

Ing. Emmanuel Obed  
Justo García

Comportamiento mecánico de muros  
hechos con block open-end

2023



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

**“COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MUROS HECHOS  
CON BLOCK OPEN-END”**

Tesis

Que como parte de los requisitos para  
obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

---

Presenta:

Ing. Emmanuel Obed Justo García

---

Dirigido por:

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

---

Querétaro, Qro., octubre de 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Comportamiento mecánico de muros hechos con  
block open-end

**por**

Emmanuel Obed Justo Garcia

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

**Clave RI:** IGMAC-309249



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Comportamiento mecánico de muros hechos con  
block open-end

Tesis

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

Presenta:

Ing. Emmanuel Obed Justo García

Dirigido por:

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno  
Presidente

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández  
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
Vocal

Dr. Enrique Rico García  
Suplente

M. en C. Iván Fermín Arjona Catzim  
Suplente

## RESUMEN

Este trabajo se centra en la evaluación de la capacidad a cortante del block tipo open-end, cuya característica distintiva es que tiene un extremo abierto. Este tipo de bloque es utilizado en la construcción de muros y se caracteriza por su fácil colocación en obra, lo cual reduce costos. Asimismo, al tener un extremo abierto, podría tener una mayor adherencia que el block hueco tradicional, con lo cual su resistencia a cortante aumentaría. Para verificar esto se llevaron a cabo pruebas experimentales tanto al block hueco tradicional como al prototipo open-end. Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales indican que el block open-end tiene un 15% más de resistencia a la compresión diagonal que el block hueco tradicional. Esto tiene importantes implicaciones en la construcción de muros, ya que podría permitir reducir la cantidad de acero de refuerzo necesaria para garantizar la seguridad estructural de los mismos, lo que se traduciría en una construcción más eficiente y económica. Además, la utilización del block tipo open-end podría mejorar la calidad de las viviendas, al brindar una mayor seguridad y resistencia. Los resultados obtenidos sugieren que el uso del block tipo open-end podría ser una opción eficiente y segura para la construcción de muros.

**(Palabras clave:** mampostería, block, cortante)

## SUMMARY

This work focuses on the evaluation of the shear capacity of the open-end type block, whose distinctive characteristic is that it has an open end. This type of block is used in the construction of walls and is characterized by its easy placement on site, which reduces costs. Likewise, by having an open end, it could have greater adhesion than the traditional hollow block, which would increase its shear resistance. To verify this, experimental tests were carried out on both the traditional hollow block and the open-end prototype. The results obtained in the experimental tests indicate that the open-end block has 15% more resistance to diagonal compression than the traditional hollow block. This has important implications in the construction of walls, since it could reduce the amount of reinforcing steel necessary to guarantee their structural safety, which would result in more efficient and economical construction. In addition, the use of the open-end block could improve the quality of the homes, by providing greater security and resistance. The results obtained suggest that the use of open-end block could be an efficient and safe option for the construction of walls.

**(Key words:** masonry, block, shear)

## Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre María Antonia García Arroyo y mi tío Salomón García Arroyo, quienes han sido mi mayor apoyo en todo momento y ha sido un ejemplo de perseverancia y dedicación. Gracias por siempre creer en mí, por motivarme a seguir adelante y por ser mi inspiración en todo lo que hago. Este logro no hubiera sido posible sin su amor incondicional y su apoyo inquebrantable. Los amo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, por mi formación como maestro en ciencias.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por la beca que se me otorgó durante mis estudios de maestría.

A mi director de tesis el Dr. Luis Francisco Pérez Moreno, por su constante guía en el transcurso de mi maestría, así como por sus comentarios los cuales ayudaron a mejorar este texto.

A mis compañeros de maestría Jonathan Francisco Gutiérrez Guzmán, Ricardo Méndez de la Luz Ahumada, María Fernanda Guerrero Urbina, Paola Liliana Sánchez López, Adair Parraguirre Gancedo y Daniel Sepúlveda Madrigal, por el apoyo y las experiencias vividas durante la maestría.

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>iii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1.    Justificación .....	2
1.2.    Descripción del problema .....	3
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	<b>4</b>
2.1.    Definición e historia .....	4
2.1.1.    Mesoamérica .....	4
2.1.2.    Avances romanos .....	7
2.1.3.    Mampostería en la actualidad .....	8
2.2.    Materiales .....	9
2.2.1.    Piezas naturales .....	9
2.1.2.    Piezas artificiales .....	10
2.1.3.    Morteros .....	13
2.1.4.    Aceros de refuerzo .....	14
2.1.5.    Concreto .....	15
2.3.    Tipos de muros .....	16
2.3.1.    Muros diafragma.....	16
2.3.2.    Muros confinados .....	17
2.3.3.    Muros reforzados interiormente .....	17
2.4.    Comportamiento mecánico de la mampostería .....	18
2.5.    Normativa .....	25
2.5.1.    Piezas .....	25
2.5.2.    Mortero .....	26
2.5.3.    Compresión diagonal.....	27
2.6.    Costos y rendimientos .....	29
2.7.    Método de elementos finitos .....	30
<b>III. HIPOTESIS Y OBJETIVOS</b> .....	<b>31</b>
3.1.    Hipótesis .....	31
3.2.    Objetivo general .....	31

3.3. Objetivos específicos.....	31
<b>IV. METODOLOGÍA .....</b>	<b>32</b>
4.1. Determinación de la resistencia a compresión diagonal de la mampostería.....	33
4.1.1. Resistencia a la compresión de las piezas de mampostería .....	33
4.1.2. Resistencia a la compresión del mortero .....	34
4.1.3. Resistencia a la compresión diagonal de los muretes .....	35
4.2. Determinación del nivel de contribución del área de contacto en la resistencia de la mampostería.....	39
4.3. Desarrollo de una herramienta comparativa mediante un modelo analítico.....	39
4.3.1. Obtención de espesor equivalente.....	39
4.3.2. Modelación de placa.....	40
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>41</b>
5.1. Determinación de la resistencia a compresión diagonal de la mampostería.....	41
5.1.1. Resistencia a la compresión de las piezas de mampostería .....	41
5.1.2. Resistencia a la compresión del mortero .....	43
5.1.3. Resistencia a la compresión diagonal de los muretes .....	45
5.2. Determinación del nivel de contribución del área de contacto en la resistencia de la mampostería.....	47
5.3. Desarrollo de una herramienta comparativa mediante un modelo analítico.....	56
<b>VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>58</b>
<b>VII. REFERENCIAS .....</b>	<b>59</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Block tipo open-end. ....	1
Figura 2. Piezas de mampostería. ....	4
Figura 3. Templo de Quetzal-Mariposa.....	6
Figura 4. Templo de Quetzalcóatl. ....	6
Figura 5. Coliseo romano. ....	7
Figura 6. Acueducto a base de arcos en Querétaro. ....	8
Figura 7. Mampostería reforzada interiormente.....	9
Figura 8. Mampostería de primera.....	10
Figura 9. Mampostería de segunda. ....	10
Figura 10. Mampostería de tercera.....	10
Figura 11. Piezas artificiales de mampostería. ....	11
Figura 12. Mecánica de la adherencia entre piezas y mortero. ....	13
Figura 13. Muro diafragma. ....	16
Figura 14. Muros confinados.....	17
Figura 15. Muro reforzado interiormente.....	17
Figura 16. Ensaye de compresión diagonal.....	20
Figura 17. Falla por tensión diagonal, atraviesa bloques y juntas.....	22
Figura 18. Falla por cortante, asociada a la adherencia.....	23
Figura 19. Falla combinada, por cortante y por tensión.....	24
Figura 20. Falla por aplastamiento en las esquinas. ....	24
Figura 21. Prueba de resistencia a la compresión en piezas de mampostería. ....	25
Figura 22. Especímenes de mortero.....	27

Figura 23. Diagrama de flujo de la metodología. ....	32
Figura 24. Máquina universal. ....	33
Figura 25. Block hueco para experimentación. ....	34
Figura 26. Ensaye de compresión en piezas de mampostería. ....	34
Figura 27. Especímenes de mortero. ....	35
Figura 28. Prueba a espécimen de mortero. ....	35
Figura 29. Piezas huecas con un extremo recortado. ....	36
Figura 30. Adherencia por juntas en block hueco tradicional. ....	36
Figura 31. Adherencia en toda la cara del block open-end. ....	36
Figura 32. Murete testigo fabricado con block hueco tradicional. ....	37
Figura 33. Murete fabricado con block hueco open-end. ....	37
Figura 34. Muretes de mampostería. ....	37
Figura 35. Colocación de micrómetros en las diagonales de los muretes. ....	38
Figura 36. Preparación de murete para ensaye en la máquina universal. ....	38
Figura 37. Ensaye de compresión diagonal en murete de mampostería. ....	38
Figura 38. Murete equivalente para modelación. ....	40
Figura 39. Murete mallado con elemento plane 182. ....	41
Figura 40. Desviación estándar para la experimentación 1 (Tabla 8). ....	42
Figura 41. Desviación estándar para la experimentación 2 (Tabla 8). ....	43
Figura 42. Desviación estándar de pruebas en mortero a 7 días, experimentación 1. ....	44
Figura 43. Desviación estándar de pruebas en mortero a 7 días, experimentación 2. ....	44
Figura 44. Desviación estándar de pruebas en mortero a 14 días, experimentación 1. ....	44
Figura 45. Desviación estándar de pruebas en mortero a 14 días, experimentación 2. ....	44

Figura 46. Desviación estándar de pruebas en mortero a 28 días, experimentación 1. ....	44
Figura 47. Desviación estándar de pruebas en mortero a 28 días, experimentación 2. ....	44
Figura 48. Desviación estándar de pruebas en muretes hechos con block tradicional, experimentación 1. ....	45
Figura 49. Desviación estándar de pruebas en muretes hechos con block open-end, experimentación 1. ....	45
Figura 50. Desviación estándar de pruebas en muretes hechos con block tradicional, experimentación 2. ....	45
Figura 51. Desviación estándar de pruebas en muretes hechos con block open-end, experimentación 2. ....	45
Figura 52. Comparación de la resistencia a compresión diagonal, primera experimentación. ....	46
Figura 53. Comparación de medias de compresión diagonal, primera experimentación. ....	46
Figura 54. Comparación de la resistencia a compresión diagonal, segunda experimentación. ....	47
Figura 55. Comparación de medias de compresión diagonal, segunda experimentación. ....	47
Figura 56. Gráficas esfuerzo-deformación, primera experimentación. ....	49
Figura 57. Gráficas esfuerzo-deformación, segunda experimentación. ....	50
Figura 58. Muro propuesto para ejercicio. ....	51
Figura 59. Desplazamiento de murete construido con piezas open-end. ....	56
Figura 60. Gráfica de esfuerzos principales. ....	56
Figura 61. Modo de falla al centro de la diagonal. ....	57

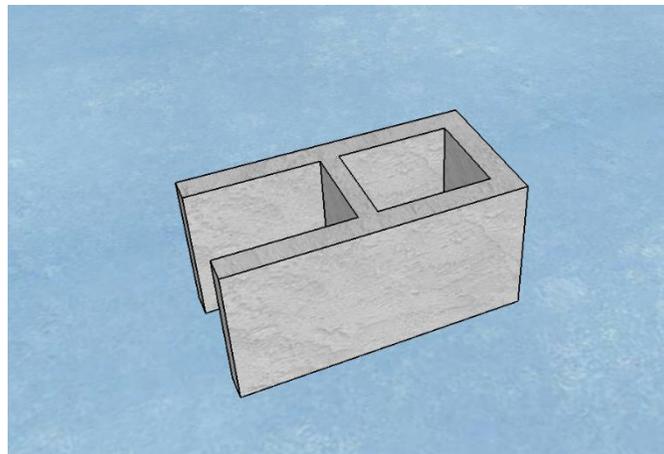
## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas de las piedras naturales [7]. .....	10
Tabla 2. Normatividad mexicana para piezas de mampostería. ....	10
Tabla 3. Propiedades de piezas artificiales [15].....	11
Tabla 4. Características de barras de refuerzo comúnmente usadas para la construcción de vivienda (NMX-C-407-ONNCCE-2001). ....	15
Tabla 5. Características de alambre de acero laminado en frío para refuerzo (NMX-B-072-CANACERO-2017).....	15
Tabla 6. Resistencia de diseño a compresión de la mampostería, $f_m^*$ en kg/cm <sup>2</sup> , para algunos tipos de pieza, sobre área bruta (NTC-2004-mampostería). ....	19
Tabla 7. Esfuerzo cortante resistente de diseño para algunos tipos de mampostería, sobre área neta (NTC-2004-mampostería). ....	21
Tabla 8. Resistencia a la compresión de los bloques. ....	42
Tabla 9. Resistencia a la compresión del mortero. ....	43
Tabla 10. Resistencia a la compresión diagonal.....	45

## I. INTRODUCCIÓN

Al diseñar una estructura de mampostería, es importante conocer propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión, a cortante y a flexión del material. Estas propiedades dependen de muchos factores como la resistencia del mortero, la resistencia del concreto en mampostería reforzada interiormente y las propiedades de la pieza de mampostería que se está usando [1].

Uno de los tipos de piezas para mampostería utilizados actualmente es el block hueco open-end, que se caracteriza por tener una abertura en sus extremos, lo que facilita su producción, transporte y colocación. Además, es una pieza más ligera que el block hueco convencional, ya que se eliminan las caras de los extremos, por lo que se trasmite menor carga a la cimentación (Figura 1).



**Figura 1. Block tipo open-end.**

La presente investigación surge de la necesidad de estudiar nuevos prototipos para la construcción, tomando como variable principal la resistencia a compresión de la mampostería fabricada con el block open-end. Con esto se busca proporcionar información que sea útil a la población en general, ya que se analiza una alternativa que se espera que sea más eficiente y económica que el proceso constructivo tradicional.

A continuación, se presentan la justificación y la descripción del problema, haciendo énfasis en las ventajas de la mampostería construida con block open-end en términos del proceso constructivo.

En el capítulo 2 se incluye una revisión bibliográfica de definiciones, lineamientos establecidos por la normativa mexicana para la realización de pruebas de laboratorio y se discuten datos de investigaciones previas que sirvieron como antecedentes para el planteamiento de este trabajo. Después, en el capítulo 3 se muestran la hipótesis y los objetivos a partir de los cuales se realizó la investigación.

Por otra parte, en el capítulo 4 se detalla la metodología que se siguió para poder comprobar la hipótesis, considerando una estructuración en tres etapas correspondientes a los objetivos específicos planteados. Posteriormente, en el capítulo 5 se presentan y se discuten los resultados de las pruebas experimentales, haciendo un análisis exhaustivo de los datos recabados.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta investigación, así como algunas recomendaciones derivadas de las observaciones en las pruebas de laboratorio.

### 1.1. Justificación

Ante la creciente demanda de vivienda en todo el mundo, es necesaria la creación e innovación de nuevos materiales de construcción que permitan trabajar de una manera más eficiente y al mismo tiempo reducir costos. Mas del 50% de la producción de acero de refuerzo está destinada para la construcción de viviendas, de las cuales, la mayoría son hechas con mampostería [2].

Resulta de especial interés estudiar la mampostería como material estructural, ya que es el más utilizado en la construcción de vivienda desde hace siglos. Con el paso del tiempo se han hecho innovaciones importantes y actualmente es necesario combinar la eficiencia y la ergonomía con la sustentabilidad. Considerando que la cantidad de estudios publicados en el ámbito de la mampostería es baja en

comparación con otros materiales usados en la construcción como el concreto y el acero, el presente trabajo contribuye a la generación de conocimiento sobre el uso y comportamiento de la mampostería.

Hablando específicamente de la mampostería con refuerzo interior construida a base de block open-end, la colocación de las piezas es más sencilla que con las piezas comúnmente usadas, debido a que no es necesario elevar los blocks para insertar la varilla y colocarlos. Así, se tiene un aumento en el rendimiento y como resultado se economiza el proceso constructivo.

## 1.2. Descripción del problema

La construcción de vivienda representa un alto porcentaje de la actividad de la industria de la construcción en México. En este contexto, es común encontrar casos en los que las piezas de mampostería no llegan a los rangos de resistencia establecidos por la normativa y en donde los procesos constructivos son deficientes.

La mampostería se originó desde que el ser humano inició la construcción de cavernas artificiales apilando piedras. Durante milenios ha habido avances importantes en la construcción con este material, como la sustitución de piedras labradas por ladrillos, el uso de arcos y la invención de la mampostería reforzada interiormente, por mencionar algunos. Sin embargo, la necesidad de vivienda requiere que se siga innovando con prototipos de mampostería que ofrezcan más resistencia, así como mejor economía, sin descuidar la sustentabilidad en el proceso constructivo [3].

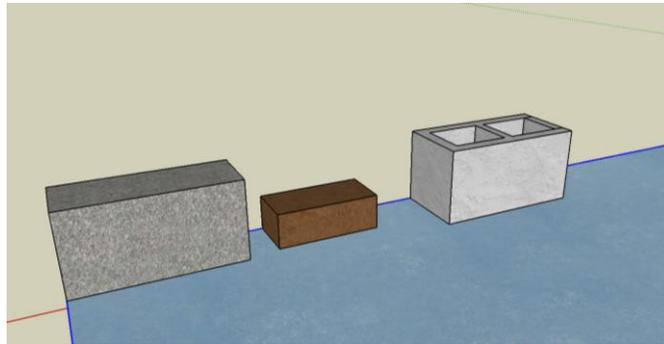
El block open-end (Figura 1) consiste en eliminar una de las caras extremas del block hueco tradicional, con lo cual se vuelve una pieza más ligera y fácil de colocar, a la vez que se evita doblar las varillas de refuerzo, con lo cual se previenen fallas frágiles [4]. Debido a la falta de estudios previos en los que se reporten datos sobre el comportamiento de muros hechos con block open end, los resultados de esta investigación serán útiles a la industria de la construcción y a la población en general.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1. Definición e historia

Las estructuras de mampostería son una de las formas de construcción más utilizadas, debido al bajo costo de los materiales, su abundancia y la facilidad del proceso constructivo [5].

La mampostería se define como la forma tradicional de construcción que consiste en erigir estructuras, colocando manualmente las piezas que las conforman, que pueden ser ladrillo rojo, piedra braza, block hueco, entre otros (Figura 2).



**Figura 2. Piezas de mampostería.**

La elección de los materiales para la mampostería siempre ha estado sujeta a la abundancia de las materias primas que se encuentran en los asentamientos humanos. Por ejemplo, los egipcios construían sus templos con alabastro, granito y basalto que se encontraba en las cercanías del río Nilo. Otro ejemplo son los persas, situados entre los ríos Tigris y Éufrates, que carecían de piedra para labrar su mampostería, pero en sus tierras era abundante la arcilla. Como resultado, las estructuras de mampostería de los persas fueron construidas con ladrillos de arcilla secados al sol [6].

#### 2.1.1. Mesoamérica

Los vestigios de las culturas mesoamericanas son admirados y estudiados debido a sus grandes avances en la construcción. En un principio, la construcción se basó

en mampostería con piezas naturales y artificiales, pero a medida que avanzaba el tiempo, se fueron descubriendo nuevas técnicas constructivas que permitieron la creación de materiales más duraderos y resistentes [7].

Estos pueblos utilizaron el concreto para construir diversos elementos, tales como losas de piso y de techo, muros de contención, muelles, pilas de puente, soportes y bóvedas:

- Muros de contención. Los centros ceremoniales ubicados en el Estado de México, como Teotenango y Calixtlahuaca, requerían muros de contención debido a su construcción en terrazas. Para lograr la estabilidad del conjunto, se utilizaron lajas de piedra de diferentes formas, que interactuaban por fricción con el peso del terraplén una vez acomodadas [8].
- Grandes pirámides. Hacia el año 500 a.C., se construyó la Pirámide del Sol en Teotihuacan, que cuenta con un núcleo sólido de adobes que sostiene el revestimiento de piedra. Para erigir los millones de metros cúbicos de material utilizados para su construcción, se cree que se requirió la fuerza laboral de unas 20 000 personas que trabajaron continuamente durante una década. Otro ejemplo notable es la Pirámide Mayor de Cholula, construida en diferentes etapas superpuestas con soportes estructurales de bloques de tepetate, sillares y adobes [9].
- Edificios cubiertos. El Templo de Quetzal-Mariposa en Teotihuacan es un edificio con forma rectangular que además incluye un patio interno (Figura 3). Su estructura es a base de marcos con grandes pilares que sobresalen por su tamaño y tallado. En el periodo clásico en Teotihuacan se perfeccionó una forma de construcción de los soportes, inspirados en la carpintería de la época, se utilizaron sillares esculpidos en unión de “caja y espiga”, para

formar las columnas con elementos machihembrados. Esta innovación fue utilizada y perfeccionada posteriormente por los mexicas.



**Figura 3. Templo de Quetzal-Mariposa.**

Un caso de especial importancia es la cultura maya, de la que se pueden mencionar algunos ejemplos que ilustran sus adelantos en ingeniería estructural. El uso de materiales como el concreto y el mortero fue esencial para la construcción de bóvedas [10], asimismo, en Comalcalco se manufacturó algo parecido al tabique recocido que se utiliza en la actualidad, lo cual sirvió para hacer grandes edificios en donde se puede observar el uso de juntas uniformes y tabiques cuatropeados para dar mayor rigidez a la estructura [9]. Para lograr un cemento resistente se combinaban arcillas con cal, que a su vez también permitió el uso de concreto puzolánico, que consiste en unir grandes piedras con aglutinantes como mortero (Figura 4).

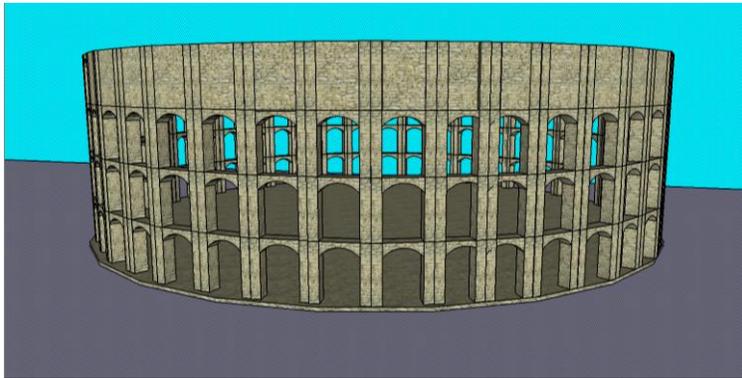


**Figura 4. Templo de Quetzalcóatl.**

### 2.1.2. Avances romanos

Un avance tecnológico que le dio un gran impulso a la mampostería fue la invención del concreto por los romanos, el cual se fabricaba con material puzolánico y ceniza volcánica mezclada con agua y fragmentos de piedra. La puzolana contiene sílice y alúmina, que al combinarse químicamente con la cal resulta en una gran resistencia y durabilidad [11].

El concreto les dio a los romanos la libertad de construir con formas diversas y gracias a esto crearon las estructuras con arcos, mismas que han sido utilizadas en todo el mundo (Figura 5).



**Figura 5. Coliseo romano.**

Anteriormente los constructores estaban limitados por la baja resistencia a la tensión que tiene la piedra, por lo que no podían construir techos con roca. Con el uso de los arcos los romanos eliminaron este problema, ya que en ellos toda la mampostería se mantiene en compresión. Esto les permitió construir grandes puentes y numerosos acueductos, asimismo, usando la intersección de los arcos fueron capaces de hacer domos como el que se encuentra en el panteón de Agripa. Durante siglos las estructuras a base de arcos han sido una práctica común en muchos países (Figura 6) y su investigación continúa debido a su gran capacidad de carga [12].



**Figura 6. Acueducto a base de arcos en Querétaro.**

El uso de los arcos por los romanos fue un gran avance en la edad media y abrió paso para la construcción de bóvedas soportadas con arriostramiento externo. El uso de piezas más pequeñas de mampostería y su unión con mortero permitieron que la resistencia a la compresión de la mampostería se explotara al máximo porque permite una mejor distribución de esfuerzos.

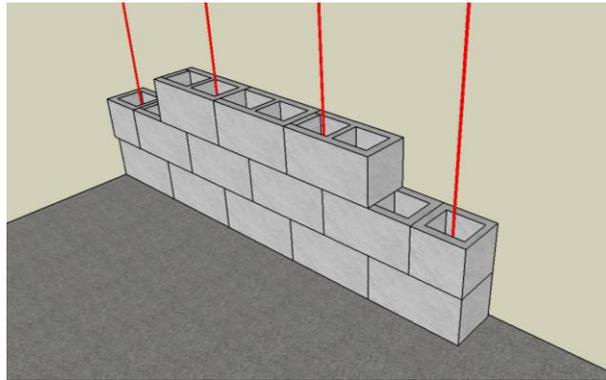
### 2.1.3. Mampostería en la actualidad

Con la invención de las armaduras en el siglo XVI, la aparición del análisis estructural en el siglo XVII y el desarrollo de la resistencia de materiales en el siglo XIX, el uso de la mampostería en grandes construcciones declinó. No obstante, con la invención del cemento Portland, la mampostería resurgió en el siglo XX y, de manera similar a sus inicios en Roma, se concentró en la construcción de muros verticales [13].

El diseño de los muros de carga es crucial para las estructuras, ya que existen muchos elementos que pueden afectar su resistencia y estos son diseñados para resistir las combinaciones de carga que puedan llegar a presentarse [5].

Han existido muchas innovaciones en este sistema constructivo con el paso de los años, una de ellas es la mampostería reforzada interiormente, en donde el refuerzo

de acero puede colocarse horizontal y verticalmente según sea necesario. La varilla se coloca en los alveolos de los blocks que luego serán rellenos con concreto y la varilla horizontal se coloca en las juntas horizontales para minimizar la aparición de grietas (Figura 7).



**Figura 7. Mampostería reforzada interiormente.**

Con el paso de los años se han hecho numerosas investigaciones tratando de encontrar el mejor prototipo de pieza, que sea capaz de cumplir con los requerimientos de resistencia y servicio que las construcciones necesitan. Para esto es necesario conocer el comportamiento mecánico de los muros fabricados con estos prototipos.

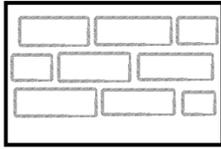
## 2.2. Materiales

### 2.2.1. Piezas naturales

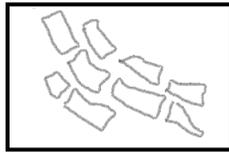
En México pueden distinguirse 3 tipos de mampostería de acuerdo a como fue labrada la piedra natural [14]:

- a) Mampostería de primera. La piedra se corta en formas rectangulares regulares conocidas como paralelepípedos. Estos bloques de piedra se llaman sillares y tienen una cara expuesta plana y rectangular (Figura 8).
- b) Mampostería de segunda. La piedra se corta de diversas formas, conforme a al contorno original con el que se extrajo del banco de piedra (Figura 9).

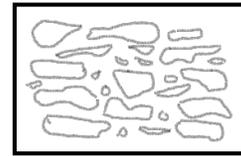
c) Mampostería de tercera. Se intenta que la cara superficial quede plana, pero esta mampostería se usa tal y como sale del banco de piedra. (Figura 10).



**Figura 8. Mampostería de primera.**



**Figura 9. Mampostería de segunda.**



**Figura 10. Mampostería de tercera.**

La mampostería utilizada en la construcción tiene propiedades muy variables. En la Tabla 1 se muestran rangos de variación en piedras naturales.

**Tabla 1. Propiedades mecánicas de las piedras naturales [7].**

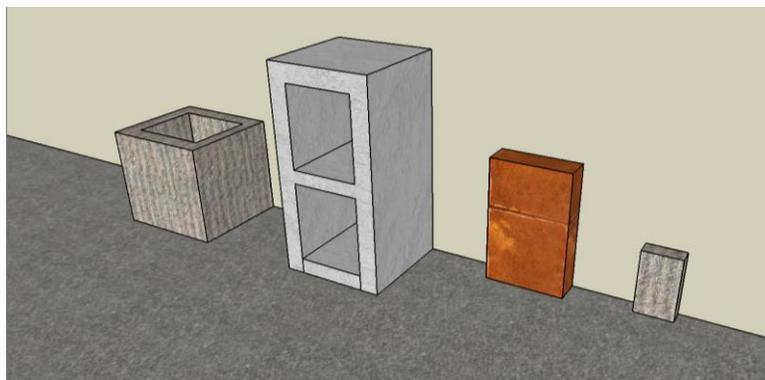
<b>Piedra</b>	<b>Peso volumétrico seco (ton/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistencia a compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistencia a tensión en flexión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup> *10<sup>3</sup>)</b>
Arenisca	1.75 - 2.65	150 - 3200	60 - 120	40 - 200
Basalto (piedra braza)	2.30 - 3.00	800 - 5800	200 - 300	100 - 300
Granito natural	2.40 - 3.20	800 - 3000	100 - 200	400 - 500
Mármol	2.40 - 2.85	300 - 3000	35 - 200	900

### 2.1.2. Piezas artificiales

La cal, el barro y la arena forman parte de las materias primas más comunes, de la gran variedad que existe en las piedras artificiales (Figura 11). Se recomienda que las piezas de mampostería cumplan las normas correspondientes (Tabla 2. Normatividad mexicana para piezas de mampostería. Tabla 2).

**Tabla 2. Normatividad mexicana para piezas de mampostería.**

<b>Norma</b>	<b>Pieza</b>
NMX-C-038-ONNCCE-2013	Determinación de las dimensiones de bloques, tabiques ó ladrillos, y tabicones.
NMX-C-036-ONNCCE-2013	Resistencia a la compresión de ladrillos, bloques y tabicones.
NMX-C-404-ONNCCE-2012	Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural.



**Figura 11. Piezas artificiales de mampostería.**

En la Tabla 3 se presentan algunos valores para tener en cuenta durante la construcción con diversos tipos de mampostería.

**Tabla 3. Propiedades de piezas artificiales [15].**

<b>Pieza</b>	<b>Resistencia a la compresión, <math>f_p</math> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Coefficiente de variación, CV</b>	<b>Peso volumétrico (ton/m<sup>3</sup>)</b>
Tabique rojo de barro recocido	35 - 115	10 - 30	1.30 - 1.50
Tabique extruido perforado verticalmente	150 - 430	11 - 25	1.65 - 1.96
	310 - 570	15 - 20	1.61 - 2.06
	150 - 400	11 - 26	1.66 - 2.20
Tabique extruido macizo	375 - 900	5 - 16	1.73 - 2.05
Tabique extruido, huecos horizontales	75 - 80	13 - 18	1.25 - 1.32
	50 - 80	16 - 30	1.69 - 1.78
Bloques de concreto ligero	20 - 50	10 - 26	0.95 - 1.21
Bloques de concreto pesado	20 - 80	7 - 29	1.32 - 1.70
Bloques de concreto intermedio	70 - 145	7 - 28	1.79 - 2.15
Tabicón	45 - 120	11 - 35	1.05 - 1.60
Silicio Calcáreo	175 - 200	11 - 15	1.79

Según la norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012 las piezas empleadas en la edificación pueden ser sólidas o huecas. Se clasifican como componentes sólidos

aquellos cuya superficie interna es igual o superior al 75% de su superficie total en la sección transversal menos favorable. Por otro lado, los elementos huecos se describen como aquellos que presentan espacios verticales u horizontales con una superficie interna no inferior al 40% de su superficie total bruta.

De acuerdo con esta norma, se pueden clasificar los tabiques, bloques y tabicones de la siguiente manera:

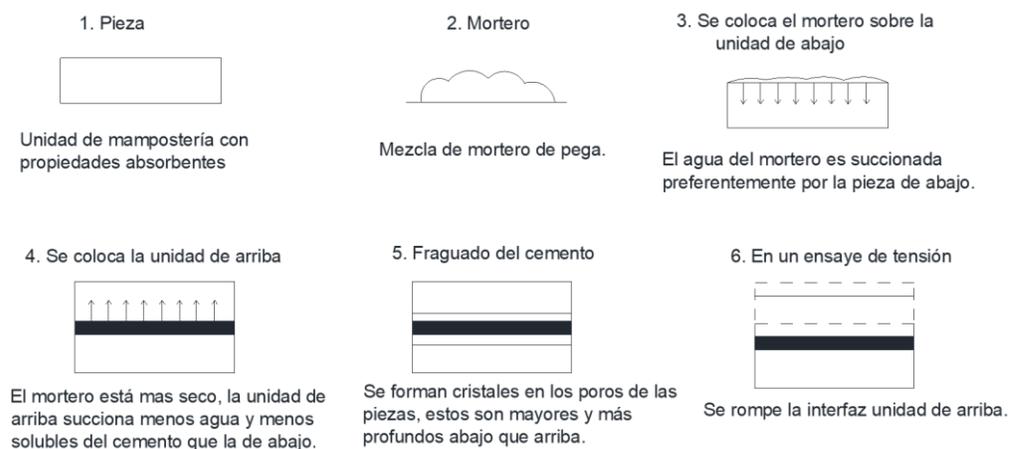
- Tabique: el objeto en cuestión es de forma prismática y se produce a partir de arcillas que son comprimidas o extruidas. Puede ser fabricado mediante procesos de cocción u otros materiales y procesos diversos. Las medidas mínimas requeridas son de 5 cm de alto, 10 cm de ancho y 19 cm de largo, sin tener en cuenta la junta de albañilería.
- Bloque: este artículo se crea mediante el proceso de moldear concreto u otros compuestos, y puede ser sólido o con espacios internos. Las dimensiones de las unidades se determinan a partir de un módulo de 10 cm y deben incorporar una junta de albañilería con un espesor de 1 cm. Las dimensiones mínimas necesarias son de 10 cm de alto, 10 cm de ancho y 30 cm de largo, y el espesor mínimo de la pared debe ser de 2.5 cm.
- Tabicón: el objeto en cuestión se produce a partir de concreto u otros materiales. Se establecen medidas mínimas nominales de 6 cm de altura, 10 cm de ancho y 24 cm de largo.

La unión de la mampostería es de naturaleza mecánica debido a al ingreso de cementantes en los poros de las piezas, por ello es recomendable que las piezas tengas poros de un tamaño mayor de 0.05  $\mu\text{m}$ . También la saturación de agua en las piezas es un factor muy importante y se recomienda que se saturen un 75% para una mejor adherencia. Las piezas secas o totalmente saturadas conllevan a adherencias débiles [16] [17].

### 2.1.3. Morteros

Los morteros son sustancias aglomerantes formadas por arena, agua y un agente cementante, como el cemento o la cal, o una mezcla de ambos. Las características esenciales de los morteros incluyen su capacidad de soportar presión y tensión, su capacidad de adherirse a la piedra, su grado de elasticidad, su manejabilidad, su velocidad de endurecimiento y su resistencia al agua. La resistencia a la compresión se considera el indicador más ampliamente aceptado de su resistencia en general y se mide mediante la evaluación de muestras cúbicas de 5 cm de lado, según la normativa NMX-C-061-ONNCCE-2015. Por lo general, los morteros de cemento presentan una resistencia a la compresión superior en comparación con los morteros de cal, normalmente oscilando entre 40 y 200 kg/cm<sup>2</sup>. [18].

Se ha comprobado que la adhesión entre el mortero y la mampostería es de origen mecánico. Al tener contacto el mortero con la pieza de mampostería, se produce una succión que penetra en los poros capilares de la mampostería. Luego, al cristalizar se forma una unión mecánica entre el mortero y la mampostería (Figura 12). Esta adherencia será favorecida por el aumento de la rugosidad o cavidades que tenga la pieza [19][20].



**Figura 12. Mecánica de la adherencia entre piezas y mortero.**

Se debe evitar una mezcla con gran contenido de agua y arena ya que al reducirse el cemento se reduce la cristalización y por tanto la adherencia. Si se demora la colocación de la pieza existen dos fenómenos que interfieren con una correcta adherencia: la evaporación y la succión de la pieza de abajo. Las características superficiales de las piezas de mampostería como son la textura, el tamaño de los poros y la porosidad juegan un papel crucial en la adherencia [19][21].

#### 2.1.4. Aceros de refuerzo

Para asegurar una completa adherencia entre el acero y el concreto en las cadenas, castillos y elementos colados al interior del muro, se debe utilizar refuerzo de acero de barras corrugadas, malla de acero o armaduras electrosoldadas de alambre de acero. Todos estos elementos deben cumplir con la normatividad mexicana correspondiente. Las barras lisas y el alambón sólo pueden usarse en estribos o en conectores, con un diámetro mínimo de 5.5 mm en el caso de estribos [22].

Cuando se trata de fortalecer la mampostería desde el interior, se introduce acero de refuerzo en las aberturas o espacios entre las piezas. Es esencial distribuirlo en la mayor cantidad posible de barras con diámetros pequeños para facilitar el adecuado revestimiento y llenado de los vacíos. El tipo de acero utilizado en la mampostería reforzada no difiere del que se usa en el concreto reforzado. La combinación de mortero en las juntas y barras de diámetro reducido mejora la resistencia al corte, disminuye la aparición de grietas y su amplitud, y aumenta la capacidad de resistencia a las deformaciones laterales. El acero de refuerzo colocado en las juntas del muro debe ser alambre delgado con un diámetro que no sea mayor a la mitad del espesor de la junta. Se prohíbe el uso de escalerillas debido al riesgo de fractura frágil en los puntos de soldadura. En cualquier caso, el alambre puede ser liso o tener corrugaciones. [14].

Los diámetros de acero de refuerzo más comúnmente utilizados se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4. Características de barras de refuerzo comúnmente usadas para la construcción de vivienda (NMX-C-407-ONNCCE-2001).**

Denominación	Diámetro		Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (kg/m)	Esfuerzo de fluencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Superficie
	(mm)	(pulg)				
Alambrón No. 2	6.4	1/4	0.32	0.248	2100	Lisa
No. 2.5	7.9	5/16	0.49	0.388	4200	Corrugada
No. 3	9.5	3/8	0.71	0.560	4200	Corrugada
No. 4	12.7	1/2	1.27	0.994	4200	Corrugada
No. 5	15.9	5/8	1.98	1.552	4200	Corrugada

La necesidad de mejorar el proceso constructivo de la mampostería, tanto en economía como en rapidez de la ejecución de obra, ha llevado a desarrollar barras de acero de alta resistencia ( $f_y = 6\ 000\ \text{kg/cm}^2$ ), castillos prefabricados de acero con esfuerzos de fluencia de  $5\ 000$  y  $6\ 000\ \text{kg/cm}^2$ , mallas electrosoldadas con alambres de los diámetros más usados y armaduras con  $f_y = 5\ 000$  y  $6\ 000\ \text{kg/cm}^2$ , cuya aplicación principal son las losas de vigueta y bovedilla (Tabla 5).

**Tabla 5. Características de alambre de acero laminado en frío para refuerzo (NMX-B-072-CANACERO-2017).**

Diámetro		Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (kg/m)	Esfuerzo de fluencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Superficie
(mm)	(pulg)				
4.0	5/32	0.12	0.10	6000	Corrugada
4.8	3/16	0.18	0.14	6000	Corrugada
6.4	1/4	0.32	0.25	6000	Corrugada
7.9	5/16	0.49	0.39	6000	Corrugada

#### 2.1.5. Concreto

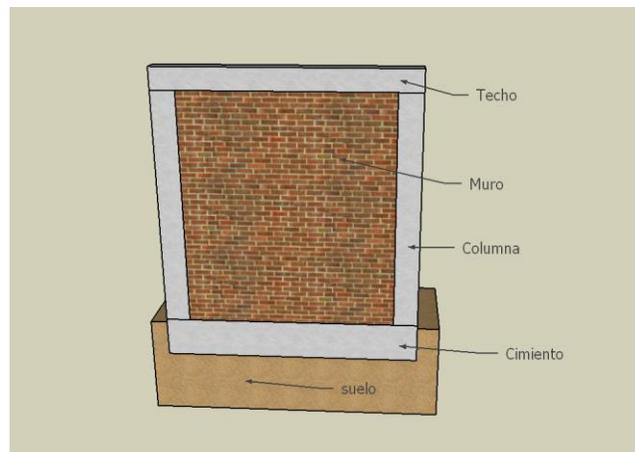
Para lograr que el acero de refuerzo se adhiriera completamente a las piezas de mampostería huecas, estas se rellenan con concreto líquido, conocido en inglés como *grout*. Este concreto debe tener una alta fluidez para poder ser colocado

adecuadamente. El término "lechada de cemento" se utiliza para referirse al *grout* sin agregados, mientras que el "concreto líquido" se utiliza para el *grout* con agregados. Dependiendo del espacio que se vaya a llenar y la capacidad de absorción de la mampostería será el revenimiento del concreto que será usado. Por lo general, se busca una alta trabajabilidad del concreto, lo que se logra mediante una relación agua-cemento alta de 0.8 a 1.2 y un revenimiento de 20 cm. Aunque esta relación agua-cemento es alta, gran parte del agua es absorbida por las piezas de mampostería, lo que disminuye la relación a valores cercanos a 0.6. Se recomienda usar agregados pequeños con un tamaño máximo de 1 cm para garantizar un colado óptimo y prevenir la segregación del material [23].

### 2.3. Tipos de muros

#### 2.3.1. Muros diafragma

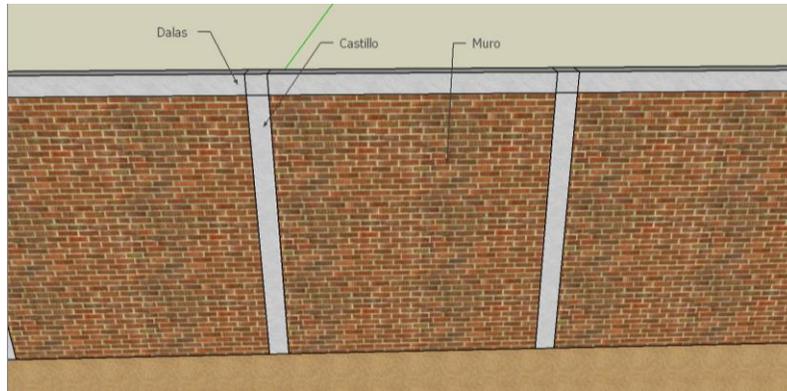
El propósito de los muros diafragma es proporcionar rigidez a los sistemas de marcos estructurales contra las cargas laterales y se pueden utilizar diferentes tipos de mampostería, incluyendo natural, confinada, reforzada interiormente o no reforzada. Es importante asegurar una unión resistente entre el muro diafragma y el marco para soportar estas cargas laterales (Figura 13).



**Figura 13. Muro diafragma.**

### 2.3.2. Muros confinados

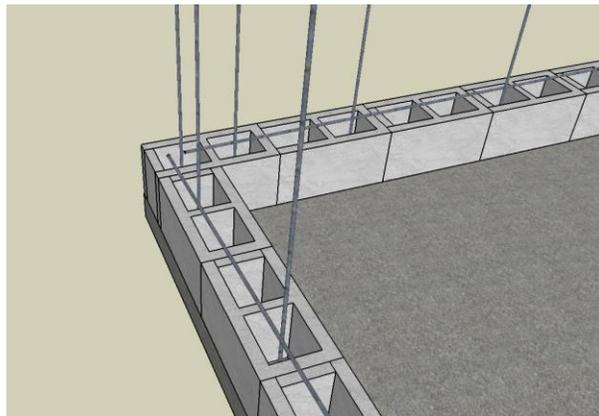
La idea principal del sistema confinado es levantar inicialmente un muro hecho de bloques o ladrillos que sea reforzado en sus extremos con castillos y en la parte superior con una cadena o cerramiento, el cual puede ser aprovechado como base para la construcción del techo (Figura 14).



**Figura 14. Muros confinados.**

### 2.3.3. Muros reforzados interiormente

Los muros reforzados interiormente se construyen con piezas huecas y se refuerzan con varillas corrugadas de diámetros pequeños, estas se colocan en los huecos de las piezas y en las juntas del muro (Figura 15).



**Figura 15. Muro reforzado interiormente.**

Se especifica en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería de la Ciudad de México (NTC-2020-Mampostería), que se puede usar el mortero con el que se pegan las piezas para colar las celdas de la mampostería, o bien se puede usar un concreto con un alto revenimiento. La mampostería reforzada interiormente tiene una gran ductilidad y mucha conveniencia económica, pero para sacar el mayor provecho a este proceso constructivo se debe tener una constante supervisión en obra, para asegurarse de que el refuerzo es colocado como se indica en los planos, así como que el concreto sea colado de manera correcta en las celdas [24].

#### 2.4. Comportamiento mecánico de la mampostería

El comportamiento mecánico de la mampostería y las formas en que puede fallar están estrechamente ligados a la interacción que se produce entre las piezas y el mortero. Esta relación se debe a que estos elementos tienen propiedades de esfuerzo y deformación diferentes, lo que significa que cuando se someten a una misma carga, se genera una interacción en la que las piezas, al ser menos propensas a deformarse, limitan la deformación en el mortero.

La resistencia a la compresión de la mampostería es su propiedad más importante, y depende de variables como la resistencia de la pieza, la resistencia del concreto, del mortero y el patrón de unión (Tabla 6) [25]. El análisis de estos factores resulta bastante complicado ya que la mampostería es considerada un elemento elástico-isotrópico [26].

Tabla 6. Resistencia de diseño a compresión de la mampostería,  $f'm$  en  $\text{kg/cm}^2$ , para algunos tipos de pieza, sobre área bruta [24].

Tipo de pieza	$f'm$ , Mpa (kg/cm <sup>2</sup> )
Tabique macizo de arcilla artesanal	1.5 (15)
Tabique de arcilla extruido	2 (20)
Bloque de concreto	1.5 (15)
Tabique de concreto (tabicón)	1.5 (15)

En el caso de las piezas, existe variabilidad en la resistencia a la compresión que puede ser atribuible a los siguientes factores:

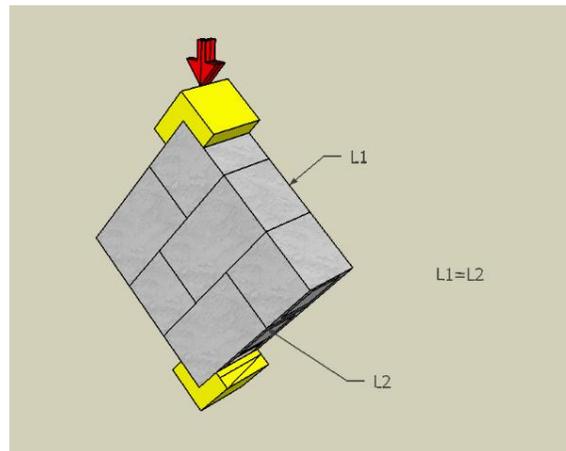
- Variación de resistencia en el lote.
- Variación entre lotes.
- Variación entre empresas.
- Variación entre procedencias regionales.

En cuanto al mortero, las características que más influyen en el comportamiento de una estructura son su capacidad de deformación y su capacidad de unirse a las piezas de mampostería. La capacidad de deformación es esencial para calcular las deformaciones totales del componente estructural y desempeña un papel importante en su resistencia a la compresión vertical. Por otro lado, la capacidad de adherencia del mortero a las piezas es lo que determina la resistencia al corte de los elementos en diferentes tipos de mampostería.[27] [28].

En cuanto a sus propiedades mecánicas, estas varían significativamente dependiendo del tipo de cemento y de la proporción de arena utilizados. Los morteros que utilizan solo cal como cementante suelen tener una baja resistencia a la compresión, alcanzando su máximo rendimiento a edades avanzadas, por lo que se desaconseja su uso como único cementante en elementos estructurales.

Para el objeto de estudio de esta investigación, los efectos asociados a la tensión diagonal son de particular importancia y pueden presentarse en diversas situaciones, entre las cuales destaca la ocurrencia de un evento sísmico. Asimismo, pueden mencionarse otros casos comunes como hundimientos diferenciales o distribución no uniforme de cargas gravitacionales en un muro.

Es crucial comprender el comportamiento mecánico de la mampostería ante esfuerzos de tensión diagonal, ya que en su mayoría las fallas se deben a estas situaciones. Para estudiar la mampostería ante este tipo de solicitaciones se realizan pruebas de compresión diagonal en muretes, que son muros a escala de dimensiones cuadradas con una base de al menos 1.5 piezas, los cuales se someten a cargas diagonales para producir esfuerzos perpendiculares de compresión y tensión (Figura 16) (Tabla 7). A pesar de que la mampostería tiene mayor resistencia a la compresión, el tipo de falla que se presenta en la mayoría de los casos es por tensión diagonal [19].



**Figura 16. Ensayo de compresión diagonal.**

Tabla 7. Esfuerzo cortante resistente de diseño para algunos tipos de mampostería, sobre área neta (NTC-2004-mampostería)[24].

<b>Pieza</b>	<b>V'm, Mpa (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Tabique macizo de arcilla artesanal	0.2 (2)
Tabique de arcilla extruido	0.2 (2)
Bloque de concreto	0.2 (2)
Tabique de concreto (tabicón)	0.2 (2)

En este contexto, resulta esencial hacer una distinción clave entre las fallas por cortante y las fallas por tensión diagonal:

En cualquier sección transversal, encontramos fuerzas internas que se pueden dividir en fuerzas normales y fuerzas tangenciales. Las fuerzas normales a la sección corresponden a los esfuerzos de flexión, los cuales están relacionados con la generación de tensiones en un lado del plano neutro y compresión en el otro. Estos esfuerzos tienen la función principal de resistir el momento flector aplicado.

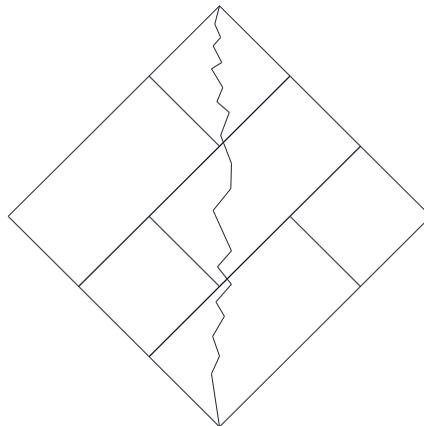
Por otro lado, las fuerzas tangenciales en la sección se denominan esfuerzos cortantes, y contribuyen a resistir las fuerzas transversales. En el plano neutro, los esfuerzos cortantes horizontales y verticales son igualmente magnitudes, y los esfuerzos de flexión se anulan, resultando en esfuerzos de tensión y compresión inclinados a un ángulo de 45° respecto a la horizontal en cualquier punto de este plano.

Es importante destacar que los esfuerzos de tensión, los cuales son de particular interés debido a la baja resistencia a la tensión de ciertos materiales, como el concreto, no se limitan a las tensiones horizontales causadas únicamente por la flexión pura. Existen tensiones de tracción con diversas inclinaciones y magnitudes, que pueden surgir tanto por cortante en el eje neutro como por la combinación de

cortante y flexión en toda la sección. Estas tensiones inclinadas, conocidas como esfuerzos de tensión diagonal, deben ser consideradas con gran atención en el diseño de elementos estructurales para garantizar la integridad de la estructura [29].

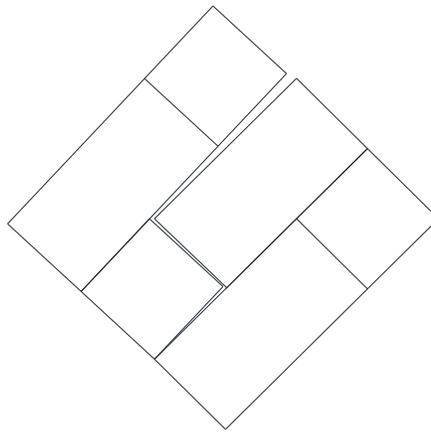
La causa de la falla en un muro puede ser identificada mediante las fisuras que se generan en él. Cuando la causa es una fuerza cortante, las fisuras suelen ser diagonales debido a las tensiones que se presentan en esa dirección. Por lo general, estas fisuras se forman a lo largo de las juntas de las piezas, debido a la debilidad de la unión entre la pieza y el mortero. No obstante, en piezas poco resistentes, pero con buena adherencia con el mortero, las fisuras pueden aparecer tanto en la pieza como en el mortero.

El tipo de falla más deseable es por tensión diagonal (Figura 17), en donde las grietas atraviesan piezas y juntas. Esto significa que existe buena adherencia entre las juntas de mortero y las piezas, lo que en general se logra al tener un mortero de alta resistencia y piezas de alta porosidad y absorción. Este caso puede presentarse también cuando la superficie de contacto es grande, como en piezas macizas y multiperforadas, o en situaciones en donde las piezas son muy pequeñas y por tanto existe una mayor relación de volumen de mortero en comparación con las piezas.



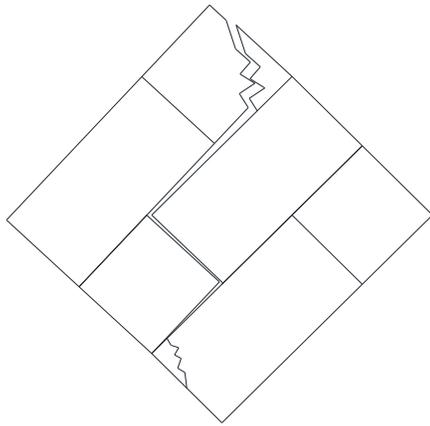
**Figura 17. Falla por tensión diagonal, atraviesa bloques y juntas.**

Por otra parte, la falla por cortante (Figura 18) se reconoce por causar grietas a lo largo de la diagonal a compresión debido al deslizamiento de las piezas a través de las juntas de mortero por las pérdidas de adherencia. Esta falla es común cuando no existe buena adherencia entre el mortero y las piezas, y en especial por tener un área de contacto pequeña en la junta como es el caso de la mampostería con grandes huecos. Es importante recordar que las fuerzas de atracción química entre el mortero y la pieza de mampostería son despreciables, por lo que son las fuerzas de atracción física, que provienen de las fuerzas eléctricas de Van der Waals, las que producen la adhesión [14].

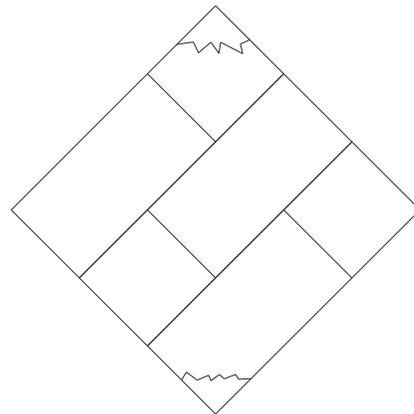


**Figura 18. Falla por cortante, asociada a la adherencia.**

Otro tipo de falla que se puede presentar es la combinada (Figura 19), cuando la grieta en parte atraviesa piezas y juntas y en parte sigue las juntas. Si es causado por el aplastamiento de una de las esquinas a compresión no debe aceptarse el resultado del ensaye (Figura 20).



**Figura 19. Falla combinada, por cortante y por tensión.**



**Figura 20. Falla por aplastamiento en las esquinas.**

Como se mencionó previamente, en la literatura no se tienen estudios en donde se reporte sistemáticamente el comportamiento de muros construidos con block open-end. Los casos de mayor relevancia para el objeto de estudio de este trabajo están relacionados con piezas de block hueco:

En 2010 realizó una investigación en donde se comparó el block hueco con el ladrillo, ya que ambas formas de construcción son muy populares en estructuras de mampostería, pero existen muchos mitos sobre sus beneficios y desventajas. Los resultados de la investigación demostraron que el block hueco tiene más resistencia y ductilidad que el ladrillo convencional, alcanzando una ductilidad 55% mayor [30].

En un estudio posterior, se modelaron y analizaron 12 piezas de mampostería, de las cuales algunas tenían forma similar al block open-end, encontrándose una mejor distribución de esfuerzos [31].

Más adelante, se hizo una comparación entre la mampostería reforzada interiormente y la que no lo está. En este punto estaba demostrado que la mampostería hueca tenía mayor ductilidad que el ladrillo, pero el objetivo era verificar si el sistema con refuerzo interior presentaba mejor comportamiento que el sistema confinado con castillos en los extremos. En esta investigación se reportó

una resistencia a la compresión 28.27% más alta en la mampostería reforzada interiormente [5].

Con base en los resultados obtenidos en estos estudios previos, se entiende que estructuralmente el uso del block hueco reforzado interiormente es mejor que la mampostería tradicional ya que tiene mayor ductilidad, así como mayor resistencia a la compresión. Es por esto por lo que cada vez se utiliza más este tipo de mampostería en la industria de la construcción.

## 2.5. Normativa

A continuación, se presentan algunas definiciones y lineamientos establecidos por la normativa mexicana respecto a las piezas, el mortero y la realización de ensayos de compresión diagonal en mampostería.

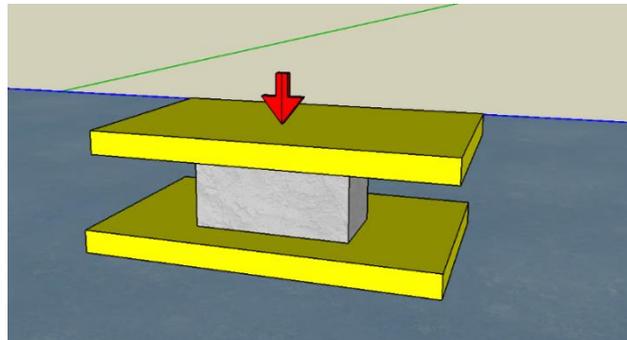
### 2.5.1. Piezas

Área neta: se calcula restando el área de las celdas al área total del bloque, como mínimo será de 50% del área total.

Área total: se calcula multiplicando el largo por el ancho de la pieza.

Celda: son los alveolos que se dejan en las piezas para aligerarlos y/o utilizarlos como “cimbra de castillos”.

La norma NMX-C-036-ONNCCE-2004, establece la metodología para la determinación de la resistencia de las piezas (Figura 21).



**Figura 21. Prueba de resistencia a la compresión en piezas de mampostería.**

Para el muestreo se deben tomar 5 piezas de cada 10 000. En la evaluación de la resistencia a la compresión, se mide la máxima fuerza ejercida por la máquina de ensaye y se determina la resistencia a la compresión al dividir esta fuerza entre el área de la sección transversal de la probeta:

$$R = \frac{F}{A} \quad (\text{Ecuación 1})$$

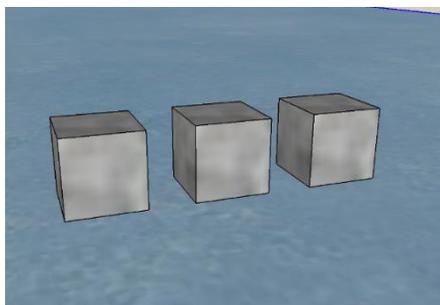
Donde:

- $F$  es la carga máxima
- $R$  es la resistencia a la compresión
- $A$  es el área transversal del espécimen

### 2.5.2. Mortero

La norma NMX-C-061-ONNCCE-2001 establece la metodología para la determinación de la resistencia del mortero mediante el ensaye de especímenes cúbicos (Figura 22). Según este documento, se establece que la preparación de las muestras debe iniciar en un lapso no mayor de 2 minutos y medio después de completar la mezcla inicial del mortero. Se procede a aplicar una capa de aproximadamente 25 mm de espesor de mortero en las secciones del molde destinadas a las muestras y posteriormente se compacta el mortero en cada una de estas secciones utilizando un pisón, realizando 32 golpes en un intervalo de 10 segundos durante 4 ciclos.

Los moldes empleados deben contar con cavidades de forma cúbica con dimensiones de 50 mm por lado, y no deben exceder las tres cavidades por molde. También se pueden utilizar moldes con cavidades de 50.8 mm por lado.



**Figura 22. Especímenes de mortero.**

Para determinar la resistencia a la compresión, se registra la carga máxima aplicada por la máquina de ensaye y se calcula la resistencia a la compresión dividiendo la carga entre el área de la sección transversal:

$$R = \frac{P_{m\acute{a}x}}{S} \quad (\text{Ecuaci3n 2})$$

Donde:

- $P_{m\acute{a}x}$  es la carga máxima
- $R$  es la resistencia a la compresi3n
- $S$  es el área de la secci3n transversal del especmen

Las NTC–2020-Mampostería mencionan las siguientes recomendaciones para morteros para fines estructurales:

- Debe de tener como mínimo una resistencia de 40 kg/cm<sup>2</sup>.
- Se debe de respetar la cantidad mínima de cemento.
- La relaci3n entre arena y aglutinante (cemento) será de 2.25 y 3. La arena debe ser medida suelta.
- Se utilizará lo menos posible de agua en la mezcla.

### 2.5.3. Compresi3n diagonal

La norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 establece la metodología para la evaluaci3n de la resistencia a la compresi3n diagonal en muros de mampostería. Esta normativa señala que, para llevar a cabo pruebas de compresi3n diagonal, es

necesario construir muros con dimensiones que sean aproximadamente cuadradas, donde la base tenga al menos una vez y media la longitud de una pieza estándar. En este tipo de ensayo, se generan situaciones de esfuerzo que implican compresión a lo largo de la diagonal, pero también se generan situaciones de esfuerzo de tracción perpendiculares a la dirección de la compresión.

Definiciones:

Longitud instrumentada: es la diagonal del murete con la que se mide la deformación unitaria.

Murete: la muestra destinada a realizar las pruebas, conocida como murete, consiste en una pieza de ensayo cuya longitud es al menos una vez y media la dimensión más grande de una unidad estándar, ya sea un tabique o un bloque. Además, el número de hiladas de estas unidades se selecciona de manera que la altura del murete sea aproximadamente igual a su longitud. El acomodo de las piezas en la probeta debe seguir una disposición similar a la que se emplea en la construcción de la estructura.

El esfuerzo cortante resistente es equivalente a la raíz cuadrada de la resistencia en compresión:

$$V = \sqrt{f_m} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$V$  es el esfuerzo cortante resistente  
 $f_m$  es la resistencia a la compresión de la mampostería

Según lo estipulado por la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010, la resistencia a la compresión diagonal de los muretes de mampostería se determinará mediante la división de la carga máxima aplicada por el área bruta del murete, la cual se mide

antes de realizar la prueba, a lo largo de la longitud de la diagonal sujeta a compresión:

$$v_m = \frac{P}{tL_c} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$v_m$	es la resistencia a compresión diagonal del murete
$P$	es la carga máxima aplicada
$t$	es el espesor del murete
$L_c$	es la longitud de la diagonal a compresión

## 2.6. Costos y rendimientos

La industria de la construcción es un caso en el que desde hace décadas se ha buscado la sustentabilidad, como ejemplo particular se pueden mencionar algunos tipos de mampostería hueca que son ecológicos ya que se pueden fabricar con residuos industriales [23]. Parte de la sustentabilidad es preocuparse por el buen desarrollo humano y se logra al proporcionar las mejores condiciones de trabajo a los trabajadores y garantizar la mejor ergonomía en sus actividades.

En una investigación realizada por [32], se concluyó que los trabajadores deben ser considerados para el desarrollo sostenible de una corporación, para llegar a esto, la ergonomía tiene que ser considerada en el desarrollo de un trabajo. La ergonomía deriva confort y conveniencia, es la correcta interacción entre las personas y su ambiente, esto puede proveer un mejor entendimiento del trabajo y mayor productividad.

Al implementar mejoras de bajo costo en el ambiente de trabajo, la producción aumenta y los desórdenes esquelético-musculares disminuyen [33]. Se ha encontrado que las personas que fabrican ladrillo tienen un nivel de exposición a lesiones esquelético-musculares de hasta 73.8% [34]. Aunque ha habido mejoras

importantes en el desarrollo de la mampostería, aún se necesita un prototipo que englobe el desempeño estructural con la parte humana.

Actualmente se está introduciendo un prototipo de block hueco llamado open-end para la construcción de muros, el cual promete tener un mejor desempeño estructural, así como una mayor facilidad en el proceso constructivo, con lo cual se disminuyen las lesiones esqueleto-musculares en los trabajadores.

El block open-end considerado en esta investigación es más ligero y fácil de colocar que las piezas tradicionales. La ergonomía y facilidad de su colocación se debe a que, en el proceso constructivo con block hueco tradicional, las varillas que servirán como refuerzo vertical se dejan colocadas desde la cimentación, por lo cual, al colocar los blocks huecos, estos se tienen que elevar manualmente a alturas de hasta 3 metros, lo cual resulta muy cansado para el trabajador. Con el prototipo open end, la pieza se coloca directamente en la hilada gracias a la abertura en su extremo. Debido a esta facilidad de colocación, es posible un aumento en el rendimiento durante la construcción de mampostería con este tipo de pieza.

## 2.7. Método de elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF) es una técnica de análisis numérico que se emplea de manera extensa en campos como la ingeniería y las ciencias aplicadas para abordar la resolución de problemas relacionados con el comportamiento de sistemas y estructuras complejas [35].

La MEF es muy común en ingeniería civil y mecánica para analizar y diseñar estructuras como puentes, edificios, aviones y automóviles. Permite evaluar cómo estas estructuras responderán bajo cargas y condiciones específicas, lo que ayuda en la optimización durante el diseño y garantiza que cumplan con los estándares de seguridad.

Uno de los programas más usados para la modelación de elementos finitos es ANSYS, el cual es un software de simulación de ingeniería utilizado para realizar

análisis numéricos y simulaciones en una variedad de campos de la ingeniería y la ciencia, permitiendo a los ingenieros evaluar el comportamiento estructural de componentes y sistemas. Esto incluye análisis de tensiones, deformaciones, vibraciones y fatiga, lo que es esencial en la industria aeroespacial, automotriz, civil y muchas otras [36].

### **III. HIPOTESIS Y OBJETIVOS**

#### **3.1. Hipótesis**

La resistencia a la compresión diagonal de la mampostería a base de block hueco aumentará al eliminar una cara de las piezas, ya que el concreto que se utiliza para colar la celda tendrá contacto entre las dos piezas contiguas a diferencia del block hueco tradicional.

#### **3.2. Objetivo general**

Analizar cuantitativamente el cambio en la resistencia de la mampostería construida con block hueco cuando se elimina una cara de las piezas, con base en ensayos experimentales y modelos estadísticos.

#### **3.3. Objetivos específicos**

- 1) Determinar la resistencia a compresión diagonal de la mampostería construida con la pieza propuesta.

- 2) Determinar el nivel de contribución del incremento del área de contacto del mortero en la resistencia de la mampostería construida con la pieza propuesta.
- 3) Desarrollar una herramienta comparativa mediante un modelo analítico.

#### IV. METODOLOGÍA

La metodología seguida en esta investigación se estructuró en tres etapas ligadas con los objetivos específicos presentados en el capítulo anterior. Cada etapa consistió en una serie de actividades que se muestran esquemáticamente en el diagrama de la Figura 23 y se describen detalladamente en las siguientes secciones.

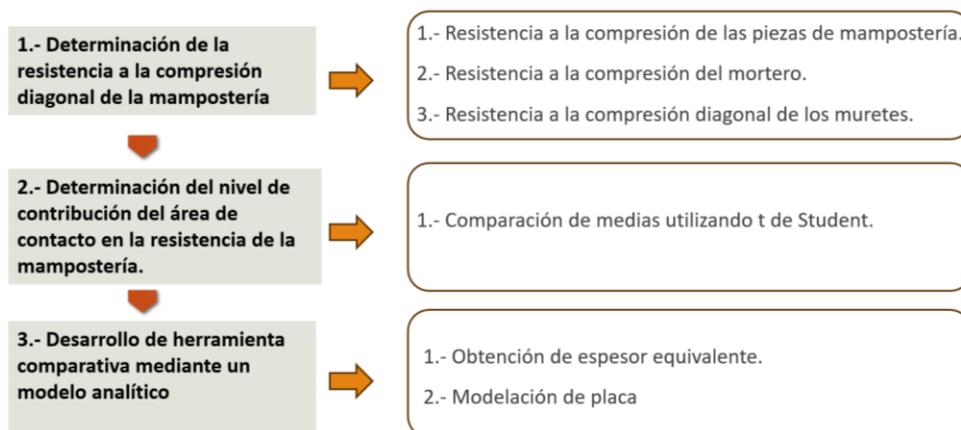


Figura 23. Diagrama de flujo de la metodología.

#### 4.1. Determinación de la resistencia a compresión diagonal de la mampostería.

La primera etapa de la metodología consistió en las siguientes actividades:

1. Se verificó la resistencia a la compresión de las piezas de mampostería, con base en los criterios de la norma NMX-C-036-ONNCCE-2004.
2. Se determinó la resistencia a la compresión del mortero a partir de los establecido por la norma NMX-C-061-ONNCCE-2001.
3. Se calculó la resistencia a la compresión diagonal de los muretes de mampostería de acuerdo con la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010.

Todos los experimentos de laboratorio fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, utilizando una máquina universal FORNEY LT-1150 que tiene una capacidad de 150 toneladas (Figura 24).

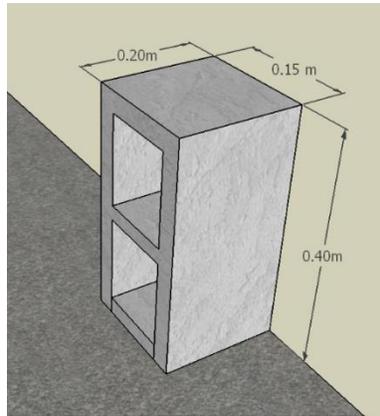


**Figura 24. Máquina universal.**

##### 4.1.1. Resistencia a la compresión de las piezas de mampostería

Para obtener resultados confiables en la prueba de compresión diagonal, era necesario contar con piezas que cumplieran con una resistencia de al menos 60 kg/cm<sup>2</sup>. Inicialmente resultó complicado encontrar piezas de buena calidad con medidas 15 x 20 x 40 cm que cumplieran con este requisito (Figura 25), ya que en las primeras bloqueras locales visitadas solo había disponibilidad de piezas con resistencias de 30 kg/cm<sup>2</sup>. Finalmente, las piezas fueron adquiridas en la bloquera

“CONDOR S.A. de C.V.”, que es conocida por contar con certificaciones de laboratorio.



**Figura 25. Block hueco para experimentación.**

Para la realización de los ensayos en las piezas, se seleccionaron aleatoriamente 5 del lote destinado a la experimentación y se sometieron a una carga de compresión en la máquina universal. Durante el proceso, se midió la carga aplicada y se registró la resistencia máxima alcanzada por cada bloque (Figura 26).



**Figura 26. Ensaye de compresión en piezas de mampostería.**

#### 4.1.2. Resistencia a la compresión del mortero

En las NTC–2020-Mampostería se establece que es posible utilizar el mortero empleado para pegar las piezas de block hueco durante el colado del interior de las celdas, siempre y cuando cumpla con una resistencia mínima de 125 kg/cm<sup>2</sup>. Por lo tanto, fue necesario verificar la resistencia del mortero antes de utilizarlo tanto para

la adherencia de las piezas como para el colado de la celda central en los muretes. La prueba se realizó en la máquina universal para 3 especímenes de 50 mm por lado (Figuras 27 y 28).



**Figura 27. Especímenes de mortero.**



**Figura 28. Prueba a espécimen de mortero.**

#### 4.1.3. Resistencia a la compresión diagonal de los muretes

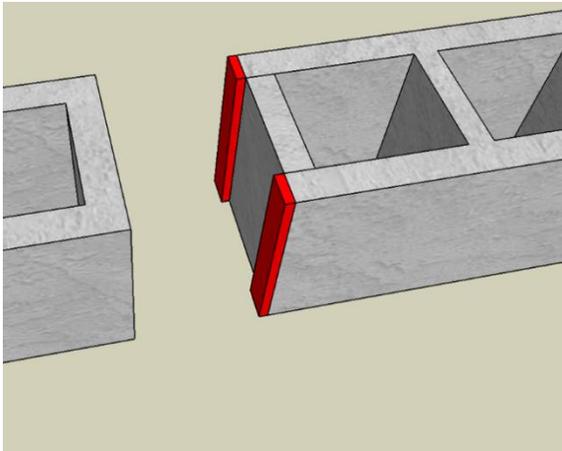
Según la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 se deben hacer 3 muretes para tener una muestra representativa en cada ensaye, cuyas dimensiones serán de por lo menos la longitud de una pieza y media en la base. Respecto a la altura, esta debe ser aproximadamente igual que la base. En el caso del block hueco, cada pieza mide 40 cm, lo que resultó en muretes de 60 cm de base y 60 cm de altura, unidos con mortero.

Con el objetivo de reproducir fielmente el prototipo open-end, se cortó el extremo de cada pieza con un esmeril y se procedió a cortar la cantidad necesaria para construir los 3 muretes (Figura 29).

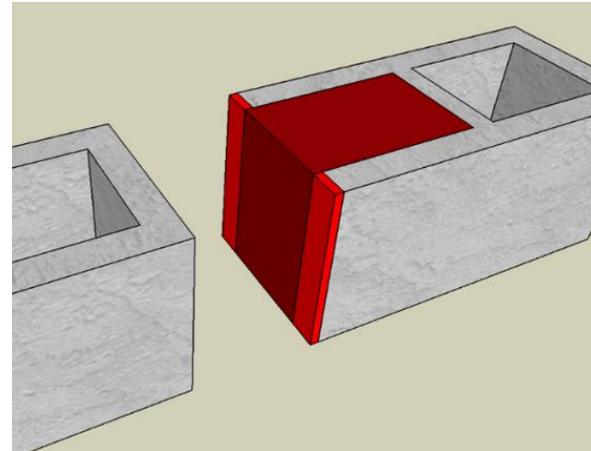


**Figura 29. Piezas huecas con un extremo recortado.**

Al realizar la construcción de los muretes con el block hueco tradicional, se colocaron dos líneas de mortero en los extremos de las piezas, como comúnmente se hace en el proceso constructivo (Figura 30). Por otra parte, en el caso de los muretes construidos con el prototipo open-end, adicionalmente se vertió mortero como material de relleno en las celdas (Figura 31).



**Figura 30. Adherencia por juntas en block hueco tradicional.**



**Figura 31. Adherencia en toda la cara del block open-end.**

Para el cumplimiento de los objetivos específicos de este trabajo se compararon los resultados obtenidos en pruebas de resistencia realizadas a 3 muretes construidos

con piezas huecas tradicionales y 3 muretes construidos con el prototipo open-end (Figuras 32 - 34).



**Figura 32. Murete testigo fabricado con block hueco tradicional.**



**Figura 33. Murete fabricado con block hueco open-end.**



**Figura 34. Muretes de mampostería.**

Transcurridos 28 días desde la construcción de los muretes, se procedió a instrumentarlos con micrómetros para medir sus deformaciones (Figura 35) y se evaluó su resistencia a la compresión diagonal en la máquina universal (Figura 36).



**Figura 35. Colocación de micrómetros en las diagonales de los muretes.**



**Figura 36. Preparación de murete para ensaye en la máquina universal.**

Durante cada ensaye, la carga se distribuyó en el murete mediante el uso de cabezales metálicos (Figura 37), cuidando que la longitud de apoyo que cubren las alas de estos fuera de un sexto de la longitud del murete.



**Figura 37. Ensaye de compresión diagonal en murete de mampostería.**

#### 4.2. Determinación del nivel de contribución del área de contacto en la resistencia de la mampostería

Para la comparación del comportamiento mecánico del block tradicional y del prototipo open-end, se usó la prueba estadística t de Student:

$$t = \frac{\bar{X}_A - \bar{X}_B}{\sqrt{\frac{SA^2}{nA} + \frac{SB^2}{nB}}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

- $\bar{X}_i$  es la media muestral
- $n_i$  es el tamaño de la muestra
- $S_i$  es la desviación estándar

Considerando las hipótesis:

- Ho: El muro fabricado con el prototipo block open-end tendrá una resistencia a la compresión diagonal menor o igual que el block tradicional.
- Ha: El muro fabricado con el prototipo block open-end tendrá una mayor resistencia a la compresión diagonal que el block tradicional.

#### 4.3. Desarrollo de una herramienta comparativa mediante un modelo analítico

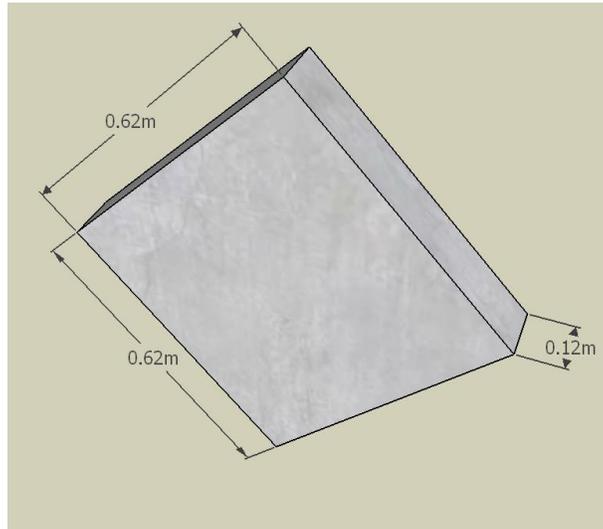
##### 4.3.1. Obtención de espesor equivalente

El espesor equivalente es un concepto utilizado en ingeniería estructural para representar la capacidad de carga de un muro o elemento de mampostería hueca de manera simplificada. Este concepto puede entenderse como el espesor que tendría el muro de mampostería si no existieran celdas vacías [37].

El espesor equivalente no es necesariamente el espesor físico real del muro, sino una representación que tiene en cuenta la cantidad de mampostería y su disposición para evaluar su resistencia y capacidad de carga.

La idea detrás del espesor equivalente es simplificar el análisis estructural al tratar un muro de mampostería hueca como un elemento de espesor uniforme con

propiedades mecánicas conocidas. Esto facilita los cálculos de carga y deformación en comparación con considerar cada unidad de mampostería individualmente. Al restar los huecos de los muretes se llegó a un espesor equivalente de 12 cm (Figura 38).



**Figura 38. Murete equivalente para modelación.**

#### 4.3.2. Modelación de placa

Utilizando el programa ANSYS se desarrolló un modelo para comparar los resultados de la experimentación. El modelo en cuestión es un murete construido con mampostería y se buscó evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga.

El modelo consistió en una placa que replica las características del murete real, considerando tanto las dimensiones como las propiedades del material utilizado. Para garantizar la precisión del modelo, se utilizaron los parámetros establecidos por las Normas Técnicas Complementarias vigentes. Una de las propiedades clave a considerar es el módulo de elasticidad del material, el cual se obtiene de acuerdo con las especificaciones proporcionadas por las mismas normas.

Es importante mencionar que el modelo supone que el material utilizado en el murete es concreto de la misma resistencia que los blocks, por lo tanto, es isotrópico. Esta suposición simplifica el análisis, pero es necesario tener en cuenta que en la realidad existen variaciones y anisotropías en los materiales de construcción. Sin embargo, al considerar el material como isotrópico, se obtienen resultados más generalizados que pueden ser útiles para comprender el comportamiento global del murete. Para el planteamiento del modelo, se usó el elemento plane 182 y se consideró un mallado con elementos cuadrados (Figura 39).

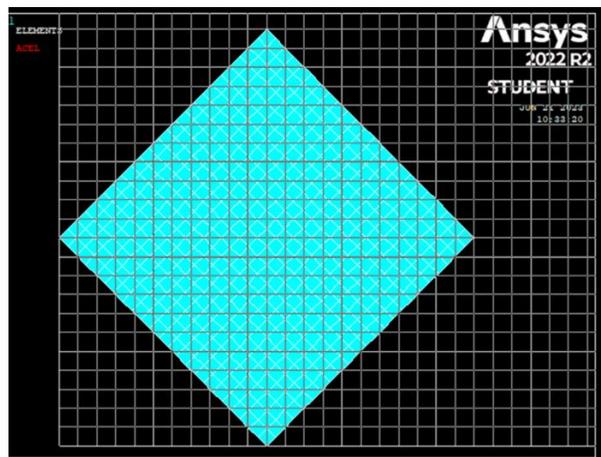


Figura 39. Murete mallado con elemento plane 182.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Determinación de la resistencia a compresión diagonal de la mampostería

#### 5.1.1. Resistencia a la compresión de las piezas de mampostería

En la Tabla 8 se muestran los resultados de la experimentación utilizando la (Ecuación 1). En las Figuras 40 y 41 se presentan las gráficas de desviación estándar de las pruebas.

Tabla 8. Resistencia a la compresión de los bloques.

Experimentación 1 (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación estándar (kg/cm <sup>2</sup> )	Experimentación 2 (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación estándar (kg/cm <sup>2</sup> )
64.18	59.81	2.62	63.56	59.51	5.69
57.72			65.19		
60.27			54.71		
58.27			52.26		
58.61			61.84		

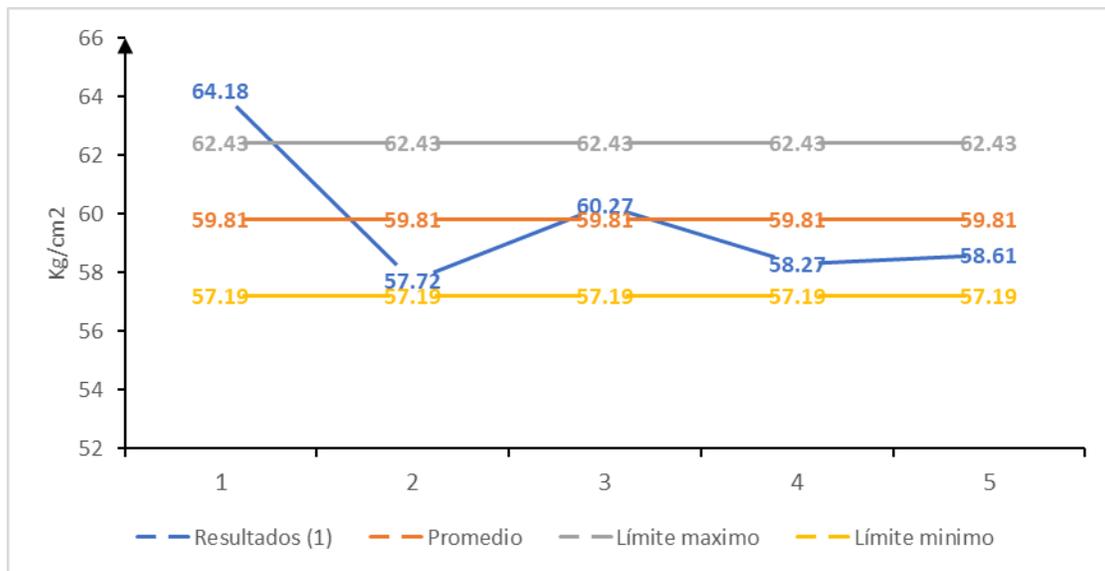
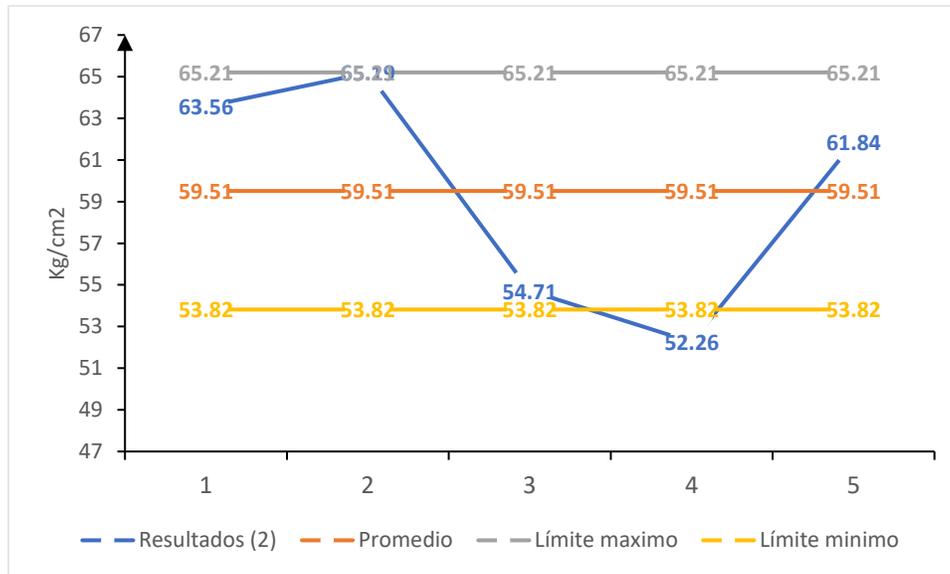


Figura 40. Desviación estándar para la experimentación 1 (Tabla 8).



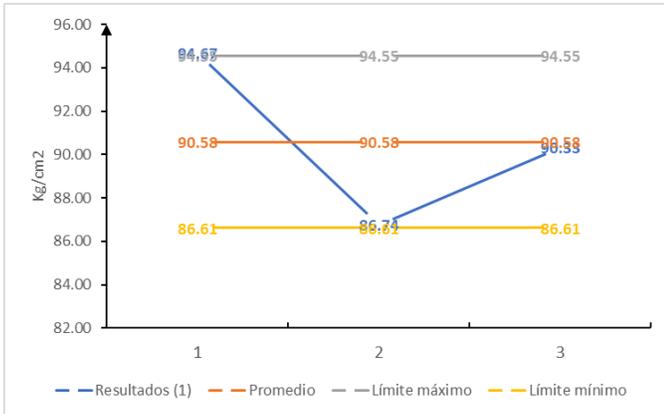
**Figura 41. Desviación estándar para la experimentación 2 (Tabla 8).**

### 5.1.2. Resistencia a la compresión del mortero

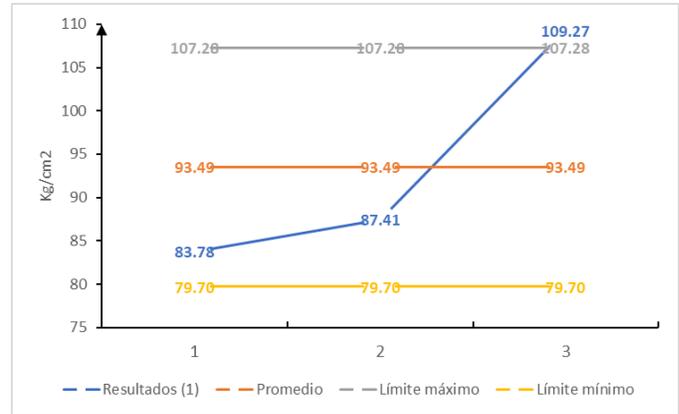
Los resultados de las pruebas de resistencia a compresión del mortero obtenidos utilizando la (Ecuación 2) se presentan en la Tabla 9. La desviación estándar correspondiente se muestra en las Figuras 42 – 47.

**Tabla 9. Resistencia a la compresión del mortero.**

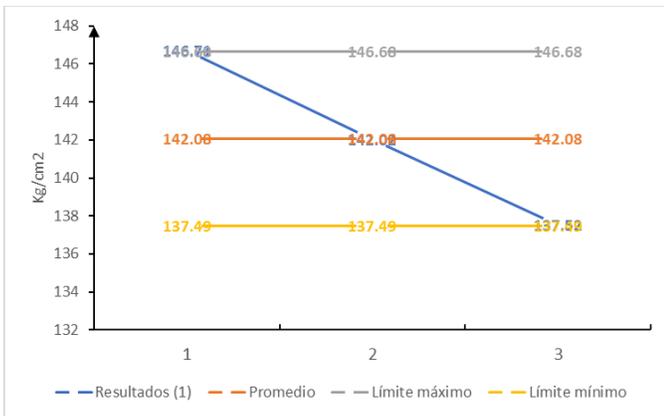
Días	Experimentación 1 (kg/cm²)	Desviación estándar (kg/cm²)	Días	Experimentación 2 (kg/cm²)	Desviación estándar (kg/cm²)
7	94.67	3.97	7	83.78	13.79
	86.74			87.41	
	90.33			109.27	
14	146.71	4.60	14	112.90	29.22
	137.52			54.62	
	142.02			87.41	
28	325.00	3.58	28	110.58	22.37
	317.92			110.58	
	320.50			149.33	
Promedio 28 días (kg/cm²):		321.14	Promedio 28 días (kg/cm²):		123.50



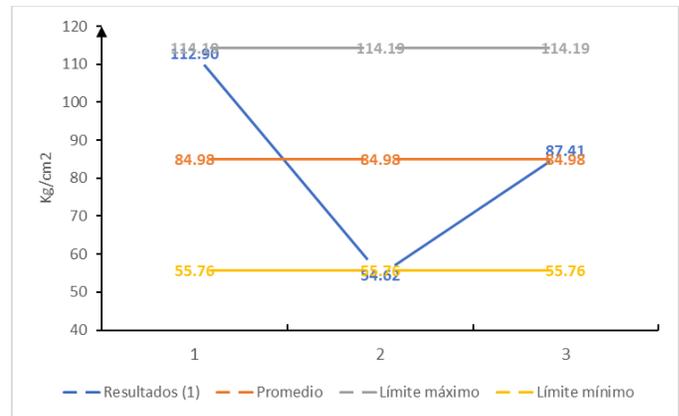
**Figura 42. Desviación estándar de pruebas en mortero a 7 días, experimentación 1.**



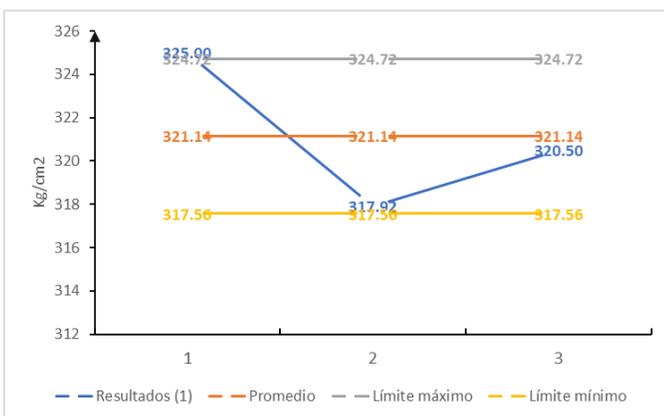
**Figura 43. Desviación estándar de pruebas en mortero a 7 días, experimentación 2.**



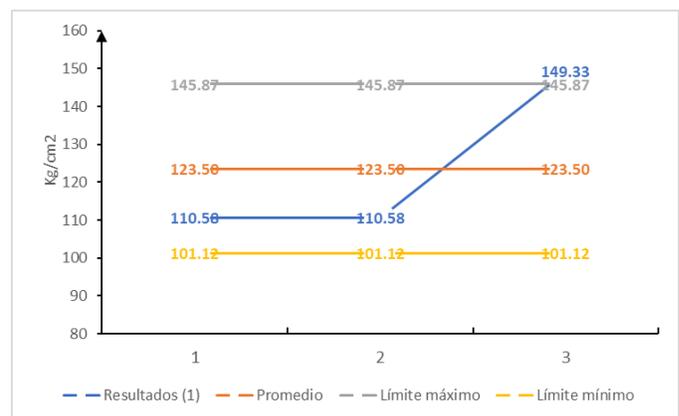
**Figura 44. Desviación estándar de pruebas en mortero a 14 días, experimentación 1.**



**Figura 45. Desviación estándar de pruebas en mortero a 14 días, experimentación 2.**



**Figura 46. Desviación estándar de pruebas en mortero a 28 días, experimentación 1.**



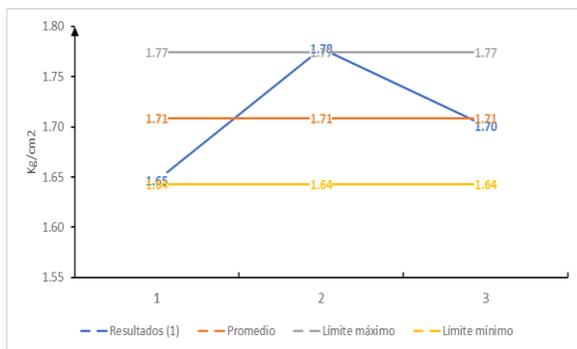
**Figura 47. Desviación estándar de pruebas en mortero a 28 días, experimentación 2.**

### 5.1.3. Resistencia a la compresión diagonal de los muretes

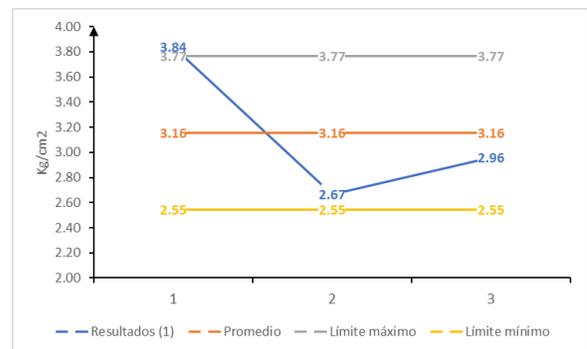
La resistencia a compresión diagonal obtenida utilizando la (Ecuación 4 se presenta en la Tabla 10, las gráficas de desviación estándar de las pruebas se muestran en las Figuras 48 – 51.

**Tabla 10. Resistencia a la compresión diagonal.**

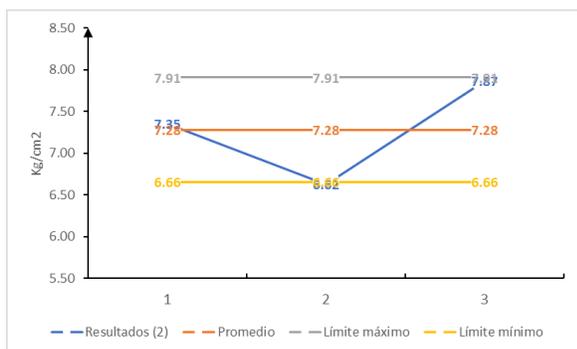
Pieza	Experimentación 1 (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación estándar (kg/cm <sup>2</sup> )	Experimentación 2 (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Desviación estándar (kg/cm <sup>2</sup> )
Tradicional	1.65	1.71	0.07	7.35	7.28	0.63
	1.78			6.62		
	1.70			7.87		
Open-end	3.84	3.16	0.61	8.27	8.46	0.23
	2.67			8.72		
	2.96			8.38		



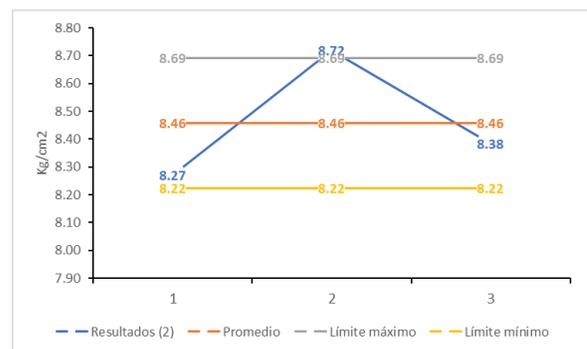
**Figura 48. Desviación estándar de pruebas en muretes hechos con block tradicional, experimentación 1.**



**Figura 49. Desviación estándar de pruebas en muretes hechos con block open-end, experimentación 1.**



**Figura 50. Desviación estándar de pruebas en muretes hechos con block tradicional, experimentación 2.**



**Figura 51. Desviación estándar de pruebas en muretes hechos con block open-end, experimentación 2.**

En las Figuras 52 y 53 se presenta una comparación de los resultados obtenidos en la primera experimentación con los muretes. Se observa que los muretes fabricados con bloques huecos open-end alcanzaron, en promedio, una resistencia a la compresión diagonal 85% respecto a los bloques huecos tradicionales.



Figura 52. Comparación de la resistencia a compresión diagonal, primera experimentación.

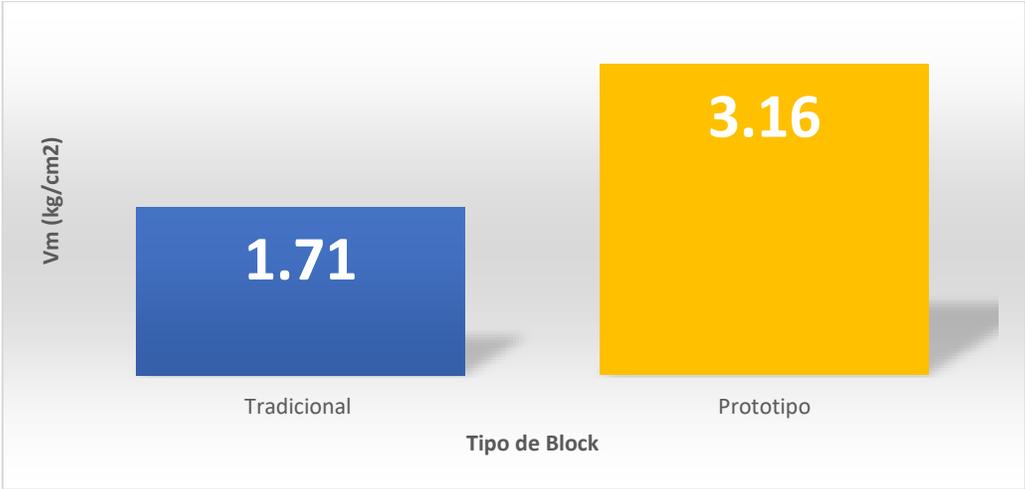


Figura 53. Comparación de medias de compresión diagonal, primera experimentación.

Para la segunda experimentación se observa que los muretes fabricados con bloques huecos open-end alcanzaron, en promedio, una resistencia a la compresión diagonal 15% mayor en comparación con los bloques huecos tradicionales (Figuras

54 y 55). La disparidad en los resultados de ambas experimentaciones se atribuye a las diferencias existentes entre los lotes de mortero utilizados en cada caso.



Figura 54. Comparación de la resistencia a compresión diagonal, segunda experimentación.

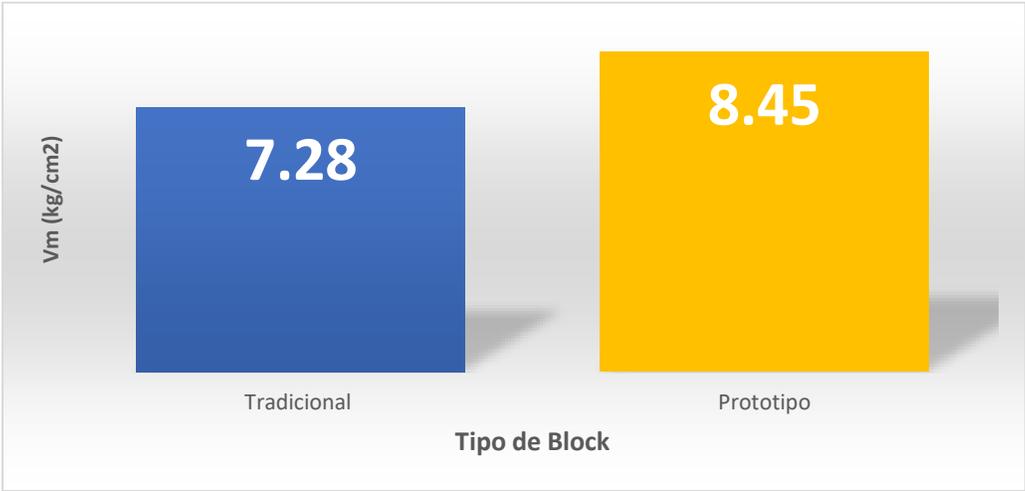


Figura 55. Comparación de medias de compresión diagonal, segunda experimentación.

5.2. Determinación del nivel de contribución del área de contacto en la resistencia de la mampostería

Como se mencionó en la sección 4.2, para la comparación de la resistencia a la compresión diagonal del bloque tradicional y el prototipo de open-end, se utilizó el estadístico t de Student.

Para lo correspondiente a la experimentación 1, se utilizaron los siguientes valores:

$$\begin{array}{lll} X_A = 1.71 \text{ kg/cm}^2 & n_A = 3 & S_A = 0.065 \text{ kg/cm}^2 \\ X_B = 3.16 \text{ kg/cm}^2 & n_B = 3 & S_B = 0.600 \text{ kg/cm}^2 \end{array}$$

Sustituyendo en la (Ecuación 5):

$$t = \frac{1.71 - 3.16}{\sqrt{\frac{0.065^2}{3} + \frac{0.6^2}{3}}} = -4.08$$

Por lo que las medias de las muestras son significativamente diferentes. El nivel de confianza para la prueba de significancia de dos colas es de 98.5%.

Respecto a la experimentación 2, los datos fueron los siguientes:

$$\begin{array}{lll} X_A = 7.28 \text{ kg/cm}^2 & n_A = 3 & S_A = 0.62 \text{ kg/cm}^2 \\ X_B = 8.45 \text{ kg/cm}^2 & n_B = 3 & S_B = 0.23 \text{ kg/cm}^2 \end{array}$$

Sustituyendo en la (Ecuación 5):

$$t = \frac{7.28 - 8.45}{\sqrt{\frac{0.62^2}{3} + \frac{0.23^2}{3}}} = 3.1$$

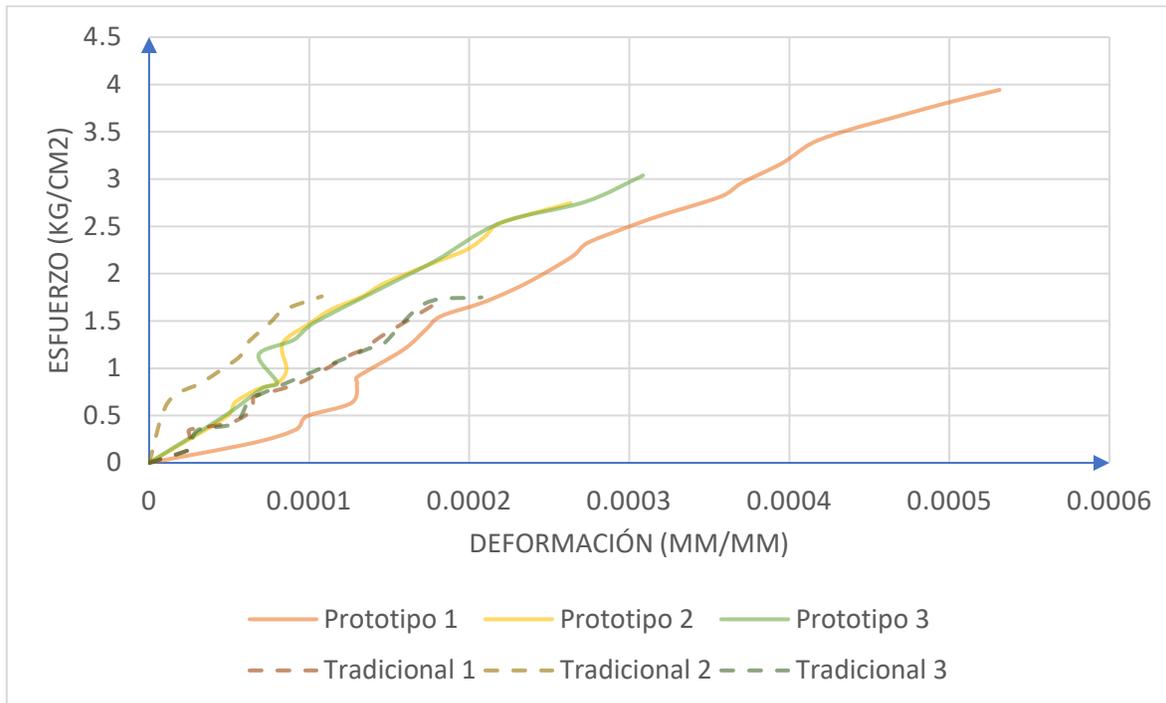
Al igual que en el caso anterior, las medias de las muestras son significativamente diferentes, con un nivel de confianza para la prueba de significancia de dos colas de 96.3%.

Por lo tanto, se puede aceptar la hipótesis alternativa  $H_a$ , la cual dice que “El muro fabricado con el prototipo block open-end tendrá una mayor resistencia a la compresión diagonal que el block tradicional.”

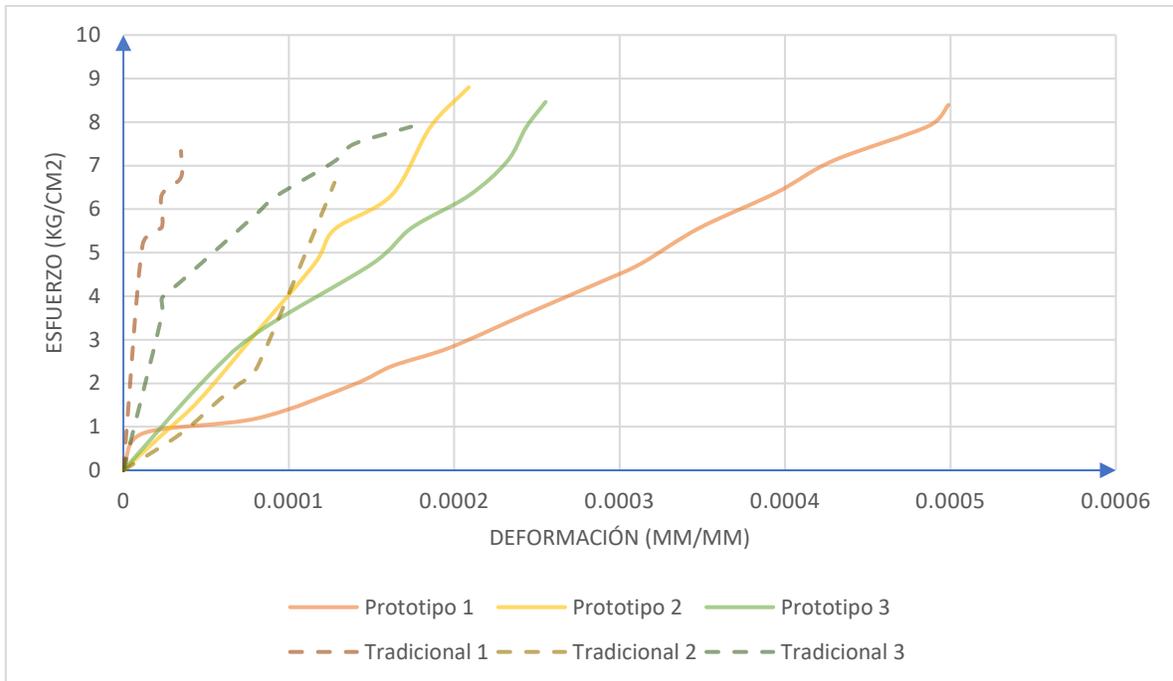
En estos resultados, se observa que la media de la resistencia de los muretes construidos con el prototipo es significativamente mayor que la media de la resistencia de los muretes construidos con el bloque tradicional, con un nivel de

confianza de 98.5% y 96.3, respectivamente. Debido a esto, se puede decir que la resistencia a la compresión aumentó en 15% al quitar uno de los extremos del block.

En las Figuras 56 y 57 se presentan las gráficas esfuerzo-deformación de los muretes fabricados con block tradicional y los fabricados con el prototipo open-end.



**Figura 56. Gráficas esfuerzo-deformación, primera experimentación.**

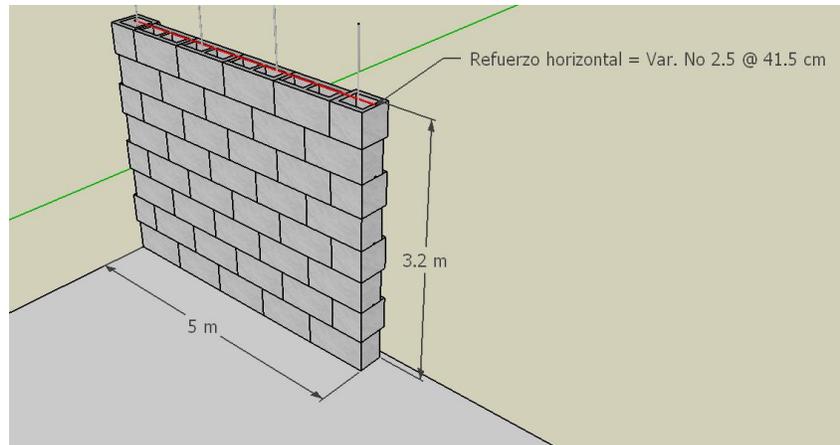


**Figura 57. Gráficas esfuerzo-deformación, segunda experimentación.**

Los dos tipos de mampostería presentan el clásico comportamiento elástico típico de las construcciones con block, pero en los del prototipo open-end se observa una mayor rigidez ante la carga de compresión diagonal ya que tienen mayor resistencia a la deformación.

Para ejemplificar el aumento de resistencia que se genera en un muro al usar el prototipo open-end, se realizó un ejercicio analítico utilizando un muro de dimensiones específicas (Figura 58). En este caso, se consideró un muro con una longitud de 5 metros y una altura de 3.2 metros, utilizando bloques huecos tradicionales. Posteriormente se repitió el mismo ejercicio, pero esta vez se utilizó el prototipo open-end con un valor de  $v'_m$  aumentado en un 15%.

El objetivo principal de este experimento fue evaluar y comparar el rendimiento estructural de ambos muros, específicamente en términos del ahorro en el acero de refuerzo horizontal que se puede lograr mediante el uso del prototipo open-end.



**Figura 58. Muro propuesto para ejercicio.**

Se comenzó calculando la resistencia del muro fabricado con block hueco tradicional con los siguientes datos:

- Factor reductor ( $F_R$ ) = 0.7
- Resistencia a la compresión diagonal ( $v'_m$ ) = 6 kg/cm<sup>2</sup>
- Longitud del muro ( $L$ ) = 500 cm
- Área transversal ( $A_T$ ) = 7 500 cm<sup>2</sup>
- Carga axial ( $P$ ) = 12 500 kg
- Resistencia a la compresión de la mampostería ( $f'_m$ ) = 50 kg/cm<sup>2</sup>
- Espesor del muro ( $t$ ) = 15 cm
- Separación máxima de refuerzo ( $s_h$ ) = 41.5 cm
- Esfuerzo de fluencia ( $f_{yh}$ ) = 4 200 kg/cm<sup>2</sup>
- Factor de área neta ( $f_{an}$ ) = 0.55
- Altura del muro ( $H$ ) = 320 cm
- Alfa ( $\alpha$ ) = 0.045

Fuerza cortante resistida por la mampostería  $V_{mR}$ :

$$V_{mR} = F_R(0.5 v'_m \sum A_T + 0.3 P) \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$V_{mR} = 18\,375 \text{ kg}$$

Fuerza cortante resistida por el refuerzo horizontal  $V_{SR}$ :

$$V_{SR} = F_R \eta \rho_h f_{yh} A t \quad (\text{Ecuación 7})$$

Cálculo del refuerzo mínimo:

$$\rho_h f_{yh} > 3 \frac{kg}{cm^2} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Despejando de la Ecuación 8:

$$\rho_{h,mín} = \frac{3 \frac{kg}{cm^2}}{4200 \frac{kg}{cm^2}} = 0.00071$$

Cálculo del refuerzo máximo:

$$\rho_h f_{yh} < 0.15 f_{an} f'_m \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$\rho_h f_{yh} < 4.125$$

$$\rho_{h,máx} = \frac{\rho_h f_{yh}}{f_{yh}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$\rho_{h,máx} = 0.00098$$

Propuesta de la cuantía:  $\rho_h = 0.0008$

Cálculo del área de acero:

$$A_{sh} = \rho_h s_h t \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$A_{sh} = 0.498 \text{ cm}^2$$

$\eta s = 0.55$ , ya que la resistencia del block es de  $50 \text{ kg/cm}^2$ .

$$K_0 = 1.3 \quad \text{si} \quad \frac{H}{L} \leq 1 \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$\frac{H}{L} = 0.64, \text{ por lo tanto } K_0 = 1.3$$

Se recalcula el valor de  $\rho_h$ :

$$\rho_h = \frac{A_{sh}}{s_h t} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$\rho_h = 0.0008$$

$$K_1 = 1 - \alpha \rho_h f_{yh} > 1 - 0.1 \alpha f_{an} f'_m \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$K_1 = 1 - \left[ 0.045 \left( \frac{kg}{cm^2} \right)^{-1} \right] 0.0008 (4200 \frac{kg}{cm^2}) > 1 - 0.1 \left[ 0.045 \left( \frac{kg}{cm^2} \right)^{-1} \right] (0.55)(50 \frac{kg}{cm^2})$$

$$K_1 = 0.8488 < 0.8762$$

$$K_1 = 0.8762$$

Cálculo del factor de eficiencia:

$$\eta = \frac{V_{mR}}{F_R \rho_h f_{yh} A_T} (K_0 K_1 - 1) + \eta_s \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$\eta = 0.69$$

Fuerza cortante resistida por el refuerzo horizontal  $V_{sR}$ , usando la Ecuación 7:

$$V_{sR} = 12\,258.42 \text{ kg}$$

Resistencia total del muro  $V_R$ :

$$V_R = V_{mR} + V_{sR} \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$V_R = 30\,633.41 \text{ kg}$$

Posteriormente se calcula la resistencia del muro fabricado con block open-end, repitiendo el proceso anterior:

- Factor reductor ( $F_R$ ) = 0.7
- Resistencia a la compresión diagonal ( $v'_m$ ) = 6.9 kg/cm<sup>2</sup>
- Longitud del muro ( $L$ ) = 500 cm
- Área transversal ( $A_T$ ) = 7 500 cm<sup>2</sup>
- Carga axial ( $P$ ) = 12 500 kg
- Resistencia a la compresión de la mampostería ( $f'_m$ ) = 50 kg/cm<sup>2</sup>
- Espesor del muro ( $t$ ) = 15 cm
- Separación máxima de refuerzo ( $s_h$ ) = 41.5 cm
- Esfuerzo de fluencia ( $f_{yh}$ ) = 4 200 kg/cm<sup>2</sup>

- Factor de área neta ( $f_{an}$ ) = 0.55
- Altura del muro ( $H$ ) = 320 cm
- Alfa ( $\alpha$ ) = 0.045

Fuerza cortante resistida por la mampostería  $V_{mR}$ :

$$V_{mR} = 20737.5 \text{ kg}$$

Refuerzo mínimo:

$$\rho_{h,\text{mín}} = \frac{3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 0.00071$$

Cálculo del refuerzo máximo, de la Ecuación 9:  $\rho_h f_{yh} < 4.125$

Usando la Ecuación 10:  $\rho_{h,\text{máx}} = 0.00098$

Propuesta de la cuantía:  $\rho_h = 0.0008$

De la Ecuación 11 se calcula el área de acero:  $A_{sh} = 0.498 \text{ cm}^2$

$\eta_s = 0.55$  ya que la resistencia del block es de  $50 \text{ kg/cm}^2$ .

Usando la Ecuación 12 se calcula  $K_0$ :

$$\frac{H}{L} = 0.64, \text{ por lo tanto } K_0 = 1.3$$

Se recalcula el valor de  $\rho_h$ , usando la Ecuación 13:  $\rho_h = 0.0008$

Usando la Ecuación 14:

$$K_1 = 1 - \left[ 0.045 \left( \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)^{-1} \right] 0.0008 (4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}) > 1 - 0.1 \left[ 0.045 \left( \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)^{-1} \right] (0.55) (50 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2})$$

$$K_1 = 0.8488 < 0.87625$$

$$K_1 = 0.87625$$

Se calcula el factor de eficiencia, Ecuación 15:  $\eta = 0.71$

Fuerza cortante resistida por el refuerzo horizontal:

$$V_{sR} = 12587.1 \text{ kg}$$

Resistencia total del muro  $V_R$ :

$$V_R = 33324.6 \text{ kg}$$

Se puede obtener el aumento en la resistencia restando los respectivos  $V_R$ :

$$V_{R,open-end} - V_{R,tradicional} = 2691.18 \text{ kg}$$

La diferencia en resistencia a cortante entre el bloque tradicional y el bloque open-end es significativa, alcanzando un valor de 2 691.18 kg, equivalente a 8.7% de aumento.

Lo anterior revela la capacidad superior del bloque open-end para resistir fuerza cortante en comparación con su contraparte tradicional. Este aumento en la resistencia a cortante se traduce en beneficios tanto económicos como estructurales.

En términos prácticos, este ahorro en resistencia al corte equivalente a 5 metros de varilla No. 2.5 en el muro propuesto. Al utilizar el bloque open-end, se puede evitar la colocación de este refuerzo horizontal adicional, lo que se traduce en un ahorro sustancial en el desarrollo de viviendas en serie. Además del ahorro económico, esta reducción en la cantidad de varilla también puede tener un impacto positivo en la eficiencia del proceso constructivo y en la duración de la obra.

Sin embargo, es importante considerar que la decisión de utilizar o no la varilla adicional dependerá de las necesidades específicas de la estructura y las regulaciones de construcción vigentes. Si se decide colocar la varilla, esto podría resultar en un aumento significativo en la seguridad estructural de las edificaciones. La varilla proporcionaría un refuerzo adicional contra cargas laterales, mejorando la capacidad del muro para resistir eventos sísmicos o condiciones de viento extremo.

### 5.3. Desarrollo de una herramienta comparativa mediante un modelo analítico

Para verificar los resultados se compararon los desplazamientos obtenidos en la experimentación de block open-end con los del modelo (Figura 59), llegando a un 85% de similitud, con lo que se puede decir que el murete se comportó de una manera bastante cercana a la isotropía.



Figura 59. Desplazamiento de murete construido con piezas open-end.

En la gráfica de esfuerzos principales (Figura 60) se puede observar que si el murete fuera un elemento isotrópico se produciría una falla por tensión diagonal, en la cual existe una concentración de esfuerzos en el centro de la diagonal.

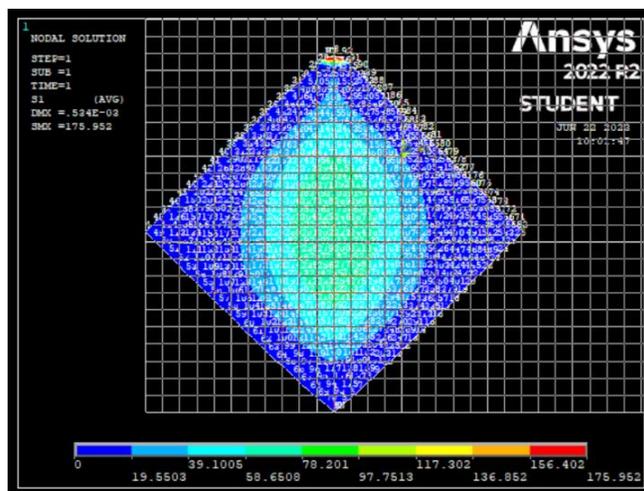


Figura 60. Gráfica de esfuerzos principales.

Al comparar con el resultado de la experimentación (Figura 61) se ve que el modo de falla es por tensión diagonal y no por cortante, en cuyo caso hubiera fallado en las juntas.



**Figura 61. Modo de falla al centro de la diagonal.**

## **VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Al eliminar una de las caras del block hueco, la resistencia del muro ante la compresión diagonal aumenta aproximadamente en un 15% ya que, al colar la celda, el concreto está en contacto con las dos piezas contiguas y esto crea una mejor distribución de esfuerzos, por lo cual se acepta la hipótesis planteada.

La principal característica de esta pieza es que, debido a la cara faltante del block, se hace muy sencilla y rápida su colocación. Además, se genera una mayor área de contacto entre piezas, lo cual es esencial para una mayor resistencia, ya el comportamiento estructural de la mampostería se acerca al deseado actuando como un solo elemento.

Al aumentar la resistencia de los muros se ofrece mayor seguridad para el usuario final, así como disminución de grietas y otros problemas típicos de las construcciones de mampostería, esto debido a la mayor resistencia a la compresión diagonal, la cual se presenta en sismos y hundimientos diferenciales.

Una de las limitaciones al utilizar este prototipo de pieza es la compra de esta, ya que no es muy popular en México. Para la experimentación realizada durante esta investigación se cortaron las caras de los blocks manualmente, lo que hace poco eficiente su utilización.

El problema es muy amplio y no se pretende dar una solución, pero se considera que con el uso de este block se puede mejorar el comportamiento como conjunto de la mampostería. Es importante continuar el estudio de la mampostería ya que es un proceso constructivo muy usado alrededor del mundo. Con esta investigación se espera que haya una mejor comprensión de las características de las construcciones de mampostería fabricadas con este tipo de block ya que en la literatura no se encontró algún estudio previo en la literatura.

## VII. REFERENCIAS

- [1] V. Matsagar, "Advances in structural engineering: Materials, volume three," *Adv. Struct. Eng. Mater. Vol. Three*, no. September, pp. 1619–2647, 2015, doi: 10.1007/978-81-322-2187-6.
- [2] S. Sismica and D. E. L. A. V. Economica, "Cuadernos de investigación."
- [3] P. Pereira Dias, V. Jesuino Kammer, and D. Waldmann, "Analysis of the geometrical imperfections of a dry-stacked masonry block based on Miscanthus," *Constr. Build. Mater.*, vol. 310, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125282.
- [4] V. Solanki and G. Mukhopadhyay, "Metallurgical analysis of transverse crack of rebars," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 104, no. May, pp. 1143–1156, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.058.
- [5] M. S. Dharek, S. Raghunath, and C. P. Ashwin, "Experimental behaviour of unreinforced and reinforced concrete block masonry walls under uniaxial compression," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, no. xxxx, pp. 2462–2467, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.398.
- [6] T. S. El-Salakawy, G. A. Hamdy, M. O. R. Al-Hariri, and S. I. Mubarak, "Experimental and numerical study of bond between masonry and near-surface mounted steel bars," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, p. e00468, 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00468.
- [7] D. Vasconcelos and T. Sánchez, "Edificaciones de mampostería para vivienda," *Edif. mampostería para vivienda*, p. 578, 1999.
- [8] S. Mora, "Ingeniería prehispánica en la Depresión Momposina. Una experiencia prehispánica para pensar alternativas al desarrollo," *Agenda Cult. Alma Máter*, pp. 17–19, 2017.
- [9] D. E. M. Parte, "La arquitectura paleocristiana de mesoamérica. (2". parte) \*," pp. 9–13, 1995.
- [10] J. E. Clark, R. D. Hansen, and T. Pérez Suárez, "La zona maya en el Preclásico," *Hist. Antig. México. Vol. I. El México Antig. sus áreas Cult. los orígenes y el Horiz. Preclásico*, vol. I, pp. 436–510, 2000.
- [11] Instituto Mexicano del cemento y del concreto A.C., "Construcción Y Tecnología En Concreto," *Constr. Y Tecnol. Del Concreto*, vol. 6, no. 12, pp. 58–59, 2017.
- [12] M. Hejazi and Y. Soltani, "Parametric study of the effect of hollow spandrel (Konu) on structural behaviour of Persian brick masonry barrel vaults," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 118, no. December 2019, p. 104838, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104838.

- [13] G. Leonard, "Ireland. By the 4th millennium," pp. 2–4.
- [14] H. Gallegos and C. Casabonne, *ESTRUCTURAL*. 2005.
- [15] B. Johns, J. Rusell, D. John T., and M. David F., "Mecanica de Materiales," *Mc Graw Hill*, vol. 238, pp. 319–370, 2020.
- [16] G. Sarangapani, B. V. Venkatarama Reddy, and K. S. Jagadish, "Brick-Mortar Bond and Masonry Compressive Strength," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 2, pp. 229–237, 2005, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(2005)17:2(229).
- [17] K. Al-Lami, A. S. Calabrese, P. Colombi, and T. D'antino, "Effect of wet-dry cycles on the bond behavior of fiber-reinforced inorganic-matrix systems bonded to masonry substrates," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 20, 2021, doi: 10.3390/ma14206171.
- [18] "NMX-C-061-ONNCCE-2001.pdf." .
- [19] B. V. Venkatarama Reddy and C. V. Uday Vyas, "Influence of shear bond strength on compressive strength and stress-strain characteristics of masonry," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 41, no. 10, pp. 1697–1712, 2008, doi: 10.1617/s11527-008-9358-x.
- [20] M. Leone and M. A. Aiello, "Bond Tests on Clay Bricks and Natural Stone Masonry Externally Bonded with FRP," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 23, p. 7439, 2021, doi: 10.3390/ma14237439.
- [21] M. R. Maheri, M. A. Najafgholipour, and A. R. Rajabi, "The influence of mortar head joints on the in-plane and out-of-plane seismic strength of brick masonry walls," *Iran. J. Sci. Technol. Trans. B Eng.*, vol. 35, no. 1, pp. 63–79, 2011.
- [22] E. Vintzileou, "Effect of Timber Ties on the Behavior of Historic Masonry," *J. Struct. Eng.*, vol. 134, no. 6, pp. 961–972, 2008, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2008)134:6(961).
- [23] X. Zhou, J. Du, Q. Peng, and P. Chen, "Hollow block masonry wall reinforced by built-in structural configuration: Seismic behavior analysis," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 126, no. April, p. 105815, 2019, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105815.
- [24] Gaceta oficial de la Ciudad México, "Normas Tecnicas Complementarias Para Diseño Y Construcion De Estructuras De Mampostería De la Ciudad De México," *Gac. Ofical La Ciud. Mex.*, no. 454, 2020.
- [25] L. Huang, ; Lejia Liao, L. Yan, S. M. Asce, and H. Yi, "Compressive Strength of Double H Concrete Block Masonry Prisms," 2014, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.

- [26] A. Gabor, E. Ferrier, E. Jacquelin, and P. Hamelin, "Analysis and modelling of the in-plane shear behaviour of hollow brick masonry panels," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 5, pp. 308–321, 2006, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.032.
- [27] R. O. G. Martins, G. H. Nalon, R. de C. S. S. A. Alvarenga, L. G. Pedroti, and J. C. L. Ribeiro, "Influence of blocks and grout on compressive strength and stiffness of concrete masonry prisms," *Constr. Build. Mater.*, vol. 182, pp. 233–241, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.091.
- [28] J. Álvarez-Pérez, J. H. Chávez-Gómez, B. T. Terán-Torres, M. Mesa-Lavista, and R. Balandrano-Vázquez, "Multifactorial behavior of the elastic modulus and compressive strength in masonry prisms of hollow concrete blocks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 241, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118002.
- [29] A. H. Nilson, D. Darwin, and C. W. Dolan, *Design Concrete Structures*. 2016.
- [30] J. F. Chen, J. G. Teng, and L. Lam, *Advances in Structural Engineering: Forword*, vol. 13, no. 5. 2010.
- [31] J. J. del Coz Díaz, P. J. García Nieto, F. P. Álvarez Rabanal, and A. Lozano Martínez-Luengas, "Design and shape optimization of a new type of hollow concrete masonry block using the finite element method," *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–9, 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.09.012.
- [32] I. Bolis, S. N. Morioka, C. M. Brunoro, P. C. Zambroni-de-Souza, and L. I. Sznelwar, "The centrality of workers to sustainability based on values: Exploring ergonomics to introduce new rationalities into decision-making processes," *Appl. Ergon.*, vol. 88, no. November 2018, p. 103148, 2020, doi: 10.1016/j.apergo.2020.103148.
- [33] K. Kogi, T. Kawakami, T. Itani, and J. M. Batino, "Low-cost work improvements that can reduce the risk of musculoskeletal disorders," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 31, no. 3, pp. 179–184, 2003, doi: 10.1016/S0169-8141(02)00195-6.
- [34] J. R. A. Bidiawati and E. Suryani, "Improving the Work Position of Worker's Based on Quick Exposure Check Method to Reduce the Risk of Work Related Musculoskeletal Disorders," *Procedia Manuf.*, vol. 4, no. less, pp. 496–503, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.11.068.
- [35] J. J. del Coz Díaz, P. J. García Nieto, C. Betegón Biempica, and M. B. Prendes Gero, "Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, no. 8–9, pp. 1445–1456, 2007, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.10.010.

- [36] W. Jäger, T. Bakeer, and P. Schöps, "Simulation of Masonry in ANSYS and LS-DYNA The Features and Challenges," *ANSYS Conf. 27th CAFEEM Users' Meet.*, no. NOVEMBER 2009, pp. 1–15, 2009.
- [37] A. Navas Carro, "Propiedades Geométricas De Los Bloques Y La Mamposteria De Concreto," *Rev. Ing.*, vol. 24, no. 2, pp. 129–144, 2014, doi: 10.15517/ring.v24i2.13929.