



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

**DISEÑO ESTRUCTURAL, CONSTRUCCIÓN Y ENSAYE DE UNA  
PROPUESTA DE UN MURO PANEL MODULAR PARA CASA  
HABITACIÓN.**

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestría en Ciencias (Estructuras)

**Presenta:**

Ing. María Fernanda Guerrero Urbina

**Dirigido por:**

Dr. Enrique Rico García

Querétaro, Qro. Diciembre 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Diseño estructural, construcción y ensaye de una  
propuesta de un muro panel modular para casa  
habitación

**por**

María Fernanda Guerrero Urbina

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0  
Internacional](#).

**Clave RI:** IGMAC-309247



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias Línea Terminal Estructuras

**DISEÑO ESTRUCTURAL, CONSTRUCCIÓN Y ENSAYE DE UNA PROPUESTA DE UN  
MURO PANEL MODULAR PARA CASA HABITACIÓN.**

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestría en Ciencias (Estructuras)

**Presenta:**

Ing. María Fernanda Guerrero Urbina

**Dirigido por:**

Dr. Enrique Rico García

Dr. Enrique Rico García  
Presidente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
Secretario

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández  
Vocal

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno  
Suplente

M.C. Iván Fermín Arjona Catzim  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Diciembre de 2023  
México

## **DEDICATORIA**

*Papá, mamá y hermanos* este trabajo tiene su esencia y es suyo también porque siempre han sido mi apoyo incondicional y mi motivación para seguir creciendo profesionalmente, esta maestría es una meta cumplida y gracias Dios la he podido compartir con ustedes.

*Francisco* gracias por cuidar de mí, por acompañarme en la aventura de vivir en otra ciudad, de trabajar juntos en mis experimentos y de compartir tu tiempo conmigo.

*Amigos* hicieron más ameno y divertido cada momento dentro y fuera de la universidad, me brindaron todo su apoyo al realizar mis experimentos y estaré siempre agradecida de haber coincidido con su amistad.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al *Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías* (CONAHCYT), por el apoyo económico y oportunidades para formar a más profesionales que buscan seguir aprendiendo.

A la *Universidad Autónoma de Querétaro*, por el acompañamiento al área de posgrado, y en especial por tener laboratorios y almacenes a disposición de los alumnos que facilitan poder llevar a cabo la experimentación de diferentes proyectos.

Al *Dr. Alejandro Clemente Chávez* por iniciar juntos el desarrollo de este trabajo, el tiempo y dedicación puestos en cada actividad para lograr los objetivos planteados.

Al *Dr. Enrique Rico García* por la disposición de integrarse a este proyecto y desde el primer momento apoyarme con su conocimiento y experiencia para poder concluir con mi experimentación.

Al *Dr. José Luis Reyes Araiza* por su apoyo en el muro de reacción y en el préstamo de herramienta y equipo.

# ÍNDICE

<b>DEDICATORIA</b> .....	3
<b>RESUMEN</b> .....	11
<b>SUMMARY</b> .....	12
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	13
<b>1.1 Planteamiento del Problema</b> .....	14
<b>1.2 Justificación</b> .....	15
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
<b>2.1 Antecedentes</b> .....	16
<b>2.1.1 Construcción modular</b> .....	16
<b>2.1.2 Tendencias de construcción</b> .....	19
<b>2.1.3 Concreto Ligero</b> .....	28
<b>2.2 Normativa Mexicana</b> .....	30
<b>2.3 Fundamento Teórico</b> .....	33
<b>3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS</b> .....	39
<b>3.1 Hipótesis</b> .....	39
<b>3.2 Objetivos</b> .....	39
<b>4. MATERIALES Y METODOLOGÍA</b> .....	40
<b>4.1 Diseño del prototipo</b> .....	44
<b>4.1.1 Geometría y características del MPM</b> .....	45
<b>4.1.2 Dimensiones</b> .....	45
<b>4.1.3 Conexiones</b> .....	46
<b>4.1.4 Mezcla de agregados y cementantes</b> .....	52
<b>4.1.5 Molde de construcción</b> .....	53
<b>4.1.6 Armado de muro</b> .....	55
<b>4.1.7 Cimentación</b> .....	56
<b>4.1.8 Sistema constructivo del muro panel modular</b> .....	58
<b>4.2 Diseño de mezcla de concreto</b> .....	60
<b>4.2.1.1 Elaboración de blocks, pilas y muretes</b> .....	66
<b>4.2.1.2 Pieza maciza</b> .....	67
<b>4.2.1.3 Pila</b> .....	68
<b>4.2.1.4 Murete</b> .....	68
<b>4.3 Construcción del prototipo de muro panel modular</b> .....	68

<b>4.4</b>	<b>PRUEBAS DE ENSAYO DEL MURO PANEL MODULAR</b> .....	<b>70</b>
4.4.1	Resistencia a la compresión simple.....	73
4.4.2	Resistencia bajo carga lateral en el plano del muro.....	76
4.4.3	Resistencia al fuego .....	84
4.4.4	Resistencia al impacto para muros.....	86
4.4.5	Resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicularmente al plano	89
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>92</b>
5.1	Blocks, pilas y muretes .....	92
5.2	Resistencia a la compresión simple.....	99
5.3	Resistencia bajo carga lateral en el plano del muro.....	104
5.4	Resistencia al fuego .....	107
5.5	Resistencia al impacto para muros.....	114
5.6	Resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicularmente al plano .....	116
5.7	Modelación en software SAP2000 .....	119
5.8	Muros de mampostería.....	123
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>125</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>130</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.1.</b> Ventajas de tendencias de construcción.....	44
<b>Tabla 4.2</b> Características malla electrosoldada .....	55
<b>Tabla 4.3.</b> Peso volumétrico seco compacto del tezontle y arenilla.....	60
<b>Tabla 4.4</b> Caracterización de las propiedades de la arenilla .....	60
<b>Tabla 4.5</b> Caracterización de las propiedades de la arenilla .....	61
<b>Tabla 4.6</b> Diseño de mezclas de concreto y sus relaciones agua-cemento .....	62
<b>Tabla 4.7</b> Peso volumétrico de especímenes cilíndricos de mezcla de concreto ligero .....	64
<b>Tabla 4.8</b> Cantidad de muestreo para panel Tipo I, NMX-C-405-ONNCCE-2014.....	69
<b>Tabla 5.1</b> Resultados de la resistencia a compresión de blocks de concreto ligero .....	92
<b>Tabla 5.2.</b> Resultado del ensayo de pilas de concreto ligero .....	93
<b>Tabla 5.3.</b> Resultados del ensayo de muretes de concreto ligero.....	97
<b>Tabla 5.4</b> Resistencia a la compresión en kg/cm <sup>2</sup> de probetas testigo y probetas sometidas a fuego .....	111
<b>Tabla 5.5</b> Desplazamientos registrados en prueba de impacto sobre el MPM.....	114
<b>Tabla 5.6</b> Deformaciones del muro panel modular sometido a carga perpendicular al plano .....	117
<b>Tabla 5.7</b> Resumen de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas .....	119
<b>Tabla 5.8</b> propiedades de la mampostería vs propiedades del concreto ligero del MPM .....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Ejemplo de estructuras bidimensionales con estado de esfuerzos planos en vigas (3 Tipos de Fachadas Prefabricadas, Ventilada y Pesada - Diseño Vip, n.d.) .....	17
<b>Figura 2.2</b> Colocación de paneles (López Flores, 2019) .....	18
<b>Figura 2.3</b> Proceso de elaboración de paneles de ferrocemento (Valencia Jiménez, 2020) .....	19
<b>Figura 2.4</b> Montaje de muro tilt-up (El Tilt-Up y Las Edificaciones Industriales - 360 EN CONCRETO, n.d.) 21	
<b>Figura 2.5</b> Placa alveolar (Nave Industrial Con Prefabricados de Concreto - Viprocosa, n.d.) .....	22
<b>Figura 2.6</b> Sistema de construcción de muros Drywall (Drywall - Home Solution, n.d.).....	23
<b>Figura 2.7</b> Panel aislado estructural (Structural Insulated Panels - BUILDERS, n.d.) .....	24
<b>Figura 2.8</b> Encofrado de poliestireno (CLIMABLOCK - Pontarolo Engineering, n.d.).....	25
<b>Figura 2.9</b> Construcción de muros de concreto con uso de moldes, Guadalajara 2022. (Elaboración propia) .....	26
<b>Figura 2.10</b> Sistema constructivo de vivienda con moldes en Torreón, Coahuila, México. (Molde Total, n.d.).....	27
<b>Figura 2.11</b> Esquema del método de prueba de resistencia a la compresión simple (Valencia Jiménez, 2020).....	30
<b>Figura 2.12</b> Esquema del método de prueba de resistencia bajo carga lateral en el plano del muro (Valencia Jiménez, 2020) .....	31
<b>Figura 2.13</b> Cámara de fuego directo (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2014).....	31
<b>Figura 2.14</b> Esquema del método de prueba de resistencia al impacto (Valencia Jiménez, 2020).....	32
<b>Figura 2.15</b> Esquema del método de prueba de resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicularmente al plano (Valencia Jiménez, 2020) .....	33
<b>Figura 2.16</b> Estructuras bidimensionales sometidas a esfuerzos planos (Zienkiewicz & Taylor, 1994) .....	34
<b>Figura 2.17</b> Conectividad de elementos con tres y cuatro nodos (SAP2000, 2017).....	37
<b>Figura 2.18</b> Carga uniforme sobre la superficie de un elemento shell (SAP2000, 2017).....	38
<b>Figura 2.19</b> Comportamiento de elementos tipo shell en software SAP2000 (Criterios Para El Modelado Con Elementos Finitos Utilizando SAP2000, n.d.).....	38
<b>Figura 4.1</b> Diagrama de flujo de la metodología .....	40
<b>Figura 4.2</b> Medidas geométricas del muro panel modular.....	46
<b>Figura 4.3</b> Esquema de conexión soldada por medio de ángulos del MPM .....	47
<b>Figura 4.4</b> Distribución de ángulos de acero dentro del MPM .....	48
<b>Figura 4.5</b> Modelo del muro panel modular en SAP2000 .....	50
<b>Figura 4.6</b> Sujeción de ángulos dentro del MPM para conexiones.....	52
<b>Figura 4.7</b> Esquema de molde de construcción del MPM .....	54
<b>Figura 4.8</b> Cimbra de madera para la construcción del MPM .....	55
<b>Figura 4.9</b> Armado de malla electrosoldada para el MPM .....	56
<b>Figura 4.10</b> Esquema de cimentación del sistema constructivo del MPM .....	57
<b>Figura 4.11</b> Cimentación del MPM .....	58
<b>Figura 4.12</b> Isométrico del sistema de construcción de muros panel modular en vivienda.....	59
<b>Figura 4.13</b> Comparativa de resistencia teórica vs real para una resistencia de 125 kg/cm <sup>2</sup> diseñada con arenilla .....	61
<b>Figura 4.14</b> Resistencia a 14 días del diseño de mezclas de concreto ligero .....	63
<b>Figura 4.15</b> Curva de resistencia para diferentes mezclas de arenilla y concreto normal según diseño de la norma ACI .....	64
<b>Figura 4.16</b> Peso volumétrico obtenido en la elaboración del MPM.....	65
<b>Figura 4.17</b> Pieza, pila y murete de una mezcla de concreto ligero.....	67
<b>Figura 4.18</b> Molde de construcción del muro panel modular .....	70

<b>Figura 4.19</b>	Muro de reacción de la Universidad Autónoma de Querétaro .....	71
<b>Figura 4.20</b>	Cimentación para la probeta de ensayo del MPM.....	72
<b>Figura 4.21</b>	Sistema de anclaje del MPM.....	73
<b>Figura 4.22</b>	Detalle de construcción del sistema de carga a compresión.....	74
<b>Figura 4.23</b>	Gato hidráulico con capacidad de 30 ton .....	75
<b>Figura 4.24</b>	Manómetro para registrar la presión ejercida por el gato hidráulico.....	75
<b>Figura 4.25</b>	Instrumentación del muro panel modular.....	76
<b>Figura 4.26</b>	Cimentación para prueba de carga lateral .....	77
<b>Figura 4.27</b>	Conexión de cimentación del panel para prueba de carga lateral.....	78
<b>Figura 4.28</b>	Conexión soldada del MPM para prueba de carga lateral.....	79
<b>Figura 4.29</b>	Perfiles de acero para la distribución de cargas en prueba de carga lateral.....	80
<b>Figura 4.30</b>	Colocación de eslinga para ejercer carga de compresión sobre la probeta de ensaye.....	81
<b>Figura 4.31</b>	Colocación de gato hidráulica para ejercer una carga de compresión de la probeta de ensaye.....	81
<b>Figura 4.32</b>	Gato hidráulico para ejercer fuerza lateral sobre la probeta de ensaye .....	82
<b>Figura 4.33</b>	Celda de carga e instrumento de lectura.....	83
<b>Figura 4.34</b>	Barra de transmisión para medir la deformación de la probeta de ensaye .....	83
<b>Figura 4.35</b>	Adaptación de horno a cámara de fuego .....	85
<b>Figura 4.36</b>	Especímenes para prueba de fuego.....	86
<b>Figura 4.37</b>	Probeta de ensaye para prueba de impacto.....	87
<b>Figura 4.38</b>	Sistema de prueba de impacto sobre el MPM .....	88
<b>Figura 4.39</b>	Sistema de medición para la deformación presentada en la prueba de impacto.....	89
<b>Figura 4.40</b>	Esquema de prueba de carga perpendicular al plano.....	90
<b>Figura 4.41</b>	Carga perpendicular al plano sobre la probeta de ensaye.....	90
<b>Figura 4.42</b>	Carga perpendicular al plano sobre el MPM.....	91
<b>Figura 5.1</b>	Ensayo de compresión a block de concreto ligero .....	93
<b>Figura 5.2</b>	Ensayo de pilas de concreto ligero .....	94
<b>Figura 5.3</b>	Curva esfuerzo deformación para una pila de concreto ligero sin malla.....	94
<b>Figura 5.4</b>	Curva esfuerzo deformación para una pila de concreto ligero con malla.....	95
<b>Figura 5.5</b>	Falla de pila con malla de refuerzo.....	95
<b>Figura 5.6</b>	Ensayo de muretes de concreto ligero .....	96
<b>Figura 5.7</b>	Curva esfuerzo deformación para un murete de concreto ligero sin malla .....	97
<b>Figura 5.8</b>	Curva esfuerzo deformación para un murete de concreto ligero con malla .....	98
<b>Figura 5.9</b>	Falla a cortante de muretes de concreto ligero .....	98
<b>Figura 5.10</b>	Falla a compresión del muro panel modular .....	100
<b>Figura 5.11</b>	Vista frontal del MPM ensayado a compresión .....	101
<b>Figura 5.12</b>	Agrietamiento posterior del MPM sometido a compresión.....	102
<b>Figura 5.13</b>	Registro de carga y deformaciones correspondientes a la prueba de compresión.....	103
<b>Figura 5.14</b>	Curva esfuerzo deformación del MPM sometido a compresión .....	104
<b>Figura 5.15</b>	Carga obtenida para prueba de carga lateral en el panel .....	105
<b>Figura 5.16</b>	Fallas presentadas en la probeta de ensaye por carga lateral.....	106
<b>Figura 5.17</b>	Fallas presentadas en las conexiones de la probeta ensayada bajo carga lateral .....	106
<b>Figura 5.18</b>	Foto de cámara térmica sobre un espécimen de concreto ligero sometido a fuego directo.....	108
<b>Figura 5.19</b>	Foto de cámara térmica de cara contraria a la expuesta a fuego directo .....	108
<b>Figura 5.20</b>	Foto de cámara térmica sobre cara expuesta a fuego directo .....	109
<b>Figura 5.21</b>	Agrietamiento de probeta sometida a fuego directo.....	110
<b>Figura 5.22</b>	Ensayo a compresión de probetas testigo y sometidas a fuego .....	111
<b>Figura 5.23</b>	Comparativa de resistencia a compresión de probeta testigo vs probeta sometida a fuego n=3, p=0.05 .....	112

<b>Figura 5.24</b> Ensayo a compresión de especímenes "A" .....	113
<b>Figura 5.25</b> Ensayo a compresión de especímenes "B" .....	113
<b>Figura 5.26</b> Ensayo a compresión de especímenes "C" .....	114
<b>Figura 5.27</b> Prueba de impacto del MPM .....	115
<b>Figura 5.28</b> Deformación inicial del elemento sometido a carga perpendicular al plano .....	116
<b>Figura 5.29</b> Grafica tiempo vs deformación del MPM sometido a carga perpendicular a su plano .....	117
<b>Figura 5.30</b> Deflexión perpendicular al plano del MPM .....	118
<b>Figura 5.31</b> Modelado de un muro panel modular en el programa Sap200.....	120
<b>Figura 5.32</b> Geometría de diseño de ANSYS Workbench.....	121
<b>Figura 5.33</b> Mallado utilizado en el análisis por elementos finitos .....	121
<b>Figura 5.34</b> Deformación total esperada para el sistema de muros panel modular.....	122
<b>Figura 5.35</b> Esfuerzos esperados para el sistema de muros panel modular .....	123

## RESUMEN

El Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social estima un rezago de vivienda en México del 45% en el cual los ocupantes de estas requieren una vivienda completa, o bien, mejoras sustanciales a la que habitan, además el 40.8% de los daños que se reportan en las viviendas en México se asocian a fallas en los muros. La problemática es que 88.8% de las paredes de las casas en el país son de tabique, ladrillo o block, esto es un proceso artesanal que depende del conocimiento y habilidades del constructor lo, que provoca que se construyan viviendas con una mayor probabilidad de presentar daños. En la actualidad existen otros sistemas de construcción diferentes a la mampostería, sin embargo, estos buscan principalmente reducir sus costos de producción a costa de la seguridad estructural. Por lo anterior en este trabajo se diseñó un sistema de construcción industrializado y clasificado de tipo estructural que es eficiente y competitivo frente a la mampostería. Se determinaron las características del sistema de muros propuesto y se construyeron 8 paneles de concreto ligero de 10 x 50 x 240 cm y 6 de 60 x 60 cm de acuerdo con la norma NMX-C-405-ONNCCE-2014 para realizar pruebas de carga a compresión, carga lateral, carga de impacto, carga uniformemente repartida perpendicularmente al plano del elemento y una prueba de fuego directo. Cada panel fue elaborado con una mezcla de concreto ligero con un peso volumétrico de 1409.16 kg/m<sup>3</sup>, la probeta de ensayo se forma por la conexión de 3 paneles de 10 x 50 x 240 cm. La probeta ensayada a compresión tuvo una resistencia de 7.05 kg/cm<sup>2</sup> y bajo una carga lateral resistió una carga de 1.67 ton, por otra parte, el material presentó una reducción de resistencia de 20.59% después de haber sido expuesto a fuego directo en probetas de 10 x 60 x 60 cm, el panel fue capaz de recibir impactos presentando una deformación instantánea promedio de 9.38 mm sin presentar un daño estructural significativo, sin embargo, el elemento no es suficientemente rígido para soportar una carga de 100 kg/cm<sup>2</sup> perpendicular a su plano sin tener una deflexión máxima de 6.66 mm. El sistema constructivo no se clasifica como estructural al no cumplir con la totalidad de los límites permitidos por la normativa, sin embargo, su construcción puede ser mejorada por un proceso industrializado para cuidar la calidad de construcción, además de poder mejorar las condiciones de cada prueba a la que fue sometido.

**Palabras clave:** prefabricado, muro-estructural, concreto, ensayo

## SUMMARY

The Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social estimates a housing gap in Mexico of 45% in which the occupants of these require a complete home, or substantial improvements to the one they live in, in addition to 40.8% of the damages that are reported in homes in Mexico are associated with failures in the walls. The problem is that 88.8% of the walls of houses in the country are made of partition, brick or block, this is an artisanal process that depends on the knowledge and skills of the builder, which causes houses to be built with a greater probability of presenting damage. Currently there are other construction systems other than masonry, however, they mainly seek to reduce their production costs at the expense of structural safety. Therefore, in this work, an industrialized and classified structural construction system was designed that is efficient and competitive compared to masonry. The characteristics of the proposed wall system were determined and 8 lightweight concrete panels of 10 x 50 x 240 cm and 6 of 60 x 60 cm were built in accordance with the NMX-C-405-ONNCCE-2014 standard to carry out load tests, compression, lateral load, impact load, load uniformly distributed perpendicular to the plane of the element and a direct fire test. Each panel was made with a light concrete mixture with a volumetric weight of 1409.16 kg/m<sup>3</sup>. The test specimen is formed by connecting 3 panels of 10 x 50 x 240 cm. The specimen tested in compression had a resistance of 7.05 kg/cm<sup>2</sup> and under a lateral load it resisted a load of 1.67 tons. On the other hand, the material presented a resistance reduction of 20.59% after being exposed to direct fire in specimens of 10 x 60 x 60 cm, the panel was capable of receiving impacts presenting an average instantaneous deformation of 9.38 mm without presenting significant structural damage, however, the element is not rigid enough to support a load of 100 kg/cm<sup>2</sup> perpendicular to its flat without having a maximum deflection of 6.66 mm. The construction system is not classified as structural as it does not comply with all the limits allowed by the regulations, however, its construction can be improved by an industrialized process to take care of the quality of construction, in addition to being able to improve the conditions of each test. to which he was subjected.

**Keywords:** precast, structural- wall, concrete, test

## **CAPÍTULO 2**

### **1. INTRODUCCIÓN**

De acuerdo con Estudio Diagnóstico del Derecho a la Vivienda Digna y Decorosa 2018 presentado por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, (CONEVAL, 2018), se estima un rezago de 14 millones de viviendas, esto quiere decir que hay un rezago de vivienda a nivel nacional del 44.7% en el cual los ocupantes de estas requieren una vivienda con infraestructura básica, o bien, con mejoras sustanciales a la que habitan.

Es por ello que diferentes organismos en México como el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) ponen especial atención en esta área del desarrollo integral de cada individuo, este organismo ha desarrollado los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) que organizan los esfuerzos de investigación en torno a problemáticas nacionales concretas que, por su importancia y gravedad, requieren de una atención urgente y una solución integral, profunda y amplia, dentro de estas problemáticas el CONAHCYT considera que se requiere una atención urgente a la vivienda. Hoy día México se enfrenta al desafío de garantizar el acceso a una vivienda adecuada, sustentable y en equilibrio con el entorno natural, que amplíe las oportunidades de los grupos vulnerables y que propicie, además de una vida digna, el desarrollo de una economía social sólida, solidaria y estable (CONAHCYT, 2022).

A través de la Universidad Autónoma de Querétaro se proponen líneas de acción encaminadas a reducir el déficit de vivienda y mejorar los procesos constructivos actuales, en este trabajo se desarrolla la construcción de un muro panel modular (MPM) con propiedades estructurales que ayude a reducir el déficit de vivienda del país y se encuentre a la vanguardia de las tendencias de construcción a nivel mundial.

El MPM fue diseñado y experimentado como una unidad individual bajo la NMX-C-405-ONNCCE-2014, aprobando las 5 pruebas correspondientes a paneles Tipo I

- 1) Resistencia a la carga axial
- 2) Resistencia a la carga latera
- 3) Resistencia al fuego
- 4) Resistencia al impacto
- 5) Resistencia a carga uniforme.

## **1.1 Planteamiento del Problema**

De acuerdo con el CONEVAL (2018), en México se estima que un 45% de la población no habita en una vivienda digna, y una situación similar ocurre en el resto del mundo; el 64.2% de la producción de vivienda en México es de autoproducción, es decir, se construye por sus propios medios sin acceso a algún crédito hipotecario, lo que sitúa en gran riesgo ante desastres naturales a la sociedad por bajos estándares de calidad en la construcción sin supervisión. El 88.6% de las paredes de las casas en México son elaboradas con materiales de procesos tradicionales (Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera o concreto) (Tejada Parra & Lara Enríquez, 2014) , lo que significa que es cuestionable la calidad estructural, en gran parte por la nula supervisión en la venta de materiales. Por otro lado, Tejada Parra & Lara Enríquez (2014) exponen que, en 2008, por primera vez en la historia, la población mundial residente en áreas urbanas superó 50%, lo que las convirtió en el hábitat dominante de la humanidad; esto expone la importancia de atender la problemática de una construcción controlada. Por otra parte, (INEGI, 2020) reporta que de los daños totales en vivienda el 40.8% está relacionado con los muros, después del primer lugar asociados a humedades y filtraciones de agua. Todo lo anterior conduce a la propuesta de un MPM que puede contribuir en gran parte a la solución a tales problemáticas de la siguiente forma:

- 1) El déficit de vivienda puede ser aminorado si se construye de forma económica a través de procesos constructivos diferentes, como la construcción de un MPM que reduce los tiempos, no necesita el uso de mano de obra especializada y proporciona las condiciones estructurales para garantizar la seguridad de sus habitantes.

2) Ofertar un prefabricado de MPM de gran eficiencia y optimizado en economía que pueda ser empleado tanto en la autoconstrucción como en el sector formal de producción de la vivienda para garantizar la calidad de las edificaciones y reducir costos de daños en la vivienda ante desastres naturales, por la casi nula supervisión en la edificación y mala calidad de las piezas artificiales del mercado.

## **1.2 Justificación**

El déficit de la vivienda es un rubro prioritario que se establece dentro de los 10 ejes principales de los Programas Nacionales Estratégicos propuestos por CONAHCYT, y que estos a su vez están alineados con la agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en lo referido al eje 11.- “Ciudades y comunidades sostenibles” por ello se justifica a nivel nacional y mundial el desarrollo de conocimientos en líneas de investigación encaminadas a proveer viviendas dignas y seguras. En México predomina la construcción tradicional de mamposterías; 91.6% de las viviendas en México son construidas con mampostería (INEGI, 2020), donde se demanda gran cantidad de mano de obra por los procesos constructivos artesanales como los muros (donde además la calidad es cuestionada por falta de supervisión), lo que eleva precios en el costo de la construcción y por ende la dificultad cada vez mayor en la adquisición de la misma. Como en México el 91.6% de los muros que componen la vivienda son de mampostería (INEGI, 2020) es necesario la construcción de un MPM prefabricado con materiales con los que la población de México se encuentra familiarizado. Por lo tanto, la propuesta de un muro panel modular puede sistematizar la edificación de la vivienda popular de forma económica y óptima estructuralmente; esto a partir de los materiales abundantes que tiene nuestro país y lograr reducir los costos de la vivienda al edificar con mayor rapidez, a menor costo de mano de obra y con una calidad controlada.

# CAPÍTULO 2

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El sector de la construcción es uno de los más grandes a nivel mundial y si existe un cambio en esta área entonces habrá un gran impacto. La industria está adoptando nuevos materiales, tecnologías digitales, variabilidad de diseños, mejorando la precisión y la productividad en la fabricación. Términos como construcción fuera del sitio, prefabricado y construcción modular se usan indistintamente y cubren una variedad de enfoques y sistemas diferentes.

### 2.1 Antecedentes

En la construcción de vivienda existen diferentes líneas de investigación que buscan mejorar sus procesos constructivos con el objetivo de verse reflejado en la parte económica, sin descuidar o dejar por un lado el diseño y su resistencia estructural.

Nos encontramos en el camino a la industrialización de la vivienda, que es un proceso productivo que, de forma racional y automatizada, emplea materiales, medios de transporte y técnicas mecanizadas en serie para obtener una mayor productividad, y esta productividad es pequeños cambios en los procesos, la generación eficiente de series pequeñas o unitarias (Jáuregui, 2009).

#### 2.1.1 Construcción modular

En México se empiezan a desarrollar nuevas tendencias de construcción de viviendas, un ejemplo es en la ciudad de Torreón, Coahuila en México donde se han desarrollado nuevos procesos como la construcción de viviendas de muros de concretos colados en el sitio con uso de moldes, lo que le permite construir casas reduciendo el tiempo de construcción.

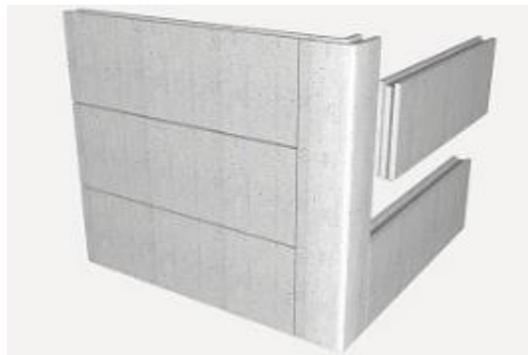
Las nuevas tendencias de construcción en el mundo están encaminadas a desarrollar sistemas con elementos prefabricados y modulares. estos sistemas presentan ventajas de ahorro en tiempo de construcción y control de la calidad. (ejemplo: encofrados aislantes de poliestireno

en España, casas contenedor y losas tubulares de acero inoxidable en china, Paneles aislados estructurales en Estados Unidos).

La construcción modular es uno de los métodos de construcción fuera de sitio más eficientes. los diferentes componentes de un edificio se diseñan y fabrican fuera del lugar de la obra, la construcción es en fábricas elaborando cada módulo para luego ser ensamblados en el sitio para formar el producto final. Alrededor del 85 al 90% de la construcción modular se realiza fuera del sitio de construcción y el trabajo restante es de 10 al 15% de trabajo en obra, incluidos los cimientos y las conexiones de servicios públicos (Kamali & Hewage, 2016).

### **El panel como un elemento fundamental para la construcción modular**

Un componente de la construcción modular es el panel, que está definido por la Real Academia Española, (2022) como el elemento prefabricado que se utiliza para construir divisiones verticales en interior o exterior de las viviendas y otros edificios. Asimismo dos de sus dimensiones son más grandes en relación al espesor, el uso pensado para este tipo de panel es como elemento de un muro que está sometido principalmente a cargas verticales y que produce un estado de esfuerzos planos en el elemento (Figura 2.1).



**Figura 2.1** *Ejemplo de estructuras bidimensionales con estado de esfuerzos planos en vigas (3 Tipos de Fachadas Prefabricadas, Ventilada y Pesada - Diseño Vip, n.d.)*

En la Universidad Autónoma de Querétaro se ha planteado la idea de diferentes opciones de construcción para el sistema de muros de una vivienda, un ejemplo es el “Diseño de muros modulares, con facultad de realización y desmontaje para una vivienda replicable de estructura de acero” este diseño se realiza como complemento al proyecto de construcción





**Figura 2.3** *Proceso de elaboración de paneles de ferrocemento* (Valencia Jiménez, 2020)

El concreto es un material utilizado en la vivienda industrializada, específicamente en los muros como una opción integralmente eficiente, concreto normales, ligeros y autocompactables, el estudio de estos concretos proporcionan sus propiedades como módulo de elasticidad, resistencia a la tensión indirecta o compresión diametral, que posicionan a este material como una opción eficiente para proporcionar seguridad ante eventos sísmicos, para incentivar la conservación del medio ambiente y para promover la reducción de los costos de construcción, operación y mantenimiento (Julián et al., 2013).

### **2.1.2 Tendencias de construcción**

A nivel mundial se comercializan diferentes modelos de paneles que pueden ser estructurales o no, con diferentes procesos de construcción e instalación además de los diferentes componentes con los cuales pueden ser elaborados, por ello es preciso conocer sus características y el uso adecuado, para definir las características y condiciones de uso que van acorde a los objetivos de este proyecto. Conocer estos modelos nos lleva a mirar

a los países que han desarrollado dichas tecnologías y poder llegar a aportar con el mismo nivel de calidad un proceso constructivo que pueda ser asequible en nuestro entorno.

### **1) Panel Tilt-up (muro estructural)**

El tilt-up es un sistema que permite la construcción en obra de muros de concreto mediante paneles de gran esbeltez contruidos directamente sobre la losa del piso de la estructura o sobre una plataforma de trabajo. Una vez que cada panel alcanza su resistencia especificada, es izado mediante una grúa y colocado sobre la cimentación, formando así la fachada de la edificación Figura 2.4 (Silva, 2021).

La colocación del refuerzo estructural con el sistema tilt-up es mucho más fácil que en proyectos convencionales ya que el refuerzo se coloca horizontalmente y sobre una superficie dura en vez de verticalmente y en escaleras. El refuerzo del panel es muy importante porque en la mayoría de los casos este último soporta las cargas estructurales del techo y de los pisos intermedios (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2000).

El sistema Tilt-up no es el método adecuado para todos los proyectos, este proceso es mejor para edificaciones de mayor tamaño, además que los paneles de concreto Tilt-up son naturalmente mejores aislantes, y en entornos donde el control de temperatura no indispensable no se justifica el costo de su construcción (Meprosa Construcciones, 2022).

Si bien este sistema presenta facilidades de construcción se convierte inviable al considerar su uso en la construcción de casa habitación, esto porque su principal característica es la construcción insitu y el uso de maquinaria pesada capaz levantar el gran peso de cada panel, contrario al objetivo de esta investigación que busca la construcción de paneles en serie y de fácil manejo para la mano de obra.



**Figura 2.4** *Montaje de muro tilt-up* (El Tilt-Up y Las Edificaciones Industriales - 360 EN CONCRETO, *n.d.*)

## **2) Placa alveolar (pieza estructural)**

La placa alveolar se compone de dos alas, una superior y otra inferior, enlazadas por un conjunto de nervios como se observa en la Figura 2.5a. Los nervios extremos definen el perfil de la junta entre placas y los interiores definen la geometría de los alveolos de aligeramiento. El espesor de las losas, la geometría de los nervios y por tanto la de los alveolos resultantes son consecuencia del sistema de fabricación utilizado y de los requerimientos de este tipo de elemento. El diseño de la sección persigue la mayor resistencia con el mayor aligeramiento. La armadura activa pretensada se dispone en los nervios en la posición más conveniente para lograr con la menor cuantía de acero una mayor resistencia y aligeramiento (Saura Arnau, 2015).

Dentro de sus ventajas es poder cubrir claros mayores y lograr una capacidad de carga más alta con peraltes reducidos, elevada capacidad a flexión y cortante, es de simplicidad constructiva que reduce errores y desperdicios, no se necesita apuntalamiento ni cimbra, es un elemento versátil y de gran ligereza por sus alvéolos interiores Figura 2.5b (VIPROCOSA, 2021)(VIPROCOSA, 2021).



a) *Placa Alveolar construida por VIPROCOSA empresa mexicana ubicada en León, Guanajuato.*

b) *Montaje de placa alveolar en nave industrial en Guanajuato, México (2021)*

**Figura 2.5** *Placa alveolar* (Nave Industrial Con Prefabricados de Concreto - Viprocosa, n.d.)

Este sistema cumple con la característica de construcción prefabricada y en serie necesaria para el prototipo de MPM, sin embargo, su mayor ventaja es cubrir grandes longitudes de claro y tales dimensiones no reflejan la construcción de una vivienda.

### **3) Sistema Drywall (muro no estructural)**

Campos Vasquez, (2008) define al sistema Drywall como un sistema constructivo que no es convencional, el Drywall es una estructura liviana que se compone de placa de Yeso también puede ser conocido como draibol o Durlock. El yeso se mezcla con fibra (generalmente papel, fibra de vidrio, o una combinación de estos materiales), plastificante, agente espumante y varios aditivos que pueden reducir el moho, la inflamabilidad y la absorción del agua. Este sistema es utilizado en la construcción únicamente de paredes y techos interiores como se observa en Figura 2.6.



**Figura 2.6** Sistema de construcción de muros Drywall (Drywall - Home Solution, n.d.)

Este sistema es ejemplo de las posibilidades de construcción de muros, cada uno con especificaciones diferentes y para usos distintos ya sean interiores o exteriores, por ello es importante mencionar la necesidad de diseñar un MPM que sea catalogado como un elemento estructural capaz de resistir todas las acciones a las que estará sometido brindando la certeza que se obtiene un elemento verificado por la normativa mexicana vigente.

#### **4) Panel aislado estructural (SIP) (muro estructural)**

La idea inicial del panel aislado estructural o por sus siglas en inglés SIP (Structural Insulated Panel) fue propuesta en 1935 por investigadores del Forest Product Laboratory (FPL) en Madison, Wisconsin en los Estados Unidos. Los investigadores descubrieron que el revestimiento de tableros duros y la madera contrachapada podían soportar la carga estructural como una pared. El primer panel aislado estructural que se comercializó fue producido en 1952.

SIP es un panel que se utiliza como elemento estructural, como paredes, techos y pisos para estructuras de hormigón. El panel se asemeja a un sándwich y varía en diferentes espesores, consta de dos capas exteriores de material rígido y una capa más gruesa como núcleo, se observa en Figura 2.7a. Las capas, de acuerdo a su uso puede formarse de diferentes materiales, el núcleo comúnmente es de espuma plástica como Extruido Poliestireno y Poliestireno Expandido, así como Espuma de Poliuretano como

poliisocianurato y poliisocianato. La espuma de Poliuretano tiene mejor desempeño contra fuego, llamas y clasificación de humo, además que son más resistentes contra cargas axiales, de flexión y laterales (Panjehpour et al., 2013).

Los paneles se fabrican con bastidores horizontales y verticales como se observa en Figura 2.7b. Como en cualquier vivienda, los insectos y roedores pueden ser un problema, estos animales inclusive llegan a perforar los SIP y por ello se recomiendan acciones para prevenir estos problemas que incluyen la aplicación de insecticidas a cada panel y al terreno previo a la construcción además de reducir los niveles de humedad al interior (Aislamientos Acústicos, 2019).



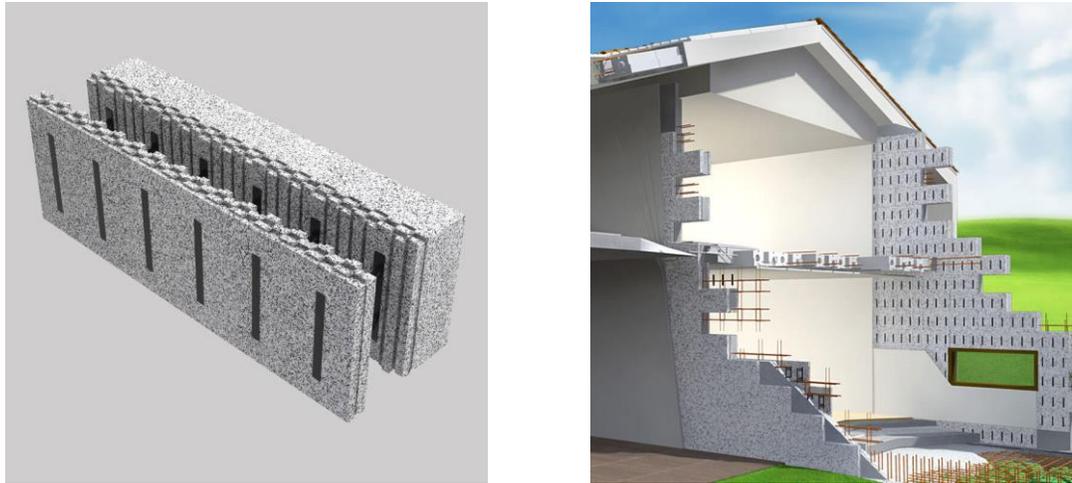
a) *Panel aislado estructural fabricado con poliestireno*      b) *Panel aislado estructural fabricado con poliestireno*

**Figura 2.7** *Panel aislado estructural* (Structural Insulated Panels - BUILDERS, n.d.)

Aplicar este sistema en México no presenta una ventaja notable por el material con el que se construye cada panel, pues los materiales característicos y abundantes en México son los agregados pétreos, esta característica y el uso indispensable de productos de mantenimiento para alargar su desempeño estructural hacen que el costo final se incremente. Construir un muro MPM que no sea asequible es contrario a los objetivos de esta investigación.

### 5) Encofrados aislantes de EPS (muro estructural)

(AISLENVAS, 2019) es una empresa española que desde 2010 comercializa un sistema de construcción basado en muros de carga de concreto armado con un encofrado de poliestireno expandido (EPS) como se muestra en Figura 2.8a, el encofrado permanece en la estructura aportando un excelente aislamiento térmico y acústico, proporcionando un alto grado de confortabilidad. El sistema permite ir construyendo toda la estructura a la vez, montando de forma rápida, sencilla y limpia la edificación como se muestra en Figura 2.8b.



**Figura 2.8** Encofrado de poliestireno (CLIMABLOCK - Pontarolo Engineering, n.d.)

Su procedimiento se basa en ensamblar cada molde, colocar acero dentro del espacio formado por los bloques y posteriormente verter un primer concreto hidrófugo para evitar la humedad (15 a 20 cm), se necesita el apuntalamiento en puntos como huecos de puertas y ventanas, se necesita además refuerzo horizontal para mantener la verticalidad y aumentar la resistencia de un segundo concreto vertido. El sistema permite tener diversos acabados y construir más de un nivel.

Si bien el proceso constructivo es sencillo y rápido de elaborar no se puede catalogar como un proceso modular pues este aún necesita de la colocación del concreto en el lugar. El

MPM busca que el prototipo sea prefabricado en un sitio diferente a la obra y posteriormente ser instalado con la menor cantidad de esfuerzo.

La construcción modular en las edificaciones es un tema que se mantiene vigente y que constantemente mejora sus procesos de acuerdo a las necesidades de cada edificación, a continuación, se presentan algunas de las tendencias constructivas de esta área con el objetivo de hacer énfasis en las oportunidades económicas, tecnológicas y científicas que tiene desarrollar temas en la índole de una vivienda digna, segura y asequible.

### **6) Construcción de muros de concreto con uso de moldes**

CEMEX (2022) es una importante empresa mexicana que provee viviendas asequibles e infraestructura de gran escala, diseña y desarrolla nuevos sistemas de construcción, como el sistema de muros con uso de moldes, donde el concreto es vertido dentro de los moldes para formar un monolito sólido, duradero y sin juntas como se observar en la Figura 2.9. Se pueden usar estructuras moduladas y estandarizadas hechas de madera contrachapada, acero, aluminio o plástico, este sistema inclusive permite que el muro se construya de forma estándar únicamente con el forjado de acero y el concreto o bien en su interior colocar un panel aislante.



**Figura 2.9** *Construcción de muros de concreto con uso de moldes, Guadalajara 2022.  
(Elaboración propia)*

Los beneficios de este proceso son la reducción en un 35% del tiempo de construcción, 40% de reducción en los costos indirectos y financiamiento, el uso de los muros de concretos colados en sitio se recomienda para construcciones en serie de conjuntos habitacionales verticales y horizontales, además de proyectos de reubicación de víctimas de desastres naturales.

En el mercado de la construcción de Coahuila, México se ofrece un sistema de vivienda a partir del uso de moldes de acero o de aluminio, que unidos entre si encofran 100% de una casa, produciendo una vivienda de concreto al día. En el diseño del molde se consideran las instalaciones eléctricas, hidráulicas e hidrosanitarias, ejemplo de su sistema constructivo se observan en la Figura 2.10.



**Figura 2.10** Sistema constructivo de vivienda con moldes en Torreón, Coahuila, México. (Molde Total, n.d.)

Con lo expuesto previamente se entiende que los nuevos métodos de construcción se encaminan a una construcción modular, prefabricable y sencilla de ejecutar para lograr procesos que sean eficientes, seguros, económicos, sostenibles, entregables en menor tiempo y de calidad. Cada sistema corresponde a una forma diferente de responder a las problemáticas de vivienda que presenta cada país.

Los resultados complementarios del Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020), reporta que para dicho año el 91.6% de las viviendas en México el material predominante con el cual se construyen sus paredes es de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto.

El Servicio Geológico Mexicano (2021) define como material pétreo al material proveniente de la roca y que se utiliza sin apenas sufrir transformaciones, regularmente se encuentran en formas de bloques, losetas o fragmentos de distintos tamaños (canteras y gravas), además el Servicio Geológico Mexicano en su Anuario Estadístico de la Minería Mexicana (2020) reportó un producción de casi 8 mil millones de toneladas de agregados pétreos, arena y grava, materias primas que son usados casi exclusivamente por el sector de la construcción.

La posibilidad de encontrar una solución o una mejora a los principales retos de construir viviendas asequibles y seguras dependerá en mayor parte de los recursos con los que se cuenten y en México se tiene un alto potencial en la producción de material pétreo, por lo cual la Dirección General de Desarrollo Minero asegura que contar con este recurso de manera abundante es una fortaleza y es capaz de generar más oportunidades en el mercado de la construcción.

En México la construcción de paneles debe cumplir con la Norma Mexicana NMX-C-405-ONNCCE-2014 que describe al panel como un componente en el que dos de sus dimensiones son mayores 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. Así un panel 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.

### **2.1.3 Concreto Ligero**

La mayor parte del calor o frío se pierde o gana principalmente por el techo, los muros y las fachadas, a través de estos elementos se transmiten un 60% del total de las pérdidas o ganancias de calor en las edificaciones, otro 15% de este flujo se da a través del suelo, hacia el terreno y viceversa, un 10% a través del acristalamiento de las ventanas y por ventilación se pierden o ganan alrededor del 15% restante (Franco Bucio Mújica, n.d.)

El mejor aislante térmico es el vacío, se utilizan materiales porosos o fibrosos capaces de inmovilizar el aire seco y confinarlo en el interior de celdillas. El alto valor de aislamiento

térmico en un concreto ligero, aumenta o disminuye en relación inversa con la densidad del material, además el concreto ligero tiende a tener una mejor respuesta ante la exposición al fuego, esto porque generalmente se utilizan agregados livianos provenientes de material volcánico lo que los convierte en material más estable frente a las altas temperaturas, además que tiene un bajo coeficiente de expansión y un bajo módulo de elasticidad comparado con el concreto convencional (Valdez Guzmán & Suarez Alcivar, 2010).

La piedra pómez (también llamada pumita o Jal) es una roca ígnea volcánica vítrea, con baja densidad y muy porosa, de color blanco o gris. El origen volcánico le dio ciertas características a la piedra pómez: una multitud de poros y células cerradas que dan por resultado una porosidad con una solidez de grano al mismo tiempo. Debido a su ligereza puede flotar sobre las aguas a causa del aire contenido en sus cavidades. Aparte de eso la piedra pómez es resistente al frío, al fuego y a la intemperie y libre de sales solubles en agua. Las partículas de esta roca volcánica poseen varias formas, predominando las alargadas y las angulosas. Sus poros cerrados le confieren una baja densidad, por lo que el comportamiento al impacto es muy ligero. La piedra pómez comúnmente es utilizada en industrias de la construcción para la fabricación de morteros u hormigones de áridos ligeros, destinados a mejorar las condiciones térmicas y acústicas (Flores et al., 2020)

Obando Velásquez y Pachacama Morocho (2018), obtuvieron que una mezcla de roca volcánica y cascajo disminuía un 13.9% la conductividad térmica comparándola con un concreto normal.

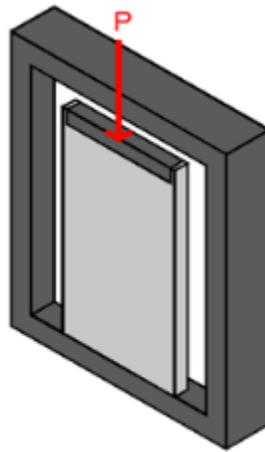
La cantidad de espacios vacíos como los poros y fisuras, y la permeabilidad, son factores que influyen sobre la durabilidad del concreto, el volumen que ocupa un agregado según su peso es un indicador de las características del mismo en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al concreto en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia específica y con esto una influencia directa sobre la economía de la mezcla, por otro lado es conocido que a mayor porosidad mayor fuerza de adhesión (Chan Yam et al., 2003)

## 2.2 Normativa Mexicana

La NMX-405-ONNCCE-2014 cataloga a los paneles Tipo I como aquellos que son para uso específico de muros, por tanto, a continuación, se enlistan las especificaciones estructurales con las que deben cumplir los paneles tipo I (muro):

### *Resistencia a la compresión simple.*

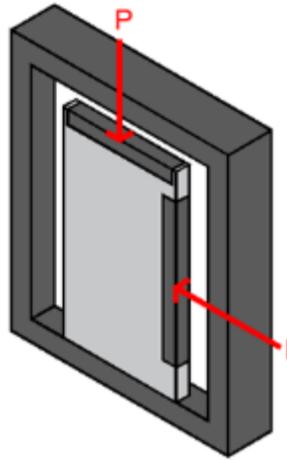
Deben de resistir un esfuerzo mínimo axial a la compresión de 0.49 MPa (5 kg/cm<sup>2</sup>) (Figura 2.11).



**Figura 2.11** Esquema del método de prueba de resistencia a la compresión simple (Valencia Jiménez, 2020)

### *Resistencia bajo carga lateral en el plano del muro*

Deben tener una resistencia mínima al cortante de 0.098 MPa (1 kg/cm<sup>2</sup>), o bien resistir una carga lateral mínima de 1.5 T por cada metro de longitud del muro, actuando simultáneamente con la carga vertical de servicio (Figura 2.12).



**Figura 2.12** Esquema del método de prueba de resistencia bajo carga lateral en el plano del muro (Valencia Jiménez, 2020)

### ***Resistencia al fuego***

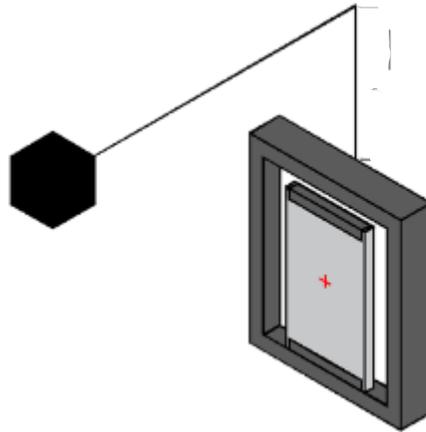
Paneles para uso en las edificaciones de riesgo menor deben cumplir con una resistencia al fuego de una hora como mínimo, sin producir flama, gases tóxicos o explosivos a una temperatura mínima de 550 °C (Figura 2.13).



**Figura 2.13** Cámara de fuego directa (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2014)

### ***Resistencia al impacto para muros***

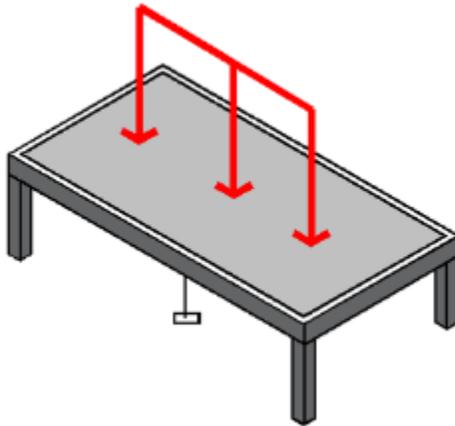
Los paneles estructurales, así como sus uniones horizontales y/o verticales deben resistir un impacto provocado por una masa de 50 kg liberada en forma de péndulo a una altura de 2.20 m en un ángulo de 45°, conservando su integridad estructural sin separación en ambas caras de la probeta, y una deflexión instantánea no mayor a 10 mm al impacto y recuperarse parcialmente de su deformación, pero conservando su integridad estructural (Figura 2.14).



**Figura 2.14** Esquema del método de prueba de resistencia al impacto (Valencia Jiménez, 2020)

### ***Resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicularmente al plano.***

Deben de resistir una carga de 981 Pa ( $100 \text{ kg/m}^2$ ), sin rebasar una flecha de  $L/360$ , donde L es la longitud del claro mayor, y recuperarse parcialmente de su deformación, pero conservando su integridad estructural (Figura 2.15).



**Figura 2.15** Esquema del método de prueba de resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicularmente al plano (Valencia Jiménez, 2020)

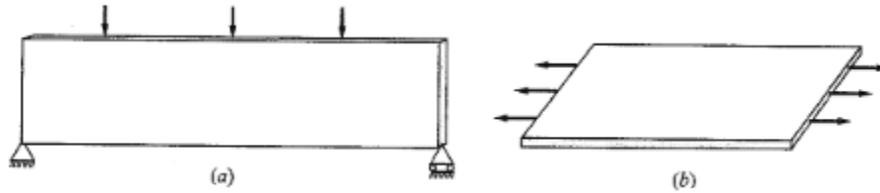
## 2.3 Fundamento Teórico

### Panel

Partiremos de las características de las dimensiones del panel, dos de ellas son más grandes en relación al espesor que puede tener, el uso pensado para este tipo de panel es como elemento de un muro que estará sometido principalmente a cargas verticales que actúan sobre su borde superior.

Lo importante será conocer los esfuerzos que se pueden producir en dicho panel cuando se encuentre sometido a cargas.

Cuando el material está en esfuerzo plano en el plano  $x$  y  $y$ , solo las caras  $x$  y  $y$  del elemento están sometidas a esfuerzos y todos actúan paralelos a los ejes  $x$  y  $y$ , como se muestra en la Figura 2.16. Esta condición de esfuerzo es muy común debido a que está presente en la superficie de cualquier cuerpo sometido a esfuerzos, excepto los puntos donde la carga externa actúa sobre la superficie (Gere et al., 2016).



**Figura 2.16** Estructuras bidimensionales sometidas a esfuerzos planos (Zienkiewicz & Taylor, 1994)

### Elementos finitos de un continuo elástico.

Zienkiewicz & Taylor (1994) en su libro de El método de los elementos finitos mencionan que en muchos casos de la ingeniería es necesario determinar la distribución de tensiones y deformaciones en un continuo elástico. En todos los casos, el número de interconexiones entre un “elemento finito” cualquiera rodeado por frontera imaginarias y los elementos vecinos a él es infinito. Se puede efectuar una aproximación de la siguiente manera:

1. El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias, en un número de elementos finitos.
2. Los elementos se conectan entre sí, mediante nodos. Los desplazamientos de estos nodos son las incógnitas del problema.
3. Se toma un conjunto de funciones que definen de manera única el campo de desplazamientos de cada elemento finito en función del desplazamiento nodal.
4. Las funciones de desplazamiento definirán el estado de deformación dentro del elemento. Estas deformaciones junto con las deformaciones iniciales y las propiedades constitutivas del material, definirán el estado de tensiones en todo el elemento y también en sus contornos.

### Funciones de desplazamientos

Un elemento finito típico,  $e$ , se define por sus nodos  $i, j, m$ , etc., y por su contorno formado por líneas rectas. Los desplazamientos  $u$  de cualquier punto del elemento se pueden aproximar mediante un vector columna,  $\hat{u}$ :

$$u \approx \hat{u} = \sum N_i a_i^e = [N_i, N_j, \dots] \begin{Bmatrix} a_i \\ a_j \\ \vdots \end{Bmatrix}^e = N a^e \quad (1)$$

Donde las componentes de N son en general funciones de posición dadas y  $a^e$  es un vector formado por los desplazamientos nodales del elemento considerado. Para el caso particular de tensión plana,

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

representa los movimientos horizontal y vertical de un punto cualquiera del elemento, y los correspondientes desplazamientos de un nodo  $i$

$$a_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Las funciones de prueba N se llamarán funciones de forma y juegan un papel decisivo en el análisis por elementos finitos.

### Deformaciones

Cuando se conocen los desplazamientos para todos los puntos del elemento, se determinan las deformaciones. Esta relación se puede escribir de forma matricial  $\varepsilon = S u$  donde S es un operador lineal. Esta expresión puede escribirse

$$B = S N \quad (4)$$

En el caso de tensión plana, las deformaciones más importantes son las que se producen en el plano y se expresan en función de los desplazamientos mediante las relaciones que definen al operador S

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Determinando las funciones de forma  $N_i, N_j$  y  $N_m$ , se obtiene con facilidad la matriz B.

### **Tensiones**

Admitiendo un comportamiento elástico lineal, la relación entre tensiones y deformaciones será lineal y de la forma

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (6)$$

Donde D es una matriz de elasticidad que contiene las propiedades del material.

### **Tensión y deformación plana**

En problemas de tensión y deformación plana, el campo de desplazamientos se expresa en función de los desplazamientos  $u$  y  $v$  en las direcciones de los ejes cartesianos ortogonales  $x$  e  $y$ .

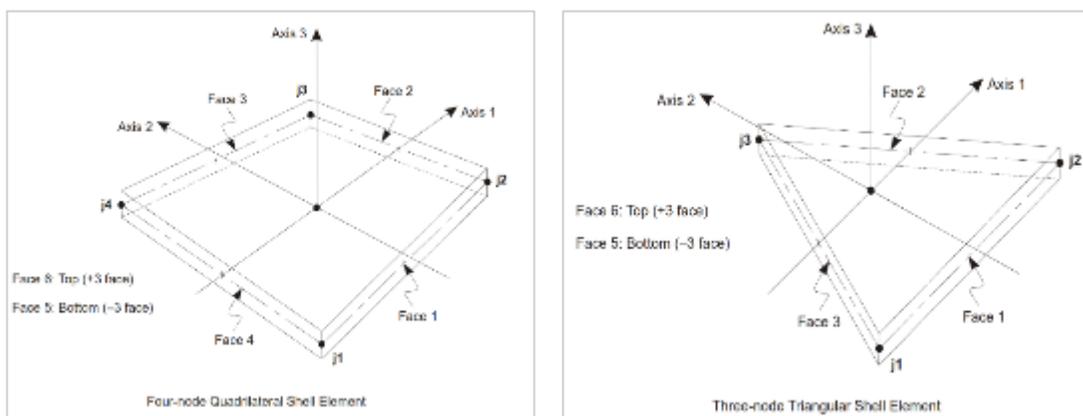
Las únicas tensiones y deformaciones que se han de considerar en ambos casos son las tres componentes en el plano  $xy$ . En el caso de tensión plana, las otras tres componentes de la tensión son nulas por definición y, por consiguiente, no contribuyen al trabajo interno. En la deformación plana, la tensión en la dirección perpendicular al plano  $xy$  no es nula. Sin embargo, por definición, la deformación en dicha dirección es nula, y por tanto dicha tensión no contribuye al trabajo interno.

### **MODELACIÓN EN SOFTWARE (SAP2000)**

El programa (SAP2000, 2017) es proporcionado por la empresa Computers and Structures, Inc. (CSI), que fue fundada en 1975 en Estados Unidos, es reconocida como pionera por proporcionar softwares para la ingeniería estructural y sísmica. CSI ofrece cinco softwares primarios: SAP2000, CSiBridge, ETABS, SAFE y PERFORM-3D, cada uno de los programas ofrece capacidades y herramientas que se adaptan a diferentes tipos de estructuras y problemas.

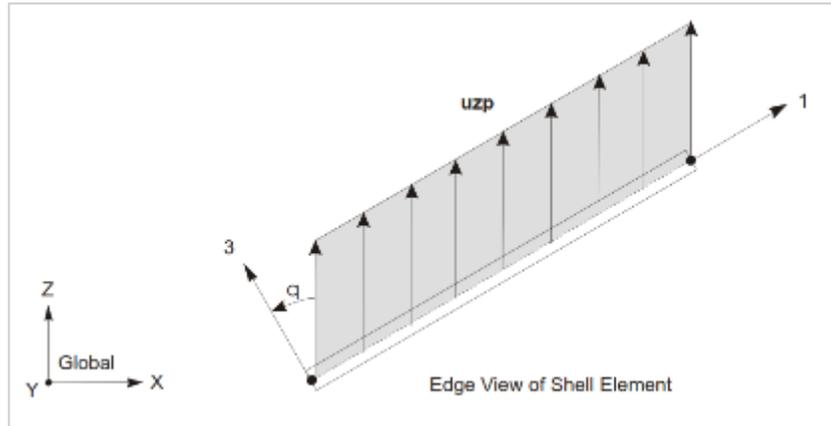
SAP2000 es un software de elementos finitos para modelado, análisis y dimensionamiento de estructuras, el programa permite utilizar el análisis de elementos tipo “Shell”, este es un tipo de objeto de área que es utilizado para modelar el comportamiento de membranas, placas y caparazones en estructuras planas y tridimensionales. El material de la cubierta puede ser homogéneo o estratificado a lo largo del espesor, además permite tener en cuenta la no linealidad del material.

El objeto se formula con elementos de tres o cuatro nodos que combinan el comportamiento de flexión de la membrana y de la placa Figura 2.17. Cada elemento de capa tiene su propio sistema coordenado local para definir las propiedades del material, el elemento puede ser cargado por gravedad y cargas uniformes en cualquier dirección, tanto en las cara superior, inferior y lateral y cargas debido a la tensión y el cambio de temperatura.



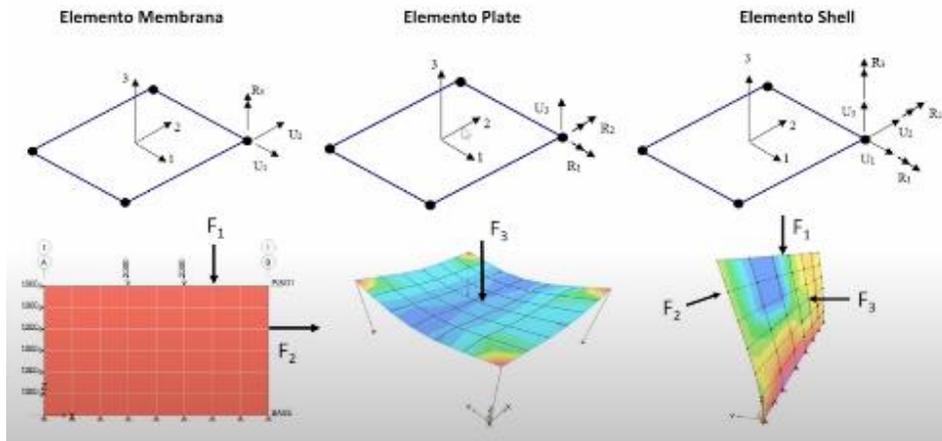
**Figura 2.17** Conectividad de elementos con tres y cuatro nodos (SAP2000, 2017)

Cada elemento “Shell” puede analizarse con una configuración de mallado para el elemento finito en cuadriláteros o triángulos. El programa permite asignar las condiciones de borde, grados de libertad, establecer un sistema local y global de coordenadas para cada elemento, asignar una carga uniformemente distribuida sobre la superficie media del elemento Figura 2.18.



**Figura 2.18** Carga uniforme sobre la superficie de un elemento shell (SAP2000, 2017)

Dentro de los elementos “Shell” se pueden seleccionar varios tipos de comportamiento como: membrana, placa, shell y en capas. El comportamiento de membrana soporta las fuerzas en el plano y el momento normal, a diferencia del comportamiento de placa que soporta solo el momento flector y la fuerza transversal mientras que para el elemento Shell es una combinación del comportamiento de membrana y placa, como se muestra en la Figura 2.19.



**Figura 2.19** Comportamiento de elementos tipo shell en software SAP2000 (Criterios Para El Modelado Con Elementos Finitos Utilizando SAP2000, n.d.)

El comportamiento para realizar el modelo analítico del MPM es el de comportamiento de membrana porque soporta las fuerzas en el plano.

# CAPÍTULO 3

## 3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

### 3.1 Hipótesis

La resistencia del muro panel modular (MPM) diseñado, construido y revisado en modelación analítica cumple con los requisitos de la normativa mexicana para paneles estructurales, con una geometría, peso y modulación que faciliten su uso en vivienda en comparación a muros tradicionales de mampostería.

### 3.2 Objetivos

#### Objetivo General

Proponer, analizar y ensayar un muro panel modular con eficiencia estructural, económico, ligero y fácil uso que cumpla con los métodos de prueba de la normativa mexicana.

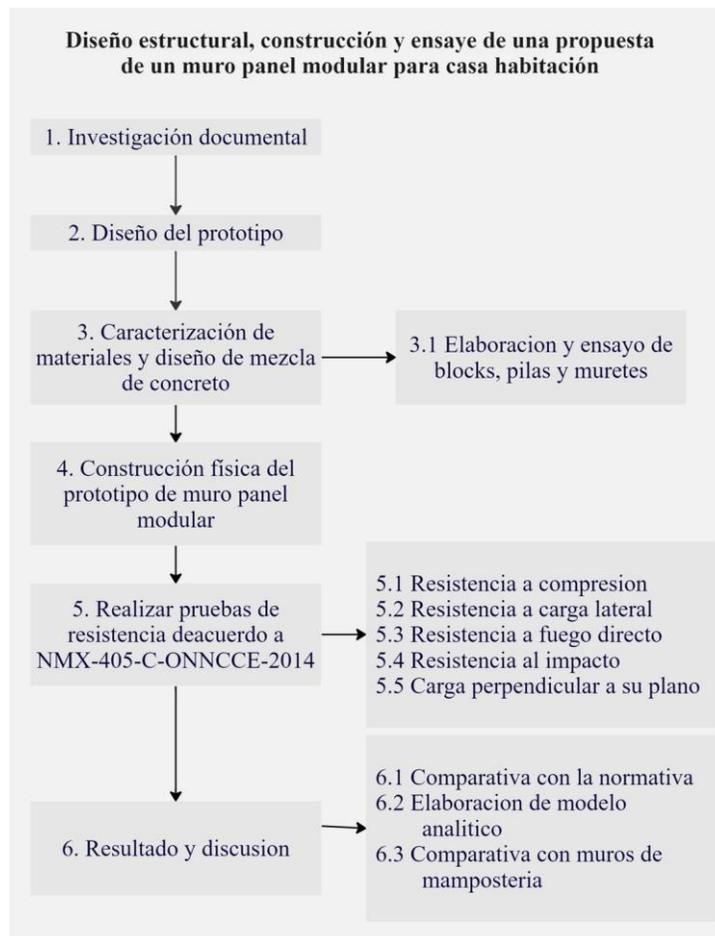
#### Objetivos Particulares

- a) Diseñar y analizar el modelo de un muro panel modular.
- b) Conocer y aplicar la normativa mexicana para ensaye de muros tipo panel estructural.
- c) Caracterizar y comparar el empleo del muro tipo panel, su comportamiento estructural y costos con los sistemas de muros análogos (muros de mampostería)

# CAPÍTULO 4

## 4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto permite que el trabajo pueda ser reproducible y marca las pautas a seguir para lograr los objetivos planteados. La figura 4.1 corresponde a un diagrama de flujo de la metodología del proyecto, se describe generalmente los pasos de la metodología y posteriormente se detallan los materiales y métodos de cada paso.



**Figura 4.1** Diagrama de flujo de la metodología

## **1. Investigación documental**

Se profundiza en el tema de vivienda en México, la situación actual en cuanto a su déficit, que organizaciones o instituciones dirigen sus acciones en el tema de viviendas asequibles, con el fin de justificar la realización del presente trabajo.

Conocer las características que definen a un elemento como panel, refiriéndose a sus propiedades físicas y mecánicas, así como definir el concepto de construcción modular identificando sus ventajas dentro de los procesos constructivos.

Investigar sobre las nuevas tendencias constructivas dentro del país y a nivel mundial, observando las ventajas y desventajas de cada sistema de construcción, para definir las características con las que se espera debe contar el prototipo del MPM propuesto con respecto a otros sistemas.

Identificar la normativa vigente en México para la construcción de paneles estructurales, que corresponde a la NMX-405-ONNCCE-2014 para paneles Tipo I.

## **2. Diseño del prototipo de muro panel modular**

El diseño del prototipo se debe basar en el conocimiento previo de otros trabajos y en la práctica profesional de la construcción. En este paso es necesario definir:

1. Dimensiones (largo, ancho, espesor).
2. Detalles de armado interior de acero del panel.
3. Tipo de agregados pétreos y cementantes a utilizar.
4. Proporciones y características de la mezcla de agregados y cementantes.
5. Peso por unidad de MPM
6. Tipo de conexión o ensamblaje entre MPM
7. Molde de construcción para realizar un panel prefabricado.

El diseño del MPM debe ser de fácil instalación, económico, ligero y que pueda ser construido en serie, considerando que su capacidad estructural debe aprobar la normativa vigente.

Se utiliza el software comercial para diseño estructural SAP2000, para modelar un elemento del muro panel modular por medio de elementos finitos, se hace uso del elemento “Shell”, este es un tipo de objeto de área que es utilizado para modelar el comportamiento de membranas, placas y caparazones en estructuras planas y tridimensionales.

Se realiza un modelo sencillo para un elemento sometido a carga de compresión y carga lateral para estimar la carga en las conexiones.

La elaboración de un modelo analítico analizado por elementos finitos es compleja por la cantidad de parámetros y condiciones tanto de los materiales, conexiones, formas y maneras en que se realiza cada prueba es por ello que se interpreta el modelo y no se espera la coincidencia exacta de los parámetros del modelo elaborado.

### **3. Caracterización de materiales y diseño de mezcla de concreto**

El diseño de la mezcla de concreto ligero es primordial en la construcción del muro panel modular, en la medida de lo posible estos factores deben mantenerse constantes.

La caracterización de la arena y la arenilla incluyen:

1. Contenido humedad
2. Absorción
3. Densidad Relativa
4. Peso volumétrico seco compacto
5. Tamaño máximo nominal del agregado
6. Módulo de Finura

Con el método ACI-211 de diseño de mezclas de concreto se definen la cantidad de materiales necesario para lograr la resistencia a compresión objetivo, para determinar propiedades de la mezcla se elaboran:

1. Cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura
2. Blocks de 10 x 20 x 40 cm
3. Pilas de 50 x 60 cm
4. Muretes de 60 x 60 cm

#### **4. Construcción física del prototipo de muro panel modular**

Definidas las características del sistema constructivo se procede a la elaboración física de los elementos. La cantidad de especímenes necesarios para realiza cada una de las pruebas de la normativa son:

- 8 paneles de 0.50 x 2.40 para las pruebas de compresión simple, carga lateral, impacto y carga uniforme
- 6 paneles para probar la resistencia al fuego, de 60 cm x 60 cm

Cada elemento se elaborará en las instalaciones del laboratorio de geotecnia de la Universidad Autónoma de Querétaro, manteniendo las buenas prácticas de laboratorio y las disposiciones que la coordinación convenga.

#### **5. Realizar pruebas de resistencia solicitadas por la normativa**

Las pruebas necesarias se diseñan siguiendo la norma NMX-C-405-ONNCCE-2014 adecuando cada ensayo al equipo y herramienta con la que se cuenta. Las pruebas necesarias son:

1. Resistencia a la compresión simple
2. Resistencia bajo carga lateral
3. Resistencia al fuego
4. Resistencia al impacto en muros
5. Resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicular al plano

El Centro de Tecnología de la Vivienda perteneciente a la UAQ cuenta con el muro de reacción que permite realizar cada una de los ensayos, por tanto, es necesario respetar las indicaciones de seguridad para hacer uso del espacio evitando accidentes.

#### **6. Emitir conclusiones respecto a los resultados obtenidos**

Comparar los valores obtenidos para cada prueba de resistencia con los señalados por la norma, esto definirá si el panel se considera como de uso estructural o en su defecto es

necesario proponer mejoras al prototipo. Se dan las conclusiones finales del diseño del muro tipo panel y se dan posibles opciones de mejora al panel propuesto.

## 4.1 Diseño del prototipo

Cada sistema de construcción presentado en los antecedentes tiene ventajas específicas de acuerdo a los objetivos de cada proyecto, sin embargo, se puede resumir su principal característica de aplicación que hace que su uso sea factible en muchos proyectos de manera nacional como internacional. Las principales características de estas tendencias de construcción se resumen en la “Tabla 4.1”

**Tabla 4.1.** *Ventajas de tendencias de construcción*

<i>Tendencia de construcción</i>	<i>Ventaja</i>
Panel Tilt-up	Resistencia estructural
Encofrados aislantes de poliestireno	Ligereza y fácil instalación
Casa contenedor	Prefabricado y fácil instalación
Construcción de muro de concreto con uso de moldes	Reducción de tiempo

Las características ya señaladas son las más importantes que esperan encontrar en un sistema constructivo aquellas personas que se dedican al diseño y construcción de vivienda, porque repercutirá directamente en el tiempo y dinero de ejecución.

Con el interés de lograr un sistema de construcción de muros que sea competitivo se propuso un sistema de paneles que se adapte a los recursos y características de construcción de la vivienda en México. La propuesta se basó en el uso de un muro panel modular que sea estructural y que cumpla con la normativa vigente, reduzca el tiempo de construcción con respecto a las mamposterías tradicionales, sea económico para el constructor, de peso ligero y fácil instalación para la mano de obra, sin uso de maquinaria pesada, prefabricado, construido en serie y que proporcione la seguridad de tener una vivienda digna y segura

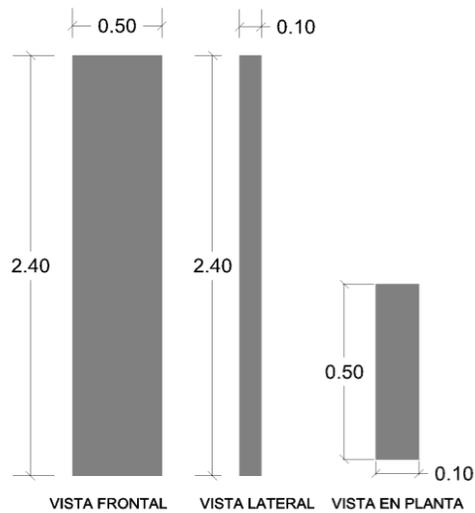
### **4.1.1 Geometría y características del MPM**

El diseño de cada propiedad se basó en la normativa y en la experiencia de la práctica profesional de la construcción a fin de que el prototipo final cumpla con las características propuestas anteriormente.

### **4.1.2 Dimensiones**

Los criterios de la NTC-CDMX-2017 clasifican a la vivienda en estructuras de mampostería Tipo I por lo tanto el espesor del muro no debe ser menor que 100 mm, además el Código de Edificación y Vivienda recomiendan las alturas mínimas de los espacios dentro de una vivienda de acuerdo con la zona climática donde se construye, el municipio de Querétaro se encuentra en un clima seco y semiseco, por lo cual se recomienda una altura de 2.5 m. Sin embargo, si la edificación se construye cumpliendo con los niveles de aislamiento térmico aprobados se puede evaluar la reducción de la altura de 2.5 m a 2.3 m. El Reglamento de construcción del municipio de Querétaro señala una altura recomendada de 2.30 m para los espacios de uso habitacional. Para la construcción del panel se tomarán 2.40 m de altura, de los cuales 10 cm de esta altura corresponden al tipo de cimentación, por tanto, se tiene una altura libre de nivel de piso terminado a techo de 2.30 m.

Debido a que no hay una especificación para el dimensionamiento del ancho de cada panel, se propone que cada elemento tenga un ancho de 50 cm, conservando así la característica de un panel donde dos de sus dimensiones son mayores respecto a la tercera y que en conjunto con las otras dos dimensiones se obtiene un MPM fácil de maniobrar. Las dimensiones propuestas para el muro panel modular y la probeta de ensaye se muestran en Figura 4.2.



**Figura 4.2** *Medidas geométricas del muro panel modular*

Las dimensiones propuestas para el MPM se acoplan también a la normativa NMX-C-405-ONNCCE-2014, de acuerdo a las pruebas señaladas en necesario ensayar una probeta de muro de 1.22 m ( $\pm 2$ cm) x 2.44 ( $\pm 4$ cm), el panel debe ser preparado de acuerdo a las especificaciones del fabricante, pues permite ensayar las uniones verticales u horizontales de los paneles para lograr las dimensiones de la probeta de ensaye. Para lograr la probeta de ensaye con la geometría ya propuesta es necesaria la unión consecutiva de tres paneles con las conexiones que a continuación se detallan.

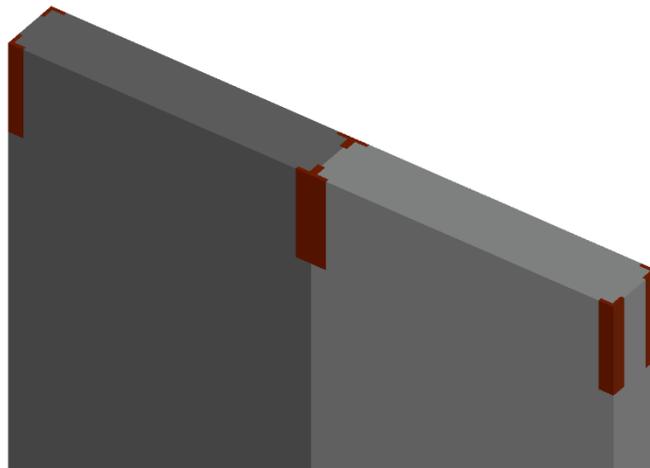
### 4.1.3 Conexiones

La elección del tipo de conexión se basó en aquella que fuera fácil de realizar y requiriera un mínimo de conocimiento para quien la ejecuta. Los tipos de conexiones que se propusieron para los paneles son la conexión soldada y la conexión ensamblada.

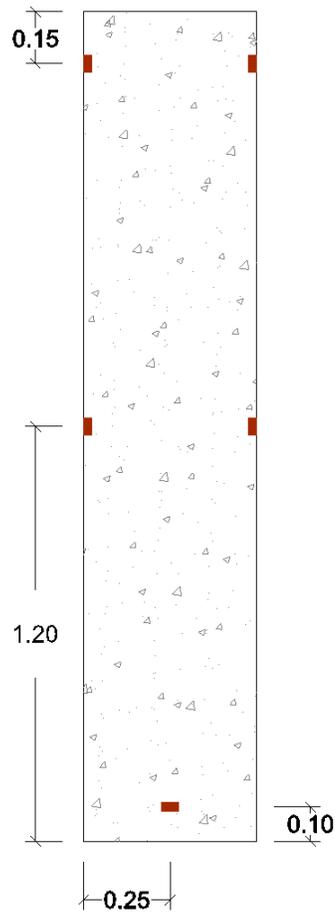
La conexión de soldadura consta en la unión de dos metales que por medio del calentamiento de sus superficies a un estado fluido se unen (McCormac, 2012), se elige este tipo de conexión para la unión consecutiva de los paneles porque representa menor dificultad para conectarse, es rígida y resulta fácil corregir errores durante la colocación de los elementos.

El termino ensamblar puede usarse comúnmente en los trabajos de carpintería, para que esta unión suceda uno de los elementos debe encajar dentro del segundo elemento, este tipo de unión funciona para la colocación de los paneles en la cimentación, lo que permite que el MPM pueda ser fabricado en serie fuera del lugar de la obra para posteriormente llegar a ser ensamblado en su lugar correspondiente en una menor cantidad de tiempo.

En la Figura 4.3 se muestra como cada panel tiene integrado ángulos de acero que permitieron la conexión soldada, los ángulos se colocaron por ambos lados en la parte superior, al centro y en la parte inferior para la cimentación, esta distribución de ángulos se muestra en la Figura 4.4.



**Figura 4.3** Esquema de conexión soldada por medio de ángulos del MPM



**Figura 4.4** Distribución de ángulos de acero dentro del MPM

El uso de perfiles de acero unidos por medio de cordones de soldadura genera una conexión estable entre cada panel, se utilizaron ángulos de 25.4 x 6.35 mm (1" x 3/16") y el tipo de unión de soldadura considerada es de ranura de penetración parcial.

El área efectiva de las soldaduras de ranura debe tomarse como la longitud de la soldadura multiplicada por la garganta efectiva. De acuerdo a la tabla J2.3 de la normativa AISC la garganta efectiva mínima de soldadura para ranuras de penetración parcial depende del espesor del material de la parte más delgada unida, para un espesor de hasta 6 mm el espesor de la garganta efectiva debe ser de 3mm (*Specification for Structural Steel Buildings*, 2016)

Suponiendo un ángulo de 25.4 x 6.35 mm (1" x 3/16") con un acero A36 donde  $F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$  y  $F_u = 4080-5625 \text{ kg/cm}^2$

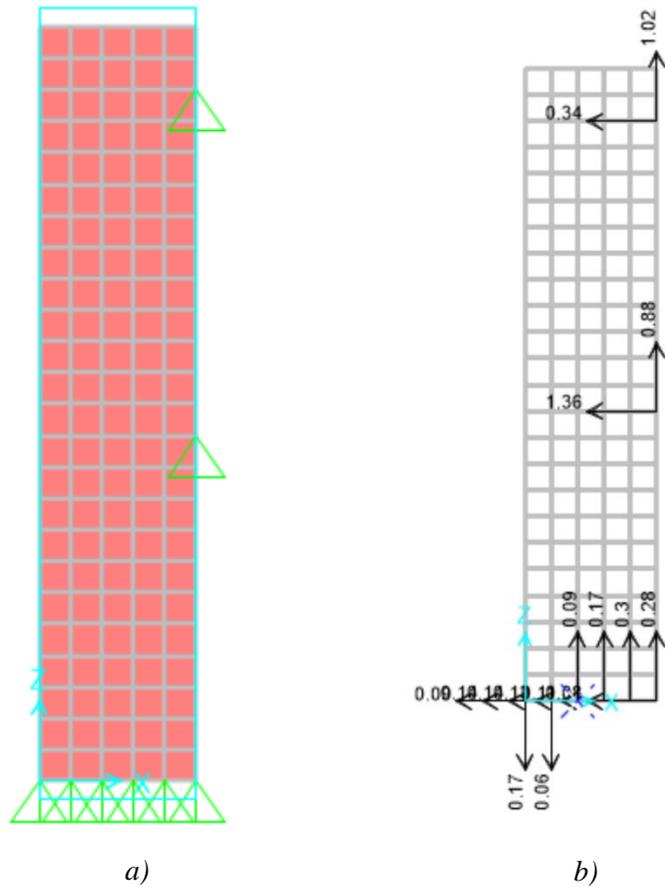
De acuerdo a la tabla J2.5 del AISC se especifica cual debe ser la resistencia disponible de las juntas soldadas de acuerdo al tipo y dirección de la carga en relación con el eje de la soldadura.

Cuando la probeta de ensayo se encuentre sometida a una fuerza de compresión los ángulos superiores y centrales estarán en dirección paralela a dicha fuerza y por tanto no es necesario considerar esta resistencia, mientras que el cordón de soldadura ubicado en la cimentación se encontrara de forma perpendicular a la dirección de la fuerza por ello si es necesario considerar la resistencia a cortante de estos elementos.

En un caso diferente, cuando la probeta es sometida a una fuerza lateral entonces los ángulos superiores y centrales serán los que se encuentren sometidos a una fuerza cortante y por tanto es necesario revisar su resistencia, y ahora la soldadura en la base se encontrara paralela a la dirección de la fuerza y no será necesario considerar su resistencia.

#### ***Cálculo de la longitud de soldadura necesaria en la conexión de los ángulos***

Con el programa SAP2000 se modelo un panel bajo las cargas mínimas especificadas por la norma para considerarlo un panel estructural, en la Figura 4.5a se muestra el modelo creado, considerando que las conexiones soldadas son un apoyo simple y de esta manera se obtiene la fuerza cortante que actúa sobre el ángulo de conexión (Figura 4.5b), a partir de la carga cortante de mayor magnitud que corresponde a la conexión soldada en el centro del panel se calcula la longitud de soldadura necesaria.



**Figura 4.5** Modelo del muro panel modular en SAP2000

Para calcular la longitud de soldadura por la revisión de la misma se supone que la unión se realiza con electrodos E70 porque se usan para aceros con valores  $F_y$  en entre 2530 a 4200  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , el número 70 indica la resistencia mínima a la tensión de la soldadura en  $\text{klb}/\text{in}^2$  en sistema internacional es  $4921.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ .

Como lo indica la tabla J2.5 del AISC se hace la revisión por cortante del metal base como de la soldadura para soldaduras de penetración parcial.

### 1) Metal base

- a) Resistencia por fluencia al cortante

$$R_n = 0.60F_y A_{gv}$$

$$l = \frac{R_n}{0.60 F_y e}$$

$$R_n = 1360 \text{ kg}$$

$$F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$$

$$e = 0.3 \text{ cm}$$

La longitud resultante es 2.98 cm

b) Resistencia por fractura de cortante

$$R_n = 0.60F_u A_{nv}$$

$$l = \frac{R_n}{0.60 F_u e}$$

$$R_n = 1360 \text{ kg}$$

$$F_u = 4080 \text{ kg/cm}^2$$

$$e = 0.3 \text{ cm}$$

La longitud resultante es 1.85 cm

La longitud propuesta de los ángulos es de 5 cm, que es superior a la longitud calculada.

**2) Soldadura**

$$\phi R_n = 0.60F_{EXX} A_{we}$$

$$l = \frac{\phi R_n}{0.60 F_{EXX} e}$$

$$\phi = 0.75$$

$$R_n = 1360 \text{ kg}$$

$$F_{EXX} = 4921.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$e = 0.3 \text{ cm}$$

La longitud resultante es 1.15 cm

La longitud de los ángulos fue de 5 cm, cumple con cada una de las condiciones de longitud de soldadura.

Los ángulos se colocaron con un ancla dentro del molde de construcción para asegurar su posición y generar un correcto empotramiento, los ángulos están soldados a la varilla corrugada de 3/8, la longitud de desarrollo para una varilla de 3/8 con dobles corresponde 28.21 cm y en la figura 4.6 se muestra la manera de sujeción de los ángulos.



**Figura 4.6** *Sujeción de ángulos dentro del MPM para conexiones*

#### **4.1.4 Mezcla de agregados y cementantes**

Los agregados y cementantes utilizados en el MPM proporcionan la rigidez necesaria para soportar las condiciones a las que estará sometido, además de proporcionar la ligereza adecuada para que pueda ser transportado y maniobrado dentro de la obra. La selección del tipo de material se basa principalmente en ser ligero en comparación a la mampostería.

El Servicio Geológico Mexicano (2020) reportó una producción de casi 8 mil millones de toneladas de agregados pétreos, arena y grava, materias primas que son usadas casi exclusivamente por el sector de la construcción, además el 92.4% de los muros de las viviendas en México son construidos con estos materiales. Utilizar agregados pétreos y materiales cementantes para la construcción de cada panel proporciona una familiaridad con los actuales procesos constructivos en México, esto crea una sensación de seguridad y aceptación al nuevo sistema de construcción.

El problema radica en que los materiales utilizados comúnmente en muros no son ligeros lo que complicaría la maniobra de instalación de cada panel, por el contrario, realizar el diseño una mezcla de concreto ligero brinda la oportunidad de mantener la resistencia estructural del elemento y la ligereza adecuada.

#### ***Peso por unidad de pieza***

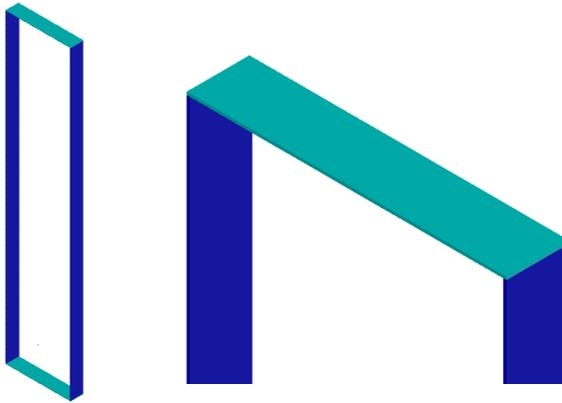
Con la experiencia profesional se tomará en cuenta que el peso total de cada panel debe ser aproximadamente 100 a 120 kg, de esta manera es posible asegurar que cada elemento sea cargado y colocado en su posición únicamente con el apoyo como máximo de 3 o 4 trabajadores de la construcción. Es indispensable lograr esta condición de ligereza para que en la instalación de los paneles no sea necesario el uso de maquinaria pesada.

#### **4.1.5 Molde de construcción**

La construcción de un molde permite que el muro panel modular pueda ser prefabricado y construido en serie, por lo tanto, el molde debe ser capaz de ser reutilizable y durable.

El molde es la unión de cuatro placas perimetrales lisas y niveladas (Figura 4.7), estos elementos proporcionan la forma geométrica a cada panel previamente descrita, en caso de considerarse necesario o querer tener un acabado prolijo o específico se puede adicionar una placa que sirva de superficie plana para lograr el acabado deseado.

Este tipo de cimbra permite que el muro panel modular sea colado sobre un firme o plataforma nivelada y que sea armado en un plano horizontal, de esta manera se facilita realizar los trabajos manuales de fabricación de cada panel.



**Figura 4.7** *Esquema de molde de construcción del MPM*

En el caso de este trabajo se utilizó madera para formar la cimbra de cada panel (Figura 4.8), por economía y facilidad de unión, sin embargo, es favorable diseñar un molde de construcción a base de acero para que sea durable y con la posibilidad de ser reutilizado una mayor cantidad de veces.



**Figura 4.8** Cimbra de madera para la construcción del MPM

#### 4.1.6 Armado de muro

La malla electrosoldada son alambres que se cruzan entre si perpendicularmente, es un producto usado generalmente en la construcción, este material se ha utilizado ampliamente para el reforzamiento estructural de viviendas, las propiedades de la malla se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2** Características malla electrosoldada

Malla	Diámetro alambre (mm)	Área alambre (mm <sup>2</sup> )	Área de acero (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Resistencia a la fluencia fy (kg/cm <sup>2</sup> )
6x6-10/10	3.43	9.24	0.606	5000

El armado interno de cada panel es el mínimo requerido por la normativa NTC-estructuras de concreto-2017, el acero mínimo se determina con

$$a_{s1} = \frac{600x_1}{f_y(x_1 + 100)}$$

$a_{s1}$  = área transversal del refuerzo colocado en la dirección que se considera, por unidad de ancho de la pieza ( $cm^2/cm$ ). El ancho

$x_1$  = dimensión mínima del miembro medida perpendicularmente al refuerzo ( $cm$ )

Para este análisis  $x_1$  toma el valor de 10 cm, que representa el espesor de cada panel.

Obteniendo para  $a_{s1} = 1.2 \text{ cm}^2/m$

Se necesita una doble capa de la malla electrosoldada (Figura 4.9) para poder cubrir con el área de acero mínima, para lograr un área de acero de  $1.212 \text{ cm}^2/m$



**Figura 4.9** Armado de malla electrosoldada para el MPM

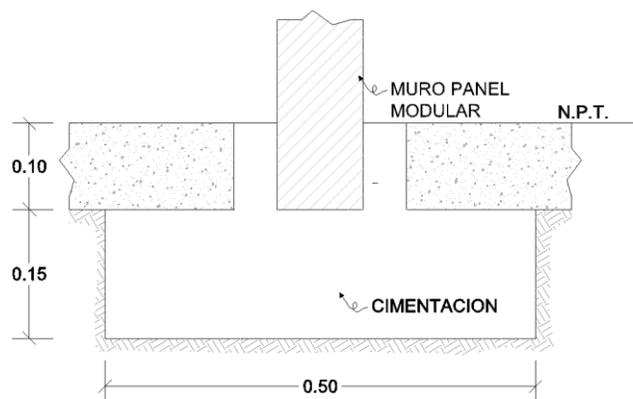
### 4.1.7 Cimentación

Se propuso una cimentación de zapata corrida, de tal manera que el muro pudiera transmitir las cargas hacia la cimentación, se utilizaron dimensiones y armados típicos para la construcción de viviendas.

Con la cimentación se busca proporcionar la rigidez necesaria para mantener en pie cada uno de los paneles, además de transmitir de forma correcta las cargas a la cimentación.

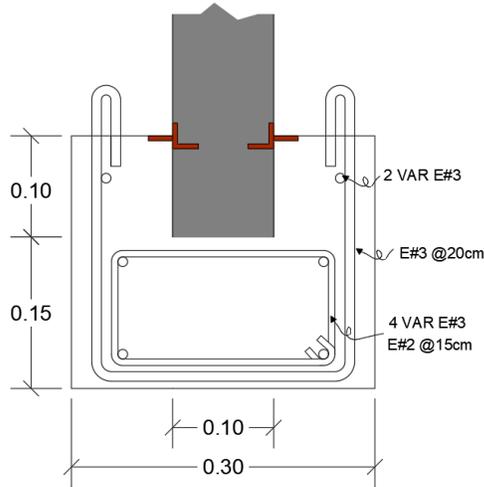
Generalmente la cimentación de los paneles tilt-up es de zapatas corridas sobre la cual se coloca cada uno de los paneles. Es posible adaptar este procedimiento a las dimensiones y características de una casa habitación.

Como se observa en la Figura 4.10 la cimentación consiste en construir una zapata corrida dejando un espacio del espesor del muro para que este pueda ser ensamblado.



**Figura 4.10** Esquema de cimentación del sistema constructivo del MPM

Bajo el esquema de cimentación descrito para el nuevo sistema constructivo se propuso una cimentación que fuera compatible con el muro de reacción donde se realizaron los ensayos a los paneles, de esta manera el armado y especificaciones son como en la Figura 4.11. Dentro del concreto se colocaron ángulos de acero a una distancia de 50 cm a lo largo del claro de la trabe de cimentación, de esta manera se puede realizar un cordón de soldadura con los ángulos que forman parte del elemento prefabricado y los ángulos ahogados en la cimentación.



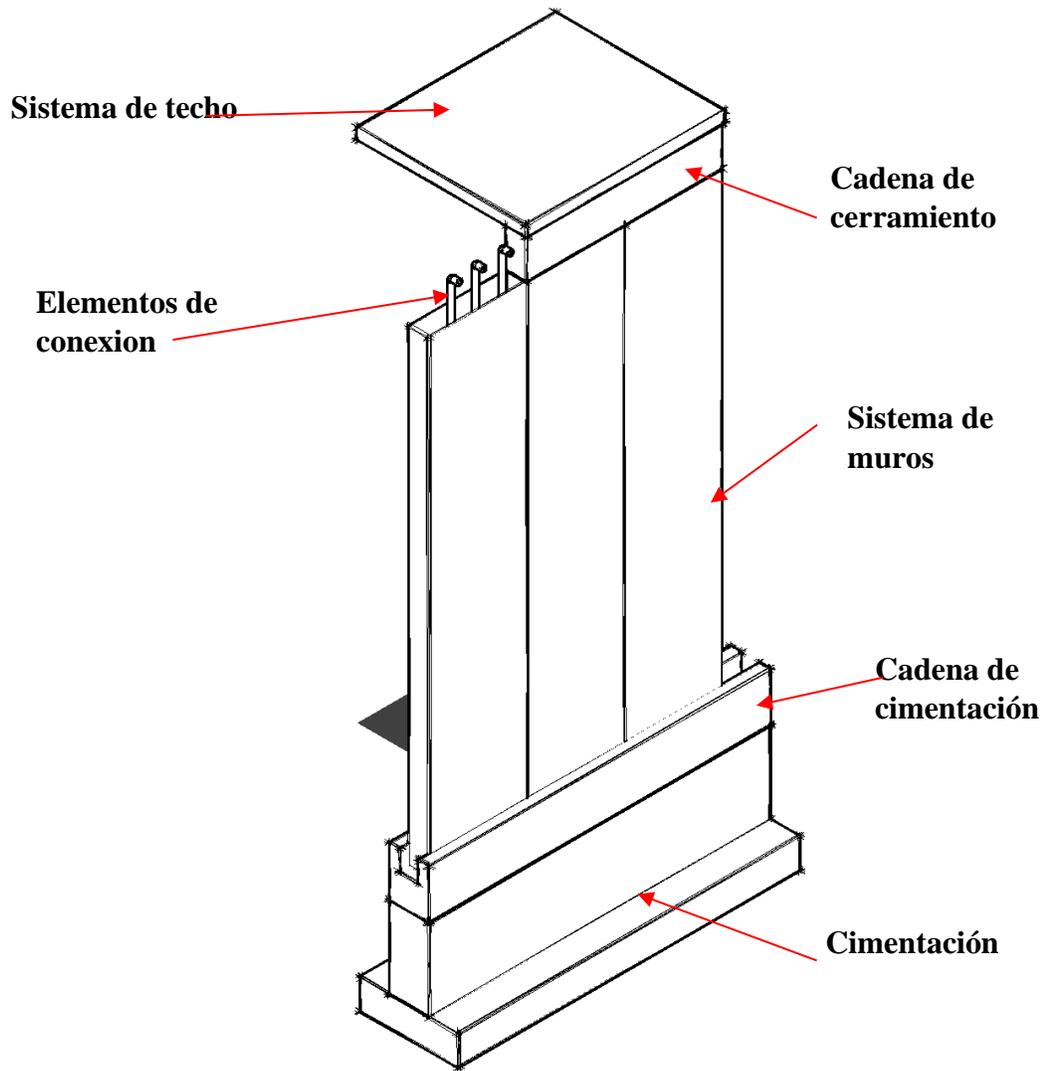
**Figura 4.11** Cimentación del MPM

#### 4.1.8 Sistema constructivo del muro panel modular

A continuación, se explica la idea constructiva del sistema de muros y como puede ser acoplado al sistema constructivo general de una vivienda, con el fin de recopilar sus características mencionadas previamente además de lograr un mejor concepto del proyecto y abrir posibilidad de estudio en la misma línea de investigación.

Generalmente las viviendas son desplantadas sobre zapatas corridas centrales o de lindero, utilizadas para transmitir la carga de la vivienda al suelo, la Figura 4.12 muestra la construcción de esta zapata, se coloca un bloque de concreto y sobre ella se desplantan hiladas de block, para lograr el nivel de desplante de la cimentación y nivel de piso terminado, sobre las hiladas de block se elabora una cadena de concreto armada, esta cadena es la encargada de recibir cada panel.

Previamente ya se describió el tipo de conexión soldadas a utilizar, cada panel debe considerar dejar varilla corrugada o elementos de conexión en la parte superior que permitan generar una unión con la cadena de concreto superior también conocida como cadena de cerramiento, este elemento sirve como confinamiento de los elementos que conforman el muro además de recibir el tipo de sistema seleccionado para losa.



**Figura 4.12** *Isométrico del sistema de construcción de muros panel modular en vivienda*

## 4.2 Diseño de mezcla de concreto

El diseño de la mezcla de concreto es un factor importante porque proporciona la resistencia suficiente a cada panel para soportar las cargas a las que fue sometido.

Los componentes básicos del concreto normal son cemento, agua, arena y grava, el peso volumétrico de este tipo mezcla esta entre  $2200 \text{ kg/m}^3$  y  $2400 \text{ kg/m}^3$ , el factor que hace que se tenga un mayor peso volumétrico y una mayor resistencia es la grava, este elemento debe modificarse cuando se requiere diseñar una mezcla de concreto que reduzca el peso volumétrico de los elementos, el objetivo de diseñar una mezcla de concreto ligero es que el MPM sea fácil de maniobrar y transportar para su instalación, sin perder la resistencia estructural.

El tezontle y la arenilla son materiales que se distinguen por su ligereza, sin embargo, evaluando el peso volumétrico seco compacto de cada uno (Tabla 4.3), la arenilla resulta ser más ligera y se toma como sustituto del agregado grueso en la mezcla de concreto.

**Tabla 4.3.** *Peso volumétrico seco compacto del tezontle y arenilla*

<b>Material</b>	<b>Peso volumétrico seco compacto <math>\text{kg/m}^3</math></b>
Tezontle	748
Arenilla	580

Para los agregados pétreos se realizó una caracterización de sus propiedades y respecto a los resultados se considero la cantidad de material necesario para lograr la resistencia objetivo, los resultados de la caracterización de las propiedades de la arenilla y la arena utilizadas se muestran en la Tabla 4.4 y Tabla 4.5 respectivamente.

**Tabla 4.4** *Caracterización de las propiedades de la arenilla*

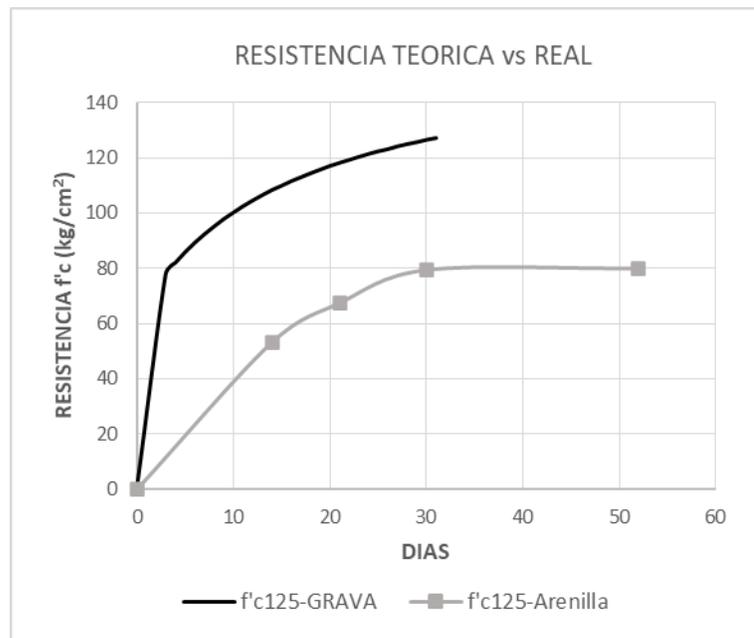
<b>Propiedades de la arenilla</b>	
Contenido de humedad (%)	20.79
Absorción (%)	54.50
Densidad relativa o peso específico (%)	1.66
Peso volumétrico seco compacto ( $\text{kg/m}^3$ )	832.28
Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	12.5

**Tabla 4.5** Caracterización de las propiedades de la arenilla

<b>Propiedades de la arena</b>	
Contenido de humedad (%)	14.08
Absorción (%)	5.49
Densidad relativa o peso específico (%)	1.21
Módulo de finura	2.36

La resistencia de diseño mínima buscada es de  $125 \text{ kg/cm}^2$  a 28 días, que de acuerdo a las NTC-2017 para estructuras de mampostería corresponde a un mortero Tipo I.

No existen referencias previas de diseños de mezclas con arenilla que permitan entender el comportamiento de este tipo de concreto, en la Figura 4.13 se muestran los resultados para un primer diseño de concreto de  $f'c=125 \text{ kg/cm}^2$  a 28 días (sin aditivo acelerante) utilizando arenilla como el agregado grueso, comparada con una curva típica de comportamiento para un diseño de concreto típico de  $f'c=125 \text{ kg/cm}^2$ .



**Figura 4.13** Comparativa de resistencia teórica vs real para una resistencia de  $125 \text{ kg/cm}^2$  diseñada con arenilla

Realizar el cambio de agregado grueso en la mezcla repercutió en obtener 36% menos de la resistencia esperada de  $125 \text{ kg/cm}^2$  a 28 días. Con esta relación obtenida, se planteó el diseño

de 4 mezclas con resistencias de diseño mayores para tener un panorama más amplio sobre el comportamiento de una mezcla de concreto con arenilla. En la Tabla 4.6 se muestran las resistencias de diseño de cada mezcla elaborada, con su respectiva relación agua cemento utilizada para cada una. Los valores para la relación agua-cemento son mayores en comparación al concreto normal porque la arenilla presentó hasta un 55% de absorción de agua.

**Tabla 4.6** *Diseño de mezclas de concreto y sus relaciones agua-cemento*

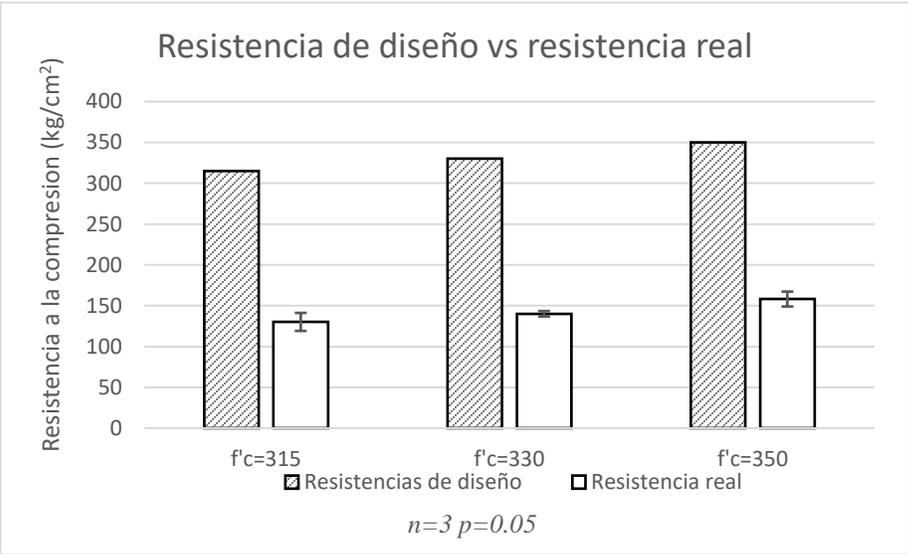
<b>Resistencia de diseño (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Relación agua/cemento</b>
125	1.169
230	1.030
315	0.714
330	0.694
350	0.711

De acuerdo a la NMX-C-083 Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes, la resistencia a la compresión se determina con el promedio de 2 especímenes como mínimo, ensayados a la edad especificada. Y la NMX-C-159 Elaboración y curado de Especímenes de Ensayo, señala que las edades comúnmente empleadas son: 7 y 28 días para las pruebas de resistencia a la compresión. Los especímenes elaborados con cemento de resistencia rápida, se prueban frecuentemente a 1, 3, 7, 14 y 28 días de edad.

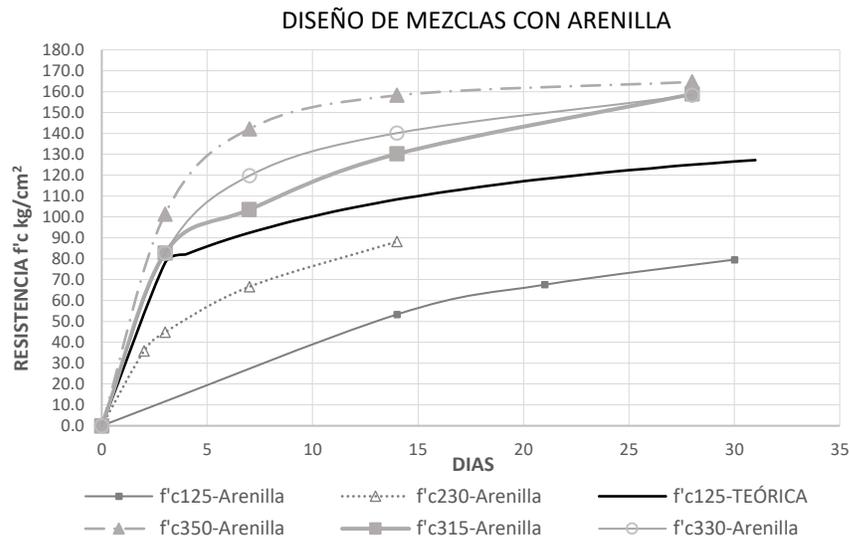
En el diseño de las mezclas se utilizó acelerante Accelguard 100 de la marca EUCOMEX que permite incrementar el desarrollo de las resistencias iniciales, con el fin de obtener la resistencia final a una edad temprana lo que permite tomar acciones rápidas frente al diseño de las mismas, la cantidad utilizada fue de 23 cc por cada kilogramo de cemento para obtener la resistencia de diseño a 14 días.

Además, se añadió el aditivo Eucon HD, este es un reductor de agua y retardante haciendo que las mezclas sean más plásticas y fluidas, la dosificación de este aditivo fue de 6 cc por cada kilogramo de cemento.

Los resultados de las resistencias obtenidas a diferentes edades de tres diseños de mezcla se muestran gráficamente en la Figura 4.14 y Figura 4.15, comparadas con la resistencia teórica de  $125 \text{ kg/cm}^2$  para un concreto normal.



**Figura 4.14** Resistencia a 14 días del diseño de mezclas de concreto ligero



**Figura 4.15** Curva de resistencia para diferentes mezclas de arenilla y concreto normal según diseño de la norma ACI

Respecto al uso del acelerante los especímenes alcanzaron en 3 días un 55.27% y a 14 días un 88.87% de la resistencia final obtenida a 28 días, sin embargo, las mezclas tienen una reducción del 57.01% respecto a la de diseño del ACI-211 propuesta.

Los valores del peso volumétrico de cada diseño están en la Tabla 4.7, el promedio resultante es de 1409.16 kg/m<sup>3</sup> a diferencia del concreto simple que se considera como 2200 kg/m<sup>3</sup>.

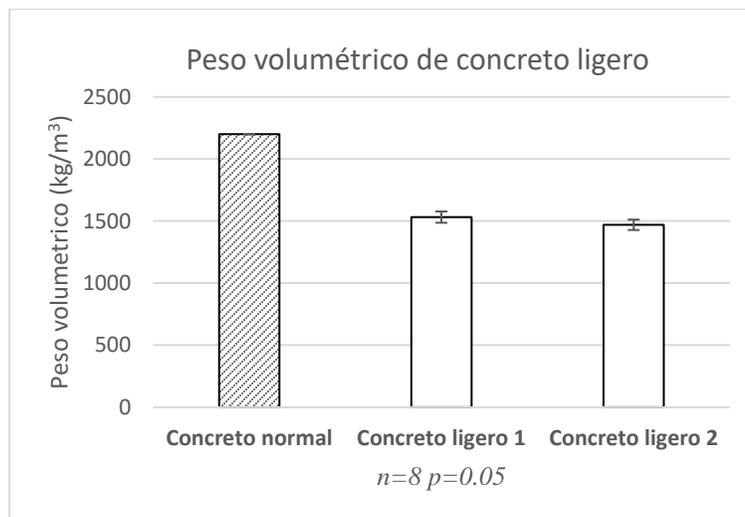
**Tabla 4.7** Peso volumétrico de especímenes cilíndricos de mezcla de concreto ligero

<b>Peso volumétrico de especímenes cilíndricos (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
f'c=125 kg/cm <sup>2</sup>	1287.67
f'c=230 kg/cm <sup>2</sup>	1432.96
f'c=315 kg/cm <sup>2</sup>	1460.61
f'c=330 kg/cm <sup>2</sup>	1441.07
f'c=350 kg/cm <sup>2</sup>	1423.50

Debido a la cantidad de material necesario para elaborar cada panel, y la cantidad de paneles a elaborar es necesario hacer diferentes mezclas, se elaboró un total de 8 mezclas de concreto

ligero para elaborar 8 paneles de 10x50x240 cm, el resultado del peso volumétrico obtenido para estas mezclas se obtiene con la elaboración de cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura.

La Figura 4.16, muestra el peso volumétrico obtenido para un concreto ligero denominado como 1 y para un concreto ligero 2, esto porque el total de las mezclas se elaboraron en dos días distintos, los elementos elaborados con el diseño de una mezcla de concreto ligero presentan a 14 días (por el uso de aditivo acelerante) una reducción de peso del 31.70% respecto a si estos hubiesen sido elaborados con un concreto normal no armado, pasando de 264 kg a 180 kg para un elemento de 10 x 50 x 240 cm.



**Figura 4.16** *Peso volumétrico obtenido en la elaboración del MPM*

De acuerdo a las NTC-2017 para construcciones de concreto, la resistencia a la compresión se verificará tomando al menos dos cilindros de cada muestra y la resistencia será el promedio de las resistencias de los cilindros elaborados.

El concreto clase 2 no debe tener una resistencia menor a 200 kg/cm<sup>2</sup>, sin embargo, este diseño se clasificara como este tipo de concreto por ser el más cercano a la resistencia diseñada. Para el concreto clase 2, se admitirá que la resistencia del concreto cumple con la resistencia especificada,  $f'_c$ , si ninguna muestra da una resistencia inferior a  $f'_c - 50$  kg/cm<sup>2</sup>, y, además, si ningún promedio de resistencia de todos los conjuntos de tres

muestras consecutivas, pertenecientes o no al mismo día de colado, es menor que  $f'c - 17 \text{ kg/cm}^2$ . La resistencia de ningún cilindro debe ser menor a  $75 \text{ kg/cm}^2$  y el promedio de las resistencias no debe ser menor a  $108 \text{ kg/cm}^2$

Si sólo se cuenta con dos muestras, el promedio de las resistencias de ambas no será inferior  $f'c - 28 \text{ kg/cm}^2$

#### **4.2.1.1 Elaboración de blocks, pilas y muretes**

La norma que debe cumplir el muro panel modular es la NMX-C-405-ONNCCE-2014 que hace referencia a Paneles para uso estructural aplicados en sistemas constructivos-Especificaciones y métodos de ensayo.

El sistema de MPM debe ser competitivo frente a los muros de mampostería, por ello se realizaron pruebas para contrastar que el diseño de dicho elemento cumple de igual manera con las Normas Técnica Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de mampostería 2017.

El análisis que se debe realizar al comportamiento del material es como pieza, pila y murete (Figura 4.17).



**Figura 4.17** *Pieza, pila y murete de una mezcla de concreto ligero*

#### **4.2.1.2 Pieza maciza**

La NMX-C-404-ONNCCE-2012 hace referencia a las especificaciones y métodos de prueba para bloques, tabiques o ladrillos para uso estructural, define a un bloque como una pieza de mampostería cuyo largo nominal es 400 mm o mayor en módulos de 100 mm y cuya altura nominal es de 200 mm. Generalmente se fabrica de concreto y puede ser macizo, multiperforado o hueco.

Según las NTC- Mampostería-2017 y la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012 la resistencia a compresión de los bloques macizos debe cumplir con  $150 \text{ kg/cm}^2$  para la resistencia media y  $120 \text{ kg/cm}^2$  para la resistencia mínima individual

Los bloques que se elaboraron con el diseño de la mezcla de concreto ligero tienen las dimensiones de 10 x 20 x 40 cm.

#### **4.2.1.3 Pila**

Para diseñar una mampostería se realiza el ensayo a compresión de pilas, esta consiste en la elaboración de un elemento que tenga una relación de altura espesor entre 2 y 6, lo que corresponde a construir una pila de 10 x 50 x 60 cm

Para el diseño de edificaciones de mampostería Tipo I, se espera una resistencia de 15 kg/cm<sup>2</sup>

#### **4.2.1.4 Murete**

El murete es ensayado para determinar la resistencia a la compresión diagonal, el elemento tiene una longitud de al menos una vez y media la longitud de la pieza y el número de hiladas necesario para que la altura sea aproximadamente igual a la longitud, tomando en cuenta que los bloques que se elaboraron son de 10 x 20 x 40 cm el murete tiene las dimensiones de 10 x 60 x 60 cm.

La resistencia a compresión diagonal para diseño de edificaciones Tipo I debe ser de 2 kg/cm<sup>2</sup>

### **4.3 Construcción del prototipo de muro panel modular**

La cantidad necesaria de muestras a ensayar está definida por la NMX-404-C, generalmente el interés de aplicar y considerar un muro prefabricado de tipo estructural es por parte de empresas que buscan integrar nuevos procesos constructivos en la vivienda, por eso se solicita que el muestreo de los elementos sea aleatorio y por duplicado en caso de que los elementos sufran daños durante su traslado y manejo.

El número mínimo de probetas para panel Tipo I se muestra en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8** Cantidad de muestreo para panel Tipo I, NMX-C-405-ONNCCE-2014

<b>Muestreo de Paneles TIPO I (NMX-C-405-ONNCCE-2014)</b>		
<b>Tipo de ensayo</b>	<b>No. de probetas mínimas</b>	<b>Tamaño de probetas (metros)</b>
Compresión	3	Tamaño máximo de probeta del fabricante
Carga Lateral	3	
Impacto	3	
Carga uniformemente repartida	3	
Fuego (compresión simple)	2	60 x 60

La cantidad de elementos que se elaboraron en este proyecto se definió por la cantidad mínima de probetas necesarias para realizar al menos un ensayo correspondiente a cada prueba, se reconoce que una mayor cantidad de ensayos permite analizar estadísticamente los resultados, sin embargo, se busca dar pie a futuras líneas de investigación en la industrialización de la construcción de muros prefabricados, por lo que se realiza al menos un ensayo de cada prueba.

Una vez definidas las características del sistema propuesto se procede a su construcción física.

- 8 paneles de 10 x 50 x 240 cm. Para las pruebas de compresión simple, carga lateral, impacto y carga uniforme.
- 6 paneles para probar la resistencia al fuego, de 60 cm x 60 cm.

Cada elemento se elaboró en las instalaciones del laboratorio de geotecnia de la Universidad Autónoma de Querétaro, manteniendo las buenas prácticas de laboratorio y las disposiciones que la coordinación convenga.

El molde de construcción se construyó a base tablas y hojas de triplay, formando un cajón, de esta manera se puede asegurar las dimensiones del panel y una mejor calidad en la

superficie de sus acabados (Figura 4.18) se buscó realizar el colado sobre una superficie plana y cercana al acceso del CETEVI para facilitar su movimiento al muro de reacción.



**Figura 4.18** Molde de construcción del muro panel modular

#### **4.4 PRUEBAS DE ENSAYO DEL MURO PANEL MODULAR**

A continuación, se describe la forma en que se realizaron las pruebas de la norma NMX-C-405-ONNCCE-2014, cada una se realizó conforme al equipo, herramienta y recurso disponible que pueda cumplir con las características señaladas, posteriormente se mostraran los resultados obtenidos en cada ensayo.

Las pruebas para considerar que un panel tipo I (para uso en muros) es de uso estructural son:

1. Resistencia a la compresión simple

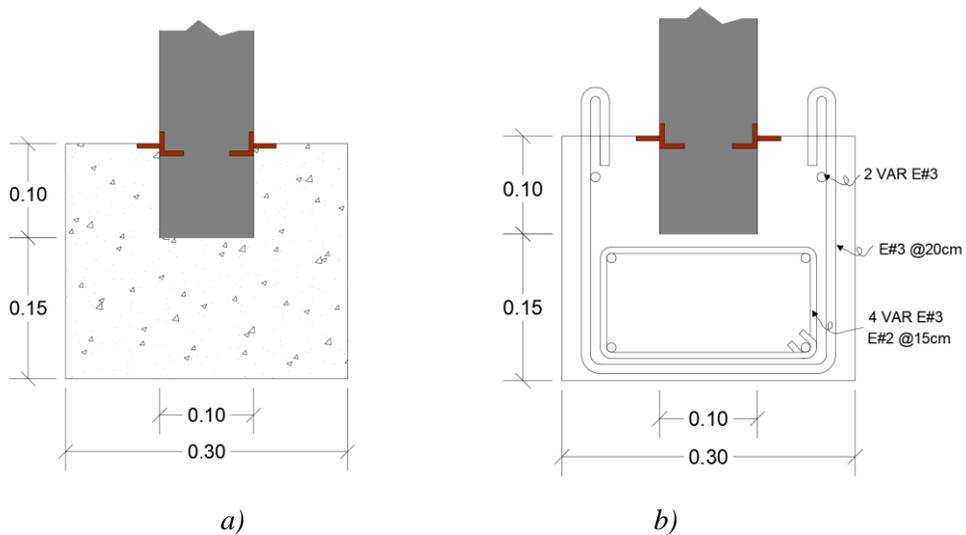
2. Resistencia bajo carga lateral
3. Resistencia al fuego
4. Resistencia al impacto en muros
5. Resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicular al plano

El Centro de Tecnología de la Vivienda perteneciente a la UAQ cuenta con el muro de reacción (Figura 4.19), el diseño del muro permite elaborar sistemas que se adecuen a las características de cada proyecto por medio de los orificios que esta ubicados en la pared como en el suelo, la función de estos orificios es crear sistemas de sujeción para los elementos que formen parte de los ensayos realizados, a estos orificios se puede acceder también por la parte inferior del suelo y desde la parte posterior del muro, cabe mencionar que cualquier maniobra relacionada con instalaciones en el muro de reacción debe respetar los protocolos de seguridad.



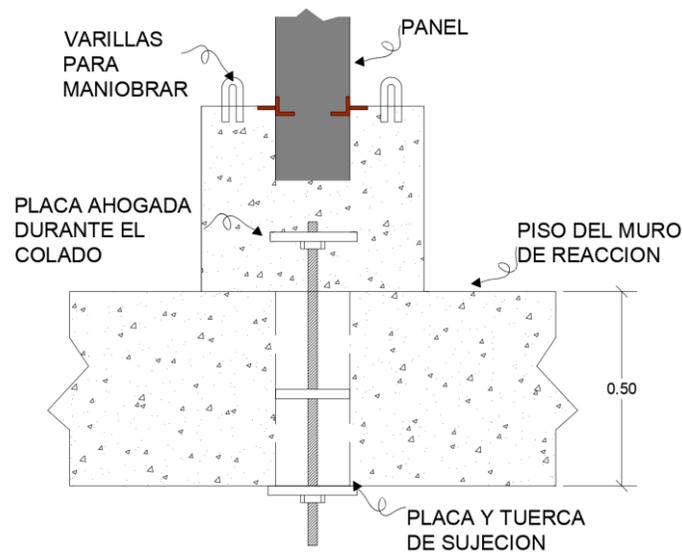
**Figura 4.19** Muro de reacción de la Universidad Autónoma de Querétaro

Previo a las pruebas fue necesario adaptar una cimentación que permitiera mantener en pie la probeta de ensaye, la Figura 4.20a muestra la adaptación de la cimentación propuesta para el sistema constructivo con una trabe de cimentación, y la Figura 4.20b especifica el armado utilizado para la trabe de cimentación, los detalles incluyen ahogar ángulos de acero para realizar la conexión en la cimentación con los ángulos que previamente fueron colados en cada panel.



**Figura 4.20** Cimentación para la probeta de ensayo del MPM

La cimentación tiene un sistema de sujeción a base de espárragos, tuercas y placas que atraviesan los orificios del muro de reacción (Figura 4.21) para asegurar la posición de la misma y evitar que se levante al momento de realizar la prueba de carga lateral sobre el panel.

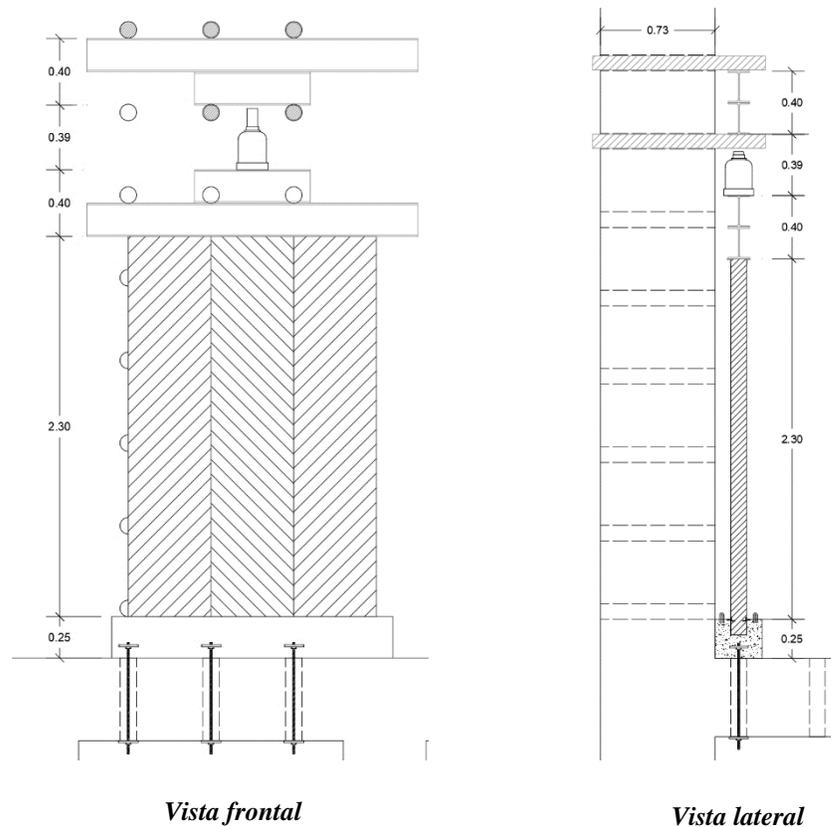


**Figura 4.21** Sistema de anclaje del MPM

#### 4.4.1 Resistencia a la compresión simple

Los elementos que someten al muro panel modular a una carga de compresión es el sistema de losa utilizado, que distribuye su peso propio y el peso de elementos existentes sobre ella hacia los muros, los paneles deben ser capaces de resistir un esfuerzo mínimo axial a la compresión de  $5 \text{ kg/cm}^2$ .

La probeta de ensaye se formó por la unión consecutiva de tres paneles, apoyados sobre la cimentación previamente elaborada, en la Figura 4.22 se muestra el esquema del sistema elaborado con perfiles IPR para aplicar la carga a compresión sobre el MPM



**Figura 4.22** *Detalle de construcción del sistema de carga a compresión*

La carga sobre el MPM fue aplicada con un gato hidráulico (Figura 4.23) que tiene una capacidad de 30 ton, y de acuerdo a la carga mínima de resistencia a la compresión especificada por la norma, la probeta debe resistir al menos 7.5 ton. La manera en que se registró la carga aplicada por el gato hidráulico fue con un manómetro que indica la presión en MPa (Figura 4.24).

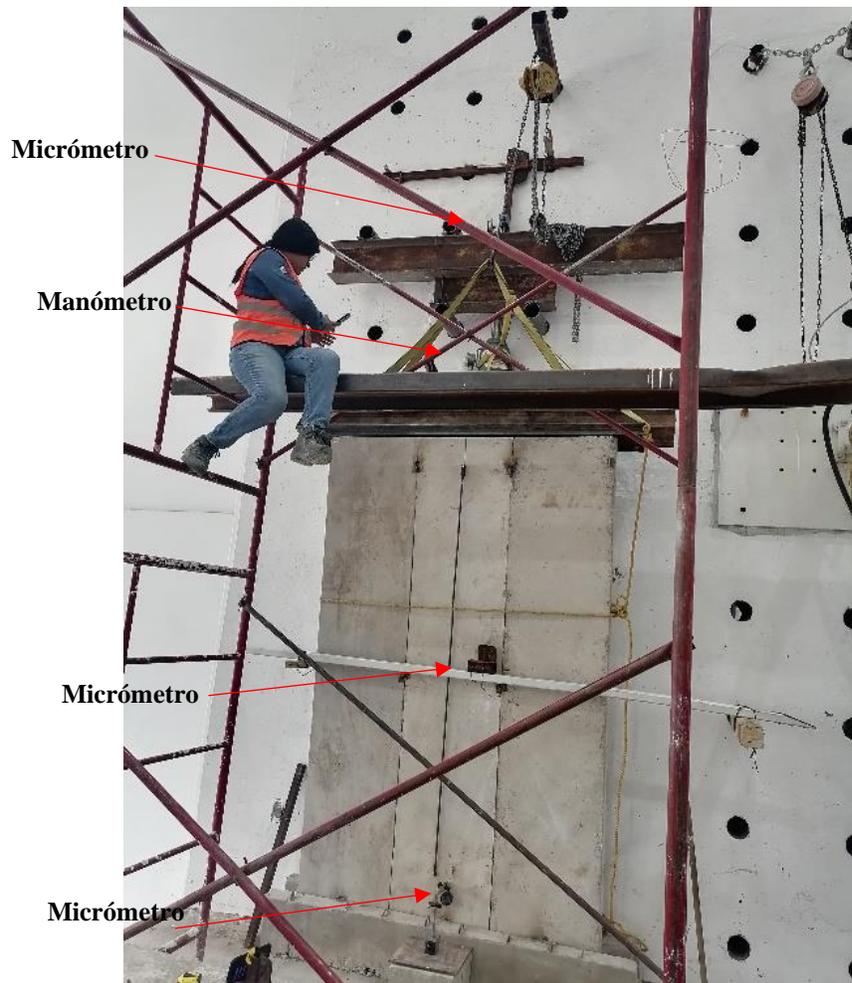


*Figura 4.23 Gato hidráulico con capacidad de 30 ton*



*Figura 4.24 Manómetro para registrar la presión ejercida por el gato hidráulico*

La instrumentación de la prueba consistió en la ubicación de 3 micrómetros (Figura 4.25), que corresponde a medir el posible desplazamiento del elemento rígido formado por los IPR para resistir la carga aplicada por el gato hidráulico, en la parte inferior de la probeta para medir el aplastamiento y al centro de la probeta para medir el desplazamiento lateral.



**Figura 4.25** *Instrumentación del muro panel modular*

#### **4.4.2 Resistencia bajo carga lateral en el plano del muro**

Toma relevancia conocer la resistencia a cortante de los elementos puesto que esta resistencia está relacionada con los efectos que puede causar la ocurrencia de un sismo sobre los muros de una vivienda, los paneles estructurales Tipo I deben tener una resistencia mínima al cortante de  $1 \text{ kg/cm}^2$ , o bien resistir una carga lateral mínima de 1.5 ton por cada metro de longitud del muro

La cimentación se elaboró con un perfil IPR que es lo suficientemente rígido para no deformarse por la carga a compresión y este se encuentra sujeto a la losa de cimentación del

muro de reacción para poder mantenerlo en su lugar, se restringió su desplazamiento horizontal como vertical que puede ocurrir frente a la carga lateral aplicada (Figura 4.25).



**Figura 4.26** *Cimentación para prueba de carga lateral*

Sobre el IPR se realizó la soldadura de placas de acero para formar un canal donde ubicar cada panel, a su vez esta placa es soldada al ángulo de acero colado dentro de cada panel para realizar la cimentación propuesta por el sistema de construcción descrito (Figura 4.27).



**Figura 4.27** *Conexión de cimentación del panel para prueba de carga lateral*

Las conexiones entre cada panel se realizaron como se describió previamente, estas consistieron en unir con soldadura los ángulos anclados dentro de cada panel (Figura 4.28).



**Figura 4.28** *Conexión soldada del MPM para prueba de carga lateral*

La probeta de ensaye fue sometida a una carga de compresión y una carga lateral simultáneamente, para distribuir de manera uniforme las cargas se instala un perfil horizontal y un vertical respectivamente, estos perfiles se muestran en la Figura 4.29.



**Figura 4.29** *Perfiles de acero para la distribución de cargas en prueba de carga lateral*

Debido a que no se cuenta con un marco rígido dentro de las instalaciones del muro de reacción la manera de aplicar la carga a compresión fue con el uso de un gato hidráulico y una eslinga, la eslinga cruza de lado a lado la probeta para pasar por los orificios de la losa de reacción (Figura 4.30), al colocar de esta manera las eslingas pueden ser tensionadas y ejercer la compresión del elemento, la manera de ejercer la tensión sobre la eslinga es por medio del gato hidráulico colocado debajo de la losa de cimentación y al cual se puede acceder por la parte inferior del muro, este sistema se muestra en la Figura 4.31.



**Figura 4.30** Colocación de eslinga para ejercer carga de compresión sobre la probeta de ensaye



**Figura 4.31** Colocación de gato hidráulica para ejercer una carga de compresión de la probeta de ensaye

La carga lateral se ejerció con un gato hidráulico fijo en el muro de reacción, el gato tiene una capacidad de aplicar 5 Ton (Figura 4.32).

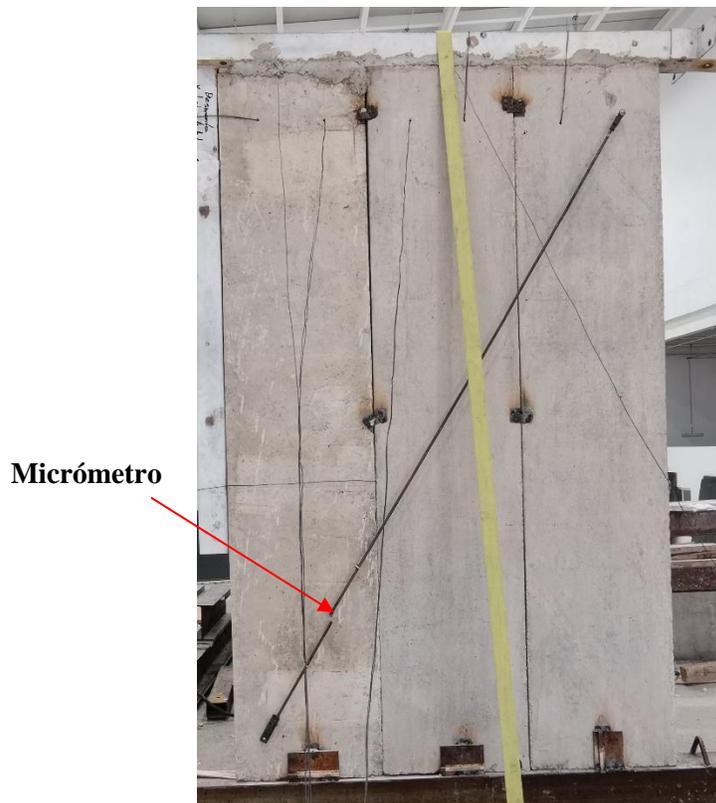


**Figura 4.32** *Gato hidráulico para ejercer fuerza lateral sobre la probeta de ensaye*

Los resultados obtenidos de la prueba es la carga máxima aplicada sobre el elemento y la gráfica de esfuerzo deformación, la carga es medida y registrada por una celda de carga colocada en la punta del gato hidráulico, la celda de carga y el instrumento de lectura se muestran en la Figura 4.33. La deformación se midió utilizando micrómetros conectados a varillas de transmisión colocadas de forma diagonal en ambas caras de la probeta de ensaye (Figura 4.34).



**Figura 4.33** Celda de carga e instrumento de lectura



**Figura 4.34** Barra de transmisión para medir la deformación de la probeta de ensaye

### 4.4.3 Resistencia al fuego

La vivienda debe proveer seguridad y resistencia bajo posibles accidentes, en dicho caso, se debe proporcionar seguridad ante la exposición de fuego para que este no se propague debido al material de que son elaborados los paneles, además que se debe conservar sus resistencia posterior al accidente ocurrido, los paneles estructurales para uso en las edificaciones de riesgo menor deben cumplir con la resistencia al fuego de una hora como mínimo, sin producir flama, gases tóxicos o explosivos a una temperatura de 550 °C. Se permite una disminución de resistencia a la compresión simple de hasta el 30% con respecto al valor alcanzado en la probeta testigo.

El fuego fue producido por gas natural o gas metano de uso doméstico.

El instrumento de medición de temperatura fue un termopar tipo J, este se localizó entre la probeta de ensayo y la salida de la flama y al mismo nivel de la cara expuesta al fuego lo más próximo posible a la probeta

La Figura 4.35 muestra la cámara de fuego adaptada para realizar la prueba, consistió en un horno que trabaja con resistencias como fuente de calor, sin embargo, el fuego directo se provee con una hornilla conectada a un tanque de gas de uso doméstico, las paredes del horno tiene un recubrimiento de asbesto que funciona como aislante termino para conservar el calor dentro del horno, la temperatura se registró con un indicador de temperatura, la ventana central permite observar y tener control de la probeta.



**Figura 4.35** Adaptación de horno a cámara de fuego

Se elaboraron 3 probetas de 60 x 60 cm con la mezcla de concreto ligero diseñada para el sistema modular, con el fin de formar 3 pares de muestras (Figura 4.36).

Por la cantidad de volumen de concreto ligero a elaborar se realizaron dos mezclas distintas, los elementos “A” y 1 elemento “C” corresponden a la primera mezcla elaborada y los elementos “B” y 1 elemento “C” corresponden a la segunda mezcla.



**Figura 4.36** *Especímenes para prueba de fuego*

#### **4.4.4 Resistencia al impacto para muros**

Este tipo de prueba puede suponerse como la caída de algún elemento de la vivienda por los movimientos sísmicos, o considerando la probabilidad de una explosión provocada por la acumulación de gas doméstico dentro del hogar, estos son supuesto ante la consideración de la norma para poder considerar el sistema constructivo como un panel estructural, sus uniones horizontales y/o verticales deben resistir un impacto provocado por una masa de 50 kg liberada en forma de péndulo a una altura de 2.20 y un Angulo de 45°, se tiene que conservar la integridad estructural sin separaciones en ambas caras de la probeta, y una deflexión instantánea no mayor a 10 mm al impacto y recuperarse parcialmente de su deformación, pero conservando su integridad estructural.

El panel se colocó en la cimentación de concreto ya descrita mientras que en la parte superior fue asegurado para evitar el desplazamiento hacia al frente como hacia atrás al momento de ser impactado, de esta manera la deformación que se presenta es al centro de la probeta

(Figura 4.37), la prueba se realizó con un panel por eso el peso del elemento de impacto se reduce a 10.42 kg, el elemento de impacto se colocó a 45° y a 2.20 m de altura a partir del centro de la probeta (Figura 4.38).



**Figura 4.37** *Probeta de ensaye para prueba de impacto*



**Figura 4.38** Sistema de prueba de impacto sobre el MPM

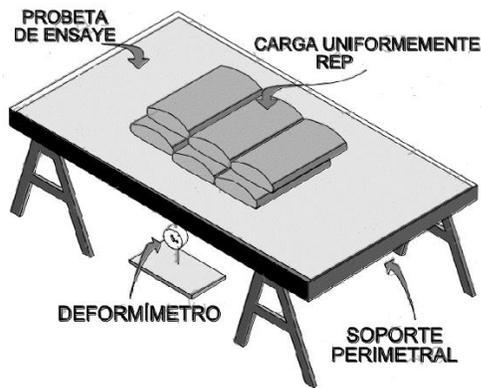
La manera de medir la deformación fue con un vernier, su funcionamiento permite registrar la deformación que se presenta, la Figura 4.38 muestra la manera en que fue colocado este dispositivo, al ser una pieza de un ancho pequeño se considera que la deformación presentada al centro del panel será la misma que se presente a la orilla del mismo, esto porque el espacio disponible en la parte posterior del sistema es poco lo que dificulta la instalación del sistema de medición además de poder dañarlo por el impacto.



**Figura 4.39** Sistema de medición para la deformación presentada en la prueba de impacto

#### **4.4.5 Resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicularmente al plano**

Los paneles deben resistir una carga de  $100 \text{ kg/m}^2$ , sin rebasar una flecha de  $L/360$ , donde  $L$  es la longitud del claro mayor, y recuperarse parcialmente de su deformación, pero conservando su integridad estructural, el esquema general de la prueba se muestra en la Figura 4.39.



**Figura 4.40** Esquema de prueba de carga perpendicular al plano

El área de aplicación de la carga corresponde a un solo panel de 0.50 x 2.40 m a los que les corresponde una carga de 120 kg

La Figura 4.40 muestra el elemento ensayado sobre las bases teniendo una longitud libre entre apoyos de 2.13 m, el elemento presenta una deflexión inicial de 1 cm esto debido a la diferencia de tiempo que se tomó en colocar el elemento sobre las bases y realizar la prueba.



**Figura 4.41** Carga perpendicular al plano sobre la probeta de ensaye

El micrómetro es colocado al centro geométrico de la probeta para registrar la deflexión.

El peso colocado sobre la probeta se distribuyó con cuatro costales previamente pesados, con 30 kg cada uno, se colocaron uno tras otro y no al mismo tiempo, el primero en una orilla, el siguiente en el otro extremo y se finalizó con los últimos dos costales al centro (Figura 4.41)

Se registró la deflexión obtenida al momento de colocar el ultimo saco de material y a partir de aquí se continúan registrando las deformación periódicamente hasta completar un periodo de 24 horas de la probeta cargada, al momento de cumplir las 24 horas del elemento cargado los sacos de material se retiran de la misma manera en que se colocaron, nuevamente se registra la deformación obtenida al momento en que se retiraron los 4 costales, se registra la deformación durante las próximas 24 hrs de la probeta no cargada.



**Figura 4.42** *Carga perpendicular al plano sobre el MPM*

# CAPÍTULO 5

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Blocks, pilas y muretes

Una vez seleccionada la mezcla adecuada de concreto ligero para obtener la resistencia a compresión objetivo se procedió a la elaboración de blocks, pilas y muretes que servirán como punto de comparación referente a la normativa de mampostería, además de conocer las propiedades del material para poder generar un modelo de análisis de elementos finitos más preciso.

Se tomaron coeficientes de la variación de la resistencia para calcular las resistencias de diseño sin embargo estos se determinan con base en la información estadística existente sobre el producto o a partir de muestreos de las piezas, se señala que en este trabajo se utilizarán los coeficientes de variación propuestos por la NTC-mampostería.

#### 5.1.1 Blocks

Se ensayaron 2 blocks de la mezcla de concreto ligero obteniendo los siguientes resultados (Tabla 5.1), para la resistencia de diseño se utilizó un coeficiente de variación de la resistencia ( $C_p$ ) de 0.35, en la Figura 5.1 se muestra el ensayo realizado a uno de los blocks.

**Tabla 5.1** Resultados de la resistencia a compresión de blocks de concreto ligero

	<b>Block 1</b>	<b>Block 2</b>
Resistencia individual ( $f_{p_{min}}$ ) $kg/cm^2$	127.75	127.17
Resistencia media de las piezas ( $f_p$ ) $kg/cm^2$	127.46	
Resistencia de diseño ( $f^p$ ) $kg/cm^2$	67.98	



**Figura 5.1** *Ensayo de compresión a block de concreto ligero*

### 5.1.2 Pilas

De las pilas se obtuvo el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión, el coeficiente de variación de la resistencia es de 0.15, se elaboraron pilas con malla y sin malla electrosoldada para evaluar el comportamiento del material con el refuerzo de acero propuesto, los resultados del ensayo de pilas se muestran en la Tabla 5.2.,

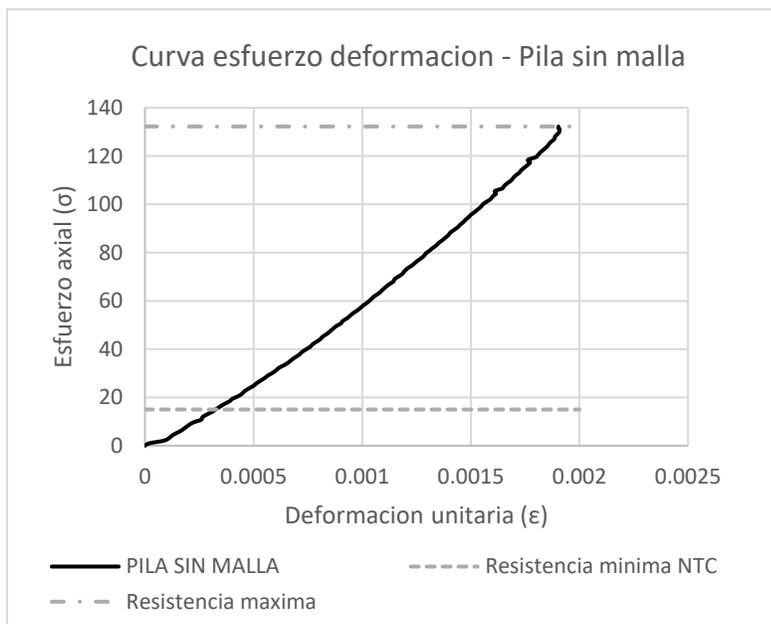
**Tabla 5.2.** *Resultado del ensayo de pilas de concreto ligero*

	<b>Sin malla</b>	<b>Con malla</b>
Resistencia individual ( $f_{p_{min}}$ ) $kg/cm^2$	124.76	114.32
Resistencia de diseño ( $f^*p$ ) $kg/cm^2$	90.73	83.14
Módulo de elasticidad	57,762.56	51,401.56

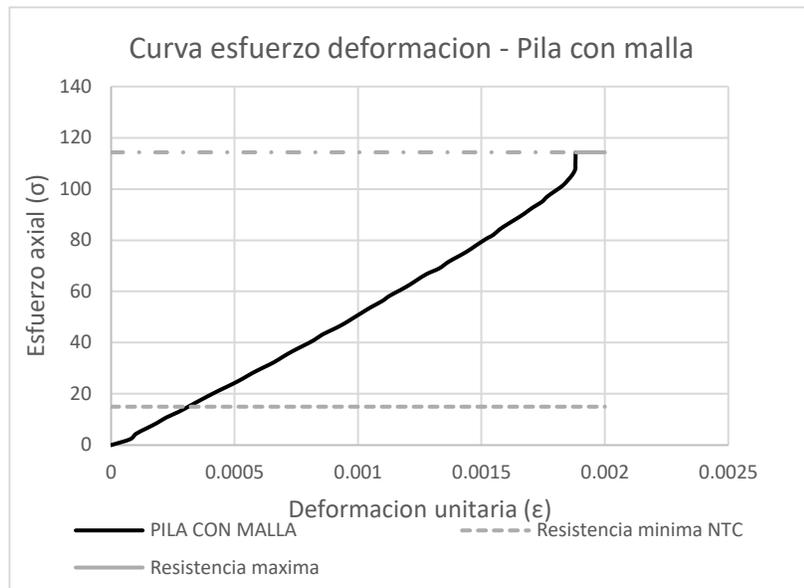
En la figura 5.2 se muestra el ensayo realizado a la pila de concreto ligero y la instrumentación utilizada para obtener las deformaciones, estas se muestran en la figura 5.3 para el murete sin malla y en la figura 5.4 para un murete con malla,



**Figura 5.2** Ensayo de pilas de concreto ligero



**Figura 5.3** Curva esfuerzo deformación para una pila de concreto ligero sin malla



**Figura 5.4** Curva esfuerzo deformación para una pila de concreto ligero con malla

La pila elaborada con malla electrosoldada presenta un agrietamiento importante en el espesor del elemento (Figura 5.5).



**Figura 5.5** Falla de pila con malla de refuerzo

La pila tiene el mismo espesor y ancho del panel, pero al ser un elemento más pequeño este no tiene una longitud de pandeo grande, aunque la pila no falla por pandeo lateral ya se puede observar el tipo de falla que pudiera ocurrir bajo una carga a compresión en el prototipo del panel, el pandeo de la malla provoca la separación del muro en partes ocasionando el agrietamiento lateral de la pila.

La pila sin malla presenta una resistencia mayor a la compresión de  $124.76 \text{ kg/cm}^2$  a diferencia de la que tiene malla  $114.32 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que el módulo de elasticidad es parecido en valor y en la forma en que se desarrolla la curva de esfuerzo deformación.

### 5.1.3 Muretes

Los muretes proporcionan la resistencia a carga lateral y el módulo cortante, se elaboró un murete con malla y otro sin malla de refuerzo. En la Figura 5.6 se muestra el ensayo realizado al murete, para el cual se registra la deformación horizontal y vertical.



**Figura 5.6** *Ensayo de muretes de concreto ligero*

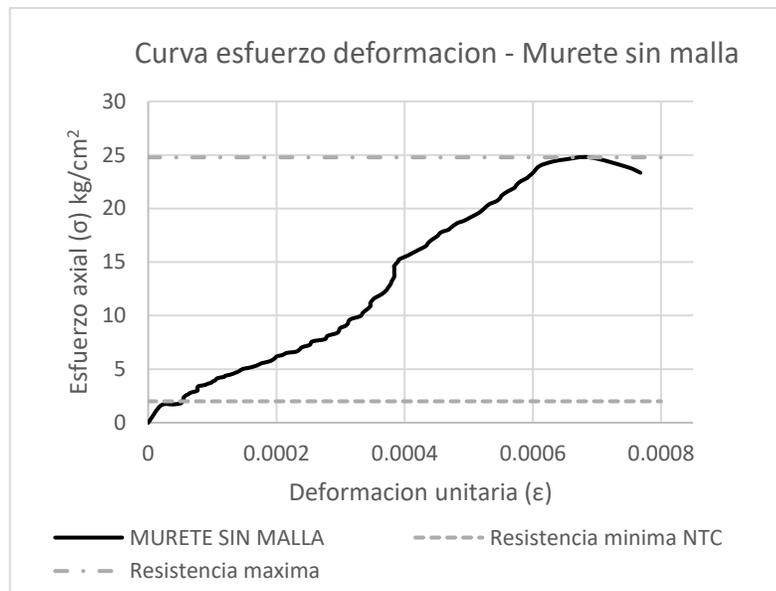
Los resultados obtenidos del ensayo de los muretes se muestran en la Tabla 5.3 y el coeficiente de variación de la resistencia utilizado fue de 0.20:

**Tabla 5.3.** Resultados del ensayo de muretes de concreto ligero

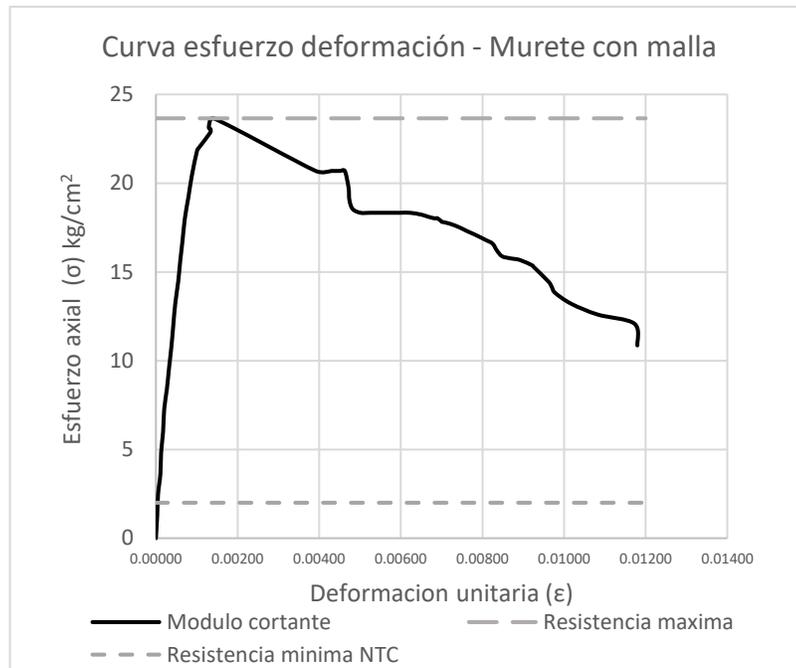
	Sin malla	Con malla
Resistencia individual ( $f_{p_{min}}$ ) $kg/cm^2$	24.77	23.65
Resistencia de diseño ( $f^*p$ ) $kg/cm^2$	16.51	15.77
Modulo cortante	29,048.97	26,504.39

En la Figura 5.7 se muestra la gráfica de esfuerzo deformación ocurrida para el murete sin malla, mientras que en la Figura 5.8 se muestra para el murete con malla.

Si bien la resistencia a la carga lateral es parecida entre ambos muretes la principal diferencia se encuentra en su curva esfuerzo deformación, el elemento que no tiene la malla de refuerzo presenta una falla súbita (Figura 5.9a) mientras que el murete con la malla de refuerzo tiene una mayor deformación (Figura 5.9b).



**Figura 5.7** Curva esfuerzo deformación para un murete de concreto ligero sin malla



**Figura 5.8** Curva esfuerzo deformación para un murete de concreto ligero con malla



a) Murete sin malla

b) Murete con malla

**Figura 5.9** Falla a cortante de muretes de concreto ligero

## **5.2 Resistencia a la compresión simple**

La probeta consiste en la unión de tres elementos que forman el muro panel modular, estos elementos se sometieron a compresión simple, se registró la máxima carga soportada por dichos paneles, esta tiene que ser mayor a  $5 \text{ kg/cm}^2$ , además se registraron las deformaciones presentadas en el elemento, la manera y los dispositivos utilizados para realizar la prueba ya se describieron en el capítulo anterior.

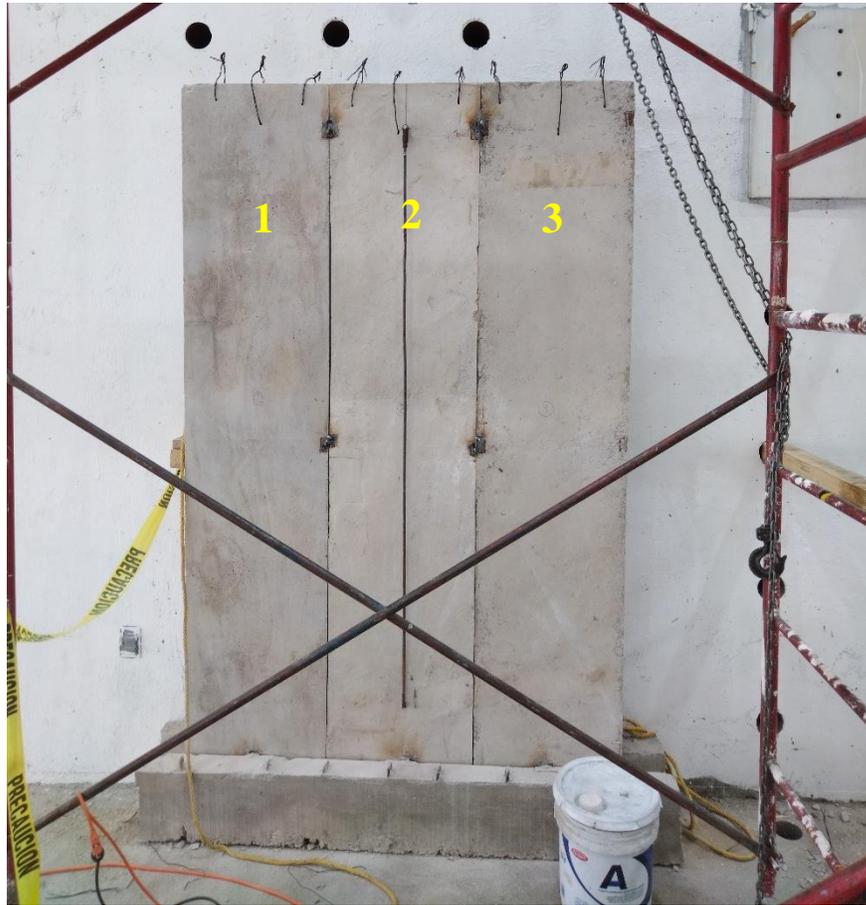
En este tipo de prueba es necesario cuidar aspectos de nivelación de los elementos y la verticalidad de aplicación de la carga, en la Figura 5.10 se muestra el elemento fallado, ocurriendo primero un pandeo lateral lo que imposibilitó seguir ejerciendo la fuerza de compresión al elemento.

El gato hidráulico presentó desventajas para la aplicación de la carga, esta debió mantener un ritmo constante y al acercarse a la carga máxima aplicada se volvió complicado para la persona que realizó la maniobra de apalancar el gato.



**Figura 5.10** *Falla a compresión del muro panel modular*

Las conexiones de acero se mantuvieron rígidas mientras que la unión de panel con panel mostro deterioro, por la parte frontal de los elementos no se presentó agrietamiento significativo (Figura 5.11), mientras que la parte posterior de cada elemento fue el que presento un mayor daño (Figura 5.12).



**Figura 5.11** *Vista frontal del MPM ensayado a compresión*



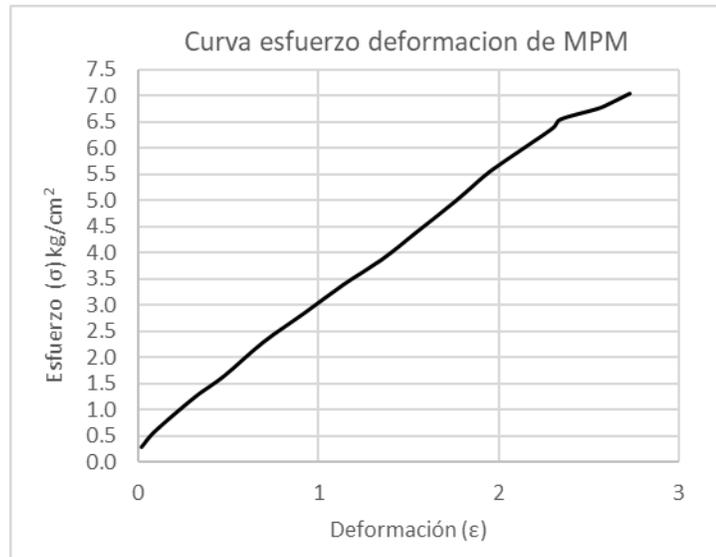
**Figura 5.12** *Agrietamiento posterior del MPM sometido a compresión*

La instrumentación de la prueba se hizo con 1 manómetro y 3 micrómetro, con un dispositivo de grabación que registra dicha carga y deformación, los videos son procesados y ajustados en un programa de edición de video para hacer corresponder la carga aplicada a la deformación presentada (Figura 5.13).



**Figura 5.13** Registro de carga y deformaciones correspondientes a la prueba de compresión

Se construye la curva esfuerzo deformación, sin embargo, se considera que esta no es representativa puesto que el micrómetro 1 registra el desplazamiento del dispositivo rígido construido para aplicar la carga a compresión sobre el panel y el desplazamiento de este sistema de acero es 9.199 mm, mientras que el aplastamiento del panel es de 2.725 mm, si bien el sistema es rígido este no lo fue lo suficiente para presentar un desplazamiento menor al del aplastamiento. Se presenta de igual manera la curva de esfuerzo deformación del sistema (Figura 5.14) como ayuda a posteriores ensayos con ayuda del mismo sistema de acero construido sobre el muro de reacción.



**Figura 5.14** Curva esfuerzo deformación del MPM sometido a compresión

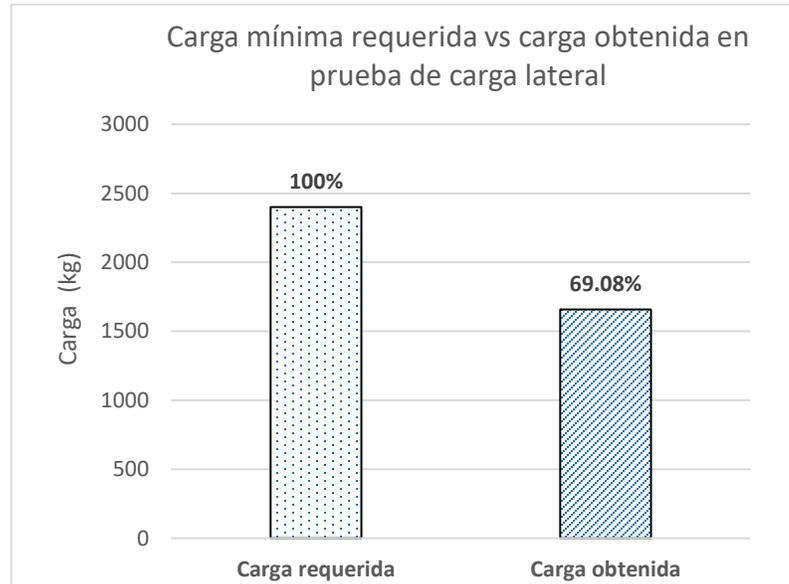
Debido al pandeo lateral del elemento con el micrómetro 2 se registra una deformación máxima de 2.75 mm al centro geométrico de la probeta.

La máxima carga registrada por el manómetro fue de 328.76 kg/cm<sup>2</sup> (32.34 Mpa), aplicados sobre el diámetro del gato hidráulico que tiene un área de 32.16 cm<sup>2</sup>, la carga máxima aplicada sobre el muro panel modular fue de 10,572.92 kg, que corresponde a un esfuerzo de 7.05 kg/cm<sup>2</sup>, la carga mínima esperada es de 5 kg/cm<sup>2</sup> (7.5 ton) esto representa un 41% más de la resistencia mínima requerida por la norma para considerar el sistema de muro como un panel estructural.

### 5.3 Resistencia bajo carga lateral en el plano del muro

Los paneles deben tener una resistencia mínima al cortante de 1 kg/cm<sup>2</sup>, o bien resistir una carga lateral mínima de 1.5 ton por cada metro de longitud del muro, actuando simultáneamente con la carga vertical de servicio, de acuerdo a las características del panel la probeta debe ser capaz de resistir 2.25 ton respondiendo a la segunda condición de carga solicitada por la norma.

La celda de carga que fue previamente calibrada, registro una lectura de 204, esta lectura es una carga de 1657.94 kg, esto representa solo un 69.08% de la carga mínima solicitada Figura 5.15.



**Figura 5.15** Carga obtenida para prueba de carga lateral en el panel

La Figura 4.16 muestra las fallas que presentó la probeta, se esperaba un desplazamiento vertical en la esquina inferior del lado de la aplicación de la carga lateral, registrándose 2.5 cm, mientras que en la esquina contraria a donde se aplicó la carga se presentó un aplastamiento de la probeta provocando un desprendimiento del material, otro tipo de falla se presentó en las conexiones soldadas (Figura 4.17), la soldadura entre placa ahogada en el panel y la placa de cimentación no fue lo suficientemente resistente y el ancla utilizada para mantener en sus posición la placa dentro de cada panel presentó un desprendimiento del concreto a su alrededor.



a) Desplazamiento de la esquina inferior cercana a la aplicación de la carga



b) Aplastamiento de la esquina contraria a la aplicación de la carga

**Figura 5.16** Fallas presentadas en la probeta de ensaye por carga lateral



a) Desprendimiento del ancla de conexión



b) Falla en la soldadura de conexión

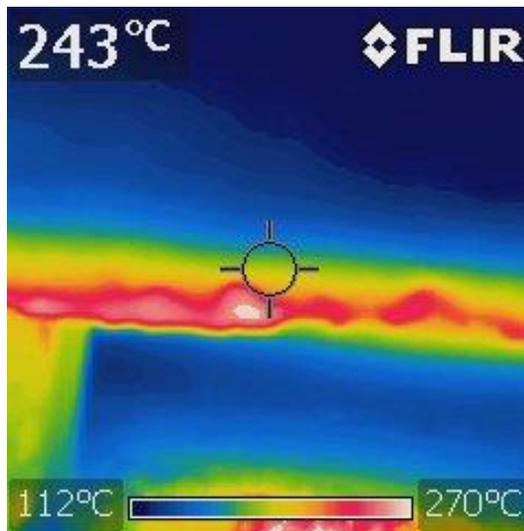
**Figura 5.17** Fallas presentadas en las conexiones de la probeta ensayada bajo carga lateral

## 5.4 Resistencia al fuego

De los 6 especímenes elaborados se forman 3 pares denominados como A, B y C, la primera probeta de cada par es denominada como probeta testigo, mientras que la segunda probeta es sometida al fuego directo dentro de la cámara previamente descrita.

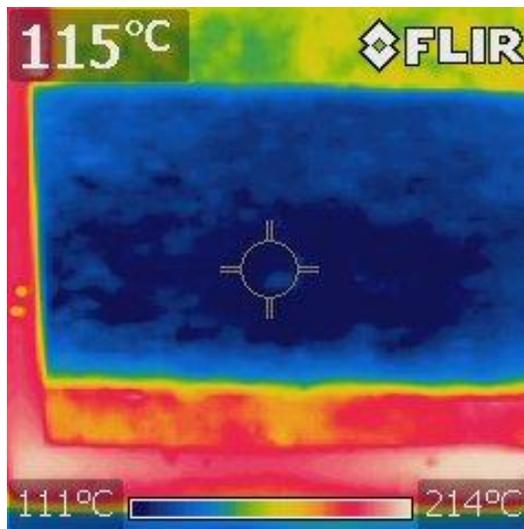
La temperatura de inicio fue de 35 °C, aumentando rápidamente en los primeros 30 min de la prueba donde se alcanzó un promedio de 321 °C, y al finalizar los 60 minutos correspondientes a la prueba se registró una temperatura promedio de 368 °C, cabe señalar que la ubicación del termopar encargado de medir la temperatura es de suma importancia puesto que las temperaturas anteriormente señaladas corresponden a la posición cuando el termopar se encuentra entre la flama y la probeta, cuando el termopar se colocó en la parte superior de la cámara se registró una temperatura máxima de 159 °C a los 60 minutos, este valor corresponde a la temperatura general de la cámara y no de la transmitida al espécimen.

El fuego fue aplicado directamente sobre una de las caras de la probeta, transmitiendo el calor de este punto a la cara contraria, con la ayuda de una cámara termínica se midió la temperatura sobre la superficie del elemento, en este proyecto se utilizó una cámara Flir i5 que tiene un rango de medición de temperatura de hasta 270 °C, la Figura 5.18 muestra la cara lateral del elemento, donde en la parte central ya alcanza una temperatura de 243 °C, mientras que en la superficie alejada de la flama una temperatura de 112 °C, esta imagen fue tomada desde la ventana de observación de la cámara de fuego.



**Figura 5.18** Foto de cámara térmica sobre un espécimen de concreto ligero sometido a fuego directo

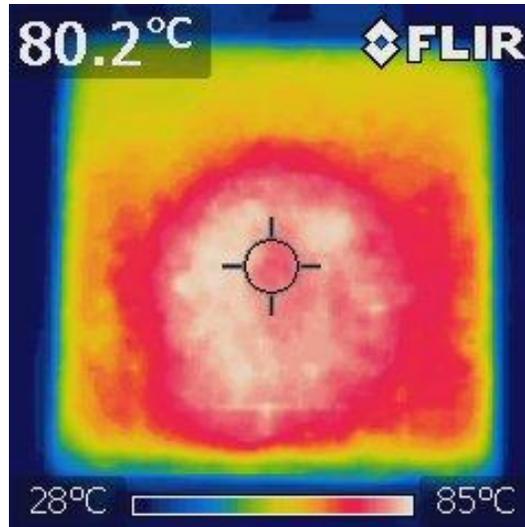
La Figura 5.19 es una imagen registrada por la Flir i5 desde la ventana de observación de la cara superior no expuesta al fuego directo del espécimen C, la parte inferior registra una mayor temperatura a diferencia de la superior que se encuentra en 115 °C.



**Figura 5.19** Foto de cámara térmica de cara contraria a la expuesta a fuego directo

Al transcurrir los 60 minutos de la prueba fue necesario esperar un tiempo a que la probeta pueda ser maniobrada, y retirada de la cámara de fuego, una vez que se puede soportar la

temperatura del elemento al tacto se retira la probeta de la cámara y aun se observa la transmisión del calor dentro del elemento con la ayuda de la cámara térmica (Figura 5.20).



**Figura 5.20** Foto de cámara térmica sobre cara expuesta a fuego directo

La apariencia obtenida después de retirar la probeta del fuego directo se muestra en la Figura 5.21, se presenta un agrietamiento superficial especialmente en el área de contacto de la flama, sin que este se desprenda fácilmente al maniobrar la probeta, también cabe resaltar que durante el ensayo de los 3 especímenes no se presentó la producción de flamas ni gases, esto era poco probable por el tipo de materiales con los que está elaborado el concreto ligero.



**Figura 5.21** *Agrietamiento de probeta sometida a fuego directo*

La segunda parte de la prueba de fuego consiste en someter a un ensayo de compresión los tres pares de probetas (A, B y C) (Figura 5.22), se espera que haya una reducción de resistencia a la compresión en la probeta que fue sometida al fuego directo, pero esta no debe ser mayor al 30% respecto a la probeta testigo que fue resguardada previo al ensayo de las probetas a fuego directo.

El ensayo se realizó en la máquina universal del laboratorio de suelos de la UAQ, sobre arena cribada se desplata la probeta para dejarla nivelada y de igual manera en la parte inferior, es importante conseguir un grosor suficiente en las placas que transmiten la carga para que no se deformen antes que la probeta llegue a su máxima resistencia.



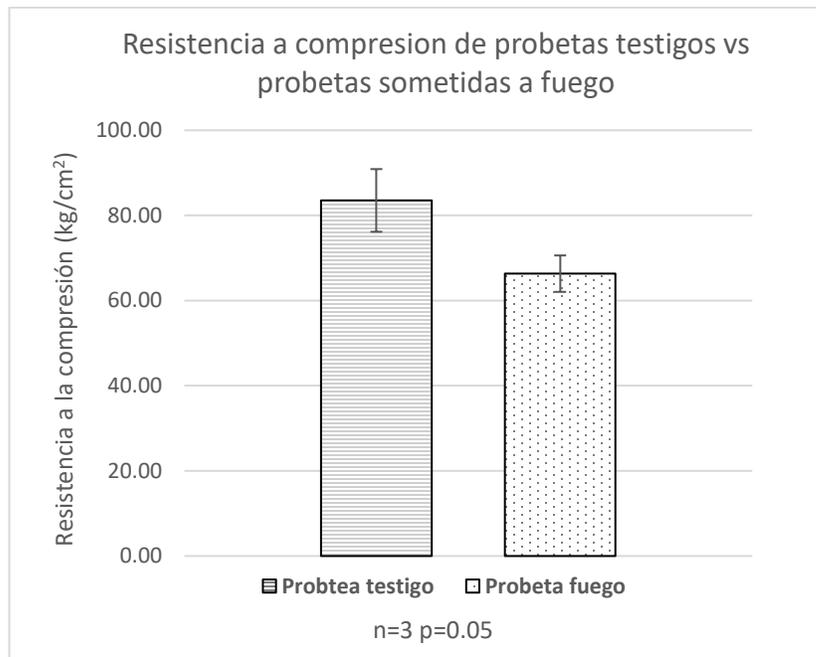
**Figura 5.22** *Ensayo a compresión de probetas testigo y sometidas a fuego*

El promedio de resistencia a la compresión de las probetas testigos fue de  $83.53 \text{ kg/cm}^2$  y para las probetas sometidas a fuego directo de la misma manera ensayadas a compresión es de  $66.33 \text{ kg/cm}^2$ , la resistencia a la compresión se redujo en promedio un 20.59% respecto a la probeta testigo, la Tabla 5.4 muestra respectivamente las resistencias máximas registradas para cada probeta.

**Tabla 5.4** *Resistencia a la compresión en  $\text{kg/cm}^2$  de probetas testigo y probetas sometidas a fuego*

Probeta	Resistencia a la compresión ( $\text{kg/cm}^2$ )		% de pérdida de resistencia
	Testigo	Sometida a fuego	
A	83.41	68.20	18.24
B	74.58	70.38	5.63
C	92.60	60.40	34.77

La figura 5.23 muestra el promedio de la resistencia a compresión de las probetas testigo y las probetas sometidas a fuego, la desviación estándar para el porcentaje de pérdida de la resistencia a la compresión es de 11.93.



**Figura 5.23** Comparativa de resistencia a compresión de probeta testigo vs probeta sometida a fuego  $n=3$ ,  $p=0.05$

Cabe destacar que las probetas que presentaron una mayor diferencia entre sus resistencias, son aquellas que pertenecían a una diferente mezcla de concreto, si bien es el mismo diseño de mezcla hay otros aspectos que pueden modificar la resistencia final de los elementos, como la no homogeneidad de la mezcla y la compactación del material.

Las principales fallas presentadas en el ensaye a compresión se muestran en las figuras 5.24, 5.25 y 5.26, el agrietamiento inicia en la parte central y posteriormente lateralmente dividiendo al muro en dos secciones que puede relacionarse a la posición de la malla electrosoldada.



a) Probeta testigo



b) Probeta sometida a fuego

**Figura 5.24** *Ensayo a compresión de especímenes "A"*



a) Probeta testigo



b) Probeta sometida a fuego

**Figura 5.25** *Ensayo a compresión de especímenes "B"*



a) Probeta testigo

b) Probeta sometida a fuego

**Figura 5.26** Ensayo a compresión de especímenes “C”

## 5.5 Resistencia al impacto para muros

Sobre la misma probeta se realizaron 7 golpes diferentes, en ninguno de ellos se presentó agrietamiento importante, en la Tabla 5.5 se muestra el desplazamiento registrado para cada uno de los golpes.

**Tabla 5.5** Desplazamientos registrados en prueba de impacto sobre el MPM

Golpe	Desplazamiento (mm)
1	4.91
2	7.27
3	8.61
4	9.15
5	9.09
6	9.53
7	9.74

Se observa que en los primeros 3 golpes el desplazamiento es menor y va en aumento hasta llegar al golpe número 4, a partir de los cuales el desplazamiento es parecido, para el último golpe el elemento ensayado aún conserva su integridad estructural (Figura 5.27). Cabe

mencionar que posterior a cada golpe la deformación que pudo ocurrir al momento de ser impactado el muro no fue permanente y este regresó a su posición original, esto se corroboró al regresar el vernier a su posición inicial y registrar un desplazamiento de cero.



**Figura 5.27** Prueba de impacto del MPM

Con un elemento que pesa 10.41 kg el muro presentó un desplazamiento inicial de 4 mm después de un primer golpe, se realizaron un total de 7 golpes a la probeta y no se presentó agrietamiento significativo, al continuar siendo impactado los últimos 4 golpes tienen una deflexión instantánea promedio de 9.38 mm, esta no sobrepasa la deflexión instantánea de 10 mm permitida por la normativa.

## 5.6 Resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicularmente al plano

El elemento es sometido a una carga perpendicular en el plano, se ensaya un elemento de 0.10 x 0.50 x 2.40 m, la probeta ensayada no debe sobrepasar una flecha de  $L/360$  esto equivale a 6.66 mm permitidos de deformación al centro geométrico del panel.

Al iniciar la prueba se muestra que ya existe una deformación inicial del elemento (Figura 5.28).



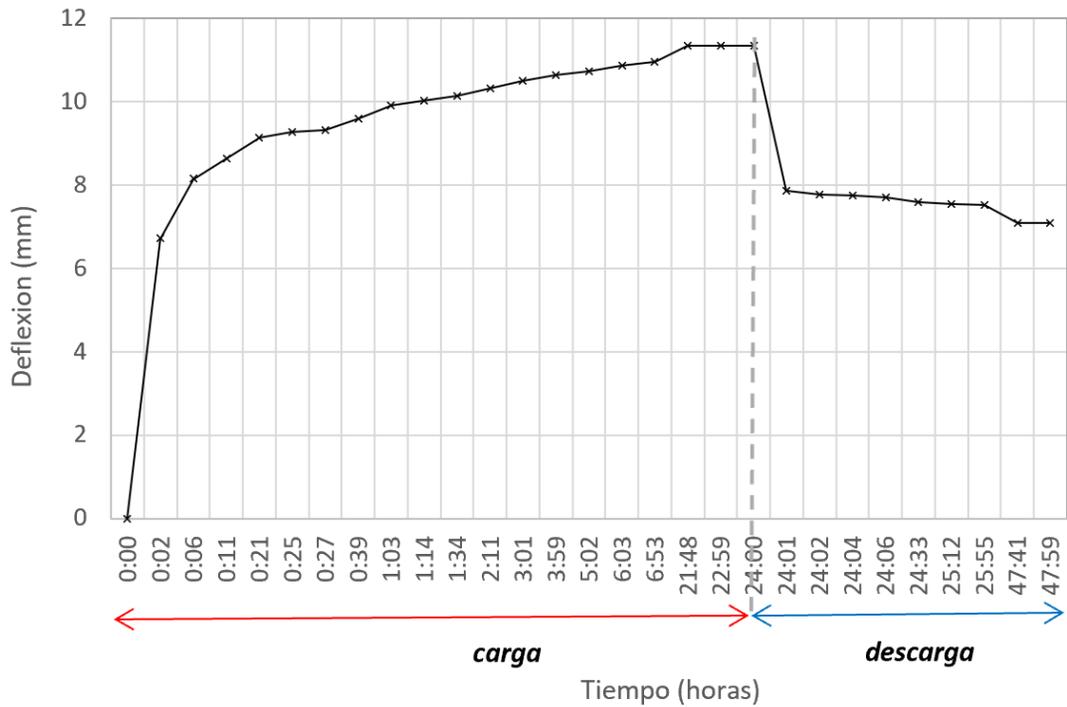
**Figura 5.28** Deformación inicial del elemento sometido a carga perpendicular al plano

Las deformaciones requeridas por la normativa son:

- Deformación inicial obtenida al final de la aplicación de la carga total
- Deformación obtenida después de 24 hrs con la aplicación de la carga total
- Deformación remanente obtenida, después de haber dejado transcurrir 24 hrs descargada la probeta

En la figura 5.29 se muestra el comportamiento de la deformación del MPM, al inicio el registro de las deformaciones se hace por periodos más cortos, mientras que al finalizar el tiempo de carga del elemento este alcanza una estabilidad lo que se registra como la

deformación máxima presentada, al retirar el peso del elemento este no se recupero totalmente de su deformación, el porcentaje que tiene de recuperación lo hace casi inmediatamente y a partir de ahí mantiene una estabilidad hasta conservar la deformación permanente.



**Figura 5.29** Grafica tiempo vs deformación del MPM sometido a carga perpendicular a su plano

En la Tabla 5.6 Se muestran las deformaciones obtenidas

**Tabla 5.6** Deformaciones del muro panel modular sometido a carga perpendicular al plano

ESTADO	DEFORMACIÓN (mm)
Probeta cargada inicialmente	4.236
Probeta carda después de 24 hr	11.323
Probeta descargada después de 24 hr	7.091

La deformación máxima se alcanza después de 24 hrs de que el elemento es cargado teniendo una deflexión máxima de 11.323 mm esto es un 70% mayor que la esperada, posteriormente se descarga y transcurridas 24 hrs la deflexión se reduce a 7.091 mm, tiene la capacidad de recuperar su forma en un 37.37%, ambas deformaciones presentadas son mayores que la deformación permitida por la normativa que respecto a la longitud del elemento es de 6.66 mm.

La deformación final se muestra en la Figura 5.30, se hace más evidente al tomar como referencia un hilo tensado sobre las bases donde apoya el elemento.



**Figura 5.30** *Deflexión perpendicular al plano del MPM*

El trabajo de realizar cada una de las pruebas es un proceso arduo que requiere el ingenio y planeación en cada una de ellas, lo ideal es ensayar por lo menos la cantidad de probetas señaladas por la normativa, sin embargo, aquí se ha realizado un ensayo correspondiente a cada una de las pruebas solicitadas en la NMC-405-ONNCCE-2014, la tabla 5.7 resume las pruebas realizadas aprobadas y no aprobadas por el muro panel modular.

**Tabla 5.7** Resumen de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas

Tipo de prueba	Resultado obtenido	Resultado mínimo por normativa	Condición de prueba
<b>Resistencia a la compresión simple</b>	7.05 kg/cm <sup>2</sup>	5 kg/cm <sup>2</sup>	APROBADA
<b>Resistencia bajo carga lateral en el plano del muro</b>	1.65 ton	1 kg/cm <sup>2</sup> o 1.5 ton por cada metro de longitud del muro (2.25 ton)	NO APROBADA
<b>Resistencia al fuego</b>	Posterior a 1 hr no se produce flama o gases, presenta una reducción en la resistencia a la compresión de 20.59% respecto a la probeta testigo	1 hr sometido a fuego sin producir flama o gases, reducción a la compresión menor del 30% respecto a una probeta testigo	APROBADA
<b>Resistencia al impacto</b>	9.39 mm de deflexión instantánea	10 mm de deflexión máxima instantánea	APROBADA
<b>Resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicularmente al plano</b>	7.091 mm	Flecha menor a L/360 (6.66 mm)	NO APROBADA

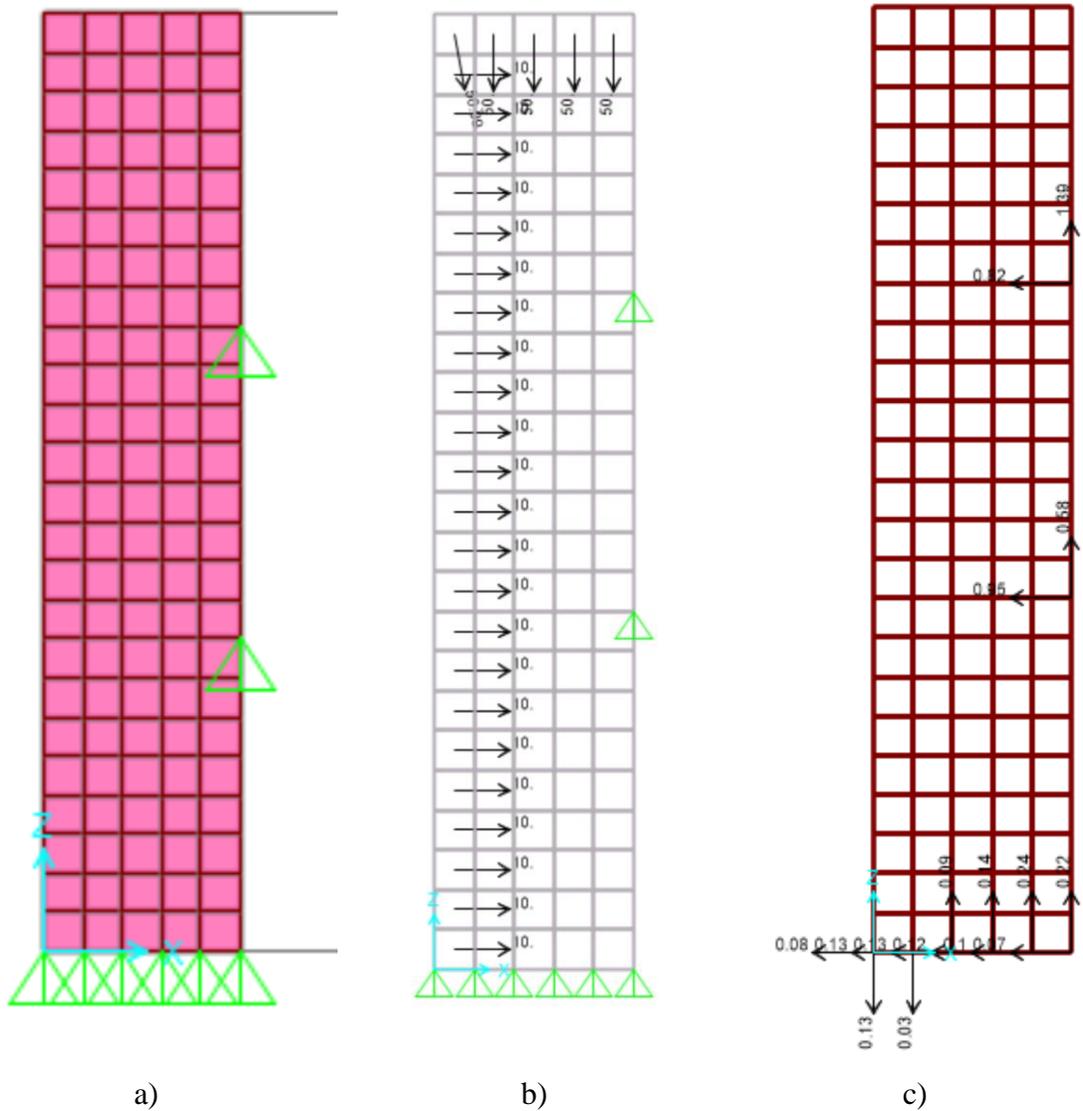
## 5.7 Modelación en software SAP2000

El modelo se compone de nodos, elementos, propiedades del material y condiciones de contorno para representar el sistema físico (ANSYS, 2022), en este trabajo únicamente se representa el comportamiento del sistema bajo una carga de compresión y carga lateral.

Se utilizó el programa SAP2000 que como ya se describió anteriormente fue utilizado para calcular el valor de las reacciones en las conexiones del elemento y determinar la longitud de soldadura, este modelo se hace como un elemento tipo Shell, en la figura 5.31 se muestran detalles de este análisis.

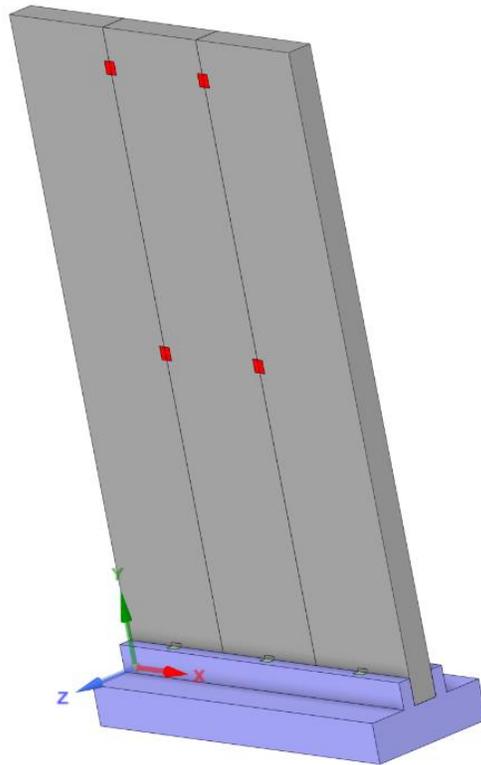
Las cargas con las que es modelado el panel son:

- Carga a compresión con un valor de 5 kg/cm<sup>2</sup>
- Carga lateral con valor de 1 kg/cm<sup>2</sup>

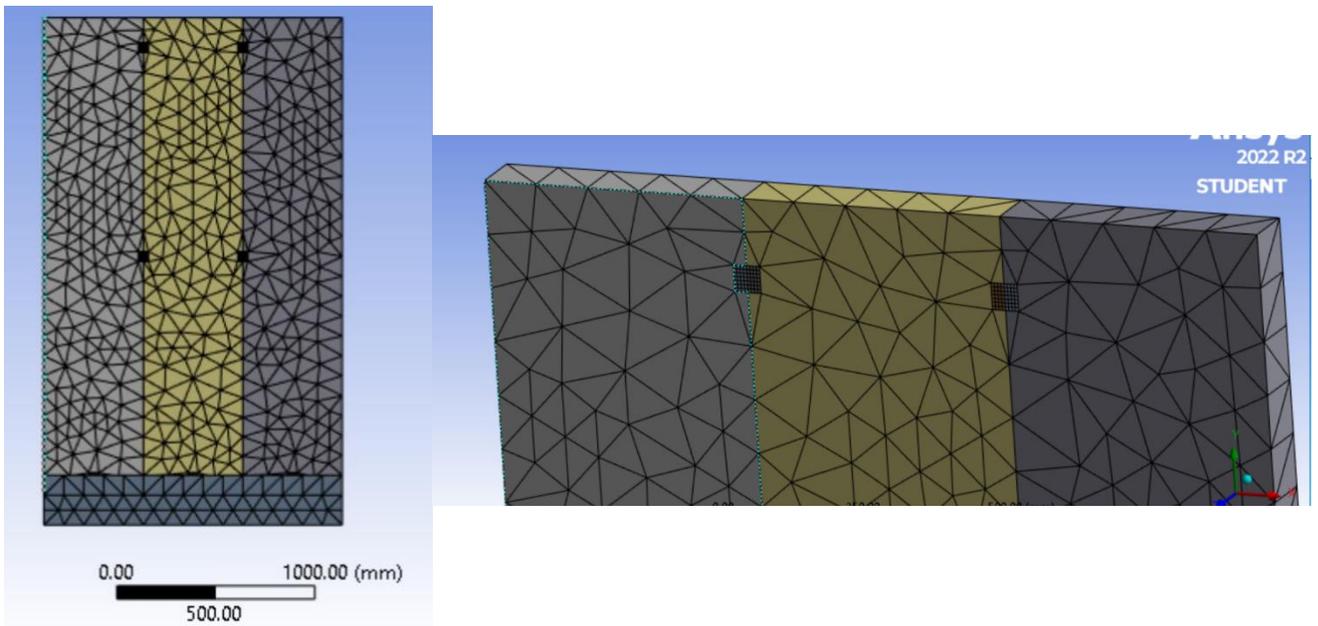


**Figura 5.31** Modelado de un muro panel modular en el programa Sap200.  
a) Condiciones iniciales de estudio b) Acciones sobre el elemento c) Reacciones de diseño obtenidas

Con la versión de ANSYS Workbench se trabajó una versión de análisis por elementos finitos más detallado de la prueba a carga lateral, en la Figura 5.32 se muestra la geometría para el análisis, que incluye las características el panel, conexiones y cimentación, en la Figura 5.33 se muestra el mallado utilizado que por tener una licencia de estudiante el análisis debe limitarse a 128 mil nodos.



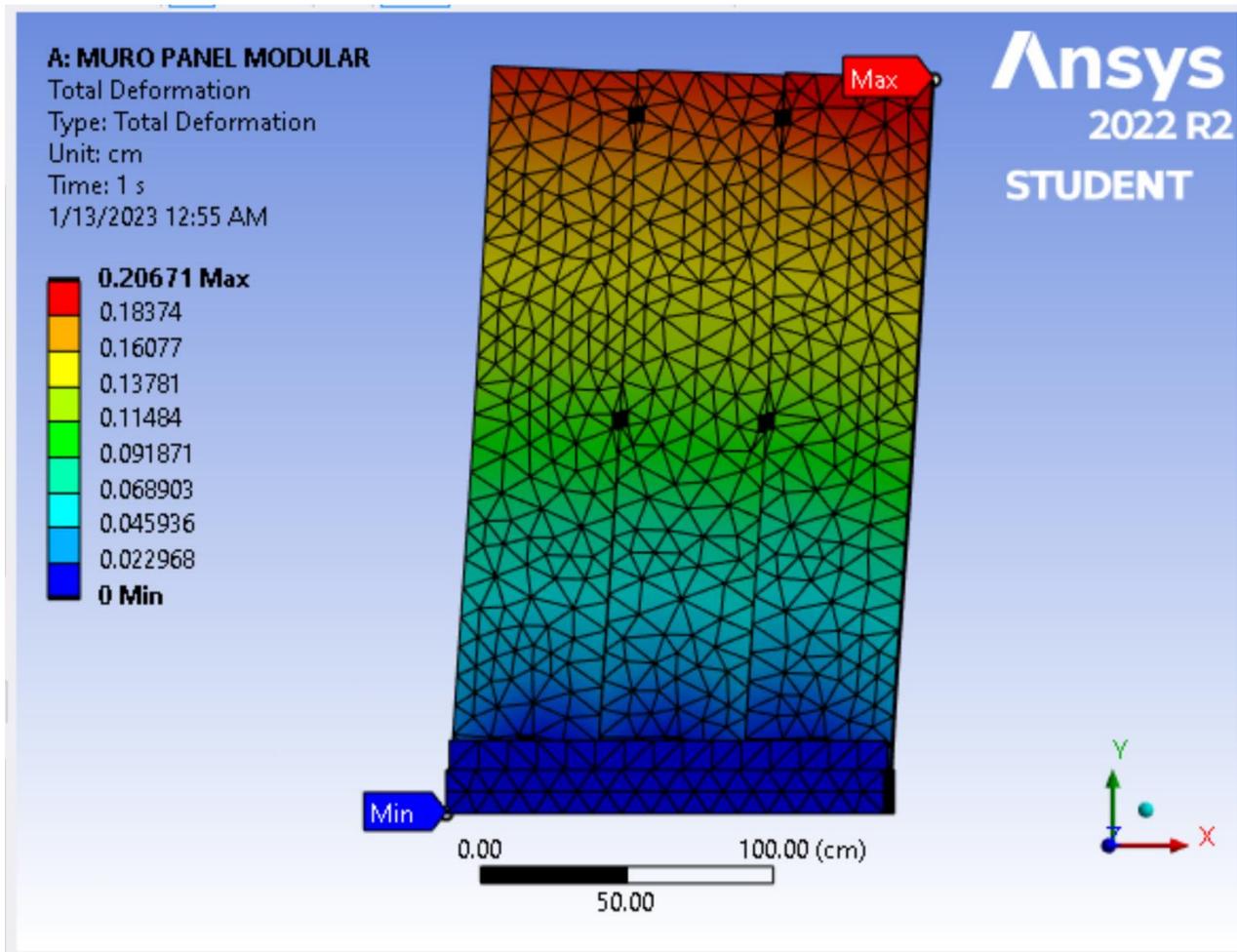
**Figura 5.32** Geometría de diseño de ANSYS Workbench



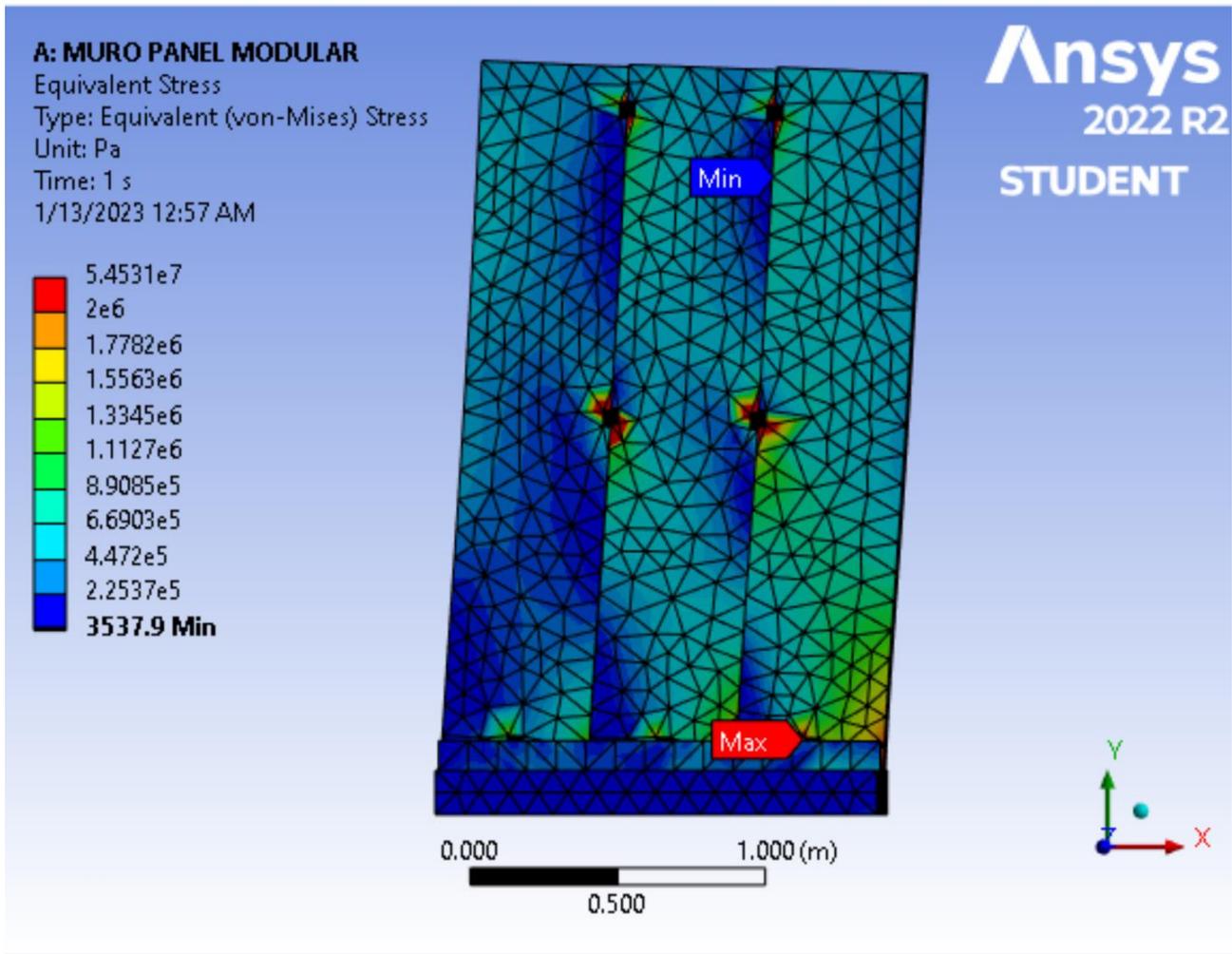
**Figura 5.33** Mallado utilizado en el análisis por elementos finitos

El modelo aún no se considera que puede ser predictivo del comportamiento de los elementos, puesto que esto es una idealización de la forma en que se aplican en realidad las cargas y de la construcción de los elementos, sin embargo, si sugiere un comportamiento aproximado de los elementos.

La Figura 5.34 muestra la deformación esperada bajo la acción de una carga lateral y los esfuerzos principales del muro panel modular se muestran en la Figura 5.35.



**Figura 5.34** Deformación total esperada para el sistema de muros panel modular



**Figura 5.35** Esfuerzos esperados para el sistema de muros panel modular

## 5.8 Muros de mampostería

Uno de los sistemas tradicionales de construcción de muros para las viviendas en México es a base de mampostería, para la cual se han desarrollado investigaciones para mejorar sus propiedades mecánicas y desempeño estructural, un ejemplo en la Universidad Autónoma de Querétaro es el trabajo de Roger Ulises Hernández Zamora (2013) que desarrollo el tema “Comportamiento de muros de mampostería de block hueco sujeto a cargas laterales, reforzado con varillas de fibra de vidrio en las juntas de los morteros” en su trabajo ha realizado las pruebas para conocer las propiedades de la mampostería elaborada con block

huevo de concreto, sus propiedades fueron determinadas con las especificaciones de la NMX-C-464-ONNCCE y estas propiedades se muestran en la Tabla 5.8 junto con los resultados obtenidos para los elementos elaborados con concreto ligero:

**Tabla 5.8** *propiedades de la mampostería vs propiedades del concreto ligero del MPM*

<b>Elemento</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Mampostería block hueco (Hernández Zamora, 2013)</b>	<b>Muro panel modular</b>
pieza	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	78.29	127.46
pila	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	57.60	114.32
	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	59,669.2	51,401.56
Murete	Resistencia a tensión diagonal (kg/cm <sup>2</sup> )	6.46	23.65
	Modulo cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	12,737.83	26,504.39

Los elementos elaborados con el concreto ligero presentan un mejor desempeño frente a las propiedades de la mampostería de block hueco, una desventaja del sistema de mampostería confinada es que presenta mayor desperdicio de material, debido a las características artesanales propias del sistema constructivo (Julián et al., 2015), por el contrario lo que sucede con los sistemas industrializados, la mano de obra tiene un esquema de producción que genera mayor eficiencia, lo que se traduce en reducción de tiempos de trabajo, reducción de desperdicios y tiempos muertos y, al mismo tiempo reducción de costos.

# CAPÍTULO 6

## 6. CONCLUSIONES

El sistema de construcción de muro panel modular no se puede clasificar como un panel Tipo I (para uso en muros) de tipo estructural de acuerdo a la NMX-C-405-ONNCCE-2014 “Paneles para uso estructural aplicados en sistemas constructivos – especificaciones y métodos de ensayo”, debido a que en el estricto sentido este sistema no aprueba los 5 ensayos solicitados por la norma, sin embargo, es un sistema que por sus características puede elaborarse con un proceso industrializado que cuide la calidad de los materiales y su construcción, con lo cual se podría realizar una cantidad mayor de ensayos por cada una de las pruebas.

El muro ensayado puede utilizarse en viviendas de tipo de interés social, si bien no fue catalogado como tipo estructural al no pasar el total de las 5 pruebas, este elemento es más que un muro divisorio, puesto que su resistencia estructural es mayor que las que presentan los materiales de construcción comunes para muros divisorios, se propone sea utilizado para viviendas con 2.30 m de altura en muros y en las que solo se cuente con un nivel de construcción, el elemento también se puede utilizar como un muro colindante en la división de terrenos

Respecto a las pruebas que se realizaron al MPM se detallan aspectos importantes de realizar las pruebas, recomendaciones de ejecución y conclusiones obtenidas:

### **Resistencia a la compresión simple**

- Construcción de un marco suficientemente rígido que soporte la carga aplicada en compresión al elemento de ensaye y de esta manera la deformación no es contraria a su sentido de aplicación.
- Asegurar las dimensiones y regularidad de cada elemento elaborado con la mezcla de concreto ligero para mantener la perpendicularidad de aplicación de la carga sobre el

muro, esto incluye mantener nivelada la cimentación y una superficie plana para recibir los paneles, el perfil de distribución de carga debe encontrarse nivelado y centrado al área donde se aplica la carga.

- Aplicar la carga de compresión con el uso de otro dispositivo como gato hidráulico con un sistema de bombeo controlado, con el fin de mantener una carga constante y no dependiente del esfuerzo humano, esto porque el gato utilizado presentaba una caída de la presión ejercida al momento de no ser constante con la carga.
- Uso de deformímetros con margen amplio de medición para registrar el desplazamiento lateral al ocurrir el pandeo lateral puesto que no se puede definir la dirección de la deformación.
- El diseño de la cimentación tubo una buena respuesta, esta no presento falla debido a la carga de compresión, pues esta debe ser elaborada con un concreto de resistencia y peso volumétrico característicos de un concreto normal.

### **Resistencia al fuego**

- Cuidar la homogeneidad de los materiales al mezclarlos en la elaboración del concreto ligero, con la finalidad de que las probetas elaboradas tengan la misma resistencia a la compresión esperada.
- Colocar el termopar entre el fuego directo y la probeta para registrar la temperatura real a la que está siendo sometido el elemento.
- Utilizar otro mecanismo para la producción del fuego directo puesto que el utilizado en la prueba no consiguió alcanzar la temperatura señalada por la normativa.

### **Resistencia al impacto en muros**

- En esta prueba el elemento para golpear la probeta se elaboró con arena, sin embargo, este presentó una compactación del material a medida que aumentaron los golpes,

como lo señala la prueba se recomienda usar los balines de acero o en su defecto un material similar pero suficientemente rígido.

- La construcción de un sistema que permita colocar al panel a una distancia que permita la observación de ambas caras de la probeta, además que tener una mayor distancia permite la colocación de otros dispositivos de medición colocados al centro geométrico.
- Probar la probeta completa para observar el comportamiento de las conexiones.
- Realizar el impacto con un elemento de mayor peso.

**Resistencia a carga uniformemente repartida actuando perpendicularmente al plano:**

- Realizar la prueba sobre el panel antes de que este alcance una deformación por su propio peso.
- Considerar que se solicita el uso de un marco rígido para el elemento, dependiendo del material con que este hecho puede aportar mayor rigidez a la probeta y no registrar la deflexión real del elemento.

La forma y diseño del muro de reacción es adecuado para poder crear sistemas y propuestas para realizar las pruebas sin embargo este no cuenta con grúa viajera lo que podría facilitar el maniobrar diferentes elementos en el muro de reacción, así como que no cuenta con un acceso a la altura del muro lo que complica la maniobra de subir los elementos, si se tuviera un marco rígido capaz de colocarse en diferentes posiciones permitiría también desarrollar de mejor manera las pruebas.

En cuanto a los paneles se requiere una mayor precisión y detalle en su construcción, para facilitar las nivelación y colocación de los elementos.

**Consideraciones para el sistema de muro panel modular**

La elaboración de cada panel y la realización de las pruebas permiten tener una idea más coherente sobre el sistema constructivo propuesto en este trabajo para presentar las ventajas y las oportunidades de mejorar y hacer más eficiente el proceso constructivo.

Las dimensiones de cada elemento permiten que puedan maniobrase fácilmente y almacenarse, sus 50 cm de ancho permiten que se sujetar fácilmente con las manos, sin embargo, estas dimensiones continúan haciendo que el panel sea pesado por lo que aún es necesario la ayuda de más de 3 personas para cargarlo totalmente, cuando se hace uso de patines y poleas la tarea maniobrarlos a pie de obra se facilita.

En cuanto a las conexiones estas resultan eficientes, su longitud puede parecer poca pero es suficiente para mantener unidos los elementos y resistir las cargas siempre y cuando se tenga especial cuidado en su colocación para que coincidan al ser unidas con otro panel, además como es una conexión soldada considerar que se debe formar un circuito cerrado para realizar la acción de soldar, esto es fácil de conseguir con la malla electrosoldada del panel asegurando que las placas toquen dicha malla.

En este trabajo se idealizo un sistema de cimentación que permitiera realizar las pruebas, queda abierta la posibilidad de estudiar un caso de cimentación que mejor se acomode al sistema de paneles modulares.

Para el desarrollo de los elementos se utilizó madera como cimbra, pero elaborar un molde de acero con la suficiente rigidez y precisión en sus dimensiones permite que los elementos tengan un mejor acabado, sean más regulares en sus dimensiones y armado y se puedan elaborar en mayor cantidad, como los muros tilt up, la ventaja es que su armado y colado de hace de forma horizontal lo que facilita los trabajos

En cuanto al diseño de la mezcla de concreto ligero, la resistencia objetivo fue fijada en 125 kg/cm<sup>2</sup> porque se consideró como un mortero del Tipo 1, sin embargo, se deja a consideración la posibilidad de tener una resistencia menor puesto que su principal falla con una carga de compresión es el pandeo lateral. El diseño de la mezcla puede ser mejorado al utilizar un cemento de alta resistencia como el que es utilizado en las concreteeras, industrializar el proceso de mezclar los materiales también permite tener una mayor homogeneidad de los materiales y elaborar una mayor cantidad de elementos por día.

Se logra obtener un concreto con un peso volumétrico de 1409.16 kg/m<sup>3</sup> esto representa un 35.94% de reducción de peso frente a un concreto normal, al alcanzar su resistencia los

elementos son suficientemente rígido para maniobrase y poder realizar instalaciones sobre el elemento, tiene la opción de poder dar un acabado pulido, especial o rugoso para posteriormente colar un mortero de recubrimiento.

## **TRABAJOS FUTUROS**

Se espera que este trabajo ayude a seguir con líneas de investigación para atender las necesidades y problemáticas de construcción e incluso mantenimiento de viviendas, para crear procesos constructivos que sean industrializados y que cuiden la calidad de su ejecución.

Los trabajos futuros que podrían ayudar a completar este trabajo son:

- Elaboración de concreto ligero de mayor resistencia con el uso de cemento de alta resistencia y el uso de aditivos.
- Estudio particular de las conexiones propuesta para el sistema de muros panel modular aquí propuesto, mejorando el tipo de conexión.
- Diseño y análisis de la cimentación del muro panel modular.
- Análisis del comportamiento de una vivienda usando el sistema de muro panel modular y el sistema de losa tridimensional modular o losa modular de arco, que son sistemas que se han desarrollado dentro de la UAQ.
- Análisis de la normativa para poder clasificar los sistemas de paneles como estructurales.
- Análisis termo-acústico de una vivienda elaborada en su totalidad con sistemas constructivos modulares.
- Análisis de costos de la construcción de una vivienda con sistemas constructivos modulares.
- Enfatizar en la realización de alguna de las pruebas señaladas por la normativa, para poder realizar un mayor número de pruebas y tener un análisis estadístico que pueda respaldar los resultados obtenidos en la prueba.

# CAPÍTULO 7

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- 3 Tipos de Fachadas Prefabricadas, Ventilada y Pesada - Diseño Vip. (n.d.). Retrieved April 24, 2023, from <https://xn--diseo-rta.vip/fachadas-ventiladas-prefabricadas/>
- Aislamientos Acústicos. (2019, June 20). *Paneles Estructurales Aislantes SIP ¡Lo Que Necesitas Saber!* <https://aislamientosacusticos.org/paneles-estructurales-aislantes-sip/>
- AISLENVAS. (2019). *Sistemas de enconfrados, estructuras, muros y forjados para la construcción en EPS.*
- ANSYS. (2022). *What Is Model Generation?* [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v222/en/ans\\_mod/Hlp\\_G\\_MOD1\\_1.html](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v222/en/ans_mod/Hlp_G_MOD1_1.html)
- Campos Vasquez, M. del C. (2008). Evaluación técnica económica de la construcción en PVC Sistema RBS. In *Universidad Ricardo Palma.* <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/144>
- CEMEX. (2022). *Sistemas de construcción de muros.* [www.cemex.com](http://www.cemex.com)
- Chan Yam, J. L., Solís Carcaño, R., & Iván Moreno, E. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 7(2), 39–46.
- CLIMABLOCK - Pontarolo Engineering. (n.d.). Retrieved April 24, 2023, from <https://pontarolo.com/prodotti/sistema-pontarolo-eps/climablock/>
- CONAHCYT. (2022). *Vivienda – CONAHCYT.* Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y tecnologías. <https://CONAHCYT.mx/pronaces/pronaces-vivienda/>
- CONEVAL. (2018). Estudio Diagnóstico del Derecho a la Vivienda Digna y Decorosa 2018. *Consejo Nacional de Evaluación de La Política de Desarrollo Social.* <https://www.coneval.org.mx/quienessomos/InvestigadoresAcademicos/>
- Criterios para el modelado con Elementos Finitos utilizando SAP2000.* (n.d.). Retrieved April 24, 2023, from <https://www.youtube.com/watch?v=XVCIR2FTT2s&t=1736s>
- Drywall - Home Solution.* (n.d.). Retrieved April 24, 2023, from <https://homesolution.net/blog/drywall-que-es-ventajas-y-desventajas/>
- El Tilt-Up y las edificaciones industriales - 360 EN CONCRETO.* (n.d.). Retrieved April 24, 2023, from <https://360enconcreto.com/blog/detalle/tilt-up-y-las-edificaciones-industriales/>
- Flores, C. M., Guzmán Gileta, J. M., Navarro Arellano, J. F., & García Solórzano, L. A. (2020). Comportamiento térmico en mezclas de cal hidratada, ceniza y roca volcánica (pidra pómez), en sustitución del cemento port-land. *Revista Ingeniantes*, 55–60.

- Franco Bucio Mújica, A. M. (n.d.). *Comisión Nacional de Vivienda*.
- Gere, J. M., Goodno, B. J., & Rosales, L. P. (2016). *Mecánica de materiales*. Cengage Learning.
- Hernández Zamora, R. U. (2013). *Comportamiento de muros de mampostería de block hueco sujeto a cargas laterales, reforzado con varillas de fibra de vidrio en las juntas de los morteros* [Universidad Autónoma de Querétaro]. <http://ring.uaq.mx/bitstream/123456789/631/1/RI000633.pdf>
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2000). *Introducción al Sistema TiltUp. Construcción y Tecnología*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Presentación de resultados Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI) 2020*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020 Resultados complementarios*.
- Jáuregui, V. G. (2009). Habidite: viviendas modulares industrializadas. *Informes de La Construcción*, 61, 33–46. <https://doi.org/10.3989/ic.08.035>
- Julián, C., Alcocer, S. M., & William, A. (2013). Propiedades mecánicas del concreto para viviendas de bajo costo. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 14, 285–298.
- Kamali, M., & Hewage, K. (2016). Life cycle performance of modular buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301411>
- López Flores, L. E. (2019). *Diseño de sistema de muros modulares, con facultad de realización y desmontaje para una vivienda replicable de estructura de acero*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- McCormac, J. C. (2012). *Diseño de estructuras de acero*. Marcombo.
- Meprosa Construcciones. (2022, October 25). *Fundamentos de la construcción Tilt-Up*. <https://meprosaconstrucciones.mx/fundamentos-de-la-construccion-tilt-up/>
- Molde total*. (n.d.). Retrieved April 24, 2023, from <https://www.meccano.mx/molde-total>
- Nave Industrial con Prefabricados de Concreto - Viprocosa*. (n.d.). Retrieved April 24, 2023, from <http://www.viprocosa.com/news/inauguran-nave-industrial-con-prefabricados-de-concreto/>
- Obando Velásquez, J. N., & Pachacama Morocho, R. E. (2018). *DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO POR ROCA VOLCÁNICA Y CONCRETO COMO MATERIAL ALTERNATIVO DE CONSTRUCCIÓN QUE PERMITA MEJORAR LOS NIVELES DE CONFORT INTERNO EN VIVIENDAS LOCALIZADAS EN CLIMAS FRÍOS*.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *NMX-C-405-ONNCCE-2014*.

- Panjehpour, M., Ali, A. A. A., & Voo, Y. L. (2013). Structural Insulated Panels: Past, Present, and Future. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 3(1), 2–8. <https://doi.org/10.32738/JEPPM.201301.0002>
- Real Academia Española. (n.d.). *Definición panel*. 2022. Retrieved October 24, 2022, from <https://dle.rae.es/panel>
- SAP2000. (2017). *Csi Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAF and CsiBridge*.
- Saura Arnau, H. (2015). *OPTIMIZACIÓN DE LOSAS ALVEOLARES PRETENSADAS EN SITUACIÓN ACCIDENTAL DE INCENDIO*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2021). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2020*. <https://www.gob.mx/sgm>
- Silva, O. J. (2021, December 7). *El tilt-Up y las edificaciones Industriales*. <https://360enconcreto.com/blog/detalle/tilt-up-y-las-edificaciones-industriales/>
- Specification for Structural Steel Buildings*. (2016).
- Structural Insulated Panels - BUILDERS*. (n.d.). Retrieved April 24, 2023, from <https://www.cascadetimberframes.com/sip-panels>
- Tejada Parra, G., & Lara Enríquez, B. E. (2014). *Déficit de vivienda y satisfacción residencial*. <https://doi.org/10.22198/rys.2018.71.a811>
- Valdez Guzmán, L. F., & Suarez Alcivar, G. E. (2010). *Hormigones Livianos*. Escuela Superior Politecnica del Litoral.
- Valencia Jiménez, E. (2020). *Análisis del comportamiento mecánico a compresión de paneles prefabricados (Tipo I) de ferrocemento*. <http://ring.uaq.mx/bitstream/123456789/2359/1/IGMAC-230906-0920-121-Emmanuel%20Valencia%20Jim%c3%a9nez%20%20-A.pdf>
- VIPROCOSA. (2021, December 7). *Placa Alveolar*. <http://www.viprocosa.com/sistema/uploads/3.Placa%20Alveolar.pdf>
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. C. (1994). *El método de los elementos finitos* (4th ed., Vol. 1, Issue Formulación básica y problemas lineales). McGraw-Hill.