



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias (Estructuras)

Análisis del comportamiento mecánico a compresión de paneles estructurales prefabricados (Tipo I) de ferrocemento.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestro en Ciencias (Estructuras).

Presenta:
Ing. Emmanuel Valencia Jiménez

Dirigido por:
Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Presidente

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

M. en C. Luis Francisco Pérez Moreno
Suplente

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Junio de 2020
México

Darí­a todo lo que sé por la mitad de lo que ignoro.
(Descartes, René)

RESUMEN

El ferrocemento es una forma de concreto armado que utiliza capas múltiples de malla, 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. El objetivo del trabajo es analizar el comportamiento mecánico a compresión uniaxial de paneles estructurales de ferrocemento para su aplicación en sistemas constructivos. La investigación se realizó en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro y está orientada a estudiar el comportamiento mecánico de paneles estructurales prefabricados de ferrocemento. Se elaboraron y ensayaron paneles cuadrados de 60 centímetros de lado (80 milímetros de espesor) reforzados con malla electrosoldada galvanizada con separaciones de 50 mm. y mortero estructural, esto con el fin de proporcionar una solución a la problemática de vivienda que existe en el país. Las probetas fallaron a compresión uniaxial bajo carga uniforme aplicada a través de una máquina universal. Inicialmente los especímenes de prueba presentaron delaminación en las uniones con el material de refuerzo. En resumen, los paneles presentan una resistencia a compresión del orden de 55 kg/cm^2 , se tiene una buena resistencia al agrietamiento además de representar una opción constructiva económica y estructuralmente viable. Aunado a la experimentación con especímenes se realizó un análisis de un panel en el programa SAP2000; el elemento se diseñó con las dimensiones comerciales de prefabricados usados en casas de interés social. Los resultados muestran las zonas más esforzadas del elemento, así como los momentos y cortantes que se presentarían en una construcción sometida a las cargas de servicio. El material en cuestión sobrepasa la carga mínima establecida en la norma mexicana que rige este tipo de elementos (5 kg/cm^2) más sin embargo se requiere realizar pruebas adicionales para tener la certeza que puede ser usado de manera segura en la construcción.

(Palabras clave: panel estructural, ferrocemento, muro, vivienda, compresión axial)

SUMMARY

Ferrocement is a form of reinforced concrete that uses multiple layers of mesh, small diameter rods completely infiltrated with mortar, encapsulated in mortar, or both. Ferrocement applications are numerous, especially in structures or structural components where self-help or low skill level is required. The aim of this work is to analyse the mechanical behaviour of uniaxial compression of structural ferro-cement panels for their application in construction systems. The research was carried out at the Faculty of Engineering of the University Autonomous of Queretaro and it is oriented to study the mechanical behavior of prefabricated structural ferro-cement panels. Square panels of 60 centimeters side (80 millimeters thick) reinforced with electro-welded galvanized mesh with 50 mm. separations and structural mortar were elaborated and tested, this with the purpose of providing a solution to the housing problem that exists in the country. The specimens failed to uniaxial compression under uniform load applied through a universal machine. Initially the test specimens presented delamination in the joints with the reinforcement material. In summary, the panels present a compressive strength in the order of 55 kg/cm², have a good resistance to cracking in addition to representing an economical and structurally viable construction option. In addition to the experimentation with specimens, an analysis of a panel in the SAP2000 program was carried out; the element was designed with the commercial dimensions of prefabricated elements used in houses of social interest. The results show the most stressed areas of the element, as well as the moments and cuts that would occur in a construction subject to service loads. The material in question exceeds the minimum load established in the Mexican norm that governs this type of element (5 kg/cm²), however, additional tests are required to be sure that it can be used safely in construction.

(Key words: structural panel, ferrocement, wall, housing, axial compression)

A mis padres Evangelina Jiménez Ugalde y Fidel Valencia Gómez, porque todo lo que he logrado se lo debo a ellos.

A mi abuela Alejandra Gómez Valencia por ser el mejor ejemplo de vida.

A mi hermana Daniela Valencia Jiménez, por ayudarme a estructurar gran parte de esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por darme la oportunidad de llegar a cumplir una de mis metas, gracias a mi familia por ser la estructura de todos mis logros, gracias a todas las personas que he conocido a lo largo de mi vida, las cuales siempre me han aportado alguna enseñanza.

A mis padres Evangelina Jiménez Ugalde y Fidel Valencia Gómez:

Esta es una muestra de agradecimiento por todo su apoyo, esfuerzo, comprensión y amor que me han dado a lo largo de mi vida, gracias a Dios y a ustedes he culminado una etapa estudiantil más; reconozco toda su labor como familia para lograr siempre lo que nos proponemos.

A mi hermana Daniela Valencia Jiménez:

Gracias por todos los consejos y las revisiones de esta tesis eres una parte importante en la conclusión de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por convertirse en mi segundo hogar por más de seis años, a los maestros que me transmitieron conocimientos y experiencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento como becario durante estos dos años.

A mis compañeros de generación y amigos, Carlos Alberto Rivas Nieto, Iván Arjona Catzím y Esaú Gómez Islas por las anécdotas que compartimos a lo largo de la maestría.

A mis compañeros del cubículo de estructuras por su amistad y vivencias.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ANTECEDENTES.....	4
2.1	JUSTIFICACIÓN.....	12
3.	HIPÓTESIS.....	13
4.	OBJETIVOS.....	14
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	14
4.2	OBJETIVOS PARTICULARES.....	14
5.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	14
5.1	ELEMENTO ESTRUCTURAL.....	14
5.2	PROCESO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL PARA EL PANEL TIPO I.....	15
5.3	FERROCEMENTO.....	15
5.3.1	<i>Fracción de volumen de refuerzo.....</i>	<i>17</i>
5.3.2	<i>Volumen de refuerzo para cualquier tipo de malla.....</i>	<i>17</i>
5.4	SUPERFICIE ESPECÍFICA DE REFUERZO.....	18
5.5	DISEÑO DEL FERROCEMENTO.....	18
5.6	MURO.....	18
5.7	SISTEMA CONSTRUCTIVO.....	18
5.8	NMX-C-405-ONNCCE-2014.....	19
5.9	TIPOS DE PANELES ESTRUCTURALES.....	19
5.9.1	<i>Paneles.....</i>	<i>19</i>
5.9.2	<i>Paneles para uso estructural.....</i>	<i>19</i>
5.10	CLASIFICACIÓN.....	19
5.10.1	<i>Paneles para uso estructural simple.....</i>	<i>20</i>
5.10.2	<i>Paneles para uso estructural compuesto.....</i>	<i>20</i>
5.11	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	20
5.12	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	22
5.13	DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS.....	23
5.13.1	<i>Prueba de resistencia a compresión simple.....</i>	<i>23</i>

5.13.2	<i>Prueba de resistencia bajo carga lateral.</i>	24
5.13.3	<i>Prueba de resistencia al fuego.</i>	25
5.13.4	<i>Prueba de resistencia al impacto en muros.</i>	25
5.13.5	<i>Prueba de resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicular al plano.</i>	25
5.14	MATERIALES	26
5.14.1	<i>Agregado fino.</i>	27
5.14.2	<i>Peso volumétrico.</i>	27
5.14.3	<i>Cemento.</i>	33
5.14.4	<i>Agua.</i>	33
5.14.5	<i>Acero de refuerzo.</i>	33
5.14.6	<i>Cimbra.</i>	34
5.14.7	<i>Desmoldante.</i>	35
5.14.8	<i>Mezcla de mortero.</i>	35
5.14.9	<i>Máquina de ensaye.</i>	36
6.	METODOLOGÍA	37
6.1	MEZCLA DE MORTERO	39
6.2	ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA.	40
6.3	ENSAYE.	41
6.4	MODELACIÓN	43
6.4.1	<i>Discretización de elementos área – muro.</i>	44
6.4.2	<i>Asignación de apoyos.</i>	44
6.4.3	<i>Análisis.</i>	45
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
7.1	COMPRESIÓN.	45
7.2	MODELACIÓN.	47
8.	CONCLUSIONES	52
9.	REFERENCIAS	54
10.	APÉNDICE	58

10.1	GRÁFICAS ESFUERZO – DEFORMACIÓN UNITARIA DE LAS PROBETAS.	58
10.2	ARCHIVO FOTOGRÁFICO.	63

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de paneles conforme a su uso estructura (NMX-C-405-ONNCCE-2014).....	20
Tabla 2 Tamaño de muestra y dimensiones de las probetas para realizar los ensayos.	22
Tabla 3 Instrumentos necesarios para la realización de la investigación conforme al tipo de prueba.	22
Tabla 4 Peso volumétrico suelto de la arena.	29
Tabla 5 Peso volumétrico compacto de la arena.	29
Tabla 6 Granulometría de agregado fino.	31
Tabla 7 Proporción de materiales.	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Porcentaje de viviendas particulares con paredes en condiciones precarias (INEGI, 2015).....	1
Fig. 2 Reporte exposición de México a desastres naturales, (Moody's Investors Service, 2017).....	2
Fig. 3 Tienda de tabaco hecha de ferrocemento en Nervi Bologna, (ACI 549R-18, 2018).....	5
Fig. 4 Zarpeo de la estructura metálica de una Tecnocasa, (Yeomans <i>et al.</i> , 2000).	7
Fig. 5 Paneles expuestos a radiación térmica, (Escamilla, 2016).	10
Fig. 6 Familia del hormigón estructural y sus posibles combinaciones.	16
Fig. 7 Pruebas experimentales para los paneles Tipo I de acuerdo con la NMX-C-405-ONNCCE-2014.	21
Fig. 8 Representación del montaje de un panel tipo I para el ensayo de resistencia a compresión.	24
Fig. 9 Representación del montaje de un panel tipo I para el ensayo de resistencia a carga lateral.	24
Fig. 10 Representación del montaje de un panel tipo I para el ensayo de resistencia al impacto.	25
Fig. 11 Representación del montaje de un panel tipo I para el ensayo de resistencia a carga uniforme.	26
Fig. 12 Malla electrosoldada y contramarco.	33
Fig. 13 Dimensiones internas y externas del molde de triplay usado como cimbra.	34

Fig. 14 Molde utilizado para colar los especímenes del segundo lote.	34
Fig. 15 Aplicación de desmoldante.	35
Fig. 16 Máquina universal utilizada para realizar las pruebas de compresión en paneles.	36
Fig. 17 Instrumentación de la máquina universal para medir las deformaciones.	37
Fig. 18 Diagrama de flujo de la metodología utilizada en la investigación.	38
Fig. 19 Elaboración de la mezcla en revolvedora Pretul RECE-160P.	39
Fig. 20 Detalles del acero de refuerzo usado, vista en planta y sección A-A.	40
Fig. 21 Proceso de elaboración de paneles.	41
Fig. 22 Dirección y área de aplicación de fuerza en componentes.	41
Fig. 23 Configuración de la prueba de compresión en la máquina universal.	42
Fig. 24 Diagrama esquemático de aplicación de carga y soporte en el panel de ferrocemento.	43
Fig. 25 Modelo del panel de ferrocemento.	44
Fig. 26 Discretización del elemento área - muro.	44
Fig. 27 Asignación de apoyos.	45
Fig. 28 Grietas y modos de falla presentados en paneles de ferrocemento.	47
Fig. 29 Gráfica de esfuerzo – deformación de los paneles estructurales.	47
Fig. 30 Fuerzas directas a la membrana F11 y F22.	48
Fig. 31 Fuerza cortante a la membrana F12.	48
Fig. 32 Momentos de flexión, M11 y M22.	49

Fig. 33 Momento de torsión.	49
Fig. 34 Fuerza de cortante transversal de al panel, V13 y V23.	50
Fig. 35 Esfuerzos directos en el panel, S11 y S22.....	50
Fig. 36 Esfuerzo de corte en el panel S12.	51
Fig. 37 Esfuerzos de cortante transversal, S33.	51
Fig. 38 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-01.....	58
Fig. 39 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-02.....	58
Fig. 40 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-03.....	59
Fig. 41 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-04.....	59
Fig. 42 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-05.....	60
Fig. 43 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-06.....	60
Fig. 44 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-07.....	61
Fig. 45 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-08.....	61
Fig. 46 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-09.....	62
Fig. 47 Molde usado para la elaboración del lote uno de paneles.	63
Fig. 48 Molde usado para la elaboración del lote dos de paneles.	63
Fig. 49 Prueba de granulometría para agregado fino.	63
Fig. 50 Prueba de peso relativo específico.	63
Fig. 51 Elaboración de mezclas.	64
Fig. 52 Pruebas de compresión.	64

Fig. 53 Aplicación de desmoldante.	64
Fig. 54 Configuración de prueba.	64
Fig. 55 Aparición de las primeras grietas.	64
Fig. 56 Falla del espécimen.	64

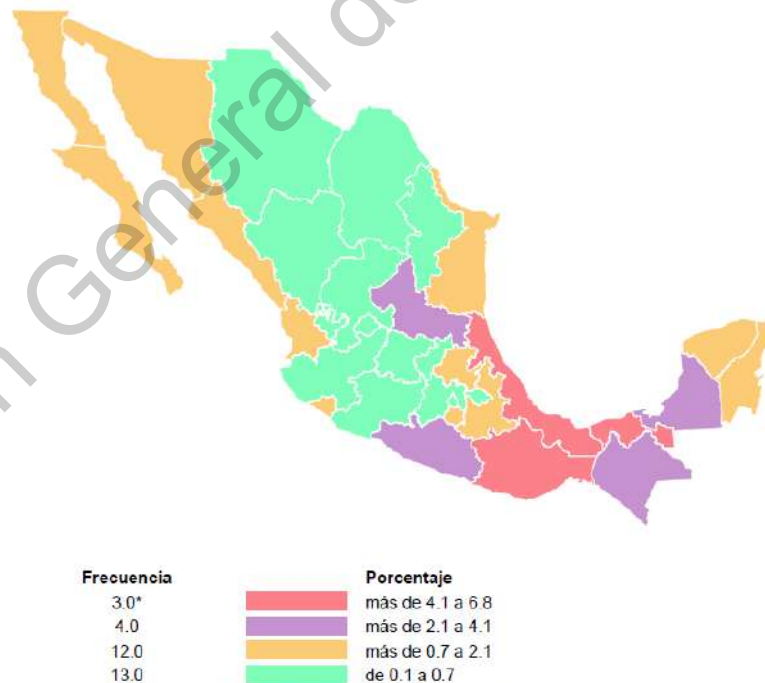
Dirección General de Bibliotecas UAQ

1. Introducción

La demanda de vivienda en México ha crecido considerablemente en los últimos años por lo que se hace necesaria la inversión en investigación para considerar nuevas opciones que permitan construir una mayor cantidad de viviendas, reducir el tiempo de construcción y el costo final del producto.

México padece de un déficit de vivienda el cual involucra factores que manifiestan un proceso estático en el ramo de la industria de la construcción; algunos de estos factores son los materiales que se usan tradicionalmente en la edificación de vivienda en serie.

A nivel nacional, en estados con alta marginación social, las viviendas particulares con paredes en condiciones precarias van del 2.1 al 6.8% (Fig. 1) lo que significa que las construcciones son inseguras.



*Unidades geográficas con valores que se alejan del resto. Ver más (/componentes/mapaTematico/doc/nota_cug.pdf)

Fig. 1 Porcentaje de viviendas particulares con paredes en condiciones precarias (INEGI, 2015).

Por otra parte, la posición geográfica de Los Estados Unidos Mexicanos favorece que constantemente se generen fenómenos naturales (Fig. 2), los cuales tienen como consecuencia la pérdida de miles de viviendas a lo largo del territorio nacional. Paralelamente, el crecimiento constante de la población aumenta la demanda de un hogar digno a bajo costo para cada familia mexicana, por lo tanto, este problema se convierte en una de las necesidades más importantes. Por lo antedicho surge la necesidad de desarrollar materiales que representen una alternativa en la construcción de casas de tipo habitación, que de manera sugestiva sea amigable con el medio ambiente y que ofrezca seguridad estructural.



Fig. 2 Reporte exposición de México a desastres naturales, (Moody's Investors Service, 2017).

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 vivienda de bajo costo y generación de empleo (Bedoya & Betancur, 2009). Por otro lado, existe una demanda significativa de materiales de construcción como el cemento, acero, tabique de arcilla y agua para satisfacer la demanda de vivienda e infraestructura.

La escasez y aumento de los costos de estos materiales llaman por alternativas asequibles para cumplir con la demanda de vivienda, particularmente para la sociedad económica más débil (Cherian *et al.*, 2017). En un contexto global donde la necesidad de una vivienda de calidad aumenta con un mejor nivel de vida y una población en crecimiento, la sobreexplotación de los recursos naturales como los materiales de construcción se está convirtiendo en un problema grave.

El presente trabajo de investigación se estructura en temas esquematizados por capítulos. El primer capítulo es una introducción del tema de estudio donde se describe la problemática y la importancia del desarrollo de la investigación.

En el capítulo dos se mencionan los antecedentes más relevantes relacionados con la problemática abordada; investigaciones científicas realizadas a nivel mundial y nacional de paneles prefabricados que han generado una alternativa en el ramo de la construcción. Se muestra una comparativa de los productos y paneles prefabricados que han demostrado buen comportamiento estructural, son de rápida construcción y económicamente competitivos con los productos convencionales.

El capítulo tres corresponde a la hipótesis de la investigación.

El capítulo cuatro menciona los objetivos general y particulares.

El capítulo cinco contiene los criterios de diseño, normativa vigente en México para paneles prefabricados con fines estructurales, proceso constructivo de las componentes, las limitaciones del proyecto, además de las pruebas realizadas a los materiales utilizados para la elaboración de los elementos de prueba (Ver Anexo 10.2).

En el capítulo seis se describe la metodología desarrollada en la investigación en sus distintas etapas para alcanzar los objetivos particulares.

En el capítulo siete se exponen los resultados a los que se llegaron, de igual manera se realizó una discusión de los mismos.

El capítulo ocho corresponde a las conclusiones de la investigación de acuerdo con los objetivos planteados.

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 desarrollo futuro de estudios realizados de paneles estructurales de ferrocemento con el fin de demostrar una de las propiedades de este material.

2. Antecedentes

El ferrocemento es una forma de concreto armado que difiere del concreto armado o pretensado convencional principalmente por la forma en que se dispersan y disponen los elementos de refuerzo (A. C. I. Committee 549, 2018a). Comparado con el concreto armado, el ferrocemento tiene propiedades ortotrópicas homogéneas en dos direcciones. 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 (A. Naaman, 2000).

Los componentes básicos de la matriz de ferrocemento son arena, material cementante y agua (Fig. 3). El tipo de arena puede variar dependiendo de si la matriz se aplica a mano o a máquina, aunque normalmente se trata de arena manufacturada que pasa por un tamiz No. 8 (2.36 mm). El material cementante puede ser de cualquier grado reconocido, aunque el cemento Portland ordinario es el más utilizado. El agua debe ser potable (A. C. I. Committee 549, 2018b).

Una de las desventajas del ferrocemento como un compuesto laminado, es que 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 dando por resultado la falla prematura. Por lo tanto, el diseño del compuesto estaría controlado por su utilidad y no por su resistencia (Jamal Shannag & Ziyad, 2007).



Fig. 3 Tienda de tabaco hecha de ferrocemento en Nervi Bologna, (ACI 549R-18, 2018).

En la construcción con elementos prefabricados, los miembros estructurales son elaborados fácilmente, transportados a la estructura en sitio y se colocan de manera rápida. De las investigaciones sobre prefabricados que más impacto han generado en la sociedad destaca la de Cherian *et al.* (2017) la cual fue desarrollada con el fin de reducir el uso de energía intensiva de los materiales de construcción, crear unidades de vivienda económicas y de forma rápida. Los autores recomiendan la construcción con módulos prefabricados, ya que reducen considerablemente el tiempo de construcción de las viviendas en serie. Como resultado de esta investigación se obtuvo un código de diseño estructural aprobado por la oficina de normas de la India.

En los últimos años se ha evidenciado notoriamente la aplicación de nuevos métodos constructivos aplicados a diferentes elementos estructurales cambiando la

perspectiva del sector de la construcción hacia la innovación (Atamba & Cuaical, 2018).

En el contexto internacional los muros de paneles estructurales han incrementado considerablemente, esto debido a las grandes ventajas que pueden ofrecer como por ejemplo su bajo costo, su gran capacidad de carga, uso conveniente, y propiedades térmicas (Wang *et al.*, 2018). Dentro de su investigación, un nuevo tipo de panel de pared sándwich con piel GFRP y un núcleo de espuma web se desarrolló usando un proceso de infusión de resina. Estos paneles tenían las características de gran resistencia axial y rigidez, peso ligero, y construcción simple. Los resultados experimentales muestran que, en comparación con los paneles sándwich normales con núcleo de espuma, se logró un aumento máximo de aproximadamente 142% en la fuerza axial máxima, esto se puede lograr debido a la presencia de refuerzo de fibras de vidrio.

En la investigación de Bedoya & Betancur (2009), determinaron que los módulos prefabricados de ferrocemento presentaron buena capacidad para resistir cargas cíclicas. El comportamiento característico exhibido por las viviendas de ferrocemento fue a flexión. En general, los módulos de ferrocemento presentaron una adecuada capacidad para disipar energía; estos exhibieron mejores características de disipación de energía que algunos sistemas construidos con materiales convencionales.

Por otra parte, 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 (Almada *et al.*, 2006) y (Yeomans *et al.* 2000), los cuales fueron implementados en modelos a escala real, manifiestan un comportamiento estructural óptimo para su aplicación en sistemas constructivos relacionados con la vivienda; más sin embargo, ninguno de estos materiales prefabricados tiene la aprobación de alguna norma vigente en México para un prefabricado con su función

estructural. Esto genera una incógnita en el sector de la construcción debido a que la implementación de estos materiales puede, o no, ser viable.

Los sistemas constructivos Termodomo y Tecnocasa (Fig. 4) (Yeomans *et al.*, 2000), desarrollados en el Centro de Diseño y Construcción, ITESM Campus Monterrey poseen ventajas sobre sistemas tradicionales de construcción, en los siguientes aspectos:

- Control de calidad en los materiales empleados debido a que el acero utilizado puede certificarse desde la planta y la prefabricación de la estructura asegura su calidad.
- Facilidad de transporte de las piezas debido a su ligereza.
- Rapidez de construcción.
- Disminución de mano de obra en el proceso constructivo, lo que representa un ahorro en el costo total del inmueble.
- Confort debido a la utilización de un mortero térmico en su construcción.



Fig. 4 Zarpeo de la estructura metálica de una Tecnocasa, (Yeomans *et al.*, 2000).

La construcción y mejoramiento de los sistemas Termodomo y Tecnocasa ha permitido que la propuesta de vivienda no solamente sea aplicable a la reconstrucción de zonas afectadas por fenómenos naturales, sino también sea una opción factible en la solución al problema de vivienda social en México.

En (Almada *et al.*, 2006), respecto al concreto celular elaborado se determinó que el revenimiento para las mezclas D12 y D16 fue de 25 cm. Este alto revenimiento permite una mayor trabajabilidad durante el colado de piezas prefabricadas requiriendo un mínimo de vibrado. Almada *et al.* (2006) concluye que el concreto elaborado con espuma preformada es más económico que el concreto de peso normal y los otros tipos de concretos ligeros, ofreciendo además mayor ligereza y resistencia térmica. Por lo que representa una opción viable en la elaboración de paneles prefabricados.

Por su parte los sistemas constructivos Biopanel y Bambulosa (materiales prefabricados hechos de bambú) representan una alternativa, ya que tienen la capacidad de ser usados en gran parte del territorio mexicano considerando los efectos de diseño de sismo y viento, además representan una opción para reducir el impacto ambiental ya que están constituidos por materiales ecológicos (Queiros & Correa, 2016).

En el mercado nacional existen sistemas constructivos industrializados a base de paneles formados por láminas con alma de poliuretano, panel W, tablaroca, etc., que son normalmente explotados por las empresas constructoras para la producción masiva de vivienda. Esto genera una incógnita debido a que el uso de estos materiales puede, o no, ser viable por lo que es necesario desarrollar 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.

En el ámbito social, la situación económica del país origina recesiones periódicas en la industria de la construcción, con la consecuente repercusión en el

sector vivienda, encareciendo los costos de venta y aumentando el déficit existente en México (Yeomans *et al.*, 2000).

Desde hace décadas los constructores mexicanos han preferido los sistemas constructivos tradicionales de concreto convencional y de mampostería sobre técnicas nuevas que garantizan la misma seguridad estructural (Almada *et al.*, 2006). Concretamente los materiales que se han utilizado por siglos en la construcción, como lo son el block, tabique, rocas, entre otros, han sido causa de un anquilosamiento estructural producto de la poca investigación e implementación de nuevos materiales en sistemas constructivos.

En el contexto nacional, la construcción de vivienda ocurre en dos mercados: el formal y el informal. El primero sigue la normatividad especificada por los códigos de construcción vigentes y tiene transparencia legal. Las viviendas cuentan con servicios básicos, son registradas en el catastro local y adquiridas con financiamiento a largo plazo. En contraste el mercado informal no cumple con las ordenanzas legales, no paga impuestos, surge a través de canales informales y no es elegible para un financiamiento convencional a largo plazo (Yeomans *et al.*, 2000). En lo que refiere a las ordenanzas legales, es recurrente la violación a dichas normas, lo cual genera un grado de incertidumbre respecto a su uso en sistemas constructivos. Por citar un ejemplo, (Martínez & Yáñez, 2015) concluyen que ninguna de las piezas macizas de concreto ligero que evaluaron en su investigación en el municipio de Querétaro alcanzó el valor de resistencia a cortante sugerido por las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal del 2004 (Administración Pública del D.F., 2004), pero, a pesar de que las piezas por sí solas no cumplían con la resistencia mínima establecida, en conjunto, las piezas y el mortero de pega tuvieron un comportamiento superior al estipulado en las NTC-RCDF-2004.

La demanda de nuevas construcciones en México conlleva a la exploración y extracción excesiva de materiales no renovables para la elaboración de agregados.

Esto contribuye en gran medida a la degradación del ambiente y a la escasez de estos recursos además del alto impacto que genera el sector de la construcción en el medio ambiente (Rosado *et al.*, 2016), como resultado del uso estandarizado de sólo algunos materiales comerciales.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro las tesis (Escamilla, 2016), (Cobrerros, 2015) y (Ramírez, 2014) demuestran que paneles elaborados con ferrocemento celular ecológico pueden soportar cargas a compresión del orden de 70 kg/cm², además tienen buenas propiedades acústicas y térmicas.

En el trabajo realizado por Escamilla (2016), se analiza el comportamiento térmico – estructural de paneles prefabricados de ferrocemento para muros de casa-habitación (Fig. 5), el autor menciona que los paneles propuestos en la investigación son una alternativa sustentable y amigable al medio ambiente; además, concluye que la prueba térmica realizada a los paneles estructurales arrojó resultados positivos respecto al ahorro energético debido a la reducción del uso de sistemas de enfriamiento.



Fig. 5 Paneles expuestos a radiación térmica, (Escamilla, 2016).

Rosado *et al.* (2016), concluyen que la resistencia a la compresión del concreto con agregado reciclado disminuye generalmente con el aumento de contenido de agregado grueso reciclado. La deformación longitudinal del concreto para un mismo estado de carga aumenta con el porcentaje de agregado grueso reciclado. Cuando el porcentaje de sustitución del agregado reciclado es de 100%, la resistencia a la compresión se reduce hasta en un 20% y el módulo elástico se reduce hasta en un 46%.

En el tema económico de una vivienda de interés social, de acuerdo con el boletín de prensa emitido por la Sociedad Hipotecaria Federal (SHF) a inicios del 2018, los precios de una vivienda nueva en el ámbito nacional tuvieron un aumento de 9.26% respecto al mismo periodo del año anterior; esto representa un aumento considerable que reduce las posibilidades de adquirir una vivienda. Por esta razón es necesario implementar materiales de menor precio que disminuyan el costo final de una vivienda.

Como resultado de la escasez de vivienda, es necesario analizar los sistemas de construcción que se están desarrollando actualmente, así como los sistemas de construcción tradicionales.

Es por esto, que es necesario desarrollar productos que cumplan con lo establecido en las normativas y los manuales de construcción vigentes y así generar productos capaces de competir con los materiales de construcción tradicionales. Para lo cual se ha realizado una revisión del estado actual de la investigación sobre el diseño de paneles estructurales prefabricados.

Debido al déficit de vivienda que existe en el país aunado al incremento constante de los materiales convencionales usados en la industria de la construcción, se pretende proponer una opción de un material de construcción prefabricado (panel Tipo I), el cual cumplirá la función de un muro de tipo estructural.

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 desarrollo futuro de estudios realizados de paneles estructurales de ferrocemento con el fin de demostrar una de las propiedades de este material.

2.1 Justificación.

Datos de la Sociedad Hipotecaria Federal (2018) indican que el precio medio de una vivienda en México al segundo trimestre del 2018 es de \$815,934.00; por otra parte, datos del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) arrojan que 43.6% (53.4 millones de personas) de la población en México viven en situación de pobreza y 7.6% (9.4 millones de personas) viven en situación de pobreza extrema. Esto significa que adquirir una vivienda para este sector resulta sumamente difícil. Además, en Forbes México (2018) aseguran que 9 de cada 10 mexicanos desea adquirir una casa, pero 45% no tiene los recursos suficientes.

De acuerdo con la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) tan sólo en 2015, el sector de la construcción en México emitió 874 mil 420 toneladas en CO₂ y 4 toneladas de Carbono Negro. México es miembro fundador de la GABC y junto a otros 23 países y más de 72 organizaciones no gubernamentales, tiene el objetivo de construir edificios ecológicos, de baja emisión de carbono, eficientes en el consumo de energía y resistentes. Para lograrlo, es esencial que el sector de la construcción se encuentre en una trayectoria baja en carbono con nuevas y mejores políticas aplicables a las edificaciones y la construcción.

Por lo antedicho, surge el interés de analizar un material de tipo prefabricado que sea capaz de aprobar un ensaye establecido en la norma mexicana correspondiente. De esta manera se busca evaluar el comportamiento de un panel

estructural tipo I y determinar si cumple las restricciones de resistencia y deformación mínimas.

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 desarrollo futuro de paneles estructurales de ferrocemento con el fin de demostrar una de las propiedades de este material.

A través de la revisión teórica que se ha realizado, se puede concluir que los sistemas de construcción que se emplean actualmente están basados en el uso de materiales tradicionales. Contrario a la generación de nuevos productos, la sociedad mexicana continúa confiando en los materiales convencionales a pesar del incremento económico y la dudosa calidad de estos.

Los elementos desarrollados son implementados principalmente en países donde el peligro sísmico es latente, por ejemplo, México, India y algunos países de Sudamérica; además estos países son algunos de los más poblados a nivel mundial.

En definitiva, los investigadores de los artículos mencionados concuerdan en la importancia del diseño y aplicación de paneles estructurales prefabricados que beneficien al sector de la vivienda, siguiendo las normativas y reglamentos establecidos en cada región.

3. Hipótesis

Los paneles estructurales prefabricados de ferrocemento representan una opción como material de construcción de viviendas unifamiliares debido al buen comportamiento mecánico a compresión uniaxial de sus componentes.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general.

Analizar el comportamiento mecánico debido a la compresión uniaxial de paneles estructurales prefabricados de ferrocemento para su aplicación en sistemas constructivos.

4.2 Objetivos particulares.

- Caracterizar los agregados y materiales para el diseño de las mezclas.
- Elaborar los especímenes estructurales.
- Evaluar el comportamiento mecánico de los paneles sometidos a compresión axial.

Actividades.

- Diseño de las mezclas.
- Ensaye de especímenes.

5. Fundamentación teórica

5.1 Elemento estructural.

La característica particular más importante de cualquier elemento estructural es su resistencia real, la cual debe ser lo suficientemente elevada para resistir, con algún margen de reserva, todas las cargas previsibles que puedan actuar sobre aquél durante la vida de la estructura, sin que se presente falla o cualquier otro inconveniente (Nilson, 2001).

5.2 Proceso del diseño estructural para el panel tipo I.

En Gallo *et al.* (2005), sugieren una serie de aspectos que sintetizan los pasos a seguir en un proceso de diseño estructural, como se observa a continuación:

1. Estructuración.
2. Análisis.
 - a) Modelación.
 - b) Determinación de las acciones de diseño.
 - c) Obtención de los elementos mecánicos de diseño.
3. Diseño.

5.3 Ferrocemento.

El comité 549 del American Concrete Institute (ACI Committe 549, 1979) define al ferrocemento de la siguiente manera “Ferrocemento es un tipo de construcción de concreto reforzado con espesores delgados, en el cual, generalmente, el cemento hidráulico está reforzado con capas de malla continua de diámetro relativamente pequeño. La malla puede ser de material metálico o de otros materiales adecuados”. El ferrocemento es un tipo de material compuesto donde los materiales que lo integran, generalmente de consistencia frágil, llamada matriz, se refuerzan con fibras dispersas a través del compuesto, dando como resultado mejores comportamientos estructurales que el comportamiento individual. En general, el ferrocemento se considera como una forma altamente versátil de un material compuesto hecho de mortero de cemento y capas de malla de alambre, o de un emparrillado de acero de diámetro pequeño similar, ligados íntimamente para crear una estructura rígida (Paul & Pama, 1978).

En (Shaheen *et al.*, 2016), mencionan que la tecnología del ferrocemento ha sido establecida como una tecnología amigable con el medio ambiente; por lo que puede ser usado en numerosas aplicaciones, incluyendo nuevas estructuras y la

reparación y rehabilitación de estructuras existentes (A. Naaman, 2000), por mencionar algunas aplicaciones están los tableros sándwich, estructuras espaciales, mezclas de alta resistencia, cubiertas colgantes, vehículos marinos, entre otros (Olvera L., 1985).

El ferrocemento ha sido considerado el primer tipo de hormigón armado y un miembro general de la familia de los materiales estructurales de hormigón (Bedoya, 2007).

En la Fig. 6 se muestra la familia del hormigón estructural y sus combinaciones (Bedoya, 2007):

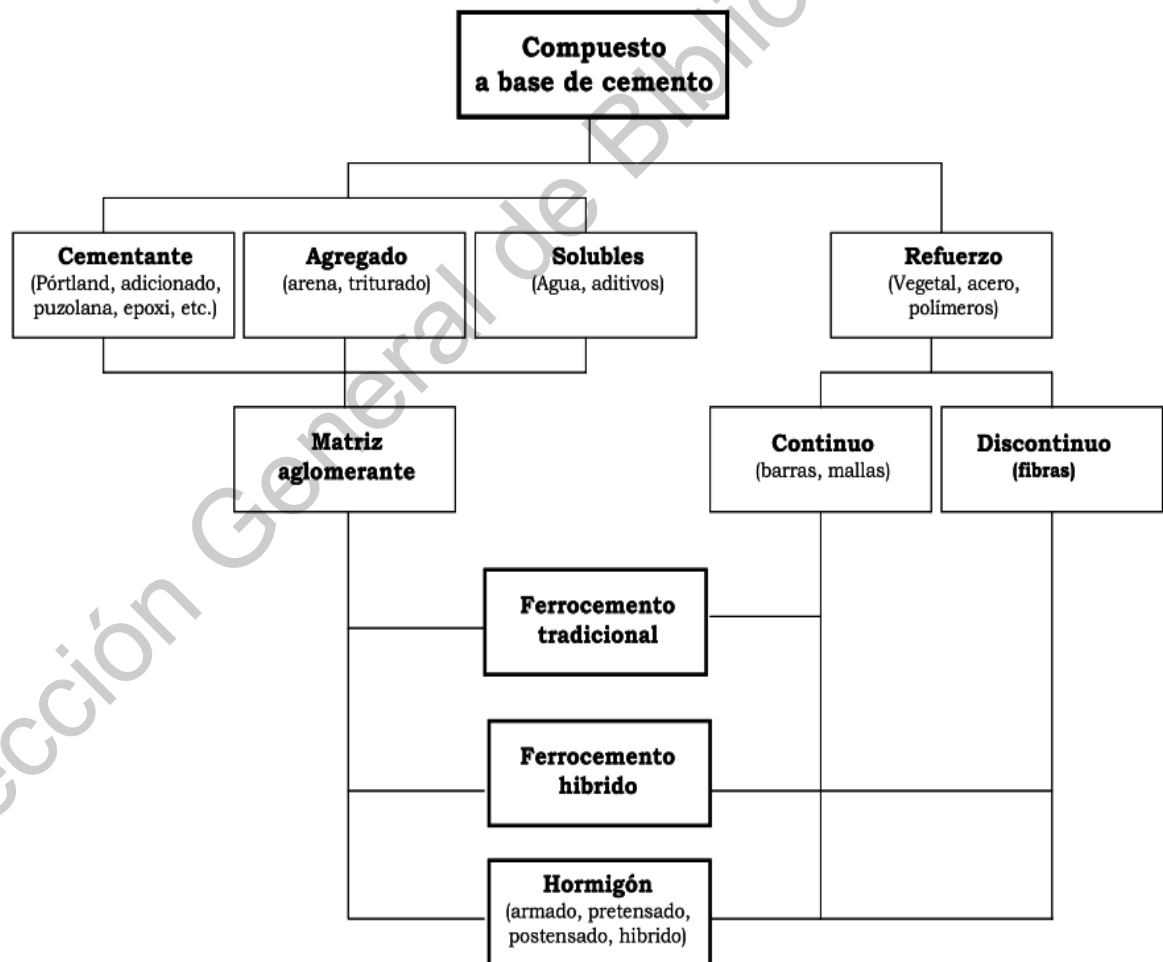


Fig. 6 Familia del hormigón estructural y sus posibles combinaciones.

5.3.1 Fracción de volumen de refuerzo.

La fracción de volumen de refuerzo es la relación entre el volumen de refuerzo y el volumen de composición (Ec. 1).

$$V_r = \frac{V_{refuerzo}}{V_{composición}} \quad (1)$$

Si el esqueleto de acero es colocado en el centro del miembro de ferrocemento y si la flexión es considerada, su influencia puede ser ignorada. Sin embargo, el esqueleto de acero debe ser considerado en la evaluación de la resistencia de los miembros a tensión (Naaman, 2000).

5.3.2 Volumen de refuerzo para cualquier tipo de malla.

De acuerdo con Naaman (2000), cuando las mallas de gallinero, mallas de metal expandido, malla reforzada de fibra polimérica, o mallas irregulares son usadas, la fracción de volumen de refuerzo puede ser calculada con la siguiente formula (Ec. 2):

$$V_r = \frac{NW_r}{h \gamma_r} \quad (2)$$

Donde:

N Número de capas de malla.

W_r Peso unitario de la malla de refuerzo, en kg/m².

γ_r Densidad del material de refuerzo, en kg/m³.

h Espesor del elemento de ferrocemento.

En el uso de estas ecuaciones para mallas galvanizadas, es necesario tener cuidado y considerar el error del galvanizado (Naaman, 2000).

5.4 Superficie específica de refuerzo.

La superficie específica de refuerzo es el área de la superficie total lateral del refuerzo dividido entre el volumen de composición (Ec. 3):

$$S_r = \frac{\text{Superficie total de refuerzo adherido}}{V_{\text{composición}}} \quad (3)$$

Para una malla de diámetro d_w se deriva la siguiente ecuación (Naaman, 2000):

$$S = \frac{4 V_r}{d_w} \quad (4)$$

5.5 Diseño del ferrocemento.

Cualquier recomendación de diseño aplicada al ferrocemento estructural depende del tipo de aplicación y debe estar basada en un análisis racional apoyado por resultados de ensayos experimentales (Escamilla, 2016), esto queda demostrado en Naaman (2010), que define las ventajas del ferrocemento usado en paneles tipo sándwich las cuales incluyen ahorros de energía y aislamiento, baja conductividad térmica, excelente aislamiento del ruido, y mejor ductilidad.

5.6 Muro.

Elemento, generalmente vertical, empleado para encerrar o separar espacios (Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto, 2017).

5.7 Sistema constructivo.

Gallo et al., (2005) define un sistema constructivo como el acomodamiento lógico de una serie de materiales para satisfacer un servicio de un elemento estructural determinado, como puede ser: proteger contra efectos del intemperismo,

soportar el peso de los acabados, equipos, instalaciones, etcétera. Por lo tanto, es posible decir que existen diversos sistemas constructivos que se proyectan para muros, techos, escaleras, sistemas de apoyo para tinacos, entre otros.

5.8 NMX-C-405-ONNCCE-2014.

Esta norma mexicana establece las especificaciones y métodos de ensayo que deben cumplir los paneles para uso estructural aplicados en sistemas constructivos para muros, techos y entrepisos de las edificaciones (IMCYC, 2016). La norma es aplicable a los paneles de fabricación nacional y de importación de cualquier material que se comercialicen en el país para uso estructural (IMCYC, 2016).

5.9 Tipos de paneles estructurales.

5.9.1 Paneles.

Son componentes con dos dimensiones mayores con respecto al espesor, que pueden ser elaborados en planta o a pie de obra, los cuales una vez instalados y terminados en la edificación conforman un elemento constructivo (NMX-C-405-ONNCCE-2014, 2014).

5.9.2 Paneles para uso estructural.

Es aquel que por sus características mecánicas es apto para resistir las acciones de diseño, permanentes, variables y accidentales a las cuales va a estar sujeto como componente de un elemento estructural vertical (muro), o de un horizontal (entrepiso y techo). Estos paneles pueden ser simples o compuestos, en la Tabla 1 se mencionan los tipos de muros respecto a su uso (NMX-C-405-ONNCCE-2014, 2014).

5.10 Clasificación.

Un panel se clasifica conforme a su trabajo estructural en:

Tabla 1 Clasificación de paneles conforme a su uso estructura (NMX-C-405-ONNCCE-2014).

Tipo de Panel.	Uso.
Tipo I	En muros.
Tipo II	En losas de entrepisos.
Tipo III	En losas de azotea.

5.10.1 Paneles para uso estructural simple.

Es aquel que por sus características es empleado para la elaboración de elementos continuos, en muros, techos o entrepisos y no contiene elementos estructurales ajenos que lo refuercen para desempeñar su función (NMX-C-405-ONNCCE-2014, 2014).

5.10.2 Paneles para uso estructural compuesto.

Es aquel que por sus características es empleado para la elaboración de elementos continuos, en muros, techos o entrepisos y si contiene elementos estructurales ajenos que lo refuercen para desempeñar su función (NMX-C-405-ONNCCE-2014, 2014).

5.11 Resistencia a compresión.

Las Normas Técnicas Complementarias (2017) establecen que en muros de concreto reforzado de vivienda de hasta dos niveles, se admitirá el uso de concreto clase 2 con resistencia especificada de 15 MPa (150 kg/cm²) si se garantizan los recubrimientos mínimos requeridos en las NTC (2017).

El procedimiento experimental que se propone para el desarrollo de la investigación, entre otros aspectos es el siguiente:

- Selección y estudio de las propiedades y características de los materiales para elaborar los paneles estructurales de ferrocemento.
- Elaboración de los paneles estructurales de ferrocemento.

- Evaluación el comportamiento mecánico de los paneles sometidos a compresión axial.
- Modelación de un panel con dimensiones comerciales sometido a cargas de servicio.

Determinación de la muestra para los ensayos a partir de las pruebas de:

- o Resistencia a la compresión simple.

Pruebas experimentales para los paneles Tipo I conforme a la norma NMX – C – 405 – ONNCCE – 2014.

En la Fig. 7 se indican las especificaciones y ensayos a los cuales deben ser sometidos los paneles tipo I para uso estructural aplicados en sistemas constructivos:

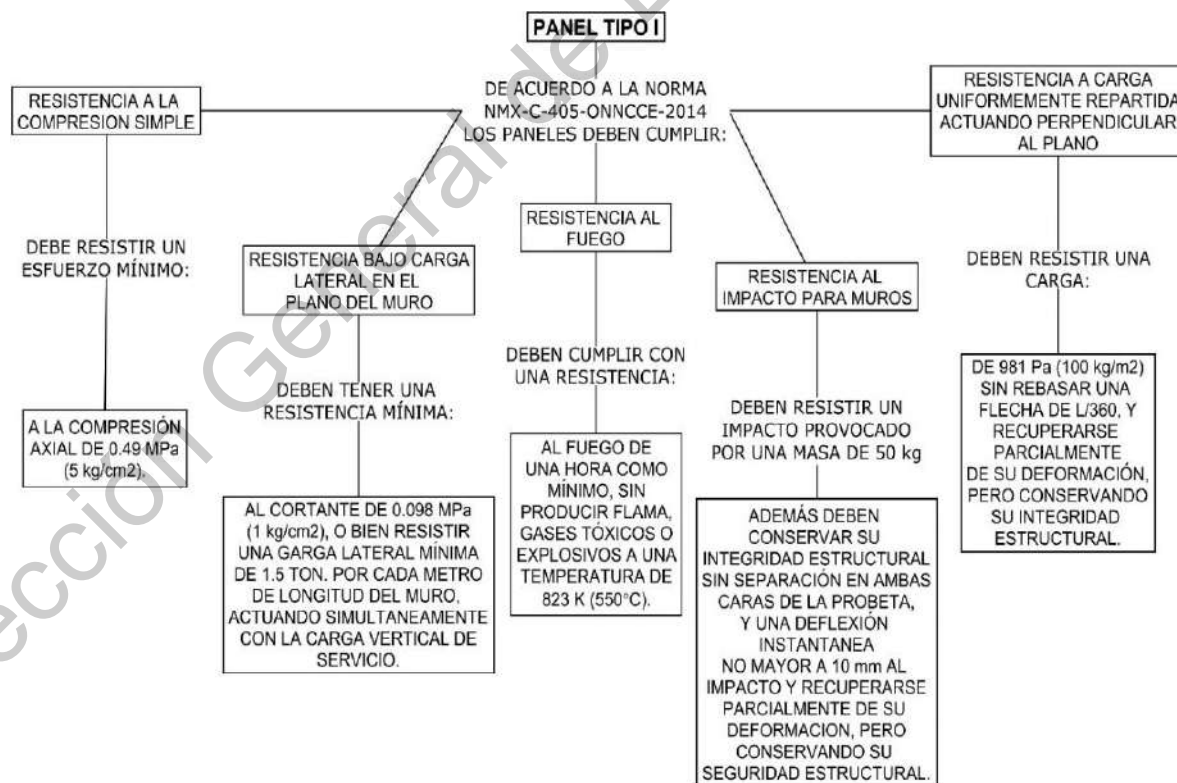


Fig. 7 Pruebas experimentales para los paneles Tipo I de acuerdo con la NMX-C-405-ONNCCE-2014.

En la Tabla 2 se muestra el tamaño de las probetas de ensayo de los paneles tipo I así como el tamaño de la muestra para realizar las pruebas.

Tabla 2 Tamaño de muestra y dimensiones de las probetas para realizar los ensayos.

Panel Tipo I		
Ensaye.	No. De probetas mínima.	Tamaño de probetas (m).
Compresión.	3	1.22 (± 2 cm) x 2.44 (± 4 cm)
Carga lateral.	3	
Impacto.	3	
Carga uniformemente repartida.	3	
Fuego (Compresión simple).	2	0.60 x 0.60

5.12 Instrumentos de medición.

Los instrumentos necesarios para la realización de la investigación se mencionan en la Tabla 3.

Tabla 3 Instrumentos necesarios para la realización de la investigación conforme al tipo de prueba.

Panel Tipo I	
Ensaye.	Instrumentos necesarios para la realización de la investigación.
Compresión.	Dispositivo de presión hidráulica, deformímetros, gráficas y fotos.
Carga lateral.	
Impacto.	Marco rígido de soporte, masa de 50 kg, deformímetros y fotos.
Carga uniformemente repartida.	Marco de carga horizontal, deformímetros y fotografías.
Fuego (Compresión simple).	Dispositivo de presión hidráulica, deformímetros, cámara de fuego, fotos.

5.13 Descripción de ensayos.

5.13.1 Prueba de resistencia a compresión simple.

Consistirá en la aplicación de una carga axial (Fig. 8), transmitida de manera uniforme a través de un perfil de acero entre la probeta y el dispositivo de presión hidráulica.

Por medio de un deformímetro se determinará el pandeo lateral y el pandeo por efectos de esbeltez.

Se calculará la resistencia a la compresión (5) y (6), posteriormente se obtendrá la curva esfuerzo-deformación de acuerdo con los intervalos de carga registrados. La resistencia se obtendrá a través de la siguiente formula:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (5)$$

O bien:

$$c^* = \frac{\bar{x}}{1 + \alpha CV} \quad (6)$$

Donde:

c^* Resistencia a la compresión, en kg/cm².

α Coeficiente que toma en cuenta un nivel de confianza de 95%.

CV Coeficiente de variación.

σ Desviación estándar.

\bar{x} Resistencia a la compresión de la muestra de paneles, en kg/cm².

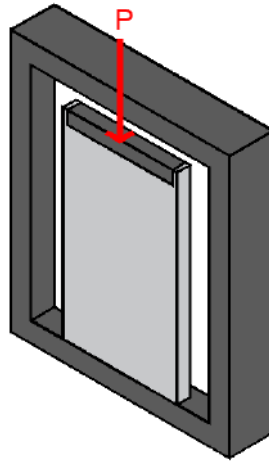


Fig. 8 Representación del montaje de un panel tipo I para el ensayo de resistencia a compresión.

5.13.2 Prueba de resistencia bajo carga lateral.

Consistirá en la aplicación de una carga lateral (Fig. 9), transmitida de manera uniforme a través de un perfil de acero entre la probeta y el dispositivo de presión hidráulica.

Por medio de un deformímetro que se colocará de manera diagonal se determinará el pandeo lateral y el pandeo por efectos de esbeltez.

Se calculará el esfuerzo máximo de la probeta.

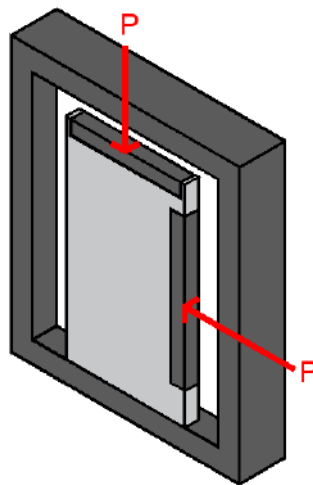


Fig. 9 Representación del montaje de un panel tipo I para el ensayo de resistencia a carga lateral.

5.13.3 Prueba de resistencia al fuego.

El panel estructural deberá exponerse a una temperatura de 823 K (550 °C) en una cámara de fuego cuyo combustible sea gas natural o gas metano de uso doméstico, sin producir flama, gases tóxicos o explosivos.

Para esta prueba las dimensiones de los paneles serán de 60 x 60 cm.

Posteriormente cuando el panel alcanza la temperatura ambiente se realiza un ensayo a compresión simple hasta la falla total.

5.13.4 Prueba de resistencia al impacto en muros.

Esta prueba determinará las deflexiones que experimentará la probeta de ensayo al ser sometida a un impacto en el medio de ambas caras con una masa lanzada a una altura de 2.20 m y un ángulo de 45° (Fig. 10).

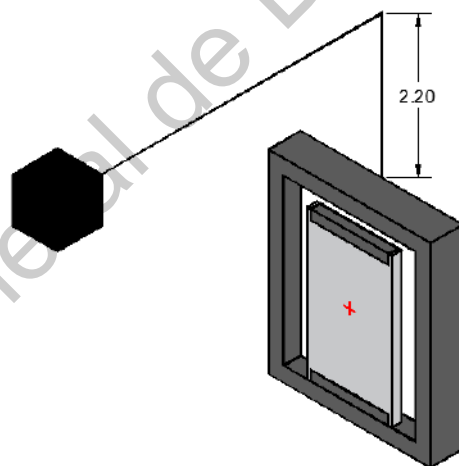


Fig. 10. Representación del montaje de un panel tipo I para el ensayo de resistencia al impacto.

5.13.5 Prueba de resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicular al plano.

Por medio de un marco de carga horizontal que permita apoyar perimetralmente la probeta (Fig. 11), se aplicará una carga distribuida simétricamente sobre el panel, de los extremos al centro hasta llegar a la carga total

que por área deba de soportar el espécimen. Asimismo, se medirán las deflexiones en la cara opuesta a donde es aplicada la carga.

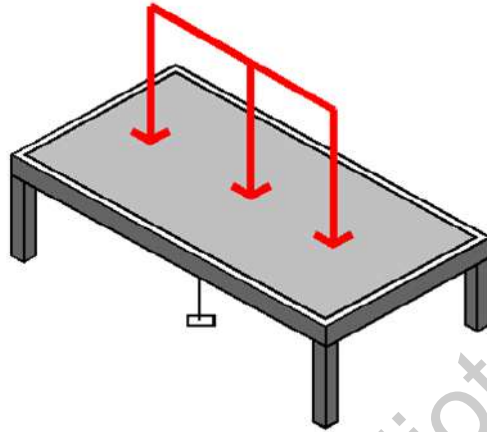


Fig. 11 Representación del montaje de un panel tipo I para el ensayo de resistencia a carga uniforme.

5.14 Materiales.

El programa de investigación fue diseñado para estudiar la respuesta a compresión de paneles prefabricados de ferrocemento usando 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 tipo cuadrada electrosoldada galvanizada de 50 x 50 mm con un f_y de 5,000.00 kg/cm². Un total de 9 paneles de ferrocemento con dimensiones de 600 x 600 x 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.

5.14.1 Agregado fino.

Determinación de desperdicios y pesos volumétricos en agregados.

Con esta prueba se determinó la cantidad de agregado grueso presente en nuestra arena.

Parte de la experimentación consistió en cribar 5 kg de agregado fino a través de la malla No. 4 y posteriormente se pesó el material retenido.

El porcentaje de desperdicio de grava en el agregado fino debe ser menor que el 5% (valor dado por especificación).

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso retenido en la malla No. 4}}{\text{Peso total de la muestra}} \times 100 \quad (7)$$

$$\% \text{ Retenido} = \frac{0.0293 \text{ kg}}{5 \text{ kg}} \times 100 = 0.586\%$$

El agregado fino cumple con la restricción de tener menos del 5% de agregado grueso.

5.14.2 Peso volumétrico.

Se determinó el peso volumétrico suelto y compacto de la arena.

Cálculo del porcentaje de humedad.

$$\% w = \frac{P_w - P_s}{P_s} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

P_w Peso húmedo del material (gr).

P_s Peso seco del material (gr).

$P_w - P_s$ Peso del agua (gr).

$$\% w = \frac{200 - 189.72}{189.72} \times 100 = 5.41\%$$

Cálculo del peso volumétrico suelto (PVS).

$$PVS = \frac{\text{Peso del material contenido en el recipiente (kg)}}{\text{Volumen del recipiente (lt)}} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

PVS Peso volumétrico seco, en kg/m³.

Cálculo del peso volumétrico suelto (PVC).

$$PVC = \frac{\text{Peso del material contenido en el recipiente (kg)}}{\text{Volumen del recipiente (lt)}} \times 100 \quad (10)$$

Donde:

PVC Peso volumétrico compacto, en kg/m³.

Cálculo del peso volumétrico seco suelto y compacto.

$$PVSS = \frac{\text{Peso volumétrico suelto}}{1 + \left(\frac{\%w}{100}\right)} \quad (11)$$

$$PVSC = \frac{\text{Peso volumétrico compacto}}{1 + \left(\frac{\%w}{100}\right)} \quad (12)$$

Donde:

PVSS Peso volumétrico seco suelto, en kg/cm³.

PVSC Peso volumétrico seco compacto, en kg/cm³.

$$\% w = \frac{P_w - P_s}{P_s} \times 100$$

$$\% w = \frac{0.9894 - 0.97912}{0.97912} \times 100 = 1.049$$

Tabla de cálculos.

Tabla 4 Peso volumétrico suelto de la arena.

Peso volumétrico suelto de la arena						
Peso del recipiente + material (kg)	Peso del recipiente (kg)	Peso neto del material (kg)	Volumen del recipiente (lt)	PVSH (kg/m ³)	% w	P.V.S.S. (kg/m ³)
7.280	1.645	5.635	4.824	1168.117	1.049	1155.990
7.330	1645	5.685	4.824	1178.482	1.049	1166.248
7.350	1.645	5.705	4.824	1182.620	1.049	1170.343
Promedio				1176.526	Promedio	1164.193

Tabla 5 Peso volumétrico compacto de la arena.

Peso volumétrico compacto de la arena						
Peso del recipiente + material (kg)	Peso del recipiente (kg)	Peso neto del material (kg)	Volumen del recipiente (lt)	PVSH (kg/m ³)	% w	P.V.S.C. (kg/m ³)
8.110	1.645	6.465	4.824	1340.174	1.049	1326.261
8.190	1645	6.545	4.824	1356.757	1.049	1342.672
8.200	1.645	6.555	4.824	1358.830	1.049	1344.72
Promedio				1351.920	Promedio	1337.884

Absorción y densidad de agregado fino.

Absorción.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{P_w - P_s}{P_s} \times 100 \quad (13)$$

Donde:

P_w Peso húmedo del material en condición (S.S.S.) en gr.
 P_s Peso constante del material (gr).

$$\% \text{ Absorción} = \frac{200.6 - 181.2}{181.2} \times 100 = 10.706$$

Peso relativo específico.

$$PRE = \frac{P_s}{(PM + PA + P_s) - (PM + m + PA)} \quad (14)$$

Donde:

PM Peso del matraz.
 m Peso de la muestra en condición (S.S.S.).
 P_s Peso constante del material.
 PA Peso del agua.
 PRE Peso relativo específico.

$$PRE = \frac{200.2}{716.6 + 200.2 - 821.1} = 2.0919$$

Granulometría.

La granulometría del agregado fino se muestra en la Tabla 6 la cual muestra una buena distribución de material fino para la prueba en cuestión.

Tabla 6 Granulometría de agregado fino.

Número de malla	Retenidos (gr)	% 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			

Módulo de finura.

$$MF = \frac{262.64}{100} = 2.6264$$

Cálculo de la humedad.

$$\% w = \frac{P_w - P_s}{P_s} \times 100$$

$$\% w = \frac{0.9894 - 0.97912}{0.97912} \times 100 = 1.049$$

Corrección al peso inicial.

$$PIC = \frac{\text{Peso inicial}}{1 + \frac{\%w}{100}} \quad (15)$$

$$PIC = \frac{500}{1 + \frac{1.049}{100}} = 494.809$$

Peso seco lavado corregido.

$$PSLC = \text{Peso seco lavado} - \text{charola}$$

$$PSLC = 421.3 - \text{charola} \quad (16)$$

Error de pesada.

$$E. \text{ de pesada} = \frac{\text{Peso seco lavado} - \text{Suma total}}{\text{Peso seco lavado}} * 100 \quad (17)$$

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 (Instituto Mexicano del Transporte, 2019).
- El peso relativo específico es de 2.0919
- Módulo de finura fue de 2.62 y de acuerdo con cumple con la normativa.
- Porcentaje de absorción de 10.7%
- La humedad inicial de la arena fue de 5.41%

El tamaño de agregado cumple además, con los rangos límites deseables estipulados en (Unidad de apoyo técnico para el saneamiento básico del área rural, 2003).

5.14.3 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.

5.14.4 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 (Instituto Mexicano del Transporte, 2019).

5.14.5 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 50 mm de espaciamiento entre cada fibra (Fig. 12) 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.

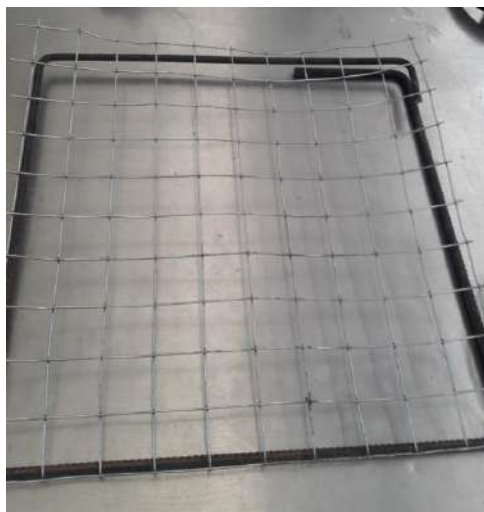


Fig. 12 Malla electrosoldada y contramarco.

5.14.6 Cimbra.

La cimbra consistió en un molde cuadrado (Fig. 13 y Fig. 14) fabricado con triplay BC elaborado de chapas de madera de pino radiata colocadas en forma perpendicular en el sentido de las fibras para de esta manera obtener un tablero de alta resistencia.

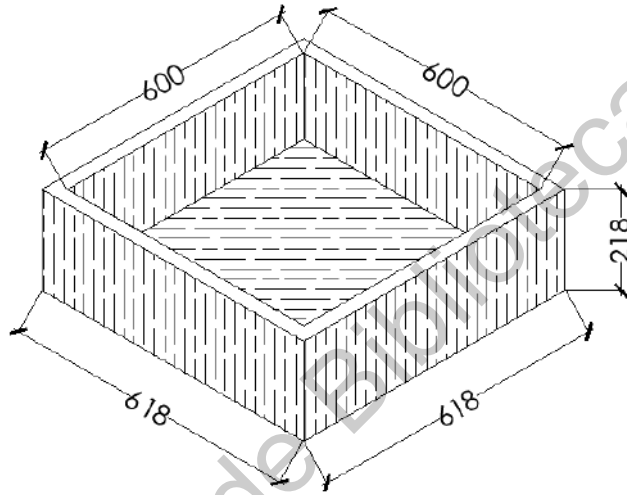


Fig. 13 Dimensiones internas y externas del molde de triplay usado como cimbra.

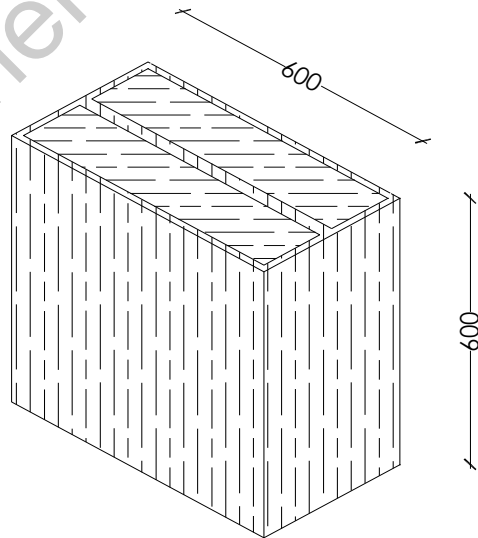


Fig. 14 Molde utilizado para colar los especímenes del segundo lote.

5.14.7 Desmoldante.

Se utilizó desmoldante líquido de aplicación rápida y eficiente con base de aceites minerales amarillo marca Sika (Fig. 15), el cual facilitó la limpieza del molde utilizado como cimbra.



Fig. 15 Aplicación de desmoldante.

5.14.8 Mezcla de mortero.

Se diseñó un mortero de una resistencia objetivo de 45 kg/cm^2 y 50 kg/cm^2 , las proporciones de cada uno de los materiales se resumen en la Tabla 7 considerando las siguientes relaciones:

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

Dosificación de materiales.

Tabla 7 Proporción de materiales.

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 (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, 2014).

5.14.9 Máquina de ensaye.

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. 16).



Fig. 16 Máquina universal utilizada para realizar las pruebas de compresión en paneles.



Fig. 17 Instrumentación de la máquina universal para medir las deformaciones.

6. Metodología

La metodología con la que se llevó a cabo la investigación fue de tipo cuantitativa, siguiendo un diseño experimental, dentro de la línea de investigación enfocada a la modelación analítica y experimental de sistemas físicos.

En el diagrama de flujo de la Fig. 18 se muestra detalladamente la serie de pasos a seguir en la experimentación de la investigación.

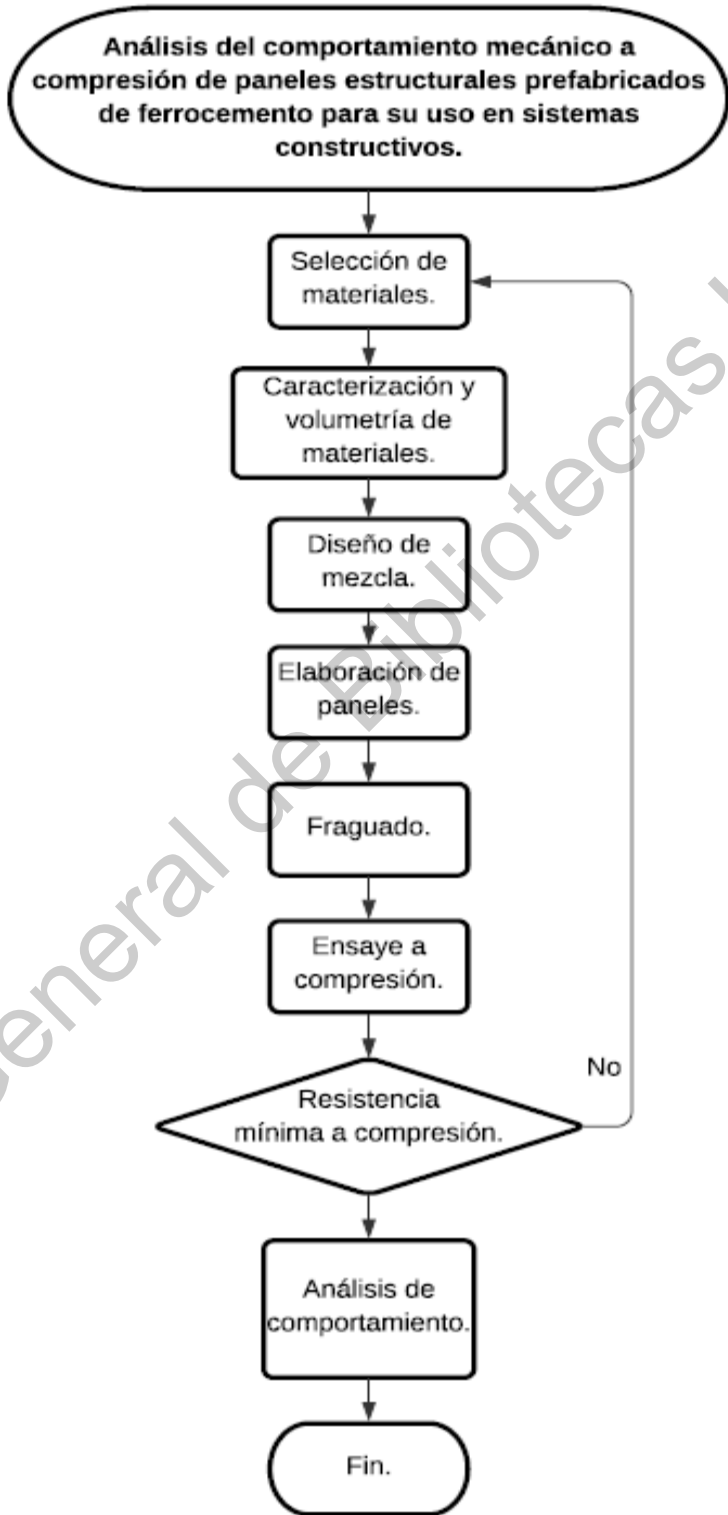


Fig. 18 Diagrama de flujo de la metodología utilizada en la investigación.

Para la elaboración del ferrocemento se utilizó como referencia (A. Naaman, 2000), de acuerdo con lo establecido en el apartado de la guía práctica de diseño.

6.1 Mezcla de mortero.

Cada lote de mortero fue elaborado usando una revolvedora Pretul RECE-160P (Fig. 19) de cemento de uso ligero a gasolina. Se colocó inicialmente el cemento Portland y la arena a una velocidad baja de acuerdo con (ASTM, 1994) por un lapso de tiempo de tres minutos, posteriormente se añadió el agua. Los periodos de mezclado se llevaron a cabo de acuerdo a los estándares prescritos en (ASTM, 1994).



Fig. 19 Elaboración de la mezcla en revolvedora Pretul RECE-160P.

6.2 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. 20) 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 fueron únicamente un par de especímenes. Los paneles elaborados (Fig. 21) fueron descimbrados y curados después de 24 horas en un cuarto con humedad constante por 28 días para evitar en lo posible pérdida de agua.

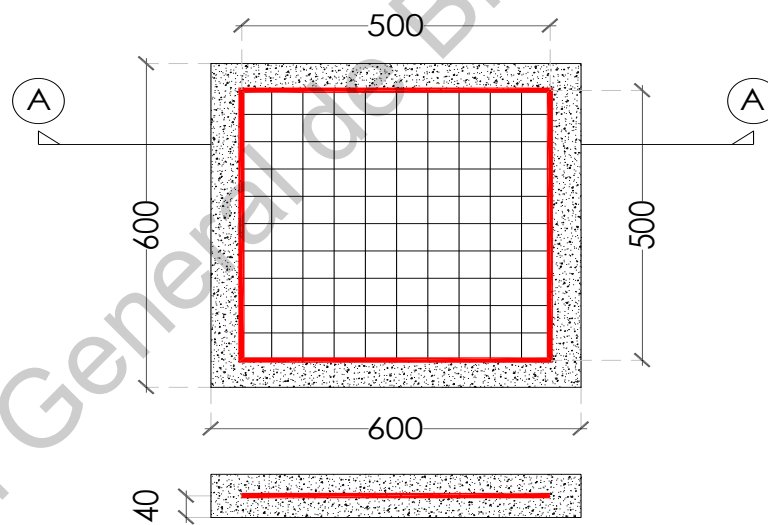


Fig. 20 Detalles del acero de refuerzo usado, vista en planta y sección A-A.



Fig. 21 Proceso de elaboración de paneles.

6.3 Ensaye.

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 de prueba transmitidas en la dirección del eje z (Fig. 22).

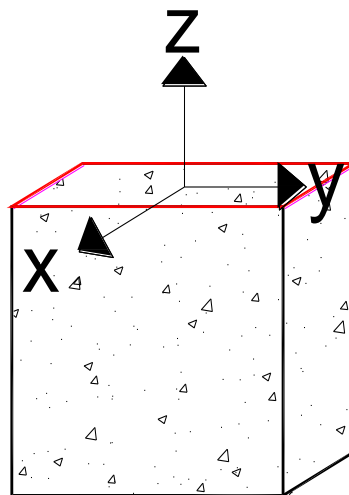


Fig. 22 Dirección y área de aplicación de fuerza en componentes.

La configuración e instrumentación de la prueba de compresión de los paneles conforme a (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, 2014) se muestra en la Fig. 23, el esquema de la aplicación y distribución de carga se presentan en la Fig. 24. Se aplicó una carga de compresión a las probetas mediante la máquina universal automatizada, la carga aplicada 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, la deformación de cada panel fue monitoreada 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 arrojaba el micrómetro. Por medio de la Ec. (18) se calculó el esfuerzo en los paneles de ferrocemento, los datos fueron procesados en una hoja de cálculo.

$$\sigma = \frac{P * 100}{A} \quad (18)$$

Dónde P es la carga en kN y A es el área en cm².



Fig. 23 Configuración de la prueba de compresión en la máquina universal.

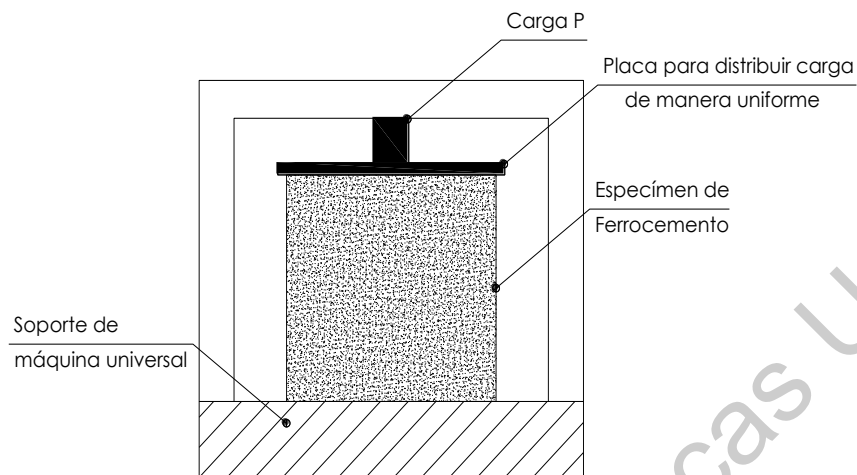


Fig. 24 Diagrama esquemático de aplicación de carga y soporte en el panel de ferrocemento.

6.4 Modelación

Se llevó a cabo el análisis de un panel en el programa SAP2000 V.20 con las siguientes características:

- Elemento tipo Shell.
- Dimensiones de 2.44 x 1.22 m. (medidas comerciales) y espesor de 0.15 m.
- Mortero de cemento arena con una resistencia de 125 kg/cm^2 un peso volumétrico de 2100 kg/m^3 .
- Malla electrosoldada de refuerzo con f_y de $5,000 \text{ kg/cm}^2$.

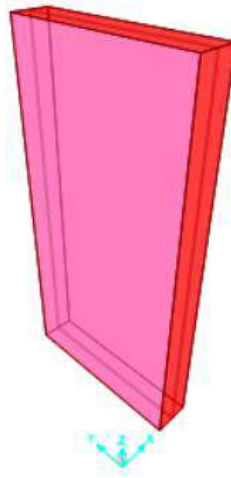


Fig. 25 Modelo del panel de ferrocemento.

6.4.1 Discretización de elementos área – muro.

Se dividió el elemento Shell en 10 elementos en el sentido horizontal y 20 elementos en el sentido vertical.

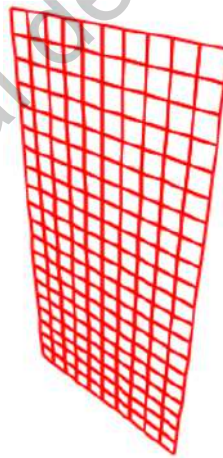


Fig. 26 Discretización del elemento área - muro.

6.4.2 Asignación de apoyos.

Se colocaron apoyos articulados en los bordes verticales y horizontal inferior.

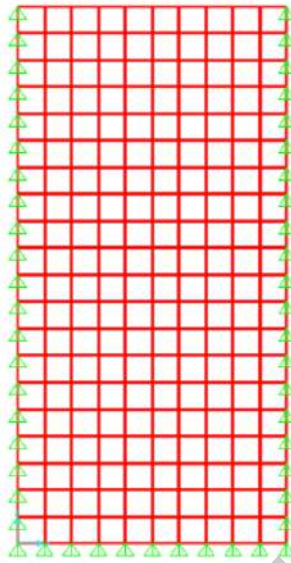


Fig. 27 Asignación de apoyos.

6.4.3 Análisis.

Se realizó un análisis tridimensional en donde el programa calculó todos los grados de libertad disponibles del modelo.

7. Resultados y discusión

7.1 Compresión.

Los resultados del ensaye a compresión se discuten con referencia en la Fig. 29, 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.

En la práctica los elementos de concreto armado no siempre se encuentran sujetos a cargas puras de compresión. Debido a que las estructuras son continuas, la carga axial se encuentra actuando 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 especímenes 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 (0.0025) menor que los especímenes FP-1 y FP-5 (mortero 2). Comparado con (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, 2014), que 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 considerablemente este valor.

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. 28) es similar en todos los casos; se presentó una grieta longitudinal (típico de una falla a compresión) desde la parte superior del panel hasta la parte inferior de aproximadamente 1.5 mm de espesor; 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. 29 el lote de mortero dos tuvo una deformación mayor que los paneles elaborados con el mortero uno.

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



Fig. 28 Grietas y modos de falla presentados en paneles de ferrocemento.

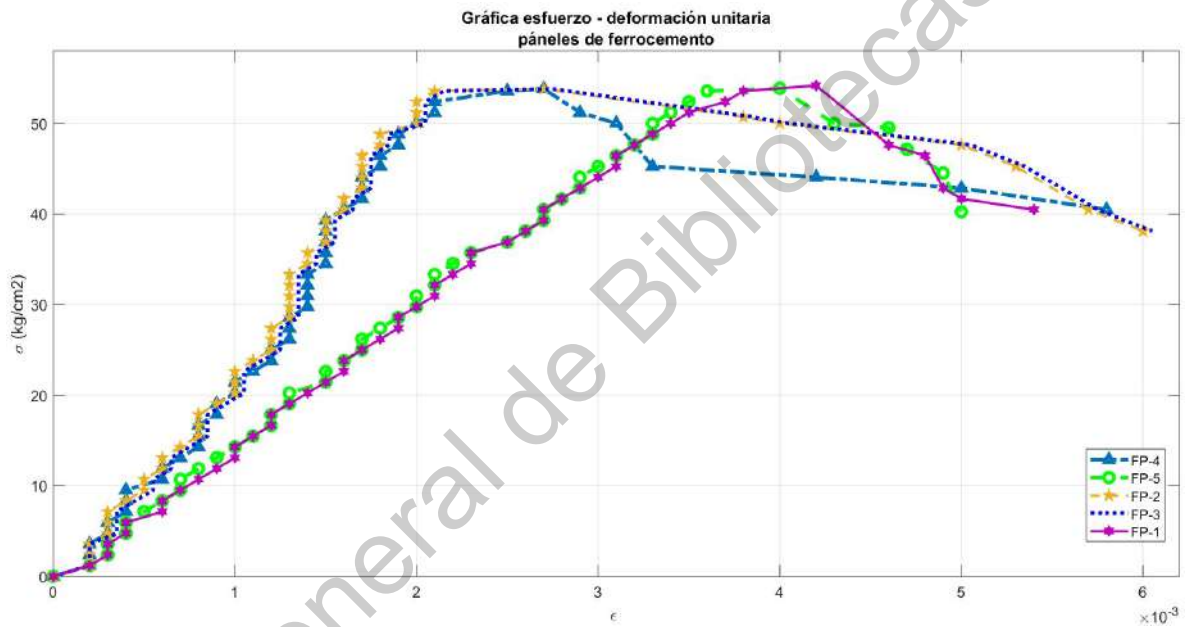


Fig. 29 Gráfica de esfuerzo – deformación de los paneles estructurales.

7.2 Modelación.

Las fuerzas internas (fuerzas y momentos) que son el resultado de integrar los esfuerzos sobre el espesor del elemento se muestran en las figuras 29-36.

Las fuerzas directas a la membrana en kgf:

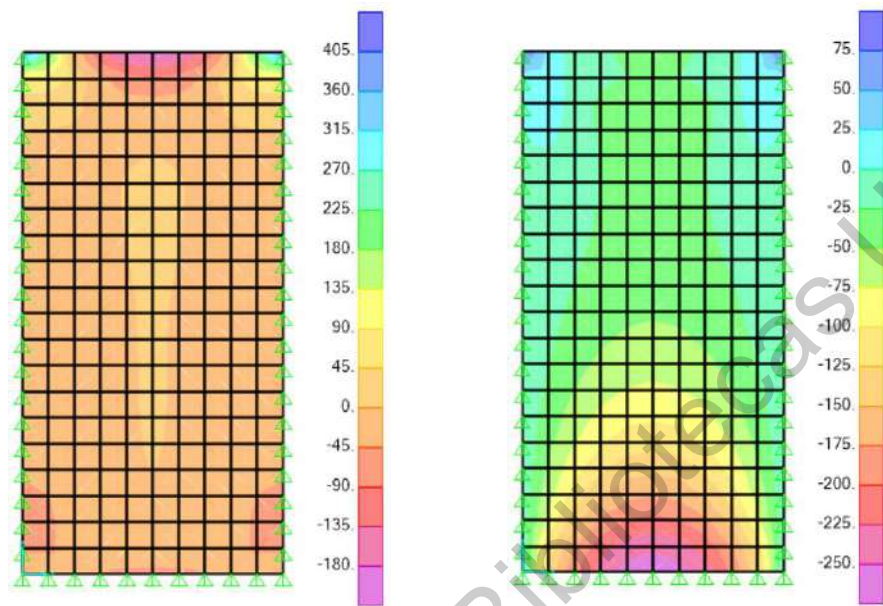


Fig. 30 Fuerzas directas a la membrana F11 y F22.

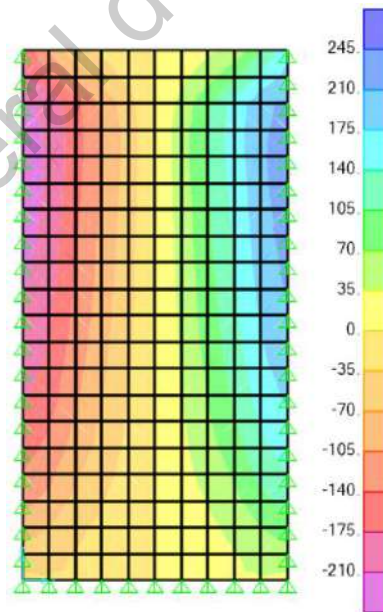


Fig. 31 Fuerza cortante a la membrana F12.

Momentos de flexión:

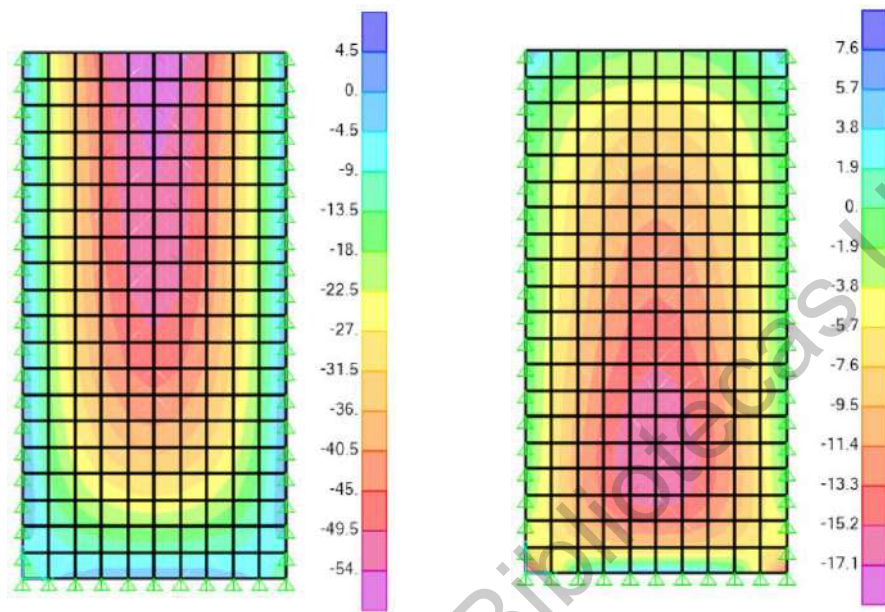


Fig. 32 Momentos de flexión, M11 y M22.

Momento de torsión:

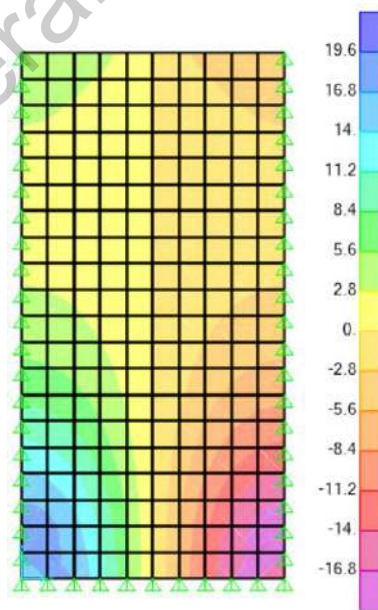


Fig. 33 Momento de torsión.

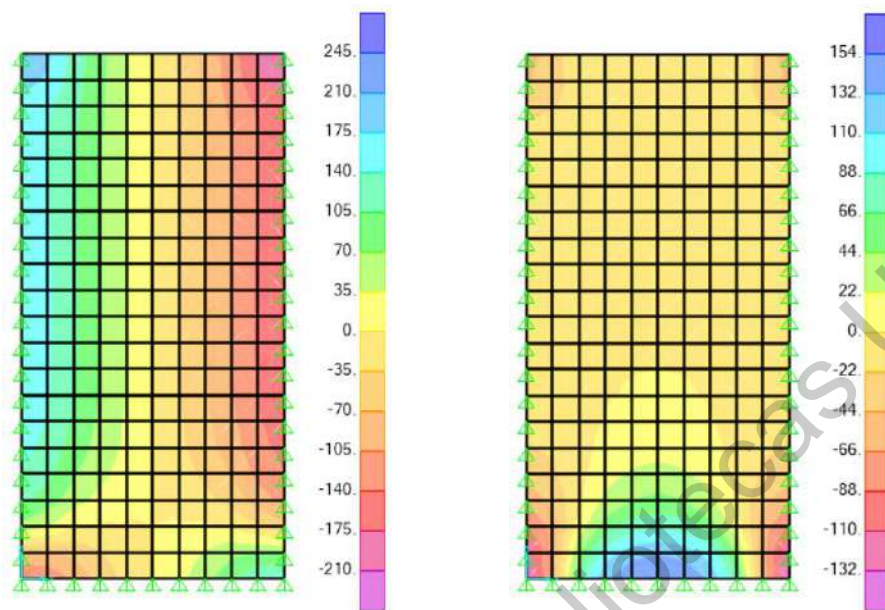


Fig. 34 Fuerza de cortante transversal de al panel, V13 y V23.

Esfuerzos:

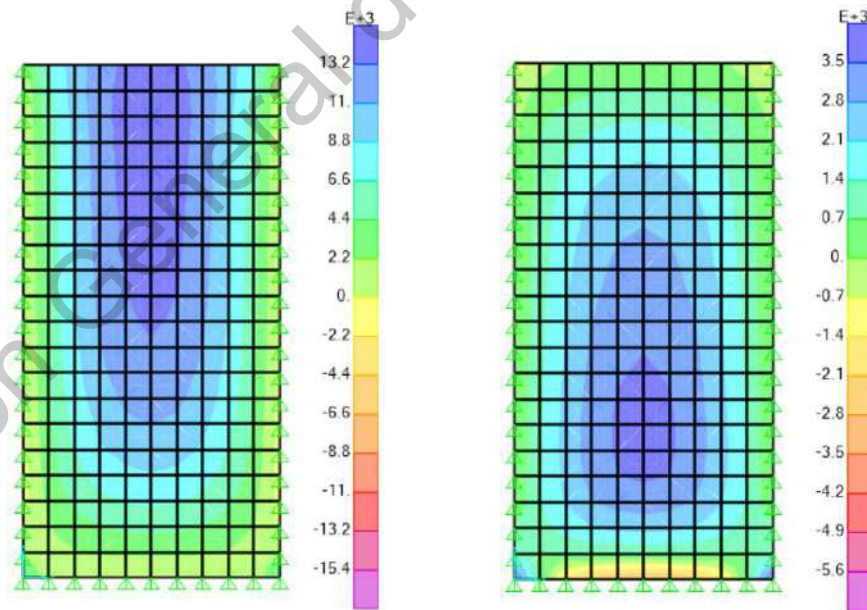


Fig. 35 Esfuerzos directos en el panel, S11 y S22.

Esfuerzos de corte en el panel:

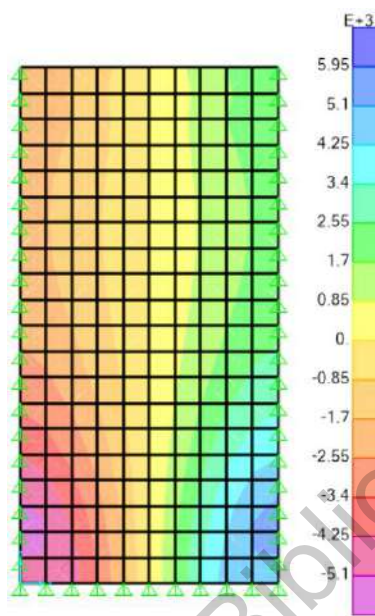


Fig. 36 Esfuerzo de corte en el panel S12.

Esfuerzos de corte transversales:

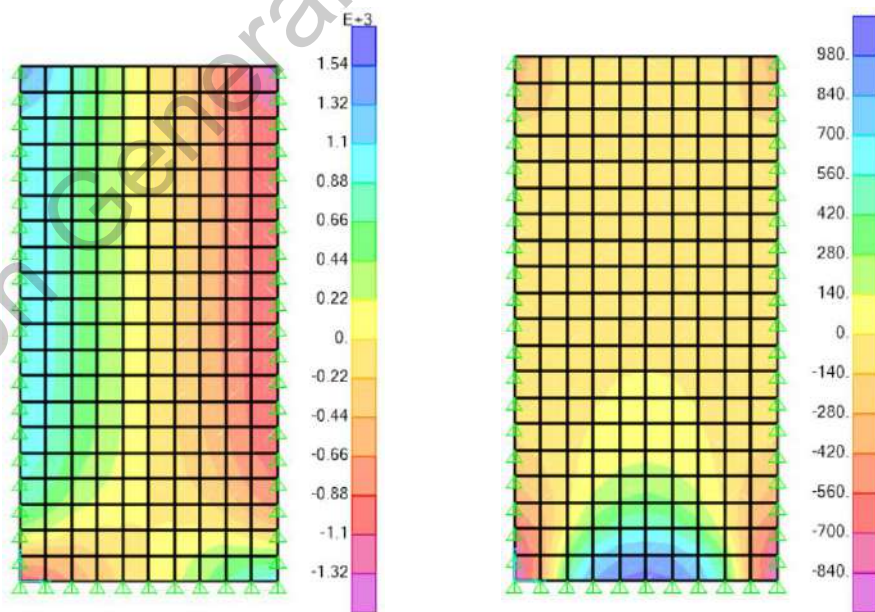


Fig. 37 Esfuerzos de cortante transversal, S33.

En la Fig. 31 del lado izquierdo observamos el momento flector máximo en la zona central superior del panel de ferrocemento con un valor de -1.81 kgf-m y en la base es aproximadamente cero. En comparación con otras investigaciones los paneles desarrollados en esta investigación tuvieron un comportamiento a compresión óptimo y uniforme en las probetas ensayadas.

8. 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.

Se acepta la hipótesis.

1. De acuerdo con (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, 2014) los paneles probados en la presente investigación cumplen con la restricción de soportar la carga mínima a compresión de dicha norma.
2. El momento flector máximo en la zona central superior del panel de ferrocemento tuvo un valor de -1.81 kgf-m y en la base fue cero, lo cual coincide el análisis de los paneles en el software.
3. Todos los paneles de ferrocemento fallaron por compresión, esto de acuerdo con los modos de falla observados en las probetas (Ver Anexo 10.1).
4. La carga máxima resistida por los paneles de ferrocemento fue de 116.7 kg/cm².
5. El espécimen que resistió menor carga 22.92 kg/cm² tuvo un proceso de curado diferente (inmersión en agua) debido a que el dispositivo del laboratorio se dañó.
6. 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.

7. 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.
8. La recomendación de usar ferrocemento en viviendas de escasos recursos puede ser factible si se realiza un estudio económico detallado.
9. Los resultados de la técnica de elementos finitos coinciden con el modo de falla que tuvieron los paneles a pesar de que tienen dimensiones distintas.

Dirección General de Bibliotecas UAG

9. Referencias

- A. C. I. Committee 549. (2018a). *549.1R-18: Design Guide for Ferrocement*. Farmington Hills, Michigan.
- A. C. I. Committee 549. (2018b). *549R-18: Report on Ferrocement*. Farmington Hills, Michigan.
- ACI Committee 549. (1979). *Ferrocement - Materials and Applications*. (American Concrete Institute, Ed.). Farmington Hills, Michigan: ACI Symposium Proceedings.
- Administración Pública del D.F. (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*. Distrito Federal, México: Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- Almada, D. V., Yeomans, F., Nungaray, C., & Elizondo, A. (2006). Caracterización de concreto celular a base de espuma preformada. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, (81), 13.
- ASTM. (1994). 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.
- Atamba, T. A., & Cuaical, J. F. (2018). *Análisis comparativo del comportamiento estructural de una edificación de 6 y 16 pisos implementando losas con paneles de tecnología M2 frente a losas con placa cooperante*. Universidad Central del Ecuador. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13568/1/T-UCE-0011-32.pdf>
- Bedoya, D. (2007). Estudio de resistencia y vulnerabilidad sísmicas de viviendas de bajo costo estructuradas con ferrocemento. *Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona-España*, pag 311. <https://doi.org/Maestria>
- Bedoya, D., & Betancur, D. Á. (2009). Comportamiento de viviendas de

ferrocemento bajo cargas ciclicas. *Revista Ingenierias Universidad de Medellin*, 8(15), 37–46. Retrieved from <http://go.galegroup.com.bd.univalle.edu.co/ps/i.do?&id=GALE%7CA228716964&v=2.1&u=univalle&it=r&p=AONE&sw=w>

Cherian, P., Paul, S., Krishna, S. R. G., Menon, D., & Meher Prasad, A. (2017). Mass Housing Using GFRG Panels: A Sustainable, Rapid and Affordable Solution. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 98(1–2), 95–100. <https://doi.org/10.1007/s40030-017-0200-8>

Cobrerros, C. (2015). *Paneles prefabricados termo-acústicos para vivienda industrializada a partir de paja de cereal y tierra estabilizada*. Universidad Autónoma de Querétaro.

Escamilla, F. (2016). *Análisis del comportamiento térmico estructural de paneles prefabricados de ferrocemento huecos para muros de casa habitacion*. Universidad Autónoma de Querétaro.

Fernando, P. L. N., Jayasinghe, M. T. R., & Jayasinghe, C. (2017). Structural feasibility of Expanded Polystyrene (EPS) based lightweight concrete sandwich wall panels. *Construction and Building Materials*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.027>

Gallo, G. O., Espino, L. I., & Olvera, A. E. (2005). *Diseño Estructural de Casas Habitación*. (M. Hill, Ed.) (Segunda Ed). México.

Instituto Mexicano del Transporte. (2019). *CMT. Características de los materiales*. Retrieved from <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-002-19.pdf>

Jamal Shannag, M., & Ziyad, T. Bin. (2007). Flexural response of ferrocement with fibrous cementitious matrices. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1198–1205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.021>

Martínez, J. L., & Yáñez, M. (2015). *Resistencia a cortante de muretes de bloques*

de concreto ligero de la ciudad de Querétaro pegados con diferentes tipos de mortero. Universidad Autónoma de Querétaro. Retrieved from <http://ri.uaq.mx/handle/123456789/5450>

Naaman, A. (2000). *Ferrocement & laminated cementitious composites.* (A. E. Naaman, Ed.) (1 st ed.). Ann Arbor, Michigan: Techno Press 3000.

Nilson, A. H. (2001). *Diseño de estructuras de concreto* (12a ed.). Mc Graw Hill.

Olvera L., A. (1985). *El ferrocemento y sus aplicaciones* (Primera ed).

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación. Norma mexicana NMX-C-405-ONNCCE-2014 (2014). México.

Paul, B. K., & Pama, R. P. (1978). *Ferrocemento* (Primera Ed). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

Queiros, M., & Correa, V. M. (2016). Comportamiento de estructuras compuestas por muros estructurales prefabricados con bambú. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, (217), 1–20.

Ramírez, Á. R. (2014). *Caracterización, desarrollo y aplicaciones de un ferrocemento celular ecológico.* Universidad Autónoma de Querétaro.

Rosado, A. I., Moreno, E. I., & Jiménez, L. F. (2016). Desempeño elástico y plástico del concreto fabricado con agregados reciclados de origen calizo de residuos de demolición. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. Retrieved from http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_19/te_10/ar_19.pdf

Shaheen, Y. B. I., Etman, Z. A., & Ramadan, A. G. (2016). Characteristics of Ferrocement Lightweight Wall. *International Journal of Civil Engineering*, 16(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0061-y>

Unidad de apoyo técnico para el saneamiento básico del área rural. (2003). Guía de construcción para estructuras de ferrocemento. Lima.

Wang, L., Wu, Z., Liu, W., & Wan, L. (2018). Structural behavior of load-bearing sandwich wall panels with GFRP skin and a foam-web core. *Science and Engineering of Composite Materials*, 25(1), 173–188. <https://doi.org/10.1515/secm-2015-0260>

Yeomans, F. S., Reynoso, R., & Marín, J. J. (2000). *Sistemas de vivienda de rápida construcción*. México.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

10. Apéndice

10.1 Gráficas esfuerzo – Deformación unitaria de las probetas.

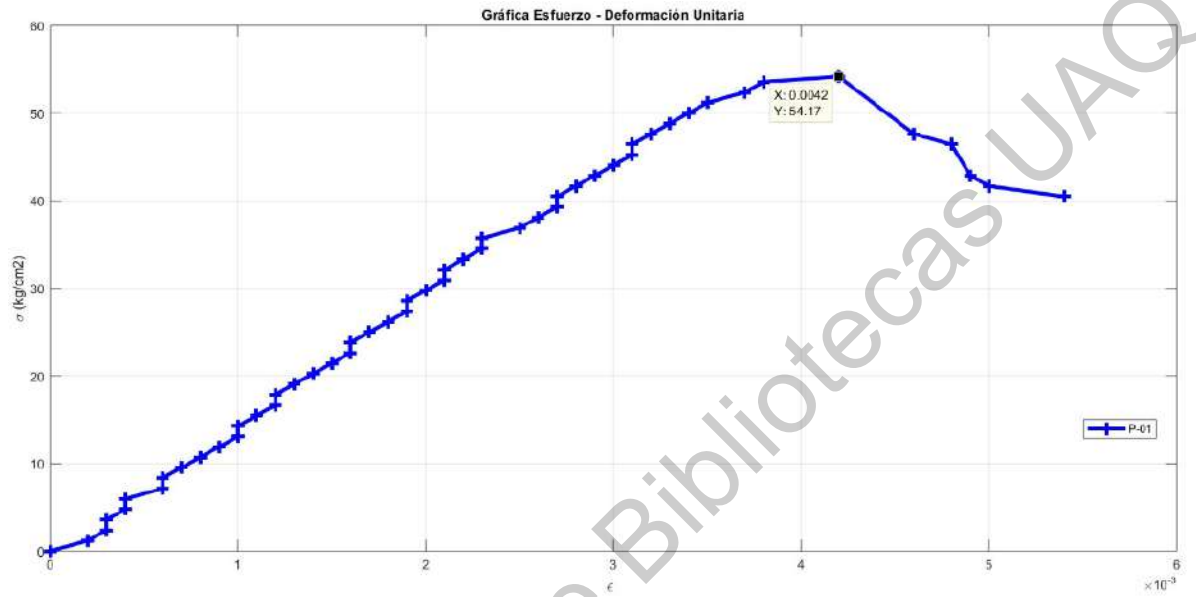


Fig. 38 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-01.

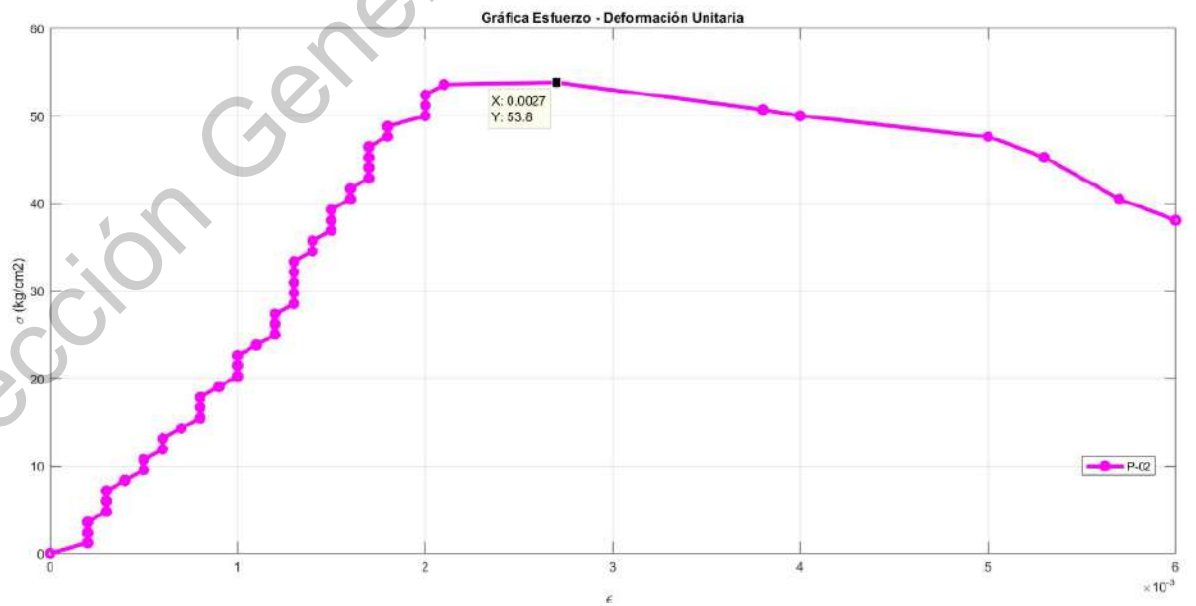


Fig. 39 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-02.

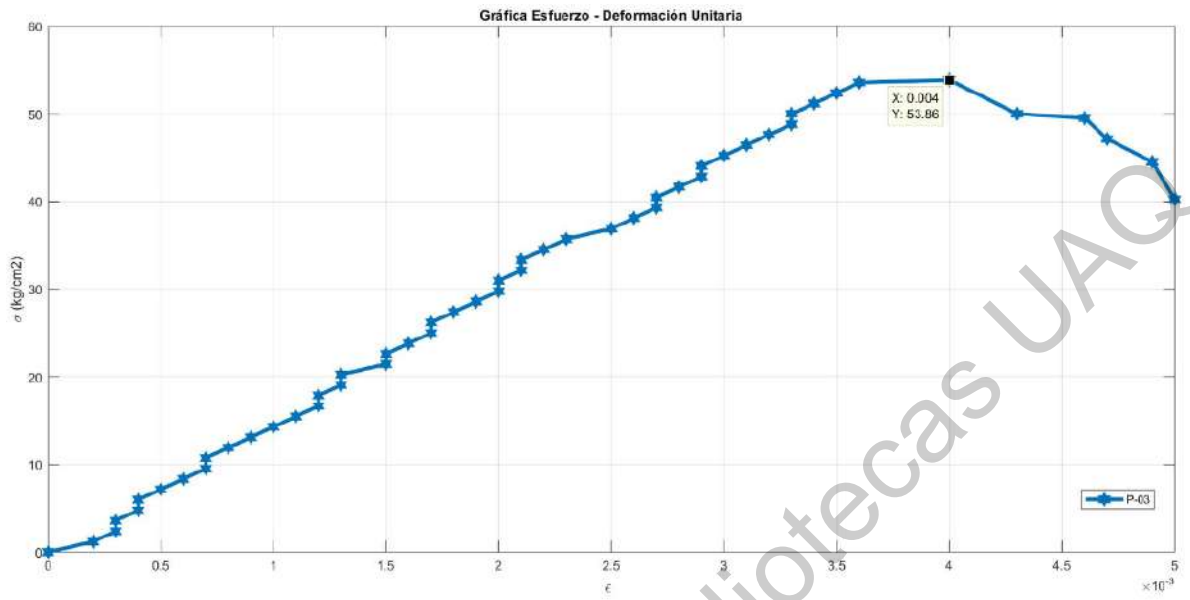


Fig. 40 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-03.

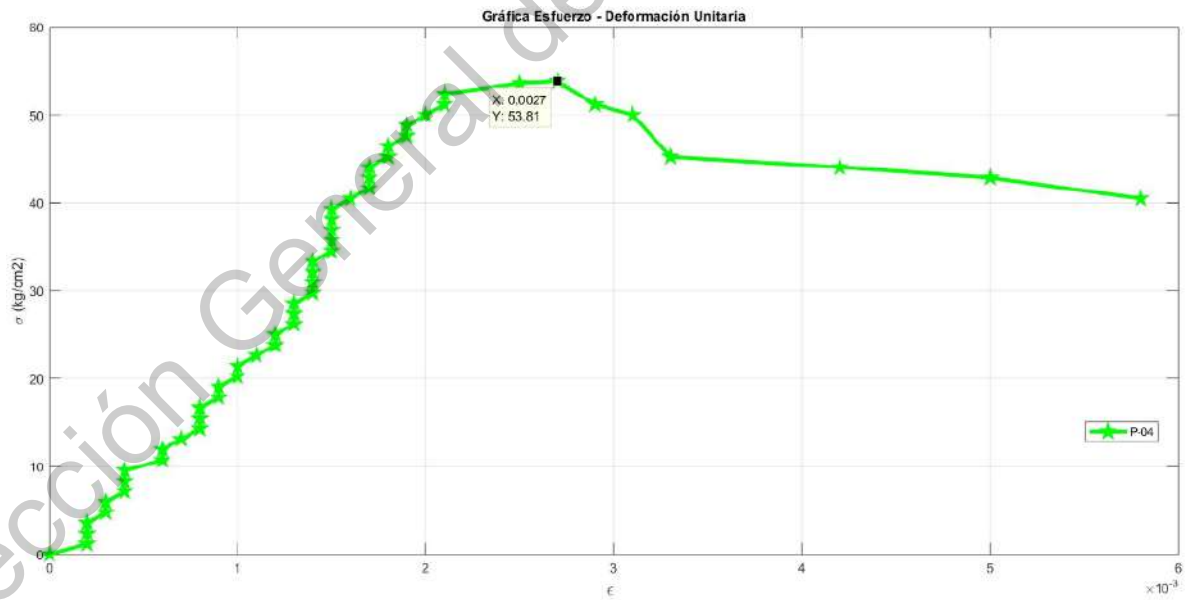


Fig. 41 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-04.

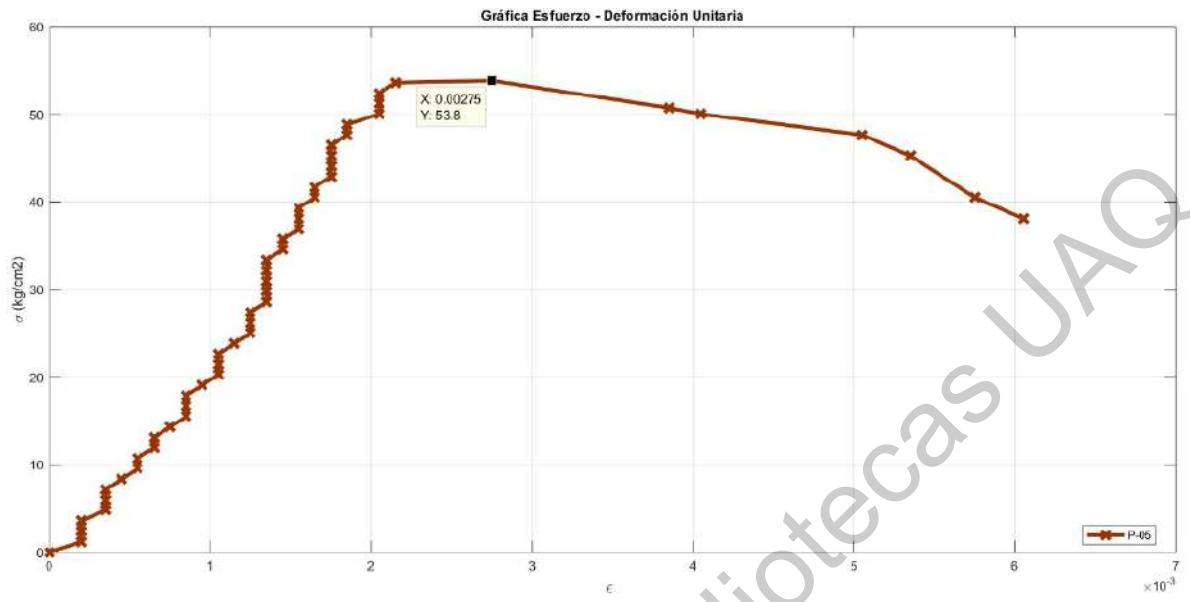


Fig. 42 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-05.

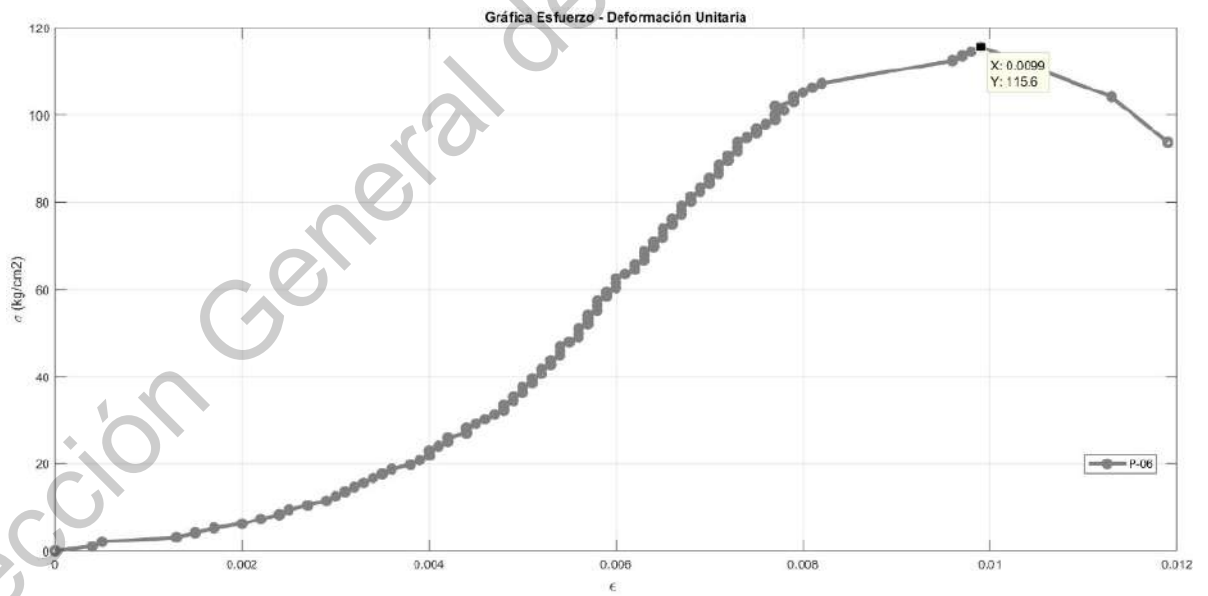


Fig. 43 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-06.

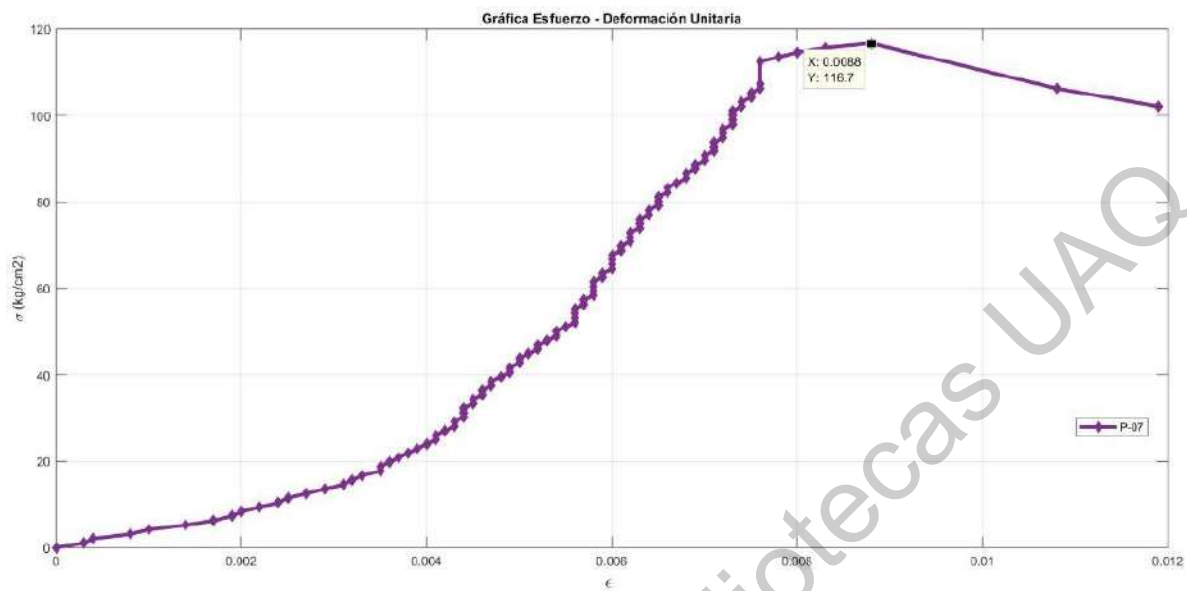


Fig. 44 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-07.

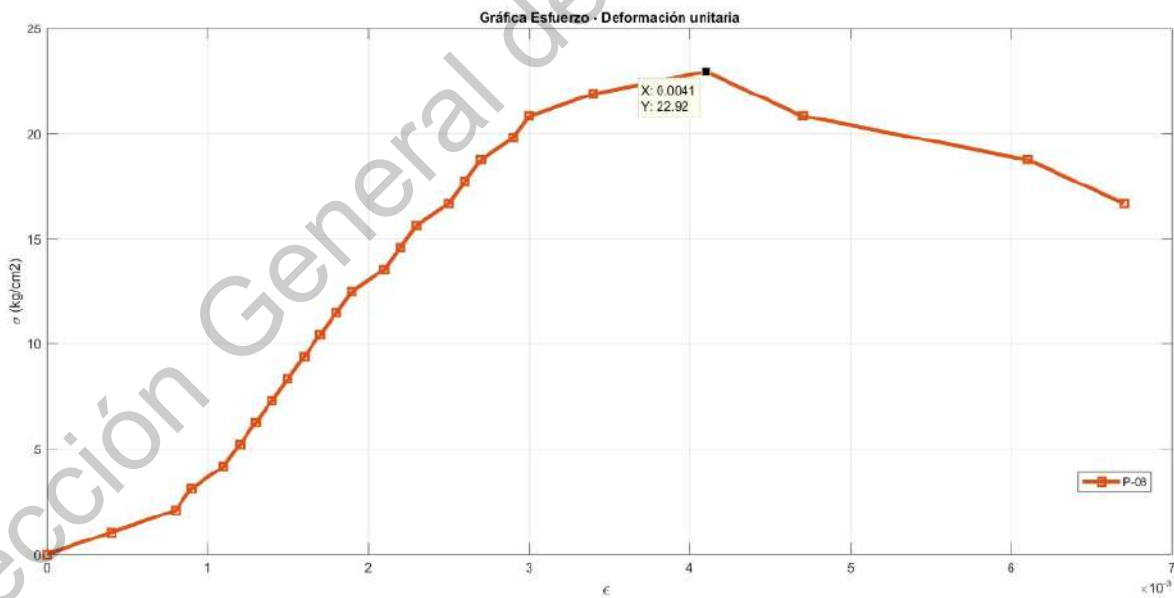


Fig. 45 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-08.

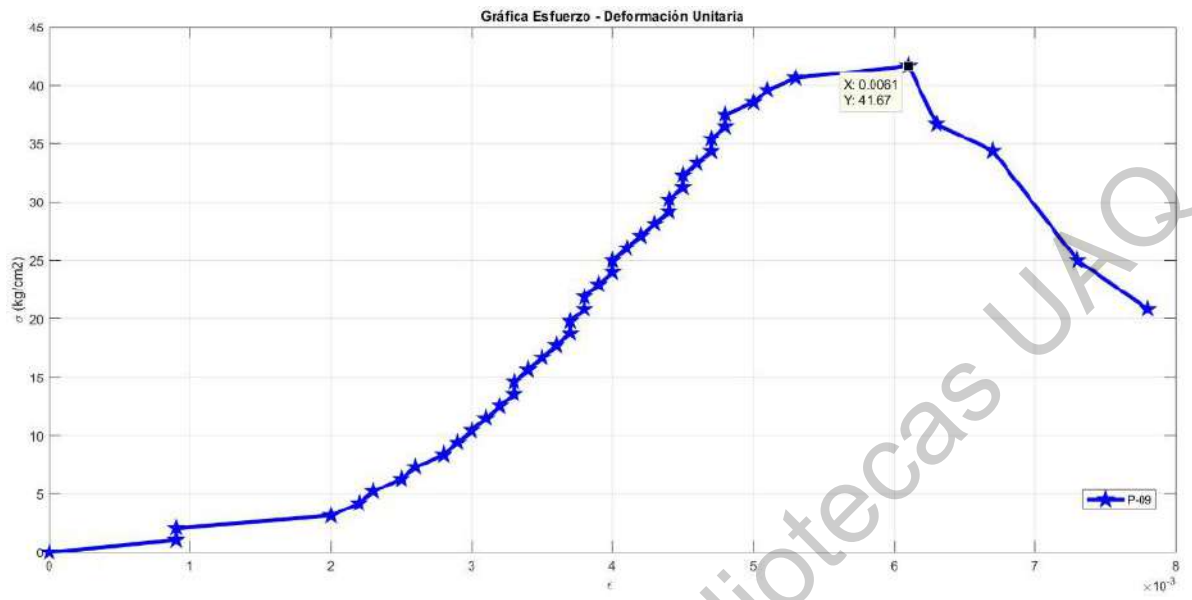


Fig. 46 Gráfica esfuerzo – deformación panel P-09.

10.2 Archivo fotográfico.



Fig. 47 Molde usado para la elaboración del lote uno de paneles.



Fig. 49 Prueba de granulometría para agregado fino.



Fig. 48 Molde usado para la elaboración del lote dos de paneles.



Fig. 50 Prueba de peso relativo específico.



Fig. 51 Elaboración de mezclas.



Fig. 54 Configuración de prueba.



Fig. 52 Pruebas de compresión.



Fig. 55 Aparición de las primeras grietas.



Fig. 53 Aplicación de desmoldante.



Fig. 56 Falla del espécimen.