

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A COMPRESIÓN DE PANELES ESTRUCTURALES PREFABRICADOS DE FERROCEMENTO

Analysis of the Mechanical Compressive Behavior of Prefabricated
Ferrocement Structural Panels

Emmanuel Valencia Jiménez ^{1*}, Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández ¹
Iván Fermín Arjona Catzim¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
emmanuelvalenciaj@gmail.com*

RESUMEN

El ferrocemento es una forma de concreto armado que utiliza capas múltiples de mallas formadas por varillas de pequeño diámetro completamente infiltradas con mortero, encapsuladas en mortero, o ambas. Las aplicaciones del ferrocemento son numerosas, especialmente en estructuras o componentes estructurales donde se requiere autoayuda o bajo nivel de habilidades [1]. Este trabajo presenta los resultados de una investigación orientada a estudiar el comportamiento mecánico de paneles estructurales prefabricados de ferrocemento. Se elaboraron y ensayaron paneles cuadrados de ferrocemento de 60 centímetros de lado y 80 milímetros de espesor, con malla electrosoldada y mortero estructural, para proporcionar una solución a la problemática de vivienda que tiene el país. Las probetas fallaron a compresión uniaxial bajo carga uniforme aplicada a través de una máquina universal. En resumen, los paneles presentan una resistencia a compresión del orden de 55 kg/cm^2 , tienen una buena resistencia al agrietamiento, y representan una opción constructiva económica y estructuralmente viable.

Palabras clave: panel estructural, ferrocemento, muro, vivienda, compresión

ABSTRACT

Ferrocement is a form of reinforced concrete that uses multiple layers of meshes made out of small diameter rods completely infiltrated with mortar, encapsulated in mortar, or both. Applications for ferrocement are numerous, especially in structures or structural components where self-help or low skill level is required [1]. This work presents the results of a research oriented to study the mechanical behavior of prefabricated structural ferrocement panels. Square ferrocement panels of 60 centimeters side and 80 millimeters thick, with electrowelded mesh and structural mortar were elaborated and tested to

provide a solution to the housing problems of the country. The specimens failed under uniaxial compression of uniform load applied through a universal machine. In summary, the panels present a resistance to compression in the order of 55 kg/cm^2 , have a good resistance to cracking, and represent an economic and structurally viable constructive option.

Keywords: structural panel, ferrocement, walls, housing, compression

INTRODUCCIÓN

En la construcción con elementos prefabricados, los miembros estructurales son elaborados fácilmente, transportados a la estructura en sitio y se colocan de manera rápida. El ferrocemento es una forma de concreto armado que difiere del concreto pretensado convencional principalmente por la forma en que se dispersan y disponen los elementos de refuerzo [2]: el ferrocemento tiene propiedades ortotrópicas homogéneas en dos direcciones y presenta una alta resistencia a la tracción, un alto módulo de ruptura y un rendimiento de agrietamiento superior. Además, debido a las altas superficies específicas de las mallas de ferrocemento, se desarrollan mayores fuerzas de unión con la matriz, lo que resulta en un menor espaciamiento y anchura de las grietas [3].

Como un compuesto laminado, el ferrocemento sufre a menudo de desprendimiento severo de la cubierta de la matriz y de delaminación de la capa de tensión extrema en el alto cociente del refuerzo, lo que tiene por resultado la falla prematura. Por lo tanto, el diseño del compuesto estaría controlado por su utilidad y no por su resistencia [4].

En países del tercer mundo donde la demanda de vivienda de bajo costo es muy alta, el ferrocemento se ha utilizado como una alternativa eficaz que, por una parte, ofrece viviendas durables y de buena calidad y, por otro lado, ofrece un sistema constructivo con base en mano de obra intensiva no calificada.



Esta combinación hace del ferrocemento una solución apropiada para sociedades en vías de desarrollo que requieren de soluciones de generación de empleo y vivienda de bajo costo [5].

Por otro lado, existe una demanda significativa de materiales de construcción, como el cemento, acero, tabiques y agua, para satisfacer la demanda de vivienda e infraestructura.

La escasez y aumento de los costos de estos materiales llaman a buscar alternativas asequibles para cumplir con la demanda de vivienda, particularmente para el sector económico más débil [6].

De las investigaciones a nivel mundial, destaca la de Cherian *et al.* [6], donde se presentan los resultados de un experimento con paneles prefabricados de yeso reforzado con fibra de vidrio, parte de los resultados consistió en la obtención de un código de diseño estructural aprobado por la oficina de normas de la India.

A nivel nacional, las viviendas particulares con paredes en condiciones precarias van del 2.78 al 6.8 % en estados con alta marginación social (Fig. 1), lo que significa que sus habitantes viven en circunstancias inseguras.

Estados Unidos Mexicanos
Porcentaje de viviendas particulares habitadas con paredes precarias (Porcentaje), 2015



Figura 1. Porcentaje de viviendas particulares con paredes precarias [7].

Gran parte de las investigaciones sobre paneles estructurales desarrolladas en México han tenido resultados positivos, sobre todo en lo que respecta a resistencia de cargas axiales y cargas laterales; por ejemplo, los sistemas mencionados en [8] y [9], implementados en modelos a escala real, manifiestan un comportamiento estructural óptimo para su aplicación en la construcción de viviendas; sin embargo, estos materiales prefabricados carecen de la aprobación de toda norma vigente en México para su producción con su función estructural.

Las tesis [10], [11] y [12] de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro demuestran que paneles elaborados con ferrocemento celular ecológico pueden soportar cargas a compresión del orden de 70 kg/cm², y además poseen propiedades acústicas y térmicas adecuadas.

Existen nuevos sistemas constructivos industrializados a base de paneles formados por láminas con alma de poliuretano, panel W, tablarroca, etc., que son normalmente explotados por las empresas constructoras para la producción masiva de viviendas.

Esto genera una incógnita debido a que el uso de estos materiales puede o no ser viable, por lo que es necesario desarrollar nuevos productos que cumplan con lo establecido en las normativas y manuales de construcción vigentes y, además, sean capaces de competir con los materiales de construcción tradicionales.

El estudio que se expone en el presente trabajo de investigación comprende el comportamiento mecánico debido a una carga uniformemente distribuida en paneles de ferrocemento para su posible aplicación como muros estructurales.

Se espera que los resultados obtenidos sirvan como una herramienta base para el futuro desarrollo de estudios realizados de paneles estructurales de ferrocemento con el fin de demostrar una de las propiedades de este material.

MATERIALES

El programa de investigación fue diseñado para estudiar la respuesta a compresión de paneles prefabricados de ferrocemento a través del uso de un mortero dosificado con una relación de agua – cemento de 0.425 y un peso volumétrico de 1985.95 kg/m³, reforzado con una malla cuadrada electrosoldada galvanizada de 50 × 50 mm con un límite elástico (fy) de 4 550.00 kg/cm².

Un total de 5 paneles de ferrocemento con dimensiones de 600 × 600 × 80 mm fueron sometidos a pruebas de compresión.

La variable experimental es el tipo de mezcla para la elaboración de los especímenes.

El comportamiento estructural observado a lo largo de la investigación fue la respuesta de cada uno de los paneles ante la aplicación de una carga uniformemente distribuida, su deformación correspondiente, la aparición de la primera grieta y las fisuras totales en cada uno de los especímenes.

Agregado fino

El agregado fino usado en la matriz de mortero tuvo las siguientes características:

- El agregado fino cumple con la restricción de tener menos del 5 % de agregado grueso [13].
- El peso relativo específico es de 2.0919.
- Módulo de finura de 2.62 y cumple con la normativa de acuerdo con [13].
- Porcentaje de absorción de 10.7 %.
- La humedad inicial de la arena fue de 5.41 %.

La granulometría del agregado fino se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Granulometría de agregado fino.

Número de malla	Retenidos (g)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Pasa
4	0	0	0	100
16	167.60	38.41	38.41	61.58
30	32.40	7.42	45.83	54.15
50	165.50	37.93	83.76	16.22
100	47.50	10.88	94.64	5.34
200	23.30	5.34	99.98	0
Suma	436.30			
Charola	17			
Suma	453.30			

El tamaño de agregado cumple, además, con los rangos límites deseables estipulados en [14].

Cemento

Se utilizó cemento Portland CPC 30R RS de la marca Cruz Azul, el cual cumple con las especificaciones de la norma mexicana NMX-X-414 ONNCCE y la norma norteamericana ASTM C-595.

Agua

El agua es el componente que se utiliza para generar las reacciones químicas en los cementantes del mortero de cemento Portland. Para la elaboración de la matriz del mortero se utilizó agua potable, es decir, sus características químicas y físicas la hacen útil para consumo humano [13].

Acero de refuerzo

Se colocó una capa de malla cuadrada (500 x 500 mm) electrosoldada galvanizada con un diámetro de alambre de 2 mm y con 50 mm de espaciamiento entre cada fibra como refuerzo interno para cada uno de los paneles de ferrocemento.



La malla se colocó en un marco fabricado con un segmento de varilla de 3/8", con un f_y de 4 200.00 kg/cm².

La fracción de volumen de refuerzo de la malla se obtuvo con la Ec. (1).

$$Vr = \frac{N \pi d_w^2}{2 h D_L} \quad (1)$$

Donde N es el número de capas de malla, d_w es el diámetro del alambre de la malla de refuerzo (mm), h es el espesor del elemento de ferrocemento (mm), y D_L es el espaciamiento entre los alambres de la malla (mm).

$$Vr = \frac{1 \times \pi \times 2^2}{2 \times 80 \times 50} = 0.00157 \text{ o } 0.15\%$$

Cimbra

La cimbra consistió en un molde cuadrado (Fig. 2) fabricado con triplay BC elaborado de chapas de madera de pino radiata, colocadas en forma perpendicular en el sentido de las fibras para obtener un tablero de alta resistencia.

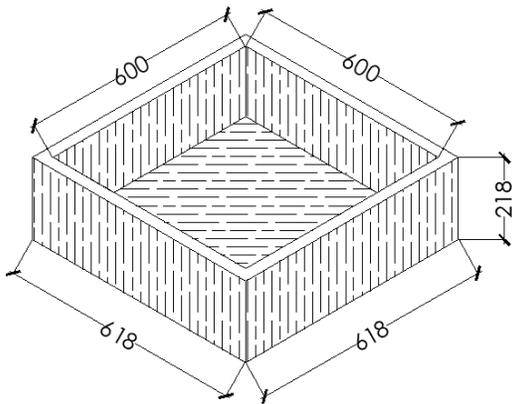


Figura 2. Dimensiones internas y externas del molde de triplay usado como cimbra.

Mezcla de mortero

Se diseñó un mortero de resistencias objetivo de 45 kg/cm² y 50 kg/cm². Las proporciones de cada uno de los materiales se resumen en la Tabla 2 según las siguientes relaciones:

- Relación en peso de agregado/cemento de 2.4
- Relación en peso de agua/cemento de 0.42 y 0.49

Dosificación de materiales

Tabla 2. Materiales para elaboración de morteros.

Proporción de materiales para mortero			
Mezcla	Arena (kg)	Cemento (kg)	Agua (l)
Mortero 1	35.62	14.40	6.12
Mortero 2	35.62	14.40	7.12

Para obtener las propiedades mecánicas a compresión de los paneles, los ensayos fueron realizados con base en la norma mexicana [15].

Máquina de ensayo

Las pruebas a compresión se realizaron en una máquina Forney Testing Machines, modelo LT-1150, con capacidad de 150 toneladas, ubicada en el laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (Fig. 3).



Figura 3. Máquina universal utilizada para realizar las pruebas de compresión en paneles.

MÉTODOS

La metodología con la que se llevó a cabo la investigación fue de tipo cuantitativa y con un diseño experimental, dentro de la línea de investigación enfocada a la modelación analítica y experimental de sistemas físicos. Para la elaboración del ferrocemento se utilizó [3] como referencia, de acuerdo con lo establecido en el apartado de la guía práctica de diseño.

Mezcla de mortero

Cada lote de mortero fue elaborado usando una revolvedora Pretul RECE-160P de cemento de uso ligero a gasolina. Se colocó inicialmente el cemento Portland y la arena a una velocidad baja por un lapso de tiempo de tres minutos y posteriormente se añadió el agua. Los periodos de mezclado se llevaron a cabo de acuerdo a los estándares prescritos en [16].

Elaboración de los especímenes de prueba

La malla se colocó con ayuda de silletas de plástico a una distancia de 40 mm del paño inferior (Fig. 4), de tal manera que se posicionó a la mitad del espesor del panel de ferrocemento; además, el recubrimiento para el acero de refuerzo fue de 50 mm. Una cantidad de mortero fresco se vació en el molde en dos capas hasta cubrir el espesor deseado, cada capa de mortero se vibró con una varilla punta de bala para reducir la cantidad de aire dentro del panel. Del mortero uno se obtuvieron tres paneles, y del mortero dos únicamente un par de especímenes. Los paneles elaborados (Fig. 5) fueron descimbrados y curados después de 24 horas en un cuarto con humedad constante por 28 días para evitar en lo posible la pérdida de agua.

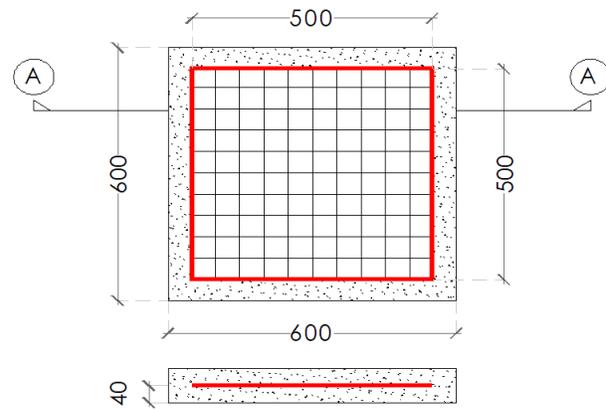


Figura 4. Detalles del acero de refuerzo usado, vista en planta y sección A-A.



Figura 5. Proceso de elaboración de paneles.



Ensaye

Estado de esfuerzos

Para las componentes usadas en la prueba, el estado de carga aplicado fue de tipo uniaxial a compresión. Se aplicó una carga de manera distribuida en las probetas transmitida en la dirección del eje z (Fig. 6).

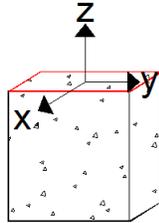


Figura 6. Dirección y área de aplicación de fuerza en componentes.

La configuración e instrumentación de la prueba de compresión de los paneles conforme a [15] se muestra en la Fig. 7 y el esquema de la aplicación y distribución de carga se presenta en la Fig. 8. Se aplicó una carga de compresión a las probetas mediante la máquina universal automatizada, la carga fue monitoreada por un laboratorista del área. La carga uniforme P (kN) fue aplicada de manera constante y reportada en intervalos de cinco kN. Mientras tanto, el monitoreo de la deformación de cada panel se realizó desde la parte superior de la máquina universal con un micrómetro electrónico desde el inicio de la carga de compresión. Para cada incremento de carga P , se registró el valor que arroja el micrómetro. Por medio de la Ec. (2) se calculó el esfuerzo en los paneles de ferrocemento, los datos fueron procesados en una hoja de cálculo.

$$\sigma = \frac{P \cdot 100}{A} \quad (2)$$

Dónde P es la carga en kN y A es el área en cm^2 .



Figura 7. Configuración de la prueba de compresión en la máquina universal.

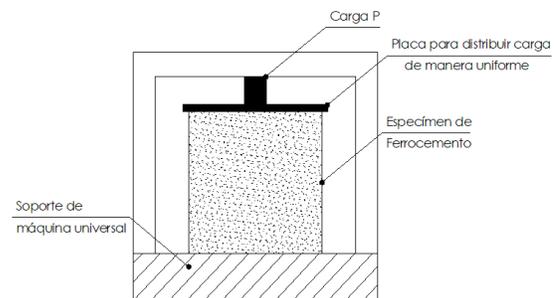


Figura 8. Diagrama esquemático de aplicación de carga y soporte en el panel de ferrocemento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Compresión

Los resultados del ensayo a compresión se discuten con referencia a la Fig. 11, donde se graficó el esfuerzo y la deformación de los paneles de ferrocemento; además, se discute la aparición de grietas en los paneles y el tipo de falla.

Es muy poco probable que los elementos de concreto armado se encuentren sujetos a cargas puras de compresión; debido a que las estructuras son continuas, la carga axial actúa simultáneamente con momento flexionante.

En el caso de los paneles, las cargas de compresión se distribuyeron en el área transversal de la sección; de acuerdo con el patrón de agrietamiento, la falla de los espe-

címenes fue por compresión en el lado más esforzado. Cuando se aplica una carga axial, la deformación unitaria a compresión es igual sobre toda la sección transversal y es la misma en los materiales que conforman los especímenes.

De las dos mezclas elaboradas podemos observar que la resistencia a compresión es de un orden similar (55 kg/cm^2), con la diferencia de que los especímenes de prueba FP-2, FP-3 y FP-4 (mortero 1) alcanzaron una deformación unitaria menor (0.0025) que los especímenes FP-1 y FP-5 (mortero 2). [15] establece que los paneles estructurales para uso en muros deben ser capaces de resistir un esfuerzo mínimo axial a la compresión de 0.49 MPa (5 kg/cm^2): los paneles sobrepasan este valor considerablemente.

Las curvas representativas de esfuerzo-deformación unitaria muestran que los dos tipos de mezcla tienen un comportamiento

similar en los paneles probados debido a su homogeneidad. El modo de falla de los paneles de ferrocemento (Fig. 9) es similar en todos los casos: se presentó una grieta longitudinal de aproximadamente 1.5 mm de espesor (típico de una falla a compresión) desde la parte superior del panel hasta la parte inferior; al mismo tiempo, se pudo observar agrietamiento en la línea donde se colocó el acero de refuerzo, la cual pudo ser ocasionada por la falta de adherencia entre el refuerzo y el mortero.

De los dos lotes de morteros podemos observar el comportamiento respecto a la deformación. En la Fig. 11 se aprecia que el lote de mortero dos tuvo una deformación mayor que los paneles elaborados con el mortero uno.

Al final de cada ensayo se examinaron y marcaron las grietas que aparecieron en cada una de las probetas.



Figura 9. Grietas y modos de falla presentados en paneles de ferrocemento.

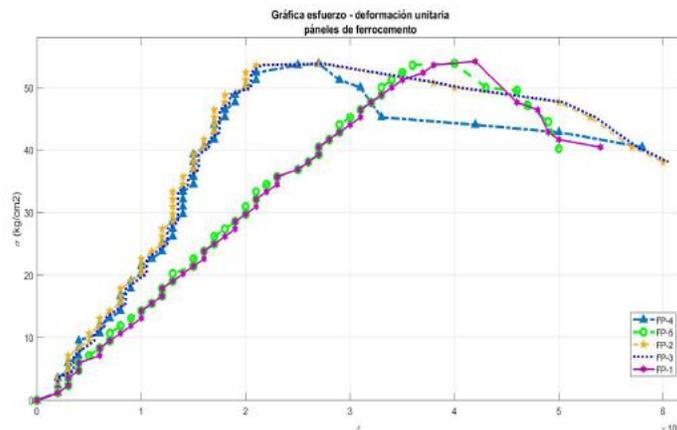


Figura 10. Gráfica de esfuerzo – deformación de los paneles estructurales.



CONCLUSIONES

Del análisis del comportamiento mecánico a compresión de los paneles de ferrocemento y los resultados obtenidos en la presente investigación, se derivan las siguientes recomendaciones y conclusiones.

1. De acuerdo con [15], los paneles probados en la presente investigación cumplen con la restricción de soportar la carga mínima a compresión de dicha norma.
2. Todos los paneles de ferrocemento fallaron por compresión según los modos de falla observados en las probetas.
3. La resistencia a la compresión y la capacidad de deformación de una matriz de mortero de alta resistencia no se utilizó completamente para el panel de ferrocemento debido a que la normativa vigente no demanda un valor elevado para este tipo de elementos estructurales.
4. Se deben realizar pruebas de impacto y de resistencia al fuego en los paneles de ferrocemento para determinar con mayor certeza que pueden ser usados como elementos de carga en muros de vivienda.
5. La recomendación de usar ferrocemento en viviendas de escasos recursos puede ser adecuada si se realiza un estudio económico detallado.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece fundamentalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haber provisto los fondos necesarios para desarrollar esta investigación. Los autores agradecen al grupo de trabajo

de la Maestría en Ciencias línea terminal en Estructuras perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por haber hecho posible la realización de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] A. C. I. Committee 549, "549.1R-18: Design Guide for Ferrocement," Farmington Hills, Michigan, 2018.
- [2] A. C. I. Committee 549, "549R-18: Report on Ferrocement," Farmington Hills, Michigan, 2018.
- [3] A. Naaman, *Ferrocement & laminated cementitious composites*, 1st ed. Ann Arbor, Michigan: Techno Press 3000, 2000.
- [4] M. Jamal Shannag and T. Bin Ziyad, "Flexural response of ferrocement with fibrous cementitious matrices," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 6, pp. 1198–1205, 2007.
- [5] D. Bedoya Ruiz and D. Á. Betancur, "Comportamiento de viviendas de ferrocemento bajo cargas cíclicas.," *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 8, no. 15, pp. 37–46, 2009.
- [6] P. Cherian, S. Paul, S. R. G. Krishna, D. Menon, and A. Meher Prasad, "Mass Housing Using GFRG Panels: A Sustainable, Rapid and Affordable Solution," *J. Inst. Eng. Ser. A*, vol. 98, no. 1–2, pp. 95–100, 2017.
- [7] INEGI, "Banco de indicadores," 2015. [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?ind=6207019038#div-FV62070190386207019038%23D6207019038>. [Accessed: 09-Sep-2019].
- [8] D. V. Almada, F. Yeomans, C. Nungaray, and A. Elizondo, "Caracterización de concreto celular a base de espuma preformada," *Soc. Mex. Ing. Estructural*, no. 81, p. 13, 2006.
- [9] F. S. Yeomans, R. Reynoso, and J. J. Marín, "Sistemas de vivienda de rápida construcción," México, 2000.
- [10] F. Escamilla, "Análisis del comportamiento térmico estructural de paneles prefabricados de ferrocemento huecos para muros de casa habitación," Universidad Autónoma de Querétaro, 2016.

[11] C. Cobreros Rodríguez, "Paneles prefabricados termo-acústicos para vivienda industrializada a partir de paja de cereal y tierra estabilizada," Universidad Autónoma de Querétaro, 2015.

[12] Á. R. Ramírez Ortega, "Caracterización, desarrollo y aplicaciones de un ferrocemento celular ecológico," Universidad Autónoma de Querétaro, 2014.

[13] Instituto Mexicano del Transporte, CMT. Características de los materiales, no. 02. 2019.

[14] Unidad de apoyo técnico para el saneamiento básico del área rural, "Guía de construcción para estructuras de ferrocemento," Lima, 2003.

[15] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, Norma mexicana NMX-C-405-ONNCCE-2014. México, 2014, pp. 1–18.

[16] ASTM, "ASTM C305. Practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency," in *Annual Book of ASTM Standards*, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, 1994.