de las empresas provinieron de tres lotes distintos de producción. De acuerdo con un estimado de la producción de este material en la ZMCM, y tomando en cuenta los requerimientos de las normas NMX-B-253 y NMX-B-290, un análisis estadístico exhaustivo de las propiedades de las mallas debería incluir el ensaye de más de diez mil probetas anuales. Es importante señalar que, de acuerdo con el tamaño de la muestra requerida por dichas normas, la ejecución del análisis estadístico es responsabilidad exclusiva de los productores de las mallas. En este estudio se realizó el ensaye de 360 probetas de mallas. Los resultados presentados son indicativos de las tendencias de las propiedades mecánicas de las mallas de alambre soldado comercializado en la ZMCM. Estas tendencias podrían extenderse parcialmente a la República Mexicana, ya que, de acuerdo con entrevistas sostenidas con los productores de malla, la demanda de malla de alambre soldado en la ZMCM es representativa, por comparación, con el resto de la demanda en el país.

Las pruebas experimentales de este estudio se realizaron siguiendo los lineamientos señalados por las normas NMX-B-253 (2006) y NMX-B-290 (2006). En la tabla 4.4 se

muestran los requisitos mínimos especificados en dichas normas, asociados a los valores promedio de las muestras ensayadas. Convencionalmente, el alargamiento en las barras de refuerzo se obtiene midiendo la longitud inicial y la longitud final entre dos marcas de calibración fuera de la zona de falla. Siguiendo este procedimiento, Flores (2003) y Marcelino (2004) han caracterizado el alargamiento de la malla de alambre soldado. Las pruebas aquí presentadas siguen esta misma metodología, con el propósito de corroborar su conveniencia; sin embargo, posteriormente se comparan los resultados con aquellos medidos siguiendo la metodología que propone la norma ASTM-A-370 (2009). 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 4.4. La tabla 4.5 muestra los valores límite.

TABLA 4.4 REQUISITOS MECÁNICOS

Parámetros de resistencia de los alambres	Resistencia a la tensión	559 MPa
	Esfuerzo convencional de fluencia	490 MPa
Parámetros de ductilidad de los alambres	Alargamiento en diez diámetros	6%
	Reducción de área	30%
Parámetros de resistencia de soldadura	Promedio mínimo de fuerza cortante de soldadura	Calibre 4 = 6.30 kN
		Calibre 6 = 4.59 kN
		Calibre 8 = 3.25 kN
		Calibre 10 = 2.27 kN

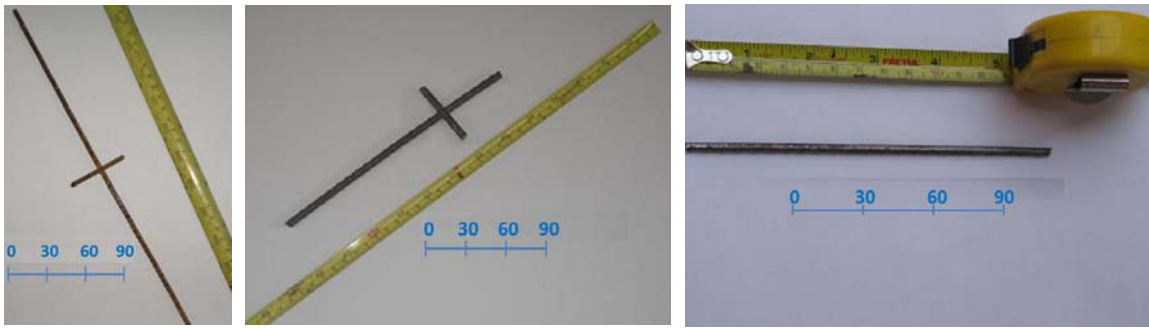
TABLA 4.5 VALORES MÍNIMOS A TENSIÓN DE CADA PROBETA INDIVIDUAL*

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

*Valores equivalentes al 80% de los indicados en la tabla 4.4.

4.3 Muestreo, dimensiones y características de las probetas

Los especímenes fueron recolectados directamente en las fábricas. Para asegurar que los lotes del producto no fueran iguales, se obtuvieron muestras en tres periodos distintos. Todas las muestras recolectadas fueron corrugadas, ya que son las más empleadas en la industria de la construcción actual.



(a) Prueba de tensión

(b) Prueba de cortante de soldadura

(c) Prueba de doblado

Fig 4.2 Probetas típicas (acotaciones en milímetros)

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 de 300 mm y, el empalme de alambre se localizó en la parte central de la probeta (fig 4.2a). La longitud libre entre mordazas de las probetas ensayadas a tensión fue de 180 mm (fig 2.3), con un empalme transversal en la parte central de la probeta.

La longitud de las probetas para los ensayos a cortante de soldadura fue de 210 mm, con un empalme de alambre transversal a 150 mm (fig 4.2b). Las probetas para doblado fueron de 150 mm de longitud y sin empalmes con soldaduras (fig 4.2c). Para cortar las probetas se utilizó una cizalla convencional y siempre se procuró 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, éstas se obtuvieron de los extremos y de las partes centrales de las muestras de malla obtenidas.

4.4 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).

4.4.1 Prueba de tensión

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 (fig 4.3a y b), respectivamente.

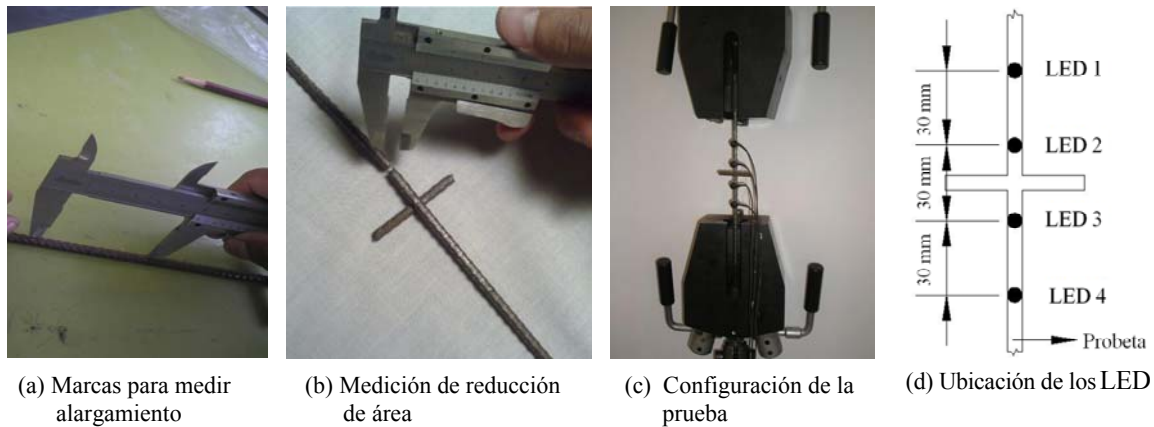


Fig 4.3 Prueba de tensión de la probeta 1, marca A 6x6–8/8

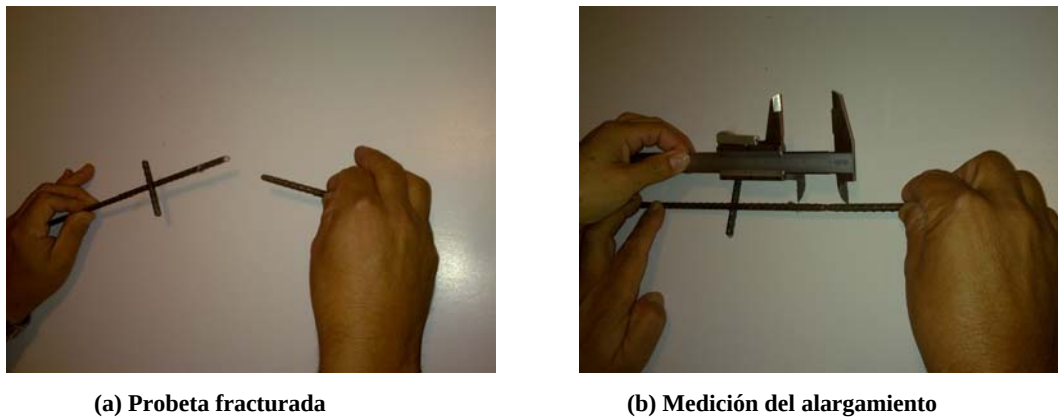


Fig 4.4 Ilustración del método para caracterizar el alargamiento de acuerdo con la norma ASTM-A-370 (2009)

De acuerdo con la norma ASTM-A-370 (2009), el alargamiento se debe medir en la zona de falla de la probeta (fig 4.4); sin embargo, para propósitos de comparación con varios estudios reportados en la bibliografía, por ejemplo Flores (2003) y Marcelino (2004), las mediciones de alargamiento se realizaron fuera de la zona de falla de la probeta. No obstante, como se mencionó anteriormente, los resultados obtenidos también se comparan con los resultados obtenidos siguiendo la metodología recomendada en la norma ASTM-A-370 (2009).

El registro de desplazamientos durante las pruebas de tensión se obtuvo utilizando una cámara óptica y LED infrarrojos (*light-emitting diode*, por sus siglas en inglés, o diodo emisor de luz). Los desplazamientos se midieron en cuatro sitios distintos dentro de la parte central de la probeta y, por tanto, las deformaciones se calcularon entre los LED 1-2, 2-3 y 3-4 (figs 4.3c y d).

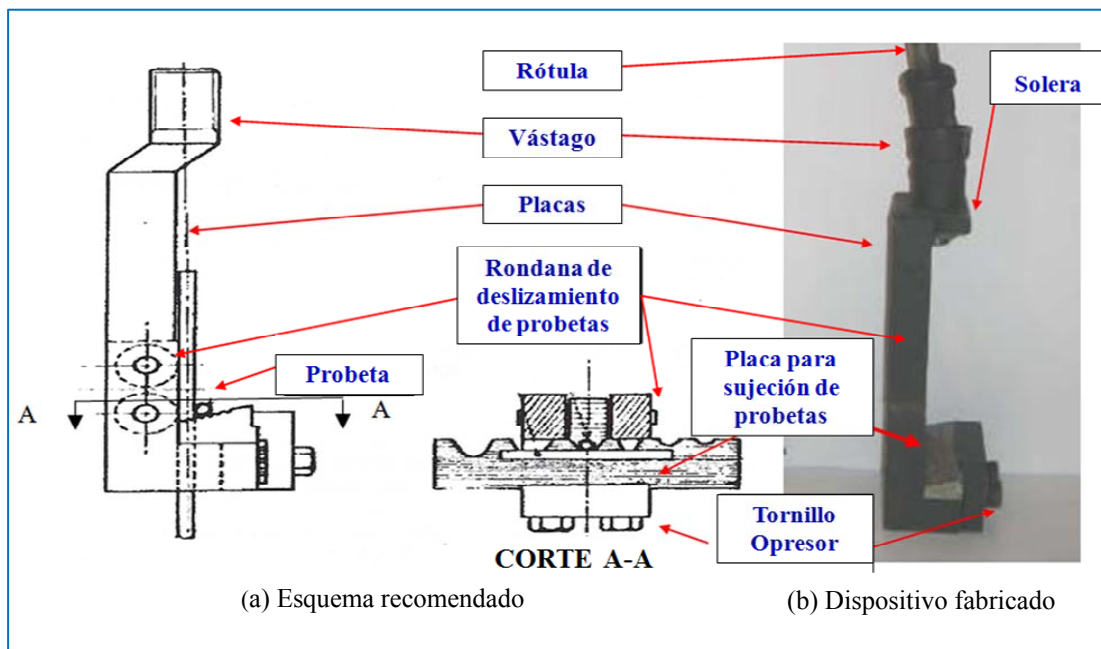


Fig 4.5 Dispositivo de cortante de soldadura

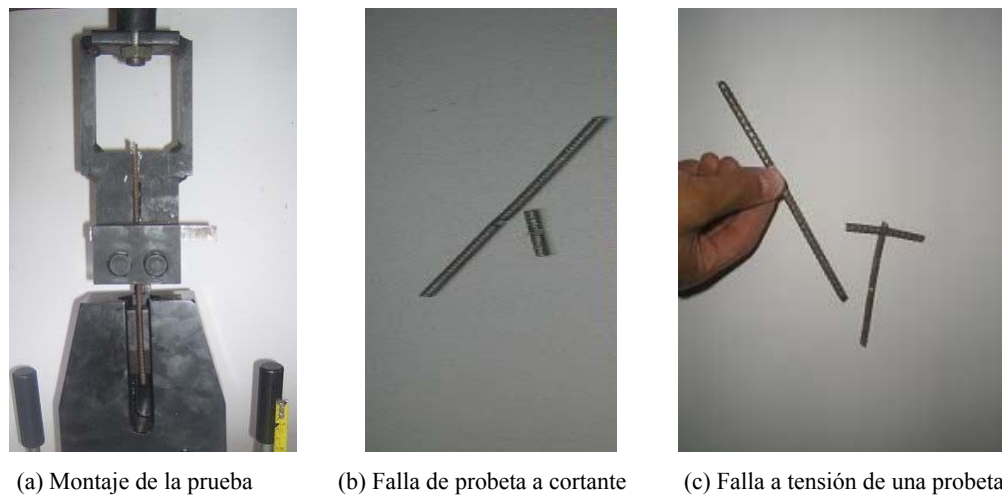


Fig 4.6 Prueba de cortante de soldadura

Las deformaciones aquí presentadas corresponden al promedio de las tres deformaciones medidas. De acuerdo con los lineamientos especificados en la norma NMX-B-172 (1988), la velocidad de separación de los cabezales bajo la carga se ajustó de tal forma que no excediera un valor de 1.57 mm por minuto por cada 25.4 mm de longitud calibrada.

4.4.2 Prueba de cortante de soldadura

El dispositivo de cortante de soldadura (fig 4.5b) se elaboró de acuerdo con las especificaciones de la norma mexicana NMX-B-290 (2006). Para garantizar que las cargas se aplicaran en el eje de la probeta, el dispositivo se sujetó a la máquina de prueba a tensión, por medio de una “articulación de rótula al centro”. La velocidad de aplicación de carga para la prueba de cortante de soldadura fue igual a 6 mm/min para todas las probetas ensayadas. Esta velocidad corresponde aproximadamente al promedio del intervalo de velocidad que se especifica en la norma correspondiente (1.3 y 13 mm/min). En la fig 4.6 se muestran detalles de las pruebas de cortante de soldadura, así como los dos tipos de falla que se presentaron.

4.4.3 Prueba de doblado

De acuerdo con la norma mexicana NMX-B-253 (2006), la prueba de doblado para este tipo de alambres se debe ejecutar en frío y sobre un mandril con diámetro igual a dos veces el diámetro de la probeta. El dispositivo se fabricó sobre una tabla de madera, en la cual se instalaron los cuatro mandriles correspondientes para los diámetros estudiados (fig 4.7). La tabla también permitió sujetar el dispositivo a una base fija. Para proporcionar soporte al doblado de la probeta se utilizaron rieles (en forma de ángulo). Asimismo, para dar el torque necesario y doblar los especímenes, se utilizó una palanca conformada por un tubo y un manubrio. La secuencia de la prueba de doblado se muestra en la fig 4.7.

4.5 Equipo empleado

Para la aplicación de la carga durante las pruebas de tensión, se utilizó una máquina servohidráulica (universal) de tensión-compresión (fig 4.8a). La obtención y almacenamiento de datos se realizó utilizando un ordenador conectado a un equipo de adquisición de datos (fig 4.8b). En la tabla 4.6 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 fig 4.3c. 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 estudiados. 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. Se observó que algunas mallas se deslizaban continuamente en las mordazas durante la prueba a tensión. Para ensayar estos alambres, fue necesario generar llaves de cortante en los especímenes utilizando pequeños puntos de soldadura.



(a) Inserción de probeta en mandril

(b) Doblado de probeta

(c) Probeta doblada

Fig 4.7 Secuencia de la prueba de doblado



(a) Máquina servohidráulica

(b) Adquisición de datos

(c) Cámara óptica

Fig 4.8 Equipo utilizado para las pruebas a tensión

TABLA 4.6 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS EQUIPOS

Características	Equipo			
	Dispositivo de carga	Adquisición de datos (carga)	Adquisición de datos (LED)	Cámara óptica
Marca	MTS	MTS	Metris	Metris
Modelo	810	Flextest 60	-----	Krypton K600
Capacidad	250 kN	4 canales de datos	20 LED	1 μ m de precisión
Velocidad	1 m/s	10 Hz – 500 Hz	10 Hz – 1 000 Hz	-----

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* o diodo emisor de luz), que permiten obtener el registro de la posición tridimensional de un punto objetivo definido sobre la probeta. Los LED fueron adheridos a las probetas utilizando adhesivo silicón convencional. Cada LED se conectó a un sistema de cámara (fig 4.8c), procurando generar un rayo óptico del LED, tan perpendicular como fuera posible, al plano de movimiento elegido. En general, el equipo mide los desplazamientos al captar la luz infraroja de los LED. La cámara óptica tiene una precisión que depende principalmente de la cantidad de luz ambiental, la frecuencia de muestreo y el número de LED utilizados.

En las figs 4.3a y b se ilustra el calibrador Vernier que se utilizó para medir alargamiento y reducción de área. Este calibrador tiene precisión de 0.05 mm y longitud de 200 mm.

4.6 Procesamiento de la información obtenida

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 de tensión aplicada 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 diez veces el diámetro de la probeta (fig 4.3a) 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 con el propósito de no afectar las partes delgadas de la probeta. 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 a un círculo el área reducida. Luego se obtuvo el cociente entre D_f y D_i .

Para el análisis estadístico de los datos observados, 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 i ésimo 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. Por ejemplo, las normas NTC-C (2004) y NTC-M (2004) utilizan 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. En otras palabras, el valor $P2$ reportado en este estudio es menor que el 98% de los datos experimentales utilizados. Para aplicar la ec 8, se debe aceptar la hipótesis de que la distribución de datos se asemeja a una distribución normal. Esta hipótesis se observó en los resultados medidos (fig 6.1).

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

5. RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 Pruebas de tensión

En la fig 5.1 se muestra una curva característica esfuerzo-deformación de los alambres estirados en frío. En esta gráfica, f_y es el esfuerzo convencional 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 .

Los esfuerzos resistentes a tensión (f_u) se calcularon como la carga máxima registrada dividida por el área nominal del alambre (tabla 4.1). Para calcular los esfuerzos de fluencia (f_y), se empleó el método de deformación permanente (para deformación de 0.2%). Sin embargo, también es posible emplear el método de extensión bajo carga, el cual se recomienda cuando no es posible obtener los valores por el método de deformación permanente (NMX-B-172, 1988).

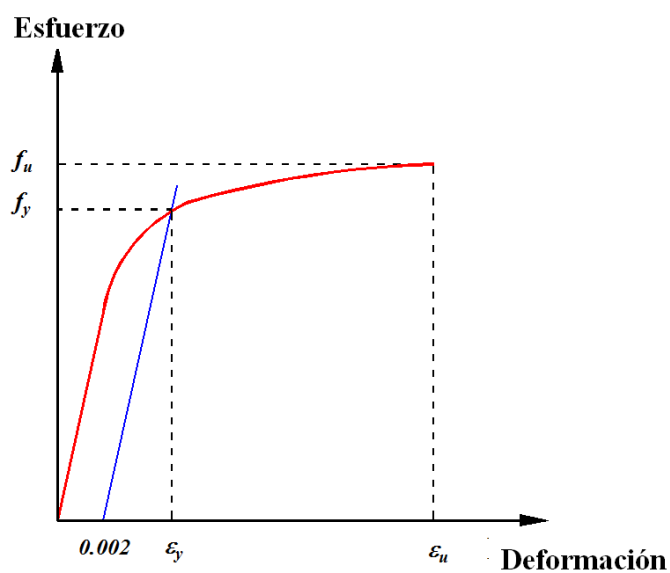


Fig 5.1 Caracterización de la curva esfuerzo-deformación

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 aquí presentados corresponden al promedio de la muestra.

En las tablas 5.1 a 5.4 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tensión. Algunos de estos resultados ya han sido señalados en Rico, Carrillo y Alcocer (2010).

TABLA 5.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS A TENSIÓN PARA LA MALLA TIPO $6 \times 6 - 4/4$

Propiedad mecánica	Marca	$\bar{X}$	S	CV (%)	Consolidado
f_y (MPa) [$\bar{X}_{\min} = 490$ MPa]	A	593	25	4.1	$\bar{X} = 599$ $CV = 14.1\%$ $P2 = 426$
	C	516	12	2.3	
	E	541	7	1.4	
	I	738	45	6.1	
	G	592	50	8.5	
f_u (MPa) [$\bar{X}_{\min} = 559$ MPa]	A	680	10	1.4	$\bar{X} = 667$ $CV = 13.0\%$ $P2 = 489$
	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	$\bar{X} = 0.0297$ $CV = 40.52\%$
	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	
Ra (%) [$\bar{X}_{\min} = 30\%$]	A	46.5	3.03	6.5	$\bar{X} = 45.0$ $CV = 18.5\%$
	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 (%) [$\bar{X}_{\min} = 6\%$]	A	1.8	1.15	62.9	$\bar{X} = 2.6$ $CV = 42.8\%$
	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 5.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS A TENSION PARA LA MALLA
TIPO 6×6–6/6

Propiedad mecánica	Marca	X	S	CV (%)	Consolidado
f_y (MPa) [$X_{\min} = 490$ MPa]	A	687	21	3.0	$X = 608$ $CV = 11.2\%$ $P2 = 469$
	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	$X = 659$ $CV = 9.3\%$ $P2 = 533$
	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	
Ra (%) [$X_{\min} = 30\%$]	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	

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. La norma NMX-B-290 indica que no se deben reportar mediciones de reducción de área cuando la medición no se puede obtener adecuadamente. En las tablas también se indica el promedio mínimo ($X_{\min}$) exigido por las normas correspondientes (tabla 4.4).

TABLA 5.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS TENSIÓN PARA LA MALLA TIPO
6×6–8/8

Propiedad mecánica	Marca	X	S	$CV(\%)$	Consolidado
f_y (MPa) [$X_{\min} = 490$ MPa]	A	712	7	1.0	$X = 636$ $CV = 15.1\%$ $P2 = 439$
	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	$X = 692$ $CV = 14.9\%$ $P2 = 481$
	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	
Ra (%) [$X_{\min} = 30\%$]	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	

¹En una de las probetas no fue posible medir Ra

TABLA 5.4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS TENSIÓN PARA LA MALLA TIPO
6×6–10/10

Propiedad mecánica	Marca	X	S	CV (%)	Consolidado
f_y (MPa) [$X_{\min} = 490$ MPa]	A	586	55	9.3	$X = 603$ $CV = 11.0\%$ $P2 = 467$
	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	$X = 652$ $CV = 10.9\%$ $P2 = 507$
	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	

¹En dos probetas no fue posible medir Ra .

TABLA 5.5 CONSOLIDADOS DE LAS PRUEBAS DE TENSIÓN

Propiedad mecánica	6×6–4/4	6×6–6/6	6×6–8/8	6×6–10/10
f_y (MPa) [$X_{\min} = 490$ MPa]	$X = 599$ $CV = 14.1\%$ $P2 = 426$	$X = 608$ $CV = 11.2\%$ $P2 = 469$	$X = 636$ $CV = 15.1\%$ $P2 = 439$	$X = 603$ $CV = 11.0\%$ $P2 = 467$
f_u (MPa) [$X_{\min} = 559$ MPa]	$X = 667$ $CV = 13.0\%$ $P2 = 489$	$X = 659$ $CV = 9.3\%$ $P2 = 533$	$X = 692$ $CV = 14.9\%$ $P2 = 481$	$X = 652$ $CV = 10.9\%$ $P2 = 507$
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 (%) [$X_{\min} = 6\%$]	$X = 2.6$ $CV = 42.8\%$	$X = 1.9$ $CV = 59.9\%$	$X = 1.7$ $CV = 65.3\%$	$X = 1.6$ $CV = 75.5\%$

TABLA 5.6 NÚMERO DE FALLAS EN SOLDADURA PARA CADA MARCA Y CALIBRE

Marca	6×6–4/4	6×6–6/6	6×6–8/8	6×6–10/10	Total
A	0 de 6	0 de 6	0 de 6	2 de 6	2 de 24
C	0 de 6	3 de 6	0 de 6	3 de 6	6 de 24
E	0 de 6	0 de 6	3 de 6	1 de 6	4 de 24
I	0 de 6	0 de 6	0 de 6	2 de 6	2 de 24
G	0 de 6	0 de 6	2 de 6	1 de 6	3 de 24
Total	0 de 30	3 de 30	5 de 30	9 de 30	17 de 120

En la tabla 5.5 se muestran los resultados consolidados de las pruebas de tensión. Dichos resultados fueron calculados con todos los datos obtenidos de cada una de las marcas, correspondientes a un mismo tipo de malla

En la tabla 5.6 se presenta el número de fallas en soldadura registradas durante las pruebas a tensión, para cada una de las marcas de cada calibre.

La tabla 5.7 muestra los datos de los 19 valores de alargamiento que se lograron obtener siguiendo los lineamientos de la norma ASTM-A-370 (2009) (fig 4.4).

TABLA 5.7 RESULTADOS DE ALARGAMIENTO DE ACUERDO CON LA NORMA ASTM-A-370 (2009) (FIG 4.4)

Tipo de malla	Núm de probetas	X (%)	S	CV (%)	Consolidado
6×6–4/4	4	7.8	0.60	7.6	
6×6–6/6	5	7.8	1.12	14.4	X = 7.44% CV = 12.2%
6×6–8/8	7	7.3	0.86	11.8	
6×6–10/10	3	6.8	0.94	13.8	

5.2 Pruebas de cortante de soldadura

La tabla 5.8 presenta los resultados obtenidos para cada una de las marcas. Estos resultados provienen de probetas que fallaron por cortante en la soldadura. En la columna Consolidado se presentan los resultados estadísticos para cada tipo de malla. Dichos resultados fueron calculados con todos los datos obtenidos de cada una de las marcas correspondientes a un mismo tipo de malla.

TABLA 5.8 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CORTANTE DE SOLDADURA QUE FALLARON A CORTANTE

Tipo	Marca	No de Probetas	X (kN)	S (kN)	CV (%)	Consolidado
6×6–4/4	A	6	10.2	1.9	18.6	X = 9.1 kN CV = 26.9%
	C	6	8.9	3.1	34.6	
	E	6	7.6	2.9	38.5	
	I	4	8.9	1.3	14.6	
	G	3	10.2	1.4	13.3	
6×6–6/6	A	5	8.4	2.1	25.3	X = 7.7 kN CV = 21.5%
	C	6	7.3 ₂	1.5 ₂	20.8 ₂	
	E	0				
	I	1	9.7	1	1	
	G	6	7.1	1.2	16.7	
6×6–8/8	A	5	6.8	1.2	17.0	X = 5.5 kN CV = 30.9%
	C	5	3.0	1.1	37.6	
	E	6	6.0	0.4	6.7	
	I	6	5.0	1.1	21.2	
	G	4	7.1	1.0	14.2	
6×6–10/10	A	3	5.5	0.5	8.8	X = 4.4 kN CV = 27.0%
	C	6	3.0	0.8	26.3	
	E	3	4.2	0.5	12.9	
	I	6	4.9	0.9	17.8	
	G	3	5.4	0.5	9.7	

¹ Solo una probeta falló a cortante, por lo que no aplican estos conceptos.

² Todas las probetas fallaron a tensión.

TABLA 5.9 RESULTADOS DE LAS PROBETAS DE CORTANTE QUE FALLARON COMO EN LA FIG 4.6c

Tipo	Marca	Núm de probetas	X (kN)	S (kN)	CV (%)	Consolidado
6×6–4/4	I	2	9.5	1.2	13.1	X = 11.5 kN CV = 20.7%
	G	3	12.8	2.0	16.0	
6×6–6/6	A	1	11.1	¹	¹	X = 10.1 kN CV = 6.5%
	E	6	10.1	0.3	2.5	
	I	5	9.8	0.9	8.9	
6×6–8/8	A	1	9.5	¹	¹	X = 7.8 kN CV = 21.6%
	C	1	5.5	¹	¹	
	G	2	8.1	0.1	1.0	
6×6–10/10	A	3	5.6	0.1	1.4	X = 5.7 kN CV = 9.4%
	E	3	5.2	0.1	1.9	
	G	3	6.3	0.4	6.5	

¹Solo se presentó un espécimen con este tipo de falla.

La tabla 5.9 muestra la carga máxima obtenida cuando las probetas de cortante fallaron a tensión, tal como se muestra en la fig 4.6c.

5.3 Pruebas de doblado

Se realizaron pruebas de doblado en las 120 probetas señaladas en la tabla 4.3. Ninguna de las probetas exhibió agrietamientos a simple vista cuando se realizó el doblado en frío a 180°, es decir, todas las marcas y modelos utilizados cumplieron con la norma correspondiente.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los resultados experimentales obtenidos, se generan las siguientes observaciones:

6.1 Comportamiento observado

1. Prueba de tensión: 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 4.4. Teniendo en cuenta dichos valores y los límites establecidos para cada probeta individual en la tabla 4.5, se observa:
 - Respecto al alargamiento (medición del alargamiento fuera de la zona de falla de la probeta):
 - o Para todas las probetas, los alargamientos medidos fueron menores de 4.8%.
 - o Los valores de alargamiento de cada probeta variaron entre 13 y 80% del alargamiento mínimo indicado en las normas correspondientes.
 - o Aunque el valor mínimo del alargamiento es de 6%, los valores promedio para los consolidados de las pruebas de tensión variaron entre 1.6 y 2.6%.
 - o Los coeficientes de variación para los consolidados de alargamiento a tensión fueron significativamente altos, es decir, variaron entre 42.8 y 75.5%. Esta situación incentiva la revisión de la metodología que siguen algunos laboratorios en México.
 - Respecto al alargamiento de acuerdo con la norma ASTM-A-370 (2009):
 - o Esta norma señala que “los extremos de la probeta fracturada deben ajustarse cuidadosamente y, la distancia entre las marcas de calibración debe medirse con una aproximación de 0.25 mm”.

- o Debido a que las fallas no siempre se presentaron dentro de las marcas de calibración, en el estudio aquí reportado fue posible obtener únicamente los resultados de diecinueve especímenes (15.8% del total de ensayos a tensión), siguiendo esta metodología (tabla 5.7).
 - o Teniendo en cuenta que el sitio de falla no siempre resulta apropiado para tomar mediciones de acuerdo con la norma ASTM-A-370 (2009), se considera que esta metodología no se puede utilizar de forma efectiva en la determinación del alargamiento a partir del número de probetas que se emplean en casos reales.
 - o Con esta metodología, todos los valores de alargamiento obtenidos cumplieron con la norma NMX-B-253 y reportaron un promedio de 7.4%, con un coeficiente de variación de 12.2%. Por lo cual, es posible que los estudios de Marcelino (2004), Flores (2003) y Bartolomé *et al* (2008) no se hayan realizado siguiendo el procedimiento señalado por esta norma.
- Para el caso de las pruebas a tensión que presentaron fallas en la soldadura:
 - o 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, catorce fueron fallas en soldadura (23.3%). Para el caso de las mallas con alambres calibre 10 (los más delgados), se observaron nueve fallas en soldadura en un total de 30 probetas ensayadas (30%).
 - o En las soldaduras de las mallas $6 \times 6-10/10$ y $6 \times 6-6/6$ de la marca C, hubo seis rupturas; en las soldaduras de las mallas $6 \times 6-10/10$ y $6 \times 6-8/8$ de la marca E se presentaron cuatro rupturas; en las soldaduras de la malla más delgada ($6 \times 6-10/10$) de la marca I, fueron dos las rupturas; en tres probetas de la marca G se presentaron rupturas en soldadura, de las cuales dos sucedieron en probetas de malla $6 \times 6-10/10$ y una en la probeta de la malla $6 \times 6-8/8$.
 - o En general, las fallas en la soldadura se presentaron en los calibres 10 y 8 (los más delgados) de las marcas A, E, G e I. Para la marca C, las fallas se presentaron en los calibres 10 y 6.
 - Los criterios estipulados de reducción de área no se cumplieron en los siguientes casos:
 - o En lo referente a probetas individuales: una probeta de malla $6 \times 6-10/10$ marca E, una probeta de la malla $6 \times 6-8/8$ marca E, una probeta de malla $6 \times 6-8/8$ marca G y, una probeta de malla $6 \times 6-8/8$ marca I. Estas probetas reportaron reducciones de área menores del 24% especificado en la tabla 4.5.

- o Los lotes de malla $6 \times 6-8/8$ de la marca G dieron un promedio de reducción de área menor del 30%, lo cual no es permitido por la norma correspondiente.
- o Los promedios para los consolidados de estos datos (tabla 5.5) variaron entre 37 y 45%. Adicionalmente, los coeficientes de variación fueron elevados, es decir, mayores de 18.5% y, en algunos casos alcanzaron valores cercanos al 60%.
- Respecto al esfuerzo último y al esfuerzo convencional de fluencia:
 - o De manera individual, todas las probetas cumplieron con los valores de f_y y f_u especificados en la tabla 4.5.
 - o Con excepción de los lotes de malla $6 \times 6-8/8$ de la marca C, el resto cumplen con el valor promedio para f_y estipulado en la norma mexicana correspondiente. Los lotes que no cumplieron dieron un promedio de esfuerzo último menor de 559 MPa.
 - o Al analizar los resultados por lotes, todos cumplieron con el criterio de f_u especificado por las normas correspondientes.
 - o Los promedios para los consolidados de los datos (tabla 5.5), variaron entre 599 y 636 MPa para el caso de f_y y, entre 652 y 692 MPa para el caso de f_u .
 - o Los coeficientes de variación para los consolidados de los datos (tabla 5.5), se mantuvieron entre 9.3 y 15.1%, lo cual se considera aceptable.
 - o En la fig 6.1 se presenta el histograma de los valores observados de f_y para todos los calibres de todas las marcas. En dicha figura se muestran las frecuencias correspondientes al número de pruebas en las cuales se presentaron valores de f_y dentro de los intervalos marcados. La tendencia de la gráfica de la fig 6.1 sustenta la hipótesis de una distribución del tipo normal y, de esta manera, se pueden calcular los percentiles necesarios. Se debe señalar que en ningún otro parámetro se observó la tendencia de distribución normal (fig 6.2). Sin embargo, con base en la fig 6.1, se puede considerar que el comportamiento a tensión de las mallas aquí estudiadas tiene una distribución del tipo normal. En la fig 6.2 se muestra este mismo histograma para los valores de f_u .

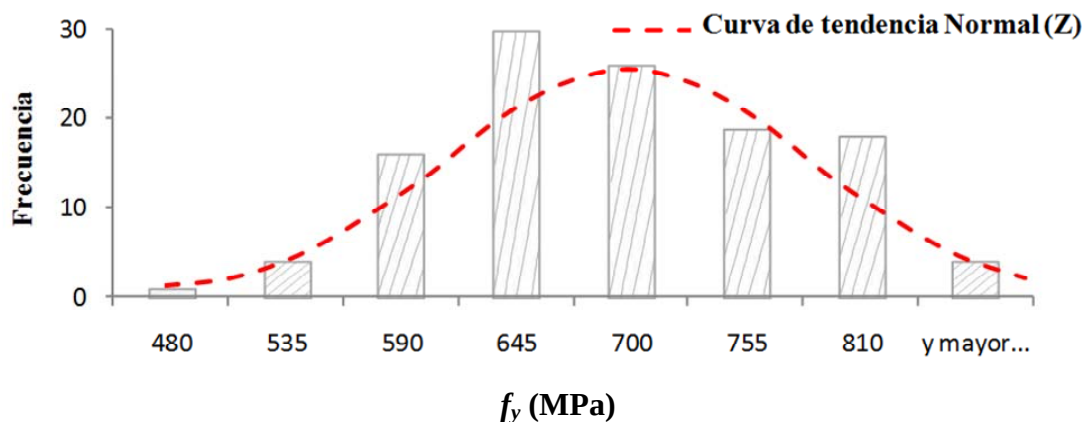


Fig 6.1 Histograma de frecuencias de f_y para todas las mallas

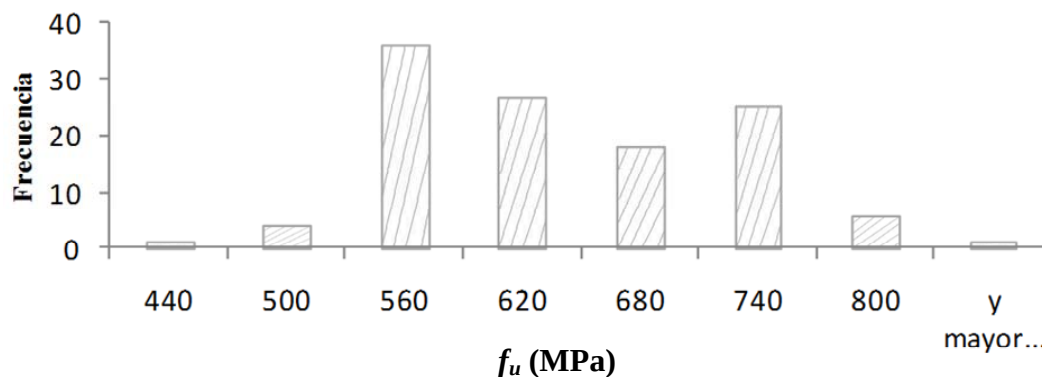


Fig 6.2 Histograma de frecuencias de f_u para todas las mallas

2. Prueba de cortante de soldadura:

- Para todos los tipos y marcas estudiadas, el promedio de la fuerza cortante resistente de la soldadura fue mayor que los valores indicados en la tabla 4.4. Por consiguiente, las probetas cumplen con la especificación de la norma NMX-B-290 (2006), respecto al cortante de soldadura. Es importante señalar que, de acuerdo con esta norma, no es necesario evaluar el comportamiento de cada probeta por separado.
- Como se observa en la tabla 5.8, los coeficientes de variación (CV) de la fuerza cortante resistente de la soldadura variaron entre 6.7 y 38.5%. Para algunos fabricantes, los CV fueron bajos, pero para otros, se presentaron valores altos y de

manera constante (fabricante C en la tabla 5.8). Sin embargo, en otros casos se reportó tanto el CV más alto, como el más bajo (fabricante E en la tabla 5.8).

- En este estudio se llevó un control del número de fallas del tipo que se ilustra en la fig 4.6c (tabla 5.6). De esta manera, se observó la falta de relación entre la frecuencia de falla en soldadura y valores altos o bajos de cortante resistente de soldadura, así como la falta de relación con valores altos o bajos de los coeficientes de variación de los cortantes resistentes.
3. Respecto a las pruebas de doblado, todas las probetas cumplieron con la especificación de la norma NMX-B-253 (2006).

6.2 Implicaciones en el diseño estructural

1. De acuerdo con Ali-Mirza y Mac-Gregor (1981), la curva modificada de Ramberg-Osgood, calculada por medio de la ec 9, es adecuada para modelar la relación esfuerzo (f)–deformación (ε) a tensión de los alambres de malla soldada.

$$\varepsilon = \frac{f}{E_s} + \left(\varepsilon_u - \frac{f}{E_s} \right) \left(\frac{f}{f_u} \right)^{20} \quad (9)$$

donde ε es la deformación (mm/mm), f es el esfuerzo (MPa), f_u es el esfuerzo máximo de tensión, ε_u es la deformación correspondiente a f_u y, E_s es el módulo elástico del material. El valor de E_s se consideró igual a 206,010 MPa (valor común reportado por Gere, 2006), debido a que la determinación experimental de este parámetro requiere de una metodología que exige un control de temperatura específico.

Para obtener las curvas asociadas a cada calibre, se sustituyeron en la ec 9 los valores obtenidos del percentil 2 ($P2$), los cuales se presentan en la tabla 5.5. Para las deformaciones últimas se utilizaron los valores promedio, ya que los valores del $P2$ para el caso de las deformaciones pierden significado físico en el momento de calcular una deformación última menor que la deformación promedio de fluencia (0.005). En la tabla 6.1 se muestran los valores que, al ser sustituidos en la ec 9, generan las curvas esfuerzo-deformación de las mallas de alambre soldado más comúnmente comercializadas en la construcción.

TABLA 6.1 VALORES QUE TOMAN LOS PARÁMETROS DE LA EC 9

Malla	f_u (MPa)	ε_u
$6 \times 6 - 4/4$	489	0.0297
$6 \times 6 - 6/6$	533	0.0196
$6 \times 6 - 8/8$	481	0.0199
$6 \times 6 - 10/10$	507	0.0173

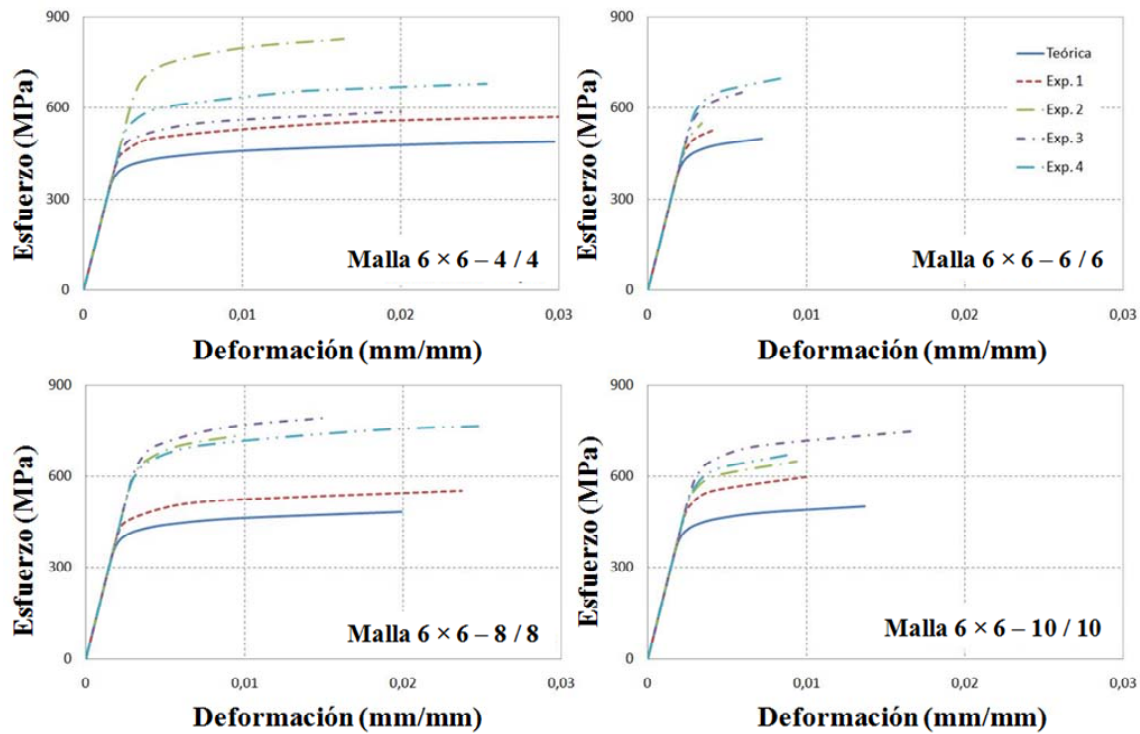


Fig 6.3 Curvas esfuerzo-deformación teóricas y experimentales para todos los calibres

Las curvas así calculadas se muestran en la fig 6.3, con el nombre de teóricas. Si la hipótesis de que las muestras reflejan el comportamiento real de las mallas es válida, las curvas aquí propuestas son adecuadas para diseño estructural, pues representan el comportamiento a tensión de las mallas de alambre soldado comercializadas en la ZMCM. Para verificar la bondad de la propuesta con fines de diseño, en la fig 6.3 se muestran las curvas experimentales más representativas (Exp 1, Exp 2, Exp 3 y Exp 4).

2. De acuerdo con Meli (2008), la mayoría de los reglamentos de construcción a nivel mundial pretenden “limitar a valores entre 0.01 y 0.02, la probabilidad de que el esfuerzo convencional de fluencia del refuerzo de un elemento estructural sea menor que el especificado”. A estos valores se les conoce como esfuerzos nominales del material para su grado y calidad. En la tabla 6.2 se comparan los valores obtenidos del percentil 2 (P_2), que se indica en la tabla 5.5, con el esfuerzo convencional de fluencia mínimo especificado en NTC-C (2004), el cual es igual a 490 MPa. El valor P_2 del esfuerzo último también se compara con el esfuerzo último estipulado en NTC-C (2004), el cual es igual a 559 MPa. En la tabla 6.2 se observa que los esfuerzos asociados al P_2 , siempre fueron menores que los esfuerzos nominales (490 y 559 MPa); por ejemplo, aproximadamente 10% menores que los nominales [véanse resultados de fórmulas $1-(f_y P_2/490)$ y $1-(f_u P_2/559)$ en la tabla 6.2].

TABLA 6.2 COMPARACIÓN DE ESFUERZOS MÍNIMOS SOLICITADOS CON ESFUERZOS ASOCIADOS AL P_2

Malla	$6 \times 6 - 4/4$	$6 \times 6 - 6 \times 6$	$6 \times 6 - 8/8$	$6 \times 6 - 10/10$
$f_y P_2$ (MPa)	426	469	439	467
$f_u P_2$ (MPa)	489	533	481	507
$1-(f_y P_2 / 490)$	13.1%	4.3%	10.4%	4.7%
$1-(f_u P_2 / 559)$	12.5%	4.7%	14.0%	9.3%

3. De acuerdo con el Eurocódigo (EC-2, 2004), en la tabla 6.3 se presentan los valores mínimos del percentil 10 (P_{10}), 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 denominados como tipo B o C, de acuerdo con la amenaza sísmica. Para los resultados obtenidos de forma experimental, el percentil 10 (P_{10}) se puede calcular por medio de la ec 10. En la tabla 6.4 se muestran los valores obtenidos con la ec 10 para los parámetros $k (f_u/f_y)$ y ε_u , correspondientes a las mallas aquí estudiadas. De acuerdo con la información indicada en las tablas 6.3 y 6.4, las mallas aquí estudiadas no cumplen con los requisitos establecidos en el Eurocódigo.

$$P_{10} = -1.28 S + X \quad (10)$$

TABLA 6.3 VALORES MÍNIMOS DEL PERCENTIL 10 PARA k Y ε_u DE LAS MALLAS DE REFUERZO SEGÚN EL EUROCÓDIGO

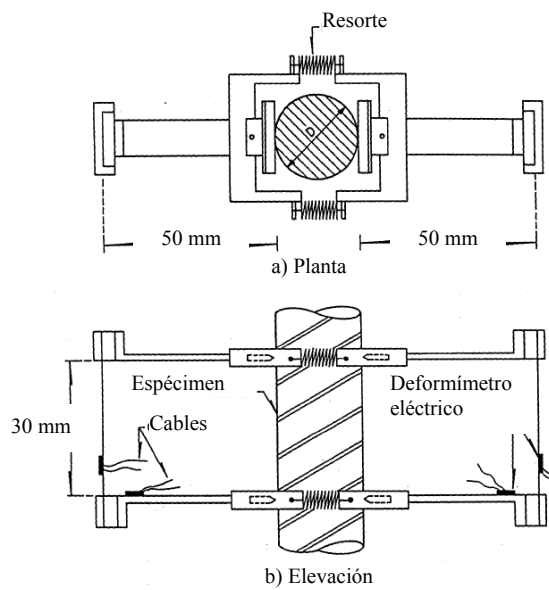
Tipo de Acero	$k = f_u/f_y$	ε_u (%)
A	≥ 1.05	≥ 2.50
B	≥ 1.08	≥ 5.00
C	$1.15 \leq k < 1.35$	≥ 7.50

TABLA 6.4 VALORES OBTENIDOS DE k Y ε_u PARA LAS MALLAS ESTUDIADAS

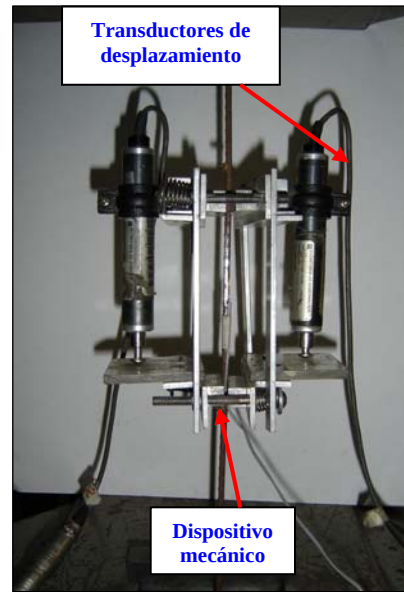
Parámetro	Malla	X	S	$P10$
$k = f_u/f_y$	6×6 – 4/4	1.12	0.05	1.05
	6×6 – 6/6	1.09	0.03	1.04
	6×6 – 8/8	1.09	0.07	1.00
	6×6 – 10/10	1.08	0.06	1.01
ε_u (%)	6×6 – 4/4	2.97	1.20	1.43
	6×6 – 6/6	1.96	0.43	1.41
	6×6 – 8/8	1.99	0.77	1.00
	6×6 – 10/10	1.73	0.56	1.01

6.3 Método y procedimiento de ensaye

1. Durante las pruebas preliminares al programa experimental, se llevaron a cabo 48 ensayes a tensión, en los cuales se registraron las deformaciones utilizando deformímetros eléctricos. De esta manera, se compararon los promedios de resistencia a la tensión de los alambres instrumentados con deformímetros, con los promedios obtenidos en el programa experimental aquí presentado (instrumentados utilizando LED). Se detectó que, en promedio, el esfuerzo último fue 4.0% menor en el caso de los alambres instrumentados con deformímetro. Esto se debe a la disminución de área que se genera al preparar la superficie para adherir el deformímetro. Adicionalmente, se observó que el 80% de las probetas con deformímetro fallaron en el sitio donde se preparó la superficie para pegar la matriz del sensor. Por tanto, se comprobó que el sitio de la falla puede ser inducido por la preparación de la superficie.



(a) Restrepo (1996)



(b) Carrillo (2010)

Fig 6.4 Extensómetros utilizados en otros estudios

2. En las pruebas preliminares se utilizó una celda de carga de mayor capacidad (2 300 kN) y, por tanto, se obtuvieron valores de f_u y f_y con mayor dispersión. Es muy probable que esta situación ocurra por la histéresis de la celda de carga, ya que las pruebas a tensión requieren la utilización de celdas con una capacidad máxima cercana al doble de la carga de falla de las probetas estudiadas. Si se utilizan celdas que cumplan con dicho límite, se tendrá mejor resolución y menor histéresis para los intervalos de carga. Se debe considerar que comercialmente existen muy pocos equipos (máquinas universales similares) disponibles para realizar pruebas a tensión con celdas de carga acopladas para este tipo de pruebas.
3. Para seleccionar el tipo de instrumentación de las probetas, en el programa experimental preliminar se realizaron varias pruebas con dos tipos de extensómetros comúnmente empleados (fig 6.4) y, con el dispositivo óptico finalmente adoptado. Respecto al extensómetro que se muestra en la fig 6.4a, se observó que este dispositivo tiende a presentar problemas de adherencia en la superficie de los alambres, los cuales se traducen en torsiones no deseadas durante las mediciones. Una solución a este problema consiste en pegar levemente el extensómetro al alambre, antes de iniciar el ensaye (por ejemplo, con una gota de silicón adhesivo). Adicionalmente, este tipo de extensómetro es frágil ante las vibraciones que se

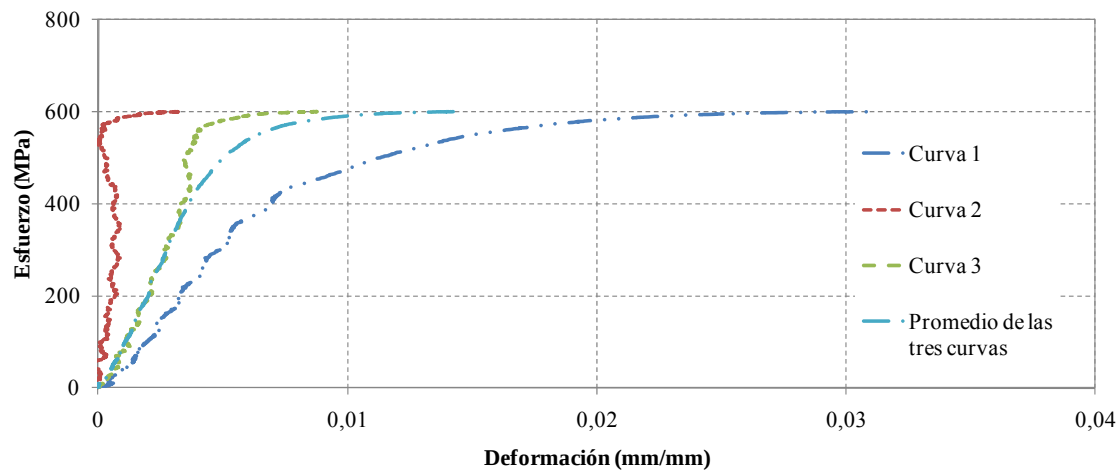
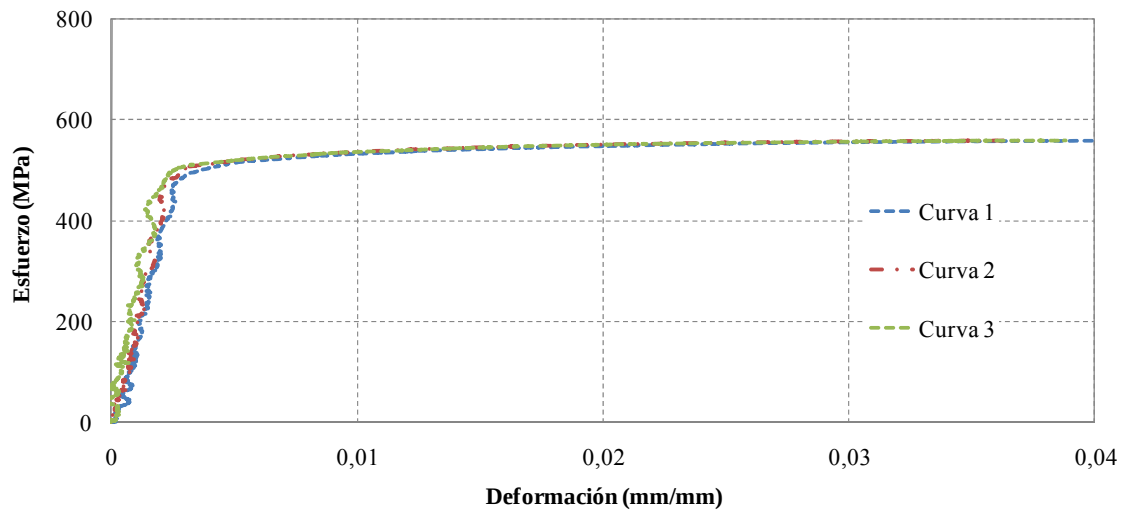
generan en el momento de las rupturas de los alambres y, por tanto, resulta más estable al ser utilizado para el ensaye de barras corrugadas convencionales.

El extensómetro mostrado en la fig 6.4b tiene una superficie de contacto muy grande con el alambre. Por tanto, se debe mejorar el diseño para que el extensómetro tenga contacto mínimo con la probeta, de forma similar a otros tipos de extensómetros (por ejemplo, el extensómetro de la fig 6.4a y, los extensómetros que se utilizan para determinar el módulo de elasticidad en los cilindros de concreto). Por otro lado, cuando se utiliza el extensómetro de la fig 6.4b, el usuario tiende a olvidar el retiro de las soleras de aluminio, las cuales podrían tomar carga durante la prueba de tensión y, por tanto, afectar los resultados de la prueba. Estas soleras de aluminio, en lugar de retirarse, deberían disponer de guías con fricción mínima y, de esa forma, también se evitarían las torsiones observadas al momento de las pruebas

4. Las deformaciones entre los LED 1-2, 3-4 y 5-6 se calcularon siguiendo la configuración que se indica en las figs 4.3c y d. Por tanto, se obtuvieron tres gráficas de deformaciones, tal como se muestra en la fig 6.5. Sin embargo, para el 85% de las probetas se obtuvieron gráficas como las de la fig 6.6. Para el 15% restante de las probetas, se obtuvieron gráficas como las de la fig 6.5, las cuales corresponden a la mayoría de las mallas más gruesas (tipo $6 \times 6-4/4$).

La curva 1 de la fig 6.6 siempre correspondió a las deformaciones medidas con los LED adyacentes a la soldadura (LED 2 y LED 3). Cuando se graficaron los conjuntos de LED 1-2 y 3-4, se observaron comportamientos menos flexibles (curvas 2 y 3 de la fig 6.6). Las deformaciones reportadas en este estudio corresponden al promedio de las tres gráficas, pues las curvas esfuerzo-deformación deben representar el comportamiento de las piezas en su conjunto (alambre y efecto de la soldadura). El comportamiento observado revela que los alambres tienen mayor flexibilidad cerca de la soldadura que en los sitios alejados de esta.

Se debe mencionar que durante las pruebas preliminares, se obtuvieron curvas esfuerzo-deformación con los extensómetros mostrados en la fig 6.4. Las curvas características obtenidas en estas pruebas preliminares fueron similares a las que se observan en las curvas 2 y 3 de la fig 6.6. Esta situación permite alertar respecto a la posibilidad de que estos extensómetros sólo permitan medir parcialmente las deformaciones que exhiben las mallas de alambre soldado en sus partes menos flexibles.



5. La norma mexicana NMX-B-290 estipula que para la aceptación de un lote determinado se debe cumplir con el porcentaje de reducción de área o con el porcentaje de alargamiento. Teniendo en cuenta lo reportado por Dove (1983) respecto a la prueba de alargamiento, parecen existir contrariedades con lo especificado en la norma NMX-B-253 (2006). Por tanto, si se continúa utilizando el parámetro del alargamiento en la norma mexicana, se debe definir la longitud libre entre mordazas que se requiere para obtener adecuadamente este parámetro. En general, para evaluar la capacidad de ductilidad de los alambres de malla, se recomienda eliminar la prueba de alargamiento de la norma correspondiente y utilizar

únicamente las pruebas de reducción de área y doblado, tal como se especifica en la norma ASTM-A-370.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el programa experimental aquí presentado se detectaron tendencias importantes de algunos lotes de producción. Sin embargo, las conclusiones se refieren a la tendencia general del comportamiento experimental de las mallas de alambre soldado comercializadas en la ZMCM. Estas tendencias podrían extenderse parcialmente a la República Mexicana, ya que la demanda de malla de alambre soldado en la ZMCM es representativa en comparación con el resto del país.

7.1 Requisitos establecidos en las normas correspondientes

1. 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 que utiliza los alambres más delgados ($6 \times 6 - 10/10$) es aquel que presenta mayor número de contravenciones. De acuerdo con información proveniente de comerciantes del producto, este tipo de malla 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 fabricación
2. En lo referente a los requisitos a tensión se indica lo siguiente:
 - Los parámetros de resistencia f_y y f_u mostraron los siguientes porcentajes de cumplimiento:
 - o 100% en los valores individuales de f_y y f_u señalados en la tabla 4.5

- o 95% en los valores promedio de f_u (los lotes de malla $6 \times 6-8/8$ de la marca C no cumplieron)
 - o 100% en los valores promedio de f_y de todas las mallas
 - o Las marcas A, E, G e I cumplieron completamente con estos parámetros.
 - Con relación al parámetro de reducción de área, los porcentajes de cumplimiento fueron:
 - o 96% para las probetas individuales de las mallas $6 \times 6-10/10$ (no cumplió una probeta de la marca E)
 - o 90% para las probetas individuales de las mallas $6 \times 6-8/8$ (no cumplieron: una probeta de la marca E, una probeta de la marca G y una probeta de la marca I)
 - o 100% para las probetas individuales de las mallas $6 \times 6-6 \times 6$ y $6 \times 6-4/4$
 - o 95% en los valores promedio de reducción de área (los lotes de malla $6 \times 6-8/8$ de la marca G no cumplieron)
 - o 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 ha llevado a cabo en varios estudios reportados en la bibliografía), en ninguna marca y en ningún calibre se reportan valores superiores al 4%. Sin embargo, es necesario que el procedimiento se lleve a cabo siguiendo los lineamientos de la norma ASTM-A-370 (2009) (fig 4.4), es decir, midiendo el alargamiento en la zona de falla de la probeta. Es necesario señalar que esta norma ASTM aplica para elementos cilíndricos redondos de alambre de acero en general, pero no menciona explícitamente su aplicación para aceros de refuerzo de concreto.
3. Todas las mallas cumplieron con los requisitos de fuerza cortante resistente de soldadura.
4. Todas las probetas cumplieron satisfactoriamente la prueba de doblado. De acuerdo con Dove (1983), esta prueba es un indicativo de la capacidad de ductilidad para este tipo de acero. Probablemente, la calidad del material de fabricación de las mallas sea aceptable, pero no sea adecuada su utilización como refuerzo en elementos estructurales que requieran desarrollar altas demandas de ductilidad.

7.2 Tipos de falla

1. Para todas las marcas se confirmó que los calibres delgados tienden a fallar en la soldadura. Aun en calibres más gruesos (calibres 6 y 4), se observó que en algunas marcas se pueden presentar este tipo de fallas. Dicha situación advierte que el método de soldadura puede afectar significativamente a los alambres y, especialmente, a los más delgados.
2. Del total de ensayos a tensión realizados (todos los lotes ensayados), el porcentaje de fallas en la soldadura fue de 14.2%. De acuerdo con el análisis de los parámetros estadísticos obtenidos, este tipo de falla no está relacionado con otros modos de falla detectados.
3. Se recomienda complementar el tipo de estudios aquí presentados, con investigaciones metalúrgicas y mecánicas más especializadas y, de esta manera, resolver o minimizar el problema de las fallas en soldadura de las mallas de alambre soldado.

7.3 Propiedades mecánicas a tensión que fueron medidas

1. Sustituyendo los valores indicados de la tabla 6.1 en la ec 9, se obtienen las curvas esfuerzo-deformación de las mallas de alambre soldado más empleadas en la ZMCM, las cuales se muestran en la fig 6.3.
2. Los percentiles 2 (P_2) correspondientes a f_y y f_u en las mallas, son menores que los valores especificados en NTC-C (2004), aproximadamente entre 4 y 14% menores (tabla 6.2). Esta situación sugiere que es necesario revisar el aseguramiento de calidad en las fábricas con la finalidad de cumplir con los objetivos de las normas señaladas.
3. Los valores de los parámetros de ductilidad medidos en esta investigación, no cumplieron con los valores estipulados en el EC2 (2004), para aceros de refuerzo denominados en este reglamento como tipos A, B o C.
4. 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.
5. De acuerdo con Dove (1983), para los alambres de una misma fábrica, el alargamiento es menor a medida que se aumenta la longitud libre entre mordazas en la prueba de

tensión (fig 2.3). La dependencia del valor de alargamiento con la longitud libre entre mordazas es un argumento válido para no incluir la prueba de alargamiento en la norma mexicana correspondiente. Si en la norma mexicana correspondiente se continúa solicitando esta prueba, se podría generar la manipulación de los resultados reportados.

6. Se debe señalar que, en general, los parámetros obtenidos están asociados con coeficientes de variación altos. Esto es un posible indicador de heterogeneidad en la calidad de los materiales.

7.4 Contenido de las normas referentes a las pruebas mecánicas

1. Se observaron casos 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 tanto, se recomienda especificar límites superiores a las propiedades de resistencia, pues un aumento pronunciado en la resistencia puede estar relacionado con la disminución de la ductilidad del material y, por tanto, aumentar su fragilidad (Bachmann, 2000).
2. Las normas mexicanas deben especificar la cantidad mínima de mediciones de diámetros que se deben realizar para calcular la reducción de área, así como un procedimiento normalizado para su medición. Para 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 de las mallas de alambre soldado. La norma ASTM-A-82 (2001) utiliza únicamente el parámetro de la reducción de área y la prueba de doblado (excluye al alargamiento).
4. Es importante recordar que la deformación última, ε_u (fig 5.1), es probablemente el parámetro más adecuado para caracterizar la ductilidad con fines de desempeño sísmico.
5. En el caso de continuar utilizando el parámetro del alargamiento en la norma NMX-B-253 (2006), es estrictamente necesario incluir la referencia directa a la norma ASTM-A-370 (2009), con la finalidad de evitar malas interpretaciones de la prueba, por ejemplo, en el caso de Marcelino (2004).

6. A partir de una revisión exhaustiva de las normas ASTM-A-82 (2001), anteriores y posteriores a la versión del año 2001, se verificó que desde 1960 hasta 2007, las normas ASTM no utilizan el procedimiento de estimación del alargamiento que se utiliza en la norma mexicana vigente NMX-B-253 (2006). Con base en lo anterior y en las observaciones de este y otros estudios experimentales, se recomienda omitir la prueba de alargamiento en la caracterización de mallas de alambre soldado y, conservar las pruebas de reducción de área y de doblado.
7. Aunado a lo anterior, se sugiere que las normas mexicanas estipulen el requisito de verificar el valor del parámetro de deformación última, ε_u . Se sugiere que el percentil 10 (P10) de los resultados experimentales sea mayor o igual a 2.5%, tal como lo señala la norma británica BS-4449 (2005) o bien, solicitar el cumplimiento de los valores señalados por CEN (2004) (tabla 6.3).
8. La recomendación planteada en el punto anterior promoverá el desarrollo de una extensa base de datos de curvas esfuerzo-deformación, alimentada de forma simultánea con los datos experimentales de varios laboratorios. La información de la base de datos permitirá estudiar exhaustivamente el efecto de la ductilidad de las mallas de alambre soldado, sobre el comportamiento de elementos de concreto reforzado.
9. Se propone que las normas mexicanas correspondientes incluyan los siguientes lineamientos:
 - a) Especificar la utilización de las mordazas tipo Templin para prevenir el deslizamiento de las probetas y garantizar la transmisión de fuerza desde la máquina de ensaye hasta las probetas. En la investigación se utilizaron seis tipos de mordazas y éstas resultaron ser las más adecuadas.
 - b) Señalar las interferencias que se pueden presentar con los extensómetros comúnmente utilizados y, especificar o referenciar procedimientos y/o mecanismos para evitar dichas interferencias no deseadas.
 - c) Especificar que para la obtención de las curvas esfuerzo-deformación, se debe obtener el promedio de los valores de deformación obtenidos en por lo menos tres segmentos de la probeta. Lo anterior, tomando en cuenta que la flexibilidad del alambre se altera tras el proceso de soldado (fig 6.6).

7.5 Recomendaciones para futuros estudios

1. El impulso de un estudio con mayor número de ensayos a tensión permitirá conocer y caracterizar estadísticamente la producción de la ZMCM. Esta base de datos resultará significativamente útil para que los diseñadores y constructores tengan una mejor estimación del comportamiento real de elementos de concreto reforzados utilizando mallas de alambre soldado. Es importante señalar que, de acuerdo con el tamaño de la muestra que especifica la norma vigente, la ejecución de un análisis estadístico exhaustivo de la producción, es responsabilidad exclusiva de los fabricantes de las mallas.
2. Se observó que algunas mallas se deslizaban continuamente en las mordazas durante la prueba a tensión. Para ensayar estos alambres, fue necesario generar llaves de cortante en los especímenes utilizando pequeños puntos de soldadura. Esta situación plantea la necesidad de revisar, en un sondeo futuro, las características de las corrugaciones conforme a las normas mexicanas correspondientes. Es muy importante verificar estas características, pues la adherencia de las mallas al concreto depende, en gran medida, de dichas corrugaciones.
3. En caso de continuar solicitando los resultados de la prueba de alargamiento, se debe llevar a cabo un programa experimental con probetas suficientes, de tal manera que sea posible calcular el alargamiento siguiendo los lineamientos de la norma ASTM-A-370 (2009). Teniendo en cuenta que el sitio de falla no siempre resulta apropiado para tomar mediciones de acuerdo con dicha norma, se considera que esta metodología no se puede utilizar de forma efectiva en la determinación del alargamiento a partir del número de probetas que se emplean en casos reales.
4. Se recomienda utilizar celdas de carga con las capacidades que se muestran en la tabla 7.1. Las celdas de carga con las características señaladas, permitirán obtener valores más confiables y menos dispersos de las cargas experimentales.

TABLA 7.1 CAPACIDAD DE LAS CELDAS DE CARGA
RECOMENDADAS PARA ENSAYAR ALAMBRES

Calibre	Capacidad máxima de celdas de carga (kN)
4	50
6	30
8	20
10	15

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 acero de refuerzo necesario. Sin embargo, hasta que no se implementen medidas que garanticen el cumplimiento de todas las características estipuladas en las normas correspondientes, se recomienda revisar los parámetros de diseño estructural asociados a los factores de seguridad estipulados en NTC-C (2004) y NTC-M (2004), para elementos de concreto reforzados con malla de alambre soldado, tal como se justifica y propone en Carrillo (2010).

8. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del personal del Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM, durante la realización de los ensayos. En especial, al técnico Raymundo Mondragón Colín y al ingeniero Eddy Grandry Carrien.

9. REFERENCIAS

- Ali-Mirza, S, y Mac Gregor, J (1981), Stength and ductility of concrete slabs reinforced with welded wire fabric, *American Concrete Institute Journal*, **78**(5), 374-376
- ASTM-A-82 (2001), *Standard specification for steel wire, slain, for concrete reinforcement*, American Society of Testing Materials, Philadelphia, EUA
- ASTM-A-370 (2009), *Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products*, American Society of Testing Materials, Philadelphia, EUA
- Bachmann, H (2000), Problems relevant to poor ductility properties of european reinforcing steel, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, International Association for Earthquake Engineering, Auckland, Nueva Zelanda, 1-9
- Bartolomé, A, Muñoz, A, y Madalengoitia, F (2008), Comportamiento a fuerza cortante de muretes de concreto reforzados con malla electrosoldada, acero dúctil y fibras metálicas, *Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil*, Colegio de Ingenieros del Perú, Arequipa, Arequipa, Perú, 1-10
- BS-4449 (2005), Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel - Bar, coil and decoiled product, *British standards*, Londres, Reino Unido
- Carrillo, J (2010), Evaluación del comportamiento al cortante de muros de concreto para vivienda por medio de ensayos dinámicos, tesis de doctorado, posgrado FI, UNAM, México, DF
- COFEMER (2006), www.apps.cofemer.gob.mx/expediente/v99/03.1195.140606.4.pdf, visitada 2 de enero, 2008, publicada 7 de julio, 2006
- Dove, AB (1983), Some observations on the physical properties of wire for plain and deformed welded wire fabric, *American Concrete Institute Journal*, **80**(5), 424-429

- EC-2 (1992), *Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings* (Eurocódigo 2), EN-1992-1-1, European Committee of Normalization, Bruselas, Bélgica
- Flores, L (2003), Evaluación experimental de marcos con muro diafragma de bloque reforzados con recubrimiento de concreto, tesis maestría, *Posgrado en Ingeniería*, UNAM, México, DF, 121 pp
- Gere, J (2006), *Mecánica de materiales*, Ed Thomson, 6a ed, México, DF, 940 pp
- Marcelino, J (2004), Comportamiento ante cargas laterales de muros de tabicón de concreto rehabilitados con malla de alambre soldado y recubrimiento de mortero, tesis de maestría, *Facultad de Ingeniería*, UNAM, México, DF, 99 pp
- Meli, R (2008), *Diseño estructural*, Ed Limusa–Noriega, 2da Ed, México, DF, 596 pp
- NMX-B-172 (1988), *Métodos de prueba mecánicos para productos de acero*, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Dirección General de Normas, México, DF
- NMX-B-253 (2006), *Industria siderúrgica–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, DF
- NMX-B-290 (2006), *Industria siderúrgica–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, DF
- NSR-98 (1998), *Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente–Título C concreto estructural*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, Bogotá, Colombia
- NTC-C (2004), Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, Gaceta Oficial del Distrito Federal, *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, México, DF
- NTC-M (2004), Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, Gaceta Oficial del Distrito Federal, *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, México, DF
- Restrepo, J (1996), Seismic behavior of connections between concrete precast elements, *University of Canterbury, Department of Civil Engineering*, research report 93-03, Christchurch, Nueva Zelanda, 385 pp
- Rico, A, Carrillo, J, y Alcocer, S (2010), Estudio experimental de las propiedades a tensión de la malla de alambre soldado disponible en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, *Memorias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato, México, 1-13

- Riva, P, y Franchi, A (2001), Behavior of reinforced concrete walls with welded wire mesh subjected to cyclic loading, *American Concrete Institute Structural Journal*, **98**(3), 324-334
- Rodríguez, M, y Botero, J (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, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, DF, 48 pp.

Este texto está gratuitamente disponible para consulta e impresión (archivo PDF de 1479 KB), en el portal electrónico del II UNAM, <http://www.iingen.unam.mx>, sección de Publicaciones, desde el 24 de mayo, 2011.

El cuidado de la edición estuvo a cargo de Olivia Gómez Mora, del la Unidad de Promoción y Comunicación del II UNAM.

