



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL  
CONCRETO CELULAR DE AUTOCLAVE”**

**TESIS**

**PRESENTADO POR:**

**I.C. DAISY SHAMEL PÉREZ BUENFIL**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE**

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

**OPCIÓN ESTRUCTURAS**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO**

**2019**

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para el desarrollo de esta tesis a través del proyecto de investigación 288718 titulado “Muros confinados de concreto celular de autoclave sujetos a cargas laterales” (FING-2018-0003), así como por la beca otorgada para la realización de estos estudios de Maestría en Ingeniería. Asimismo, le agradezco a la Universidad Autónoma de Yucatán su apoyo para la realización de dichos estudios.

## RESUMEN

El Concreto Celular de Autoclave (CCA) es un material que se comenzó a utilizar en la década de 1920 en Suecia. Es un material ligero que se elabora con cemento, cal, arena, agua y aluminio; este último hace que la mezcla se expanda hasta 5 veces su volumen original. Es un material económico y sustentable debido a su bajo peso y a que es un buen aislante térmico y acústico.

En México se cuenta con normas técnicas para el diseño de muros de mampostería (GCM 2017). En estas normas se establecen los requisitos para el diseño de muros no reforzados, reforzados interiormente y confinados, entre otros. Los requisitos para muros de mampostería confinada consideran piezas de concreto y arcilla. A su vez, en los Estados Unidos de América se cuenta con un reglamento para el diseño de muros de mampostería de CCA (ACI 2013). En este reglamento sólo se consideran muros de CCA no reforzados y reforzados interiormente.

Se visualiza la oportunidad de construir muros confinados de CCA para un uso estructural. Para desarrollar ecuaciones de diseño de muros confinados de CCA se requiere hacer estudios experimentales a escala natural y profundizar en el conocimiento sobre las propiedades mecánicas del CCA, tales como: resistencia a la compresión axial, resistencia a la tensión y módulo de elasticidad.

El objetivo de este trabajo es analizar las propiedades mecánicas del Concreto Celular de Autoclave mediante ensayos experimentales y modelos del Método de Elemento Finito (MEF). Se ensayó el material proveniente de un mismo lote. Se obtuvieron propiedades del CCA tales como densidad, contenido de humedad, resistencia a la

compresión axial, resistencia a la tensión y módulo de elasticidad. Adicionalmente, se obtuvieron propiedades de la mampostería de CCA tales como la resistencia a la compresión diagonal, módulo de cortante, resistencia a la compresión axial y módulo de elasticidad.

Se obtuvieron curvas de esfuerzo-deformación del CCA y de la mampostería de CCA. Se compararon los resultados de los ensayos realizados al material y a la mampostería. Se propusieron modificaciones a la norma mexicana para el ensaye a compresión diagonal de muretes de CCA con el fin de observar la falla por tensión. Se desarrolló una ecuación para calcular la resistencia a compresión diagonal del CCA en función de la longitud del murete y la resistencia a tensión del CCA. Mediante modelos del MEF se analizaron las distribuciones de esfuerzos de los elementos ensayados con diferentes normas ASTM. Estos resultados de los modelos de MEF permiten entender las diferencias en la resistencia a tensión obtenidas de los distintos ensayos.

Se concluyó que la ecuación para calcular la resistencia a compresión diagonal aproxima satisfactoriamente los resultados experimentales y que las juntas de mortero de pared delgada influyen en el patrón de agrietamiento de los muretes. Adicionalmente, se concluyó que la resistencia a compresión axial y el módulo de elasticidad de las pilas de CCA son similares a los obtenidos del ensaye de una pieza.

## ABSTRACT

Autoclaved Aerated Concrete (AAC) is a material that started to be used in 1920 in Sweden. It is a lightweight material composed of Portland cement, lime, silica sand, water and aluminum powder; the latter makes the mix get expanded up to 5 times its original volume. It is an economic and sustainable material because of its light weight and its thermic and acoustic properties.

In Mexico there are codes for masonry walls design (GCM 2017). In these codes there are requirements for the design of unreinforced walls, reinforced walls and confined walls. The requirements for confined masonry walls consider concrete blocks and clay bricks. On the other hand, in America there is a code for AAC masonry design (ACI 2013). In this code there are only specifications for the design of AAC unreinforced and reinforced masonry walls.

It is visualized in a future the opportunity of building confined masonry walls of AAC for structural use, but in Mexico the current codes don't consider this material. In order to develop design equations for AAC confined walls it is required to carry out experimental studies on full-scale walls and go deeper in the knowledge of the AAC mechanical properties, such as: compressive strength, splitting tensile strength and modulus of elasticity.

The objective of this work is to analyze the Autoclaved Aerated Concrete mechanical properties through experimental tests and Finite Element Method (FEM) models. The tested material was from the same batch. AAC properties like density, moisture content, compressive strength, splitting tensile strength and modulus of elasticity were obtained,

Additionally, AAC masonry properties such as diagonal tensile strength, modulus of rigidity, compressive strength and modulus of elasticity were obtained.

Stress-strain curves were obtained for AAC and AAC masonry. The results of the experimental tests from AAC and ACC masonry were compared. Modifications to the Mexican norms were proposed for the diagonal tension test for AAC masonry wallets in order to observe a diagonal tension failure. An equation to calculate the diagonal tensile strength was developed in terms of the wallet's length and the splitting tensile strength of AAC. The stress distribution of the elements tested with different ASTM norms to calculate tensile strength were analyzed using FEM models. These results from MEF models allow to understand the differences in the tensile strength obtained from different tests.

It was concluded that the equation to calculate the diagonal tension strength fits well the experimental results and that the thin-bed mortar joints influence the crack pattern in the wallets. Additionally, it was concluded that the compressive strength and the modulus of elasticity of the masonry prisms of AAC are similar to those obtained from the AAC units.

# CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>CONTENIDO .....</b>	<b>8</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Planteamiento del problema.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>19</b>
1.2.1    Objetivo general .....	19
1.2.2    Objetivos específicos.....	19
<b>1.3 Alcance de la tesis .....</b>	<b>19</b>
<b>1.4 Contenido .....</b>	<b>19</b>
<b>2 REVISIÓN DE LA LITERATURA .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Concreto Celular de Autoclave .....</b>	<b>21</b>
2.1.1    Densidad y contenido de humedad.....	22

	9
2.1.2	Resistencia a la compresión axial..... 22
2.1.3	Resistencia a la tensión..... 24
2.1.4	Módulo de elasticidad..... 26
2.1.5	Resistencia a la Compresión Diagonal ..... 27
2.1.6	Energía de agrietamiento ..... 30
<b>2.2</b>	<b>Mecánica de la fractura..... 31</b>
<b>2.3</b>	<b>Modelación de la mampostería con el MEF..... 34</b>
<b>2.4</b>	<b>Modelación del CCA con el MEF ..... 35</b>
<b>2.5</b>	<b>DIANA37</b>
	<b>Elementos de esfuerzo plano ..... 37</b>
<b>2.6</b>	<b>Conclusiones de la revisión de la literatura..... 38</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA ..... 39</b>
<b>3.1</b>	<b>Descripción general..... 39</b>
<b>3.2</b>	<b>Obtención de las propiedades mecánicas del CCA..... 40</b>
3.2.1	Densidad y contenido de humedad..... 40
3.2.2	Resistencia a compresión axial ..... 40
3.2.3	Resistencia a tensión..... 42
3.2.4	Módulo de elasticidad ..... 45
<b>3.3</b>	<b>Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de CCA..... 48</b>
3.3.1	Resistencia a compresión axial y módulo de elasticidad de la mampostería .... 48
3.3.2	Compresión diagonal y módulo de cortante de la mampostería..... 52

<b>3.4</b>	<b>Desarrollo de modelos elásticos de elemento finito de pruebas a tensión con la misma altura .....</b>	<b>58</b>
3.4.1	Desarrollo de modelos elásticos de elemento finito de muretes a tensión .....	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>64</b>
<b>4.1</b>	<b>Propiedades mecánicas del CCA.....</b>	<b>64</b>
4.1.1	Densidad .....	64
4.1.2	Resistencia a compresión axial .....	65
4.1.3	Resistencia a tensión.....	65
4.1.4	Módulo de elasticidad.....	66
<b>4.2</b>	<b>Propiedades mecánicas de la mampostería .....</b>	<b>67</b>
4.2.1	Resistencia a la compresión axial y módulo de elasticidad de la mampostería.	67
4.2.2	Resistencia a la compresión diagonal y módulo de cortante de la mampostería	69
<b>4.3</b>	<b>Modelos elásticos de elemento finito de piezas de CCA con diferente geometría</b>	<b>74</b>
4.3.1	ASTM C496 .....	74
4.3.2	ASTM C1006 .....	76
4.3.3	ASTM E519 .....	78
<b>4.4</b>	<b>Modelos del Método de Elemento Finito de muretes de distinto tamaño .....</b>	<b>80</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>82</b>
<b>5.1</b>	<b>Humedad y resistencia a la compresión axial.....</b>	<b>82</b>
<b>5.2</b>	<b>Resistencia a la compresión axial y a la tensión, y Módulo de elasticidad .....</b>	<b>83</b>

	11
<b>5.3 Ensaye a compresión diagonal.....</b>	<b>84</b>
<b>5.4 Modelos de tensión de muretes.....</b>	<b>89</b>
<b>5.5 Modelos de pruebas de tensión.....</b>	<b>93</b>
<b>6 CONCLUSIONES.....</b>	<b>96</b>
<b>7 REFERENCIAS.....</b>	<b>98</b>
<b>APÉNDICE A. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....</b>	<b>102</b>
<b>APÉNDICE B. RESULTADOS DE VARIACIÓN DE LA HUMEDAD .....</b>	<b>104</b>
<b>APÉNDICE C. PATRONES DE AGRIETAMIENTO DE MURETES .....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO A. ENSAYES DE COMPRESIÓN DIAGONAL HERNÁNDEZ (2015) CCA-4.....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO B. ENSAYES DE COMPRESIÓN DIAGONAL HERNANDEZ (2015) CCA-6.....</b>	<b>110</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Relación lineal entre la resistencia a la compresión axial y la densidad del CCA (Qu y Zhao, 2017) .....	24
Figura 2.2 Ensayes de tensión estudiados por Malyszko et. al. (2017) .....	25
Figura 2.3 Resistencia a la tensión diagonal .....	27
Figura 2.4 Tipos de falla .....	28
Figura 2.5 Modos de fractura .....	32
Figura 2.6 Clasificación de los materiales de acuerdo con su respuesta.....	33
Figura 2.7 Elemento Q8MEM.....	38
Figura 3.1 Secado de cubos de CCA.....	40
Figura 3.2 Determinación del peso húmedo.....	41
Figura 3.3 Cabeceo del espécimen.....	41
Figura 3.4 Aplicación de la carga a compresión.....	42
Figura 3.5 Esquema del ensaye a tensión de un bloque de CCA .....	43
Figura 3.6 Determinación del contenido de humedad de la pieza .....	43
Figura 3.7 Ensaye a tensión de bloques de CCA.....	44
Figura 3.8 Obtención de prismas de CCA.....	45
Figura 3.9 Marco de soporte de la instrumentación .....	45
Figura 3.10 Determinación del peso húmedo del espécimen .....	46
Figura 3.11 Sistema para el ensaye de módulo de elasticidad.....	47
Figura 3.12 Vista frontal del ensaye a compresión axial de la mampostería .....	49
Figura 3.13 Sistema de instrumentación del ensaye a compresión axial de las pilas de mampostería .....	50
Figura 3.14 Esquema del ensaye a compresión diagonal de un murete de CCA .....	53
Figura 3.15 Cabezales metálicos.....	54

Figura 3.16 Obtención de la resistencia a compresión diagonal .....	55
Figura 3.17 Obtención del módulo de cortante .....	56
Figura 3.18 Malla de elementos finitos y condiciones de apoyo del modelo elástico de un cilindro (Modelo A) .....	60
Figura 3.19 Malla de elementos finitos y condiciones de apoyo del modelo elástico de un bloque (Modelo B).....	61
Figura 3.20 Malla de elementos finitos y condiciones de apoyo del modelo elástico de un murete (Modelo C) .....	61
Figura 3.21 Modelado de muretes a tensión .....	63
Figura 4.1 Curva esfuerzo-deformación de especímenes .....	66
Figura 4.2 Curva esfuerzo-deformación de pilas de mampostería .....	68
Figura 4.3 Curva esfuerzo-deformación angular de muretes de 120 cm .....	71
Figura 4.4 Curva esfuerzo-deformación angular de muretes de 60 cm .....	71
Figura 4.5 Distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) de un cilindro (ASTM C496) .....	75
Figura 4.6 Esfuerzos a tensión obtenidos computacionalmente (MEF) y analíticamente (ASTM C496) .....	76
Figura 4.7 Distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) de un bloque (ASTM C1006) .....	77
Figura 4.8 Esfuerzos a tensión obtenidos computacionalmente (MEF) y analíticamente (ASTM C1006) .....	78
Figura 4.9 Distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) de un murete (ASTM E519) .....	79
Figura 4.10 Esfuerzos a tensión obtenidos computacionalmente (MEF) y analíticamente (NMX C464 y ASTM E519) .....	80

Figura 4.11 Distribución de esfuerzos en muretes de distinto tamaño que tienen un esfuerzo máximo a tensión ( $\sigma_{11}$ ) de $4.65 \text{ kg/cm}^2$ .....	81
Figura 5.1 Humedad vs resistencia a la compresión axial del CCA.....	82
Figura 5.2 Distribución de esfuerzos principales de los muretes.....	86
Figura 5.3 Patrón de agrietamiento para muretes con junta al centro .....	88
Figura 5.4 Patrón de agrietamiento para muretes sin junta al centro .....	88
Figura 5.5 Estado de esfuerzos a $45^\circ$ .....	89
Figura 5.6 Longitud del murete vs carga .....	90
Figura 5.7 Longitud del murete vs resistencia a la compresión diagonal.....	92
Figura 5.8 Distribución de esfuerzos de diferentes pruebas de tensión .....	95
Figura C.1 Agrietamiento Murete M1 120 .....	105
Figura C.2 Agrietamiento Murete M2 120 .....	105
Figura C.3 Agrietamiento Murete M1 60 .....	106
Figura C.4 Agrietamiento Murete M2 60 .....	106
Figura C.5 Agrietamiento Murete M3 60 .....	107
Figura C.6 Agrietamiento M4 60 .....	107
Figura C.7 Agrietamiento M5 60 .....	108
Figura D.1 Resultados ensaye a compresión diagonal Hernández (2015).....	109
Figura E.1 Resultados ensaye a compresión diagonal Hernández (2015) .....	110

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de los tipos de CCA examinados (Wittman y Gheorghita, 1983).....	30
Tabla 2.2 Energía de fractura del CCA .....	31
Tabla 3.1 Factores de corrección por relación de esbeltez para prismas de mampostería (ASTM-C-1314-14).....	51
Tabla 3.2 Factores de corrección por relación de esbeltez para prismas de mampostería (NMX-C-464-ONNCCE-2010) .....	51
Tabla 3.3 Modelos elásticos de ensayos a tensión .....	59
Tabla 3.4 Carga aplicada a los muretes.....	62
Tabla 4.1 Peso seco y densidad específica del CCA .....	64
Tabla 4.2 Resistencia a la compresión axial del CCA .....	65
Tabla 4.3 Resistencia a tensión del CCA .....	65
Tabla 4.4 Módulo de elasticidad del CCA .....	67
Tabla 4.5 Resistencia a compresión axial promedio y módulo de elasticidad de las pilas de mampostería .....	68
Tabla 4.7 Resistencia a la compresión diagonal de muretes de 120 cm .....	69
Tabla 4.8 Resistencia a la compresión diagonal de muretes de 60 cm .....	70
Tabla 4.8 Módulo de cortante muretes 120 cm NMX C464 .....	72
Tabla 4.9 Módulo de cortante muretes 60 cm NMX C464 .....	72
Tabla 4.10 Módulo de cortante muretes 120 cm ASTM E519 .....	73
Tabla 4.11 Módulo de cortante muretes 60 cm ASTM E519 .....	74
Tabla 4.12 Carga que produce un esfuerzo máximo de tensión en el centro de los muretes de 4.65 kg/cm <sup>2</sup> .....	81
Tabla 5.1 Comparación de los valores de $f_{tCCA}$ y $E_{CCA}$ analíticos (ACI) y experimentales	83

Tabla 5.2 Comparación de los resultados de ensayos a compresión de piezas y pilas de CCA .....	84
Tabla 5.3 Comparación de los esfuerzos principales máximos y la resistencia del CCA para los muretes ensayados .....	87
Tabla 5.4 Revisión de la aproximación de la ecuación.....	93
Tabla 5.5 Esfuerzos de tensión obtenidos con las ASTM y el MEF.....	95
Tabla A.1 Sistema de adquisición de datos .....	102
Tabla B.1 Contenido de humedad y resistencia a compresión axial del CCA .....	104

# INTRODUCCIÓN

## 1.1 Planteamiento del problema

El Concreto Celular de Autoclave (Autoclaved Aerated Concrete) es un material que se comenzó a utilizar en la década de 1920 en Suecia. Es un material ligero que se elabora con cemento, cal, arena, agua y aluminio; este último hace que la mezcla se expanda hasta 5 veces su volumen original. Es un material económico y sustentable debido a su bajo peso y a que es un buen aislante térmico y acústico. Su uso como sistema estructural es muy común en Estados Unidos y países de Europa. Su comercialización en México es reciente y su uso ha sido en elementos no estructurales. El Concreto Celular de Autoclave (CCA) se utiliza en la construcción como paneles prefabricados y bloques.

La mampostería confinada es uno de los sistemas estructurales más utilizados en México para estructuras de baja altura. Para su diseño estructural generalmente se utilizan las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Gobierno del Distrito Federal (GCM 2017). Este reglamento está basado en resultados experimentales que consideran las piezas típicamente usadas en México: tabiques huecos y sólidos de arcilla y bloques huecos de concreto. Se visualiza la oportunidad de construir muros confinados con piezas de CCA para un uso estructural, pero la normatividad actual no considera este tipo de material. Adicionalmente, se requiere profundizar en el conocimiento de las propiedades mecánicas del CCA, tales como: resistencia a la compresión axial, resistencia a la tensión y módulo de elasticidad.

Se han realizado estudios en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán en los que se han ensayado muros confinados de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles y carga axial constante. En estos estudios se ensayaron 7 muros, 3 para conocer el comportamiento dominado por flexión y 4 por cortante (Chim 2017; Alcocer 2017; Ricalde 2017). Se observó que los muros confinados de CCA se comportan como un solo panel, de tal manera que no existe agrietamiento en las juntas de mortero de pared delgada. Esta es una observación importante, ya que en la mampostería se ensayan pilas y muretes para conocer su comportamiento. En este sentido surge la pregunta ¿se requieren ensayar pilas y muretes de CCA?; esto es, ¿los parámetros obtenidos de pilas y muretes son diferentes a los obtenidos de las piezas?

Por otra parte, el Método del Elemento Finito (MEF) es una herramienta de análisis que permite obtener soluciones aproximadas de modelos matemáticos. Los modelos computacionales basados en el MEF son un medio para analizar el comportamiento mecánico de las estructuras, tanto en el rango elástico-lineal, como en el no lineal. Contar con modelos computacionales calibrados y confiables son de gran utilidad para entender los fenómenos y reproducir condiciones no consideradas en los ensayos experimentales, lo que permite obtener un ahorro económico y en tiempo con respecto a la experimentación. Adicionalmente, un modelo computacional preciso es posible únicamente si se tiene la información detallada de las propiedades mecánicas de los materiales.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Analizar las propiedades mecánicas del Concreto Celular de Autoclave mediante ensayos experimentales y modelos del Método de Elemento Finito.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Determinar experimentalmente las propiedades mecánicas del CCA.
- Determinar experimentalmente las propiedades mecánicas de la mampostería de CCA.
- Desarrollar modelos del MEF de diferentes pruebas a tensión para analizar la resistencia de piezas y de la mampostería.

## **1.3 Alcance de la tesis**

Este proyecto de investigación se limita únicamente a piezas pertenecientes a un lote con una resistencia a la compresión axial de 53.86 kg/cm<sup>2</sup>. Se estudia el comportamiento mecánico del CCA y de la mampostería de CCA.

Este trabajo de tesis es parte del proyecto de investigación titulado “Muros confinados de concreto celular de autoclave sujetos a cargas laterales”, el cual es financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

## **1.4 Contenido**

Este trabajo cuenta con seis capítulos, organizados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Se presenta una introducción a la problemática que se atiende en esta investigación, el objetivo general, los objetivos específicos y el alcance de este trabajo.

Capítulo 2. Se presenta la revisión de literatura sobre el CCA, las propiedades mecánicas como material y mampostería. De igual manera, se presentan las normas para obtener dichas propiedades y los trabajos de investigación realizados sobre las propiedades del CCA.

Capítulo 3. Se presenta la metodología utilizada para la realización de los ensayos de las propiedades mecánicas del CCA y de la mampostería de CCA. Así como las características de los modelos del MEF utilizadas para analizar los ensayos de tensión de los materiales.

Capítulo 4. Se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de las propiedades mecánicas del CCA y de la mampostería de CCA, así como las distribuciones de esfuerzos obtenidas de los modelos de MEF.

Capítulo 5. Se presenta el análisis y la interpretación de los resultados experimentales obtenidos. Se comparan los resultados experimentales con las ecuaciones del ACI. Se desarrolló una ecuación para obtener la resistencia a compresión diagonal de los muretes y se compara con los resultados experimentales.

Capítulo 6. Se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación.

## 2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

Se realizó una revisión de la literatura sobre las propiedades básicas del CCA, los conceptos básicos de la mecánica de la fractura, la modelación por el método de elemento finito y el software DIANA FEA.

### 2.1 Concreto Celular de Autoclave

El Concreto Celular de Autoclave es un tipo de concreto que se desarrolló en 1924 en Suiza. Los materiales usados en la fabricación del CCA son cemento, cal, agua, polvo y aluminio. La arena es mezclada con los demás materiales hasta formar una masa que es vertida en moldes en donde ocurre la reacción química entre el aluminio y el hidróxido de calcio, que provoca la expansión del material mediante la aparición de pequeñas burbujas de hidrógeno en la mezcla; esta expansión ocasiona que sea un material muy ligero. Posteriormente, se deja curar durante 45 minutos mientras el material se solidifica. Después de este tiempo el material es sólido, pero permanece blando, lo cual permite que se corte en las piezas deseadas y se colocan en un horno de autoclave durante 12 horas a una temperatura de 180°C y a una presión de 12 kg/cm<sup>2</sup>. El CCA se produce en clases 2, 4 y 6, con resistencias a compresión axial de entre 20 kg/cm<sup>2</sup>, 40 kg/cm<sup>2</sup> y 60 kg/cm<sup>2</sup>, y densidades entre 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup> y 700 kg/m<sup>3</sup> respectivamente (ASTM C1693, 2011).

El uso del CCA ha ido en aumento a lo largo del tiempo, de tal suerte que actualmente es utilizado en países como Alemania, Francia, Inglaterra, Holanda, Portugal, China, Estados Unidos de América y México. El uso en México se ha extendido a Ciudad de México, Estado de México, Guanajuato, Nuevo León, Puebla y Yucatán.

### **2.1.1 Densidad y contenido de humedad**

El porcentaje de absorción del CCA está determinado directamente por la alta porosidad presente en el material. La absorción se da en 2 secciones principalmente: el agua que se almacena en los microporos presentes en el CCA, así como en las zonas visibles de los macroporos.

Los parámetros para determinar la densidad del CCA están especificados por la norma ASTM C1693. La resistencia a la compresión y la conductividad térmica están fuertemente relacionadas con la densidad, la cual es controlada principalmente por el componente expansivo y la densidad de los propios materiales con los que el CCA está fabricado (Qu y Zhao, 2016).

### **2.1.2 Resistencia a la compresión axial**

La resistencia a la compresión axial ha sido utilizada como una medida de calidad del material y para predecir otras propiedades. Las propiedades del CCA a compresión están especificadas en la norma ASTM C1693. Su resistencia a compresión puede variar de 20 kg/cm<sup>2</sup> a 60 kg/cm<sup>2</sup>, dependiendo de la clase. Esta variación se debe a la formación de los poros a lo largo de todo el material. La resistencia a compresión es directamente proporcional a la densidad de la pieza e inversamente con su contenido de humedad (Narayanan, 2000).

Para determinar la resistencia a compresión se debe tomar el promedio del ensaye de al menos tres cubos de 100 mm de lado. Chim (2017) ensayó la resistencia a compresión axial del CCA clase 4 ( $f_{\text{CCA}}$ ) en donde obtuvo un valor promedio de 4.33 MPa con un coeficiente variación de 0.11.

Shabbar et al. (2017) estudiaron la influencia del contenido del aluminio en la resistencia a compresión. Concluyeron que la densidad y la porosidad son función de la cantidad de aluminio utilizada; mientras aumenta la cantidad de aluminio, la densidad y resistencia a compresión disminuyen.

Schober (2005) estudió la influencia de la porosidad en la resistencia a compresión del CCA y concluyó que la resistencia es mayor mejorando la distribución de los poros para evitar microagrietamientos entre ellos.

Qu y Zhao (2017) compararon los estudios de otros autores que relacionan la resistencia a compresión axial con la densidad del CCA. Concluyeron que el refinamiento de la distribución de poros aumenta la resistencia a la compresión axial. Asimismo, concluyeron que hay una relación lineal entre la resistencia a la compresión axial y la densidad (Figura 2.1).

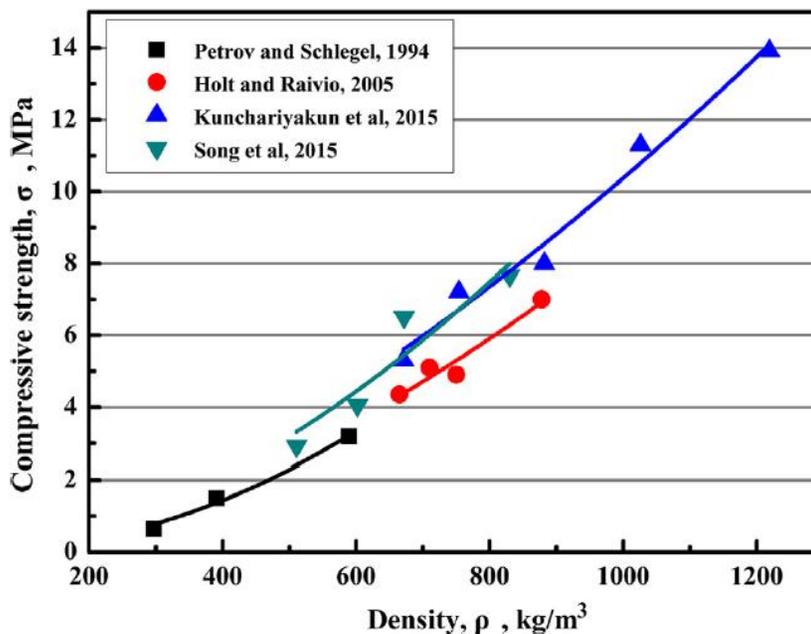


Figura 2.1 Relación lineal entre la resistencia a la compresión axial y la densidad del CCA (Qu y Zhao, 2017)

### 2.1.3 Resistencia a la tensión

Parker et al. (2007) evaluaron la resistencia a tensión del CCA experimental y analíticamente con el fin de correlacionar la resistencia a tensión con su resistencia a compresión, en donde se concluyó que la prueba ASTM C1006 debe ser el método principal para la determinación de la resistencia a tensión.

El ACI establece una ecuación que relaciona la resistencia a tensión en función de la resistencia a compresión es la siguiente:

$$f_{tCCA} = 0.1995\sqrt{f_{CCA}} \quad (2.1)$$

Donde  $f_{tCCA}$  es la resistencia a tensión del CCA en MPa y  $f_{CCA}$  la resistencia a compresión que debe ser mayor a 3.4 MPa.

Alcocer y Chim (2017) ensayaron 6 bloques de CCA clase 4 con dimensiones nominales de 150 cm x 200 cm x 610 cm (espesor x altura x longitud) en donde se obtuvo una resistencia a la tensión promedio de 0.38 MPa con un coeficiente de variación de 0.08.

Malyszko et. al (2017) estudiaron los mecanismos de falla de diferentes ensayos de tensión del CCA experimentalmente (Figura 2.2) y mediante simulaciones por el Método del Elemento Finito. Por último, estableció un nuevo método para obtener constantes elásticas del CCA y se concluyó que el método aproxima satisfactoriamente los valores de las constantes elásticas y se puede usar para la caracterización mecánica del CCA a tensión.

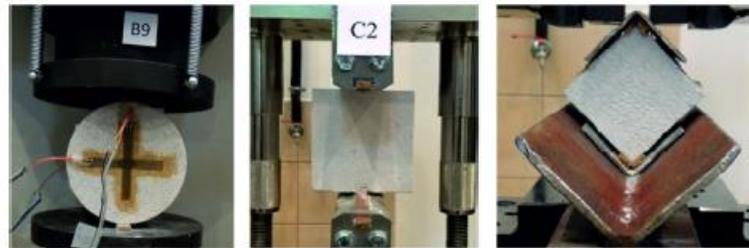


Figura 2.2 Ensayos de tensión estudiados por Malyszko et. al. (2017)

### 2.1.4 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del CCA normalmente es significativamente menor al del concreto normal. Puede variar de 10,000 kg/cm<sup>2</sup> a 80,000 kg/cm<sup>2</sup> de acuerdo con su clase. En la Universidad de Texas y la Universidad de Alabama en Birmingham se ensayaron 46 especímenes con el fin de encontrar la relación entre la resistencia a compresión axial y el módulo de elasticidad del CCA (Argudo, 2003). Se obtuvo la siguiente ecuación para un ajuste lineal:

$$E_{CCA} = 0.3f_{CCA} + 105 \quad (2.2)$$

Donde  $E_{CCA}$  es el módulo de elasticidad del CCA y  $f_{CCA}$  es la resistencia a compresión del CCA, ambos en psi.

El reglamento del ACI propone la siguiente ecuación para un ajuste no lineal (ACI 530-13):

$$E_{CCA} = 6500f_{CCA}^{0.6} \quad (2.3)$$

En donde  $E_{CCA}$  y  $f_{CCA}$  están en psi.

### 2.1.5 Resistencia a la Compresión Diagonal

La resistencia a la compresión diagonal de la mampostería ( $v_m$ ) se determina mediante la prueba de muretes de al menos una vez y media la longitud de la pieza y el número de hiladas necesario para que la altura sea aproximadamente igual a la longitud. Los muretes se ensayan sometidos a una carga de compresión monótona a lo largo de su diagonal y el esfuerzo cortante medio se determina dividiendo la carga máxima entre el área bruta del murete medida sobre la misma diagonal (Figura 2.3) (GCM, 2017). En otras referencias, la resistencia a la compresión diagonal puede ser llamada como “resistencia a la tensión diagonal” debido a que la aplicación de la carga a compresión provoca que se presente la falla a tensión a lo largo de la diagonal (Drysdale et al., 1999).

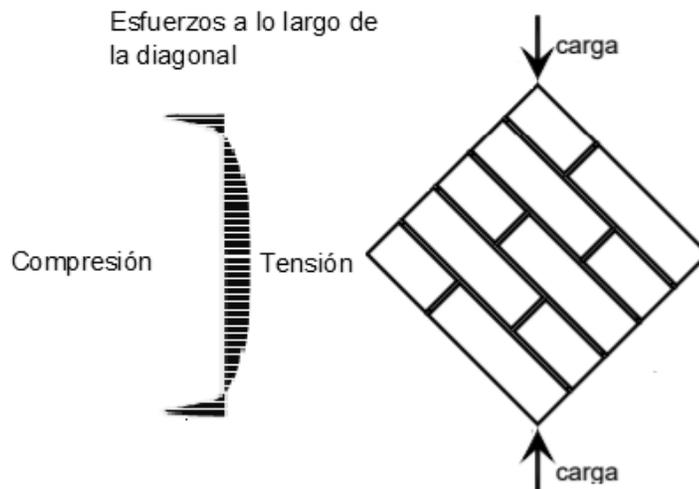


Figura 2.3 Resistencia a la tensión diagonal

En los ensayos a compresión diagonal se han observado tres diferentes tipos de falla (Figura 2.4) (Drysdale et al. 1999; Marín 2008):

- Falla por tensión diagonal en bloques: Se produce una grieta diagonal que atraviesa predominantemente las piezas, su trayectoria es aproximadamente recta.
- Falla por tensión diagonal en juntas de mortero. Se produce por la falla de la adherencia entre las piezas y el mortero, su trayectoria es en forma escalonada aproximadamente al centro del murete.
- Falla por deslizamiento. Se produce la falla por fricción entre las piezas y el mortero, produciéndose el desprendimiento de cualquier junta horizontal.

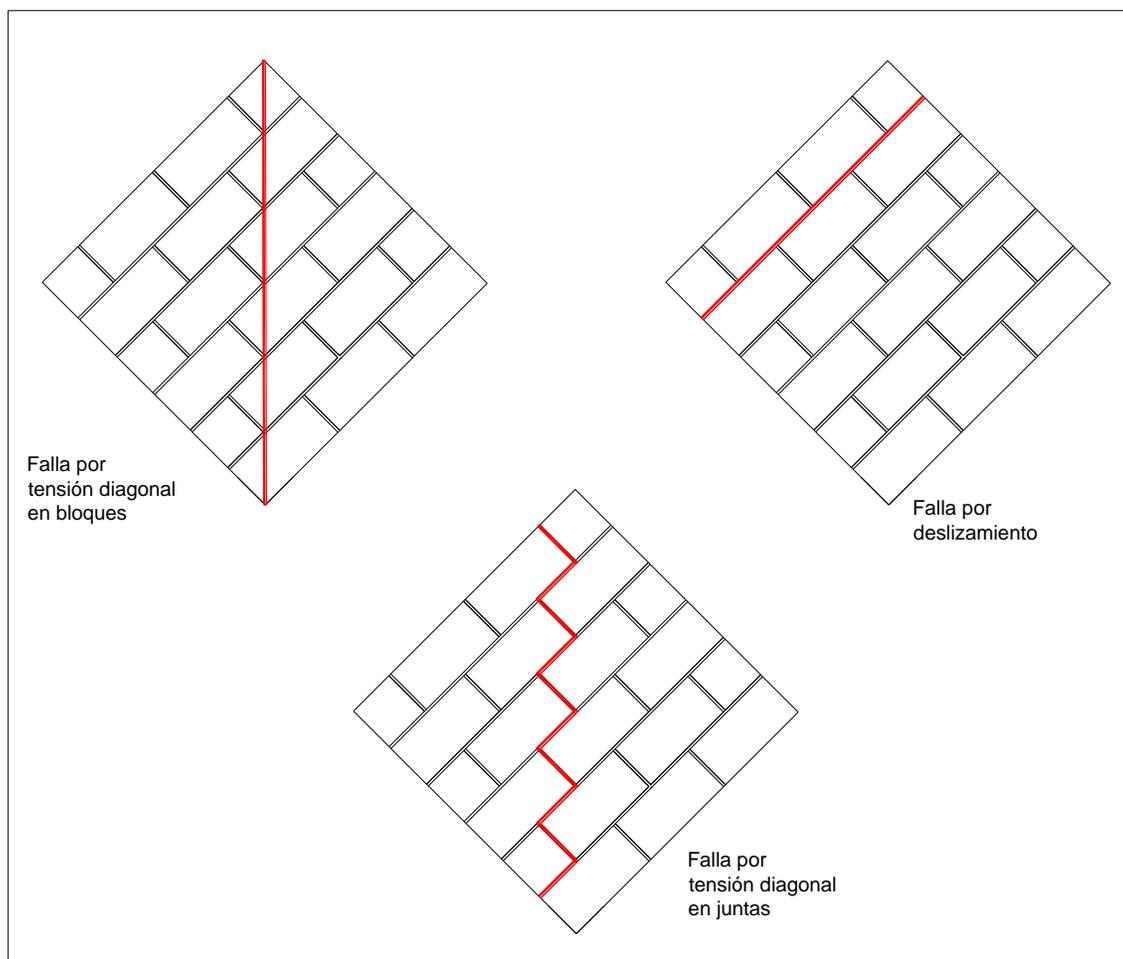


Figura 2.4 Tipos de falla

Marín (2008) observó que los principales modos de falla en los muretes de bloques huecos de concreto fueron dos: falla por tensión diagonal en juntas de mortero y falla por deslizamiento. Esto se debe a que en las juntas de mortero se presentan los esfuerzos principales. Esto lo llevó a concluir que la resistencia a compresión diagonal de la mampostería es función de la adherencia entre el mortero y el bloque.

Hernández (2015) realizó ensayos de compresión diagonal en 9 muretes de CCA-4 y 9 muretes de CCA-6. Las dimensiones de los muretes fueron de 100 cm x 100 cm x 15 cm (largo x alto x espesor). De los ensayos obtuvo una resistencia  $v_m$  promedio de 6.34 kg/cm<sup>2</sup> y 7.41 kg/cm<sup>2</sup> para CCA-4 y CCA-6, respectivamente. El tipo de falla observada fue en el panel de la mampostería, lo cual indicó que los muretes se comportan como un solo panel y que las juntas de mortero de pared delgada son más resistentes que las piezas de CCA.

Chim (2017) estableció una ecuación (Ecuación 2.4) que relaciona la resistencia a la compresión diagonal del CCA y la resistencia a tensión del CCA. Esta ecuación se obtuvo de datos de ensayos de muretes ensayados por Hernández (2015) y bloques de CCA-4. En esta ecuación se considera que la carga que produce la falla en ambos tipos de pruebas es la misma para especímenes del mismo tamaño.

$$v_m = \frac{\pi}{2} f_{tCCA} \quad (2.4)$$

Donde  $v_m$  es la resistencia a compresión diagonal del CCA y  $f_{tCCA}$  es la resistencia a tensión del CCA, ambos en kg/cm<sup>2</sup>.

### 2.1.6 Energía de agrietamiento

Se han ensayado tres diferentes tipos de concreto celular de autoclave para determinar la energía de fractura (Wittmann y Gheorghita, 1983). En la Tabla 2.1 se presentan las propiedades mecánicas de cada tipo de CCA. De estos ensayos se concluyó que la energía de fractura de CCA es un 10% del valor del concreto convencional. En la Tabla 2.2 se presentan los valores de energía de fractura ( $G_f$ ) de cada tipo de CCA ensayado.

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de los tipos de CCA examinados (Wittman y Gheorghita, 1983)

Tipo de material	Esfuerzo a compresión (N/mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo a tensión (N/mm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )
L	2.23	0.27	1200
N	3.12	0.43	1500
S	4.45	0.47	1700

Tabla 2.2 Energía de fractura del CCA

Tipo de Material	$G_f$ (N/mm)
Tipo L	6.07
Tipo N	7.83
Tipo S	10.17
Concreto normal	110

En las tablas 2.1 y 2.2, L, N y S son el tipo de material y corresponde a clase 2, 3 y 4, respectivamente. Por lo tanto, la energía de fractura para CCA clase 4 asociada a este estudio es de 10.17 N/mm (Wittmann y Gheorghita, 1983).

## 2.2 Mecánica de la fractura

La Mecánica de la fractura es una teoría que determina la falla del material mediante un criterio de energía en conjunto con el criterio de esfuerzo (Bazant y Planas, 1998). Es común que ciertos aspectos de la falla no puedan ser predichos por ensayos de laboratorio, sin embargo, se pueden explicar mediante la Mecánica de la Fractura. El análisis estructural basado en los principios de la Mecánica de la Fractura puede conducir a estimar mejor el tamaño de grieta y las deformaciones bajo cargas de servicio, los factores de seguridad bajo cargas últimas y la respuesta después de la falla durante el colapso (Gettu y Shah, 1994).

La Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL) considera que el proceso de fractura ocurre en una pequeña zona en el extremo de la grieta, permitiendo que el estado de esfuerzos en torno a ésta sea elevado y acepta que debiese ocurrir un comportamiento no lineal, pero dado que ocurre en una zona pequeña, sus efectos son despreciables. Estas simplificaciones hacen que el rango de aplicación de la MFEL sea limitado y que se necesiten otras aproximaciones para el estudio de otros casos (Pérez, 2015).

La MFEL identifica tres modos básicos en que puede producirse la deformación en un cuerpo agrietado (Figura 2.5):

- a) Modo I o de abertura. Las caras de la grieta se separan entre sí en dirección normal a éstas. Este modo se desarrolla ante esfuerzos de tensión.
- b) Modo II o de deslizamiento. Las caras de la grieta se deslizan una sobre otra. Este modo se desarrolla ante esfuerzos por cortante.
- c) Modo III o de torsión o de rasgado. Las caras de la grieta se deslizan lateralmente una con respecto a la otra. Este modo se desarrolla ante esfuerzos por cortantes.

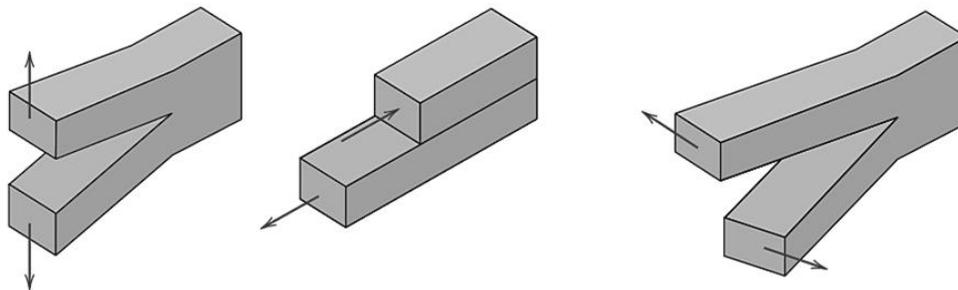


Figura 2.5 Modos de fractura

El comportamiento mecánico de las estructuras depende de las propiedades del material del que están hechas. Basados en su respuesta esfuerzo a tensión-deformación, la mayoría de los materiales utilizados en la ingeniería pueden ser categorizados en materiales frágiles, dúctiles o cuasi-frágiles (Shah et al. 1995) (Figura 2.6):

- a) Frágiles: Estos materiales se caracterizan por una rápida disminución de los esfuerzos cuando el material se ha fracturado. Por ejemplo, el cristal.
- b) Dúctil: Estos materiales se caracterizan por un comportamiento elasto-plástico después de haber alcanzado el esfuerzo máximo a tensión. Por ejemplo, el acero.
- c) Cuasifrágil: Estos materiales se caracterizan por un decremento gradual de los esfuerzos después de haberse alcanzado el esfuerzo máximo a tensión. Por ejemplo, el concreto.

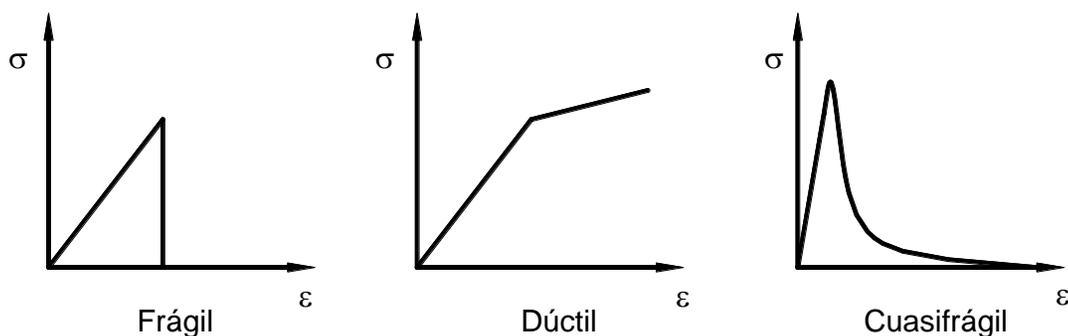


Figura 2.6 Clasificación de los materiales de acuerdo con su respuesta

### **2.3 Modelación de la mampostería con el MEF**

Lourenço y Rots (1997) desarrollaron un modelo de interfaz con múltiples superficies de plasticidad para analizar muros mampostería sujetos a cargas laterales en el plano. El modelo fue comparado con ensayos de cinco muros de mampostería de 100 x 100 cm a base de tabiques sólidos de arcilla de 10 cm de espesor, los cuales fueron sometidos a cargas laterales en el plano en combinación con carga axial. Dos muros fueron construidos con una abertura al centro y los otros tres fueron sólidos con variaciones en la carga axial. En los modelos de elementos finitos usaron elementos cuadriláteros de esfuerzo plano de 8 nodos y 2 grados de libertad por nodo para los tabiques, así como elementos lineales de interfaz de 6 nodos y 2 grados de libertad para las juntas de mortero. El tamaño de los elementos fue de aproximadamente 50 y 25 mm. Se concluyó que los resultados numéricos aproximaron adecuadamente los experimentales.

Lourenço et al. (1998) desarrollaron un modelo anisotrópico continuo para aproximar el comportamiento de muros de mampostería ante cargas en el plano. El modelo constitutivo de los muros fue de plasticidad y se seleccionaron dos criterios de falla; el primero fue para un comportamiento dúctil y el segundo para un comportamiento frágil. Los resultados fueron comparados con resultados experimentales de nueve muros de mampostería sujetos a cargas en el plano en combinación con carga axial. Los muros se construyeron a base de bloques huecos de concreto de 200 cm de altura, 360 cm de ancho y 15 cm de espesor. En el modelo de elementos finitos usaron elementos cuadriláteros de esfuerzo plano de 4 nodos y 2 grados de libertad por nodo para la mampostería, así como elementos triangulares de esfuerzo plano de 3 nodos y 2

grados de libertad por nodo para los castillos de los muros. El tamaño de los elementos finitos de la mampostería fue de  $24 \times 15$  y el de los flancos de los muros de  $2 \times 15$ . Se concluyó que el modelo fue capaz de predecir el comportamiento de la mampostería con los dos criterios planteados y tuvo una buena aproximación para las cargas de falla.

Janaraj y Dhanasekar (2014) desarrollaron un modelo anisotrópico continuo para aproximar el comportamiento a cortante en el plano de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto. Los resultados fueron comparados con resultados experimentales de 2 muretes de mampostería confinada y 2 muretes de mampostería no confinada. Los muretes se construyeron con bloques huecos de concreto de 2 celdas. Los muretes no confinados se reforzaron con mortero expansivo en las celdas de los extremos. En el modelo de elementos finitos usaron elementos cuadriláteros de esfuerzo plano de 4 nodos y 2 grados de libertad por nodo para la mampostería. El acero de refuerzo se modeló como un elemento armadura embebido en el mortero. Los resultados del modelo coincidieron en buena medida con los resultados experimentales. Compararon los resultados con ecuaciones empíricas para el cortante en el plano obtenidas de la literatura. En general encontraron buena coincidencia. Concluyeron que el macro modelo de elemento finito usado es efectivo para determinar resistencia a cortante, el modo de falla y la deformación característica de los muretes.

## **2.4 Modelación del CCA con el MEF**

Al-Kashif et al. (2012) estudiaron el comportamiento de paneles de CCA sometidos a tensión mediante un análisis no lineal de elemento finito y los comparó con estudios experimentales. Se utilizó un modelo tridimensional con elementos sólidos con 8 nodos

y 3 grados de libertad por nodo. Se utilizó un modelo distribuido para modelar el acero de refuerzo y las conexiones a cortante del panel. Se concluyó que el modelo por elemento finito aproximaba correctamente los resultados experimentales, indicando que el modelo era adecuado para estimar la resistencia de los paneles de CCA.

Parker et al. (2007) estudiaron la falla a tensión del CCA mediante ensayos experimentales y modelos de elemento finito. Se compararon los resultados experimentales con las ecuaciones propuestas en las ASTM C1006, ASTM C496 y ASTM E519. Se concluyó que la norma ASTM C1006 es la más recomendada como el método primario para determinar la resistencia a tensión.

Koudelka et al. (2015) estudiaron el acortamiento hidro-térmico del CCA mediante ensayos experimentales y modelos de elemento finito con el fin de encontrar un coeficiente hídrico de acortamiento. Se concluyó que el coeficiente no es constante y que es necesario realizar análisis no lineales para describir el comportamiento del CCA.

Ferretti et al. (2015) modelaron el desarrollo del agrietamiento en vigas de CCA mediante ensayos experimentales y mediante modelos del Método del Elemento Finito. Se concluyó que las propiedades mecánicas obtenidas en especímenes estándares son representativas para el comportamiento de muros de escala real. De igual manera, se calibró una ley exponencial que establece el patrón de agrietamiento de los modelos.

## 2.5 DIANA

El programa de cómputo Displacement Analyzer (DIANA) es un código de elementos finitos desarrollado especialmente para la realización de análisis de ingeniería civil y geotecnia (Piekarczyk et al., 2000). Es capaz de resolver problemas singulares de ingeniería con sus avanzadas capacidades de modelización y análisis. Tiene una gran variedad de modelos de materiales, tipos de elementos y procedimientos de análisis. Presenta un entorno gráfico para el preproceso y postproceso de modelos de elementos finitos. En esta sección se presentan las características de elementos usados en la modelación del agrietamiento de la mampostería en el plano.

### Elementos de esfuerzo plano

Los elementos de esfuerzo plano son aquellos que generalmente tienen un espesor pequeño, en comparación a las dimensiones del elemento. Se caracterizan por tener esfuerzos normales perpendiculares al plano iguales a cero ( $\sigma_{zz} = 0$ ). En DIANA (TNO, 2017) los elementos isoparamétricos cuadriláteros de esfuerzo plano de 4 nodos se denominan Q8MEM (Figura 2.7). El elemento se basa en interpolación lineal y tiene un esquema de integración de Gauss de 2x2. El campo de desplazamientos  $u, v$  correspondientes a los desplazamientos en las direcciones  $x, y$ , respectivamente, se aproximan en función de las coordenadas naturales  $\xi, \eta$ . La aproximación del campo de desplazamientos se expresa como:

$$u = \alpha_1 + \alpha_2\xi + \alpha_3\eta + \alpha_4\xi\eta \quad (2.5)$$

$$v = \beta_1 + \beta_2\xi + \beta_3\eta + \beta_4\xi\eta \quad (2.6)$$

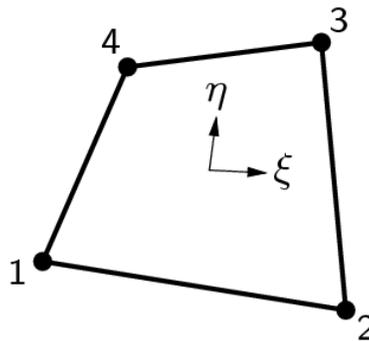


Figura 2.7 Elemento Q8MEM

## 2.6 Conclusiones de la revisión de la literatura

Con base en la revisión de la literatura presentada anteriormente se concluye que el CCA es un material cuya resistencia a la compresión depende directamente de su densidad. La densidad está estrechamente relacionada con las propiedades térmicas y aislantes del CCA. En México se manejan comúnmente 3 clases de CCA con diferentes densidades y resistencia a compresión.

La resistencia a compresión diagonal de la mampostería es función de la adherencia entre el mortero y el bloque. Se ha observado que el mortero de pared delgada es más resistente que el utilizado en otros tipos de mampostería y que esto permite que los paneles de mampostería con CCA se comporten como un solo material, ya que no se han observado agrietamientos en las juntas.

Las normas mexicanas no consideran piezas de CCA y no se cuentan con ecuaciones para el diseño de muros de mampostería con este material.

El programa DIANA FEA es capaz de modelar elementos y sistemas estructurales mediante modelos elásticos y no lineales.

### **3 METODOLOGÍA**

#### **3.1 Descripción general**

El objetivo del trabajo es analizar las propiedades mecánicas del concreto celular de autoclave mediante ensayos experimentales y modelos del Método de Elemento Finito.

Para alcanzar el objetivo de este trabajo se desarrollaron las siguientes actividades:

1. Obtención de las propiedades mecánicas del CCA.
  - 1.1 Densidad y contenido de humedad.
  - 1.2 Resistencia a compresión axial
  - 1.3 Resistencia a tensión
  - 1.4 Módulo de elasticidad
2. Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de CCA.
  - 2.1 Resistencia a compresión axial
  - 2.2 Módulo de elasticidad
  - 2.3 Resistencia a compresión diagonal
  - 2.4 Módulo de cortante
3. Desarrollo de modelos elásticos del MEF para diferentes pruebas a tensión.
  - 3.1 Cilindro - ASTM C496
  - 3.2 Bloque - ASTM C1006
  - 3.3 Murete - ASTM E519

#### 4. Análisis de propiedades mecánicas mediante el MEF

##### 4.1 Modelos elásticos de pruebas a tensión con la misma altura

##### 4.2 Modelos de muretes a tensión

### 3.2 Obtención de las propiedades mecánicas del CCA

#### 3.2.1 Densidad y contenido de humedad

Se midieron, pesaron y secaron 6 cubos de 10 cm (Figura 3.1) con el fin de determinar su densidad conforme a la norma ASTM C-1693-11. Después, se secaron 3 cubos de 10 cm hasta que su contenido de humedad se encontrara entre el 5 y 15%.



Figura 3.1 Secado de cubos de CCA

#### 3.2.2 Resistencia a compresión axial

La resistencia a compresión axial del CCA se determinó con base en la norma ASTM C1693-11. Se ensayaron seis cubos de 10 cm por lado. Se obtuvieron 3 cubos de 10 cm x 10 cm x 10 cm de cada tercio del bloque y se secaron hasta tener un contenido de humedad entre el 5 y 15% (Figura 3.2). El ensaye a compresión axial de

los cubos se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. En el Apéndice B se reportan los resultados de ensayos a compresión con otros contenidos de humedad.



Figura 3.2 Determinación del peso húmedo

Se realizó el cabeceo en las dos caras perpendiculares a la dirección de crecimiento de la mezcla de CCA con mortero de azufre para garantizar una superficie plana y nivelada en la zona de aplicación de carga (Figura 3.3).



Figura 3.3 Cabeceo del espécimen

Se colocó en la máquina universal SATEC revisando la nivelación de todo el sistema y se aplicó la carga a 2000 kg/min (Figura 3.4). A manera de respaldo, para registrar la carga se utilizó una celda de carga de dona de 22.7 ton marca Futek.



Figura 3.4 Aplicación de la carga a compresión

### **3.2.3 Resistencia a tensión**

La resistencia a tensión del CCA se determinó con base en la norma ASTM C1006-01. Se ensayaron 6 bloques de CCA con dimensiones nominales de 150 cm x 200 cm x 610 cm (espesor x altura x longitud). El ensaye a tensión se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton (Figura 3.5). Las cargas se validaron mediante la utilización de una celda de carga tipo dona marca Futek y de 25.7 ton de capacidad, la cual se conectó a un sistema de adquisición de datos que se describe en el Apéndice A.

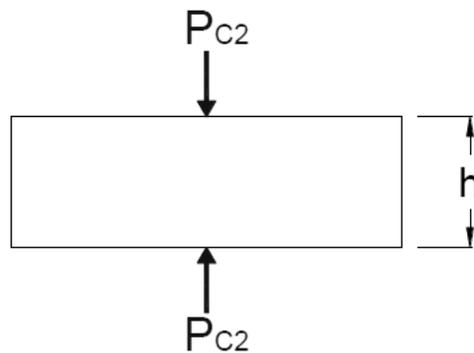


Figura 3.5 Esquema del ensaye a tensión de un bloque de CCA

Las normas ASTM no establecen un límite de contenido de humedad para el ensaye a tensión. Sin embargo, en este trabajo las piezas se secaron hasta obtener un contenido de humedad de entre 5 y 15% para que exista una correspondencia a la prueba de compresión axial (Figura 3.6).



Figura 3.6 Determinación del contenido de humedad de la pieza

Se colocó la barra inferior centrada en la máquina universal y se colocaron dos topes de madera a sus costados para evitar cualquier desplazamiento (Figura 3.7). El bloque

se colocó centrado y nivelado con ayuda de esponjas en los bordes. Se colocó una celda de carga tipo dona marca de 22.7 ton de capacidad para validar los resultados. La carga se aplicó a una velocidad constante como establece la norma ASTM C1006-01.



Figura 3.7 Ensayo a tensión de bloques de CCA

La resistencia a tensión se calculó con la Ecuación 3.1:

$$f_{tcca} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot H} \quad (3.1)$$

Donde:

$f_{tcca}$  es la resistencia a tensión del CCA

P es la carga máxima aplicada

t es el espesor del bloque

H es la altura del bloque

### 3.2.4 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad se determinó con base en la norma ASTM C1693-09. Se ensayaron 3 prismas rectangulares de 10 cm x 10 cm x 20 cm (espesor x altura x longitud). Los prismas se obtuvieron como especifica la norma (Figura 3.8).

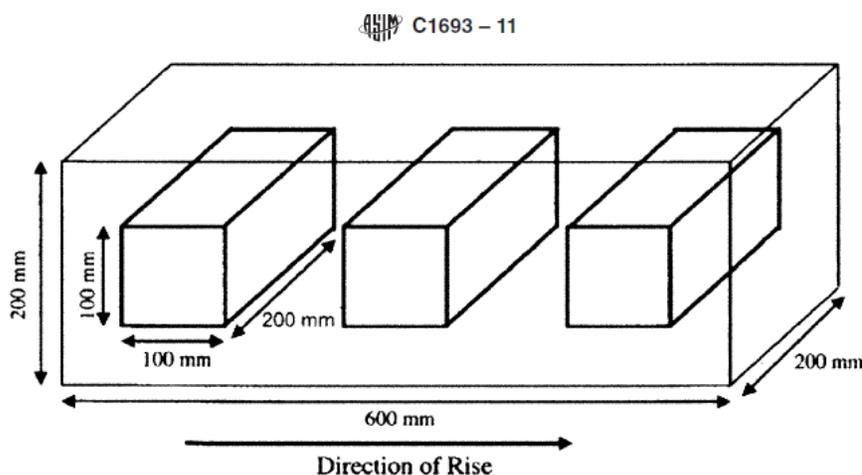


Figura 3.8 Obtención de prismas de CCA

Para medir los desplazamientos se colocaron potenciómetros lineales de 12 mm en dos caras paralelas del espécimen. Los potenciómetros estaban soportados por un marco de aluminio apoyado en dichas caras a una distancia de 10 cm (Figura 3.9).

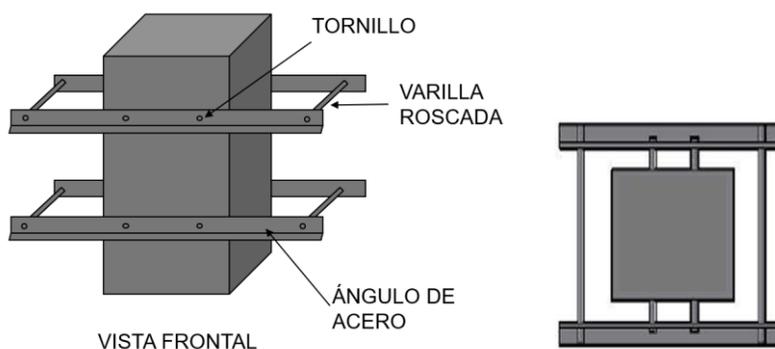


Figura 3.9 Marco de soporte de la instrumentación

Se secaron los prismas hasta obtener porcentajes de humedad entre 5 y 15% (Figura 3.10).



Figura 3.10 Determinación del peso húmedo del espécimen

Se realizó el cabeceo de las caras de 10 x 10 cm con mortero de azufre para garantizar una superficie plana y nivelada en la zona de aplicación de carga. Posteriormente, se colocó en la máquina universal verificando que la carga se aplique centrada y que el sistema de medición de desplazamientos esté nivelado (Figura 3.11). La magnitud de la carga se validó mediante un sistema de adquisición de datos. La carga se aplicó de acuerdo con la norma ASTM C1693-09.



Figura 3.11 Sistema para el ensaye de módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad se determinó con la Ecuación 3.2:

$$E_{cca} = \frac{f_b - f_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (3.2)$$

Donde:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_a + \Delta_b}{L_m} \quad (3.3)$$

$\Delta_a$  y  $\Delta_b$  son el acortamiento en 2 potenciómetros

$L_m$  es la longitud calibrada (10 cm)

$\varepsilon_a$  es la deformación unitaria calculada en  $0.05f'_{cca}$

$\varepsilon_b$  es la deformación unitaria calculada en  $0.33f'_{cca}$

$f_a$  es el 5% de la resistencia máxima

$f_b$  es el 30% de la resistencia máxima

### **3.3 Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de CCA**

#### **3.3.1 Resistencia a compresión axial y módulo de elasticidad de la mampostería**

La resistencia a compresión axial de los muros de mampostería se obtuvo de pruebas de pilas de 15 x 60.8 x 39.5 cm (espesor x altura x longitud) de acuerdo con las recomendaciones especificadas en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal-2017 (GCM, 2017), la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 y la norma ASTM-C-1314-14.

Las pilas de mampostería fueron ensayadas en el marco de carga metálico del Laboratorio de Estructuras y Materiales de la FIUADY. Las cargas se aplicaron mediante un actuador hidráulico con una capacidad de 100 toneladas. Las cargas se obtuvieron utilizando una celda de carga con una capacidad de 100 toneladas. Para obtener las deformaciones axiales de las pilas de mampostería se colocaron dos potenciómetros lineales, marca ETI, modelo LCP12S-25, de 1.2 cm de longitud. La adquisición de datos se realizó utilizando un equipo de marca "National Instruments", el cual se describe en el Apéndice A.

El procedimiento general utilizado para el ensaye de las pilas de mampostería fue el siguiente:

1. Se midieron las dimensiones de las caras de la pila (Altura (h), Ancho (B) y Largo (C)). Todas las dimensiones de las pilas se registraron en formatos previamente preparados.
2. Se cabecearon los extremos superiores e inferiores de las pilas con una pasta de azufre con resistencia mínima a la compresión de 350 kg/cm<sup>2</sup> para obtener dos superficies planas y niveladas.
3. Se alinearon las pilas para la aplicación de las cargas axiales (Figura 3.12) y se colocaron los sensores de desplazamientos en un sistema de instrumentación a base de ángulos de aluminio previamente pegados a los bloques de las pilas.

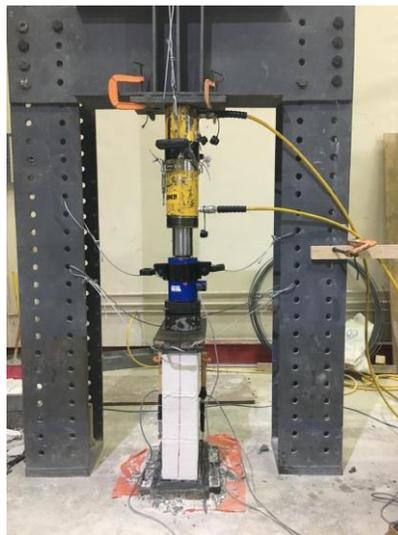


Figura 3.12 Vista frontal del ensayo a compresión axial de la mampostería

4. La celda de carga y los potenciómetros lineales fueron conectados al sistema de adquisición de datos previamente descrito (Figura 3.13).



Figura 3.13 Sistema de instrumentación del ensaye a compresión axial de las pilas de mampostería

5. Se aplicó la carga tratando de tener una velocidad uniforme y continua, sin producir impacto ni pérdida de carga. La primera mitad de la carga se aplicó a una velocidad conveniente y la segunda mitad tratando de llegar a la falla en un rango de 2 a 3 minutos, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM-C1314-14 y la NMX-C-464-ONNCCE-2010.

La resistencia a compresión axial de la mampostería se determinó con la Ecuación 3.4:

$$f_{mcca} = \frac{P_{max}}{A_n} \quad (3.4)$$

Donde:

$f_{mcca}$  es la resistencia a compresión axial

$P_{max}$  es la carga máxima

$A_n$  es el área neta de la cara donde se aplicó la carga

De acuerdo con la norma ASTM-1314-14 se debe aplicar un factor de corrección con base en la proporción  $h_p/t_p$  usando la altura máxima y la menor dimensión de la pila.

El factor de corrección se determina con base en la Tabla 3.1 (ASTM-C1314-14).

Tabla 3.1 Factores de corrección por relación de esbeltez para prismas de mampostería (ASTM-C-1314-14)

$h_p/t_p$	1.3	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
Factor de corrección	0.75	0.86	1.0	1.04	1.07	1.15	1.22

El factor de corrección para este trabajo fue de 1.15 para la ASTM-1314-14.

De acuerdo con la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 se debe aplicar un factor de corrección con base en la proporción  $h_p/t_p$  usando la altura máxima y el espesor de la pila. El factor de corrección se determina con base en la Tabla 3.2 (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

Tabla 3.2 Factores de corrección por relación de esbeltez para prismas de mampostería (NMX-C-464-ONNCCE-2010)

$h_p/t_p$	2	3	4	5
Factor de corrección	0.75	0.90	1.00	1.05

El factor de corrección para este trabajo fue de 1.00 para la NMX-C464-ONNCCE-2010.

El módulo de elasticidad se calculó de acuerdo con la norma ASTM-C1314-14 y la NMX-C-464-ONNCCE-2010 (Ecuación 3.5):

$$E_{mCCA} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (3.5)$$

Donde:

$E_{mCCA}$  es el módulo de elasticidad de la mampostería

$\sigma_1$  es el esfuerzo axial correspondiente a 0.00005 de deformación

$\sigma_2$  es el esfuerzo axial correspondiente al 40% de la carga máxima

$\varepsilon_2$  es la deformación producida por el esfuerzo  $\sigma_2$

La deformación se calculó con la Ecuación 3.6:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_0} \quad (3.6)$$

Donde:

$\delta$  es el acortamiento medido a lo largo de la longitud calibrada (40 cm)

$l_0$  es la longitud calibrada medida entre apoyos de potenciómetros

### **3.3.2 Compresión diagonal y módulo de cortante de la mampostería**

Para llevar a cabo esta investigación se realizaron dos series de pruebas experimentales. La primera parte consistió en ensayar dos muretes de acuerdo con la norma ASTM E 519 (Figura 3.14). Estos muretes tuvieron una dimensión de 120 cm x 120 cm. Con base en los resultados obtenido de estas pruebas, se diseñó la segunda serie de pruebas que consistió en ensayar 5 muretes de 60 cm x 60 cm. Todos los

especímenes fueron construidos con bloques de CCA unidos con mortero de pared delgada. Los acortamientos y alargamientos diagonales de los muretes se midieron utilizando potenciómetros lineales de 50 mm de capacidad. Ambos se midieron sobre la longitud de la diagonal, en dos direcciones ortogonales y en ambas caras de los muretes.

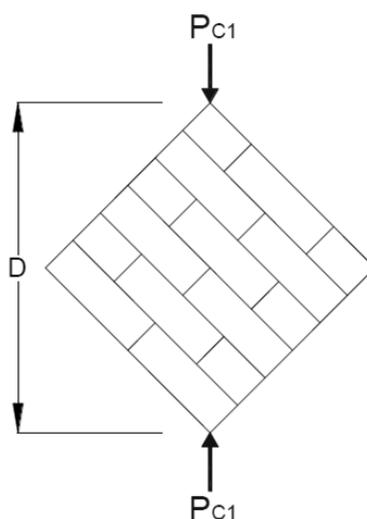


Figura 3.14 Esquema del ensayo a compresión diagonal de un murete de CCA

Las cargas se aplicaron mediante un actuador hidráulico marca ENERPAC con una capacidad de 30 toneladas, un compresor de aire y una bomba hidráulica. Para poder aplicar la carga en el murete, se utilizaron cabezales metálicos de acuerdo a la norma ASTM E519 (Figura 3.15). Las cargas se obtuvieron utilizando una celda de carga, marca LEBOW, modelo 3674-50K, con una capacidad de 22.68 toneladas. Se utilizó un transductor de presión, marca SENSOTEC, modelo 060-2345-16 LM, con una capacidad de 10,000 psi, el cual permitió verificar las lecturas de la celda de carga. La adquisición de datos se realizó utilizando un equipo marca National Instruments, como se describe en el Apéndice A.

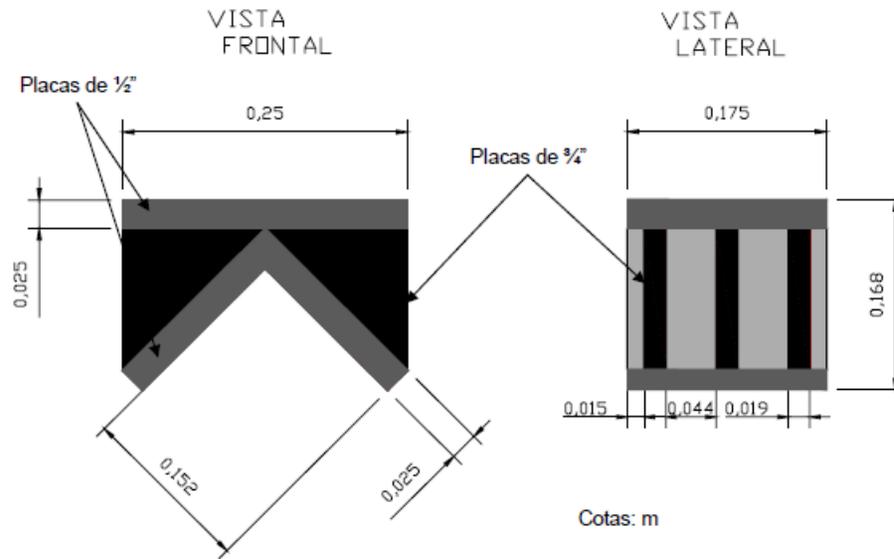


Figura 3.15 Cabezales metálicos

La resistencia a compresión diagonal del murete se calculó dividiendo la carga máxima entre el área bruta del murete medida antes de la prueba sobre la diagonal a compresión, (Ecuación 3.7). El área se obtuvo como el producto del espesor del murete,  $t$ , y la longitud de la diagonal a compresión,  $L_c$  (Figura 3.16).

$$v_m = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.7)$$

Donde:

$v_m$  es la resistencia a compresión diagonal

$P_{max}$  es la carga máxima

$A$  es el área transversal de la diagonal

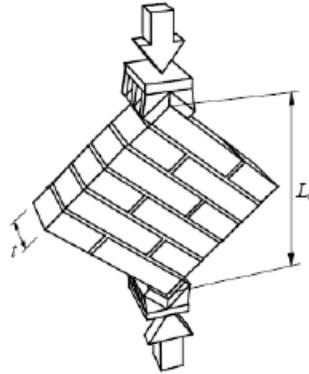


Figura 3.16 Obtención de la resistencia a compresión diagonal

Para el cálculo del módulo de cortante se consideraron las normas mexicanas y las estadounidenses. Para las primeras, se calculó el módulo de cortante conforme a la NMX-C-464-ONNCCE-2010 con la Ecuación (3.8):

$$G_m = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005} \quad (3.8)$$

Donde:

$G_m$  es la rigidez secante a cortante;

$\tau_1$  es el esfuerzo cortante correspondiente a 0.00005 de deformación angular;

$\tau_2$  es el esfuerzo cortante correspondiente a 40% de la carga máxima. Los esfuerzos cortantes se calculan dividiendo la carga aplicada entre el área ( $P/A$ );

$\gamma_2$  es la deformación angular producida por el esfuerzo  $\tau_2$ .

La deformación angular se calcula como:

$$\gamma = |\varepsilon_c| + |\varepsilon_t| \quad (3.9)$$

Donde:

$$\varepsilon_c = \frac{\delta_c}{l_{o_c}} \quad y \quad \varepsilon_t = \frac{\delta_t}{l_{o_t}} \quad (3.10)$$

$\varepsilon_c$  es la deformación unitaria de la diagonal a compresión;

$\varepsilon_t$  es la deformación unitaria de la diagonal a tensión;

$\delta_c$  es la deformación (acortamiento) medida sobre la longitud calibrada de la diagonal a compresión;

$\delta_t$  es la deformación (alargamiento) medida sobre la longitud calibrada de la diagonal a tensión;

$l_{o_c}$  es la longitud calibrada, medida antes de la prueba, de la diagonal a compresión entre apoyos de potenciómetros (45 cm para muretes de 120 cm y 25 cm para muretes de 60 cm); y

$l_{o_t}$  es la longitud calibrada, medida antes de la prueba, de la diagonal a tensión entre apoyos de potenciómetros (45 cm para muretes de 120 cm y 25 cm para muretes de 60 cm) (Figura 3.17).

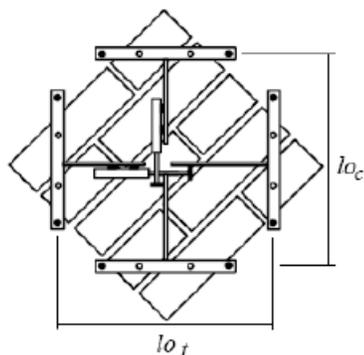


Figura 3.17 Obtención del módulo de cortante

Adicionalmente, se calculó el módulo de cortante (G) conforme la norma ASTM-E519-00 con la Ecuación (3.11):

$$S_s = \frac{0.707P}{A_n} \quad (3.11)$$

Donde:

$S_s$  es el esfuerzo cortante sobre el área neta;

P es la carga máxima aplicada;

$A_n$  es el área neta del espécimen y se calcula:

$$A_n = \left( \frac{W + h}{2} \right) tn \quad (3.12)$$

Donde:

W es la base del espécimen;

h es la altura del espécimen;

t es el espesor del espécimen;

n es el porcentaje del área gruesa de la pieza que es sólida, se expresa en decimales.

El módulo de cortante (G) se calcula con la ecuación (3.13):

$$G = \frac{S_s}{\gamma} \quad (3.13)$$

Donde:

$\gamma$  es la deformación angular y se calcula:

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad (3.14)$$

Donde:

$\Delta V$  es la deformación (acortamiento) vertical;

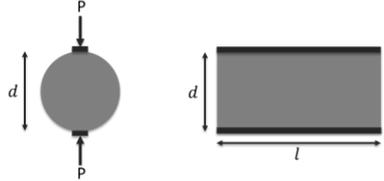
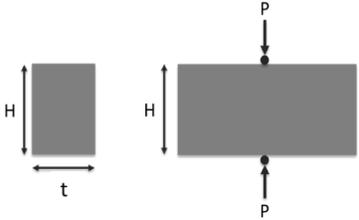
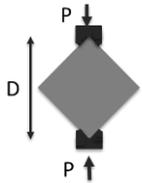
$\Delta H$  es la deformación (alargamiento) horizontal;

$g$  es la longitud vertical calibrada.

### **3.4 Desarrollo de modelos elásticos de elemento finito de pruebas a tensión con la misma altura**

Con el objetivo de comparar la distribución de esfuerzos de diferentes métodos de ensayo para determinar la resistencia a tensión, se desarrollaron modelos de elementos finitos. Se modelaron tres ensayos a tensión correspondientes a diferentes normas bajo las mismas condiciones. En la Tabla 3.3 se presentan los modelos correspondientes a las normas ASTM C496, ASTM C1006 y ASTM E519, que corresponden al ensaye de un cilindro, un prisma y un murete, respectivamente. Para cada uno de los modelos se indica la ecuación con la que se calcula el esfuerzo de tensión resistente.

Tabla 3.3 Modelos elásticos de ensayos a tensión

Norma	Modelo	Ecuación	
ASTM C496		$T = \frac{2P}{\pi ld}$	(3.15)
ASTM C1006		$T = \frac{2P}{\pi tH}$	(3.16)
ASTM E519		$S_s = \frac{0.707P}{A}$	(3.17)

Todos los modelos tuvieron una altura de 20 cm y un espesor de 15 cm. Se consideró un módulo de elasticidad de 21,805 kg/cm<sup>2</sup> para el concreto celular de autoclave, con base en los resultados experimentales. Asimismo, una relación de Poisson de 0.2, con base en la revisión de la literatura (Piekarczyk et al., 2000). Se utilizaron elementos isoparamétricos cuadriláteros de esfuerzo plano de cuatro nodos y con dos grados de libertad por nodo (u,v). Los desplazamientos  $u$  y  $v$  son los desplazamientos en la dirección  $x$  y  $y$ , respectivamente. El tamaño de los elementos finitos fue de 0.5 cm por lado. En los tres casos se restringió el nodo inferior en las direcciones  $x$ ,  $y$ , así como en el nodo medio superior en la dirección  $x$ . A los tres modelos se les aplicó en el nodo superior una carga de -2000kg en la dirección  $y$ .

Es importante resaltar que probablemente para los modelos de los ensayos de un cilindro y un bloque pudiese ser los elementos de deformación plana una mejor aproximación.

En la Figura 3.18, Figura 3.19 y Figura 3.20 se presentan las mallas de elementos finitos de los modelos de los ensayos de las normas ASTM C496, ASTM C1006 y ASTM E519, respectivamente.

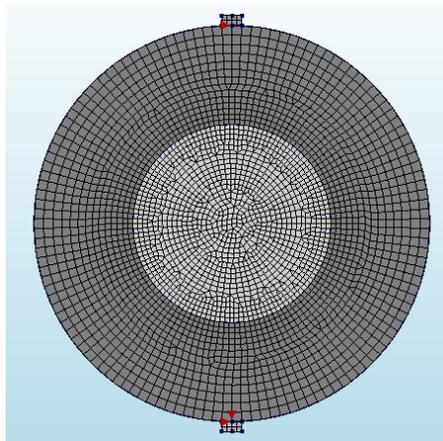


Figura 3.18 Malla de elementos finitos y condiciones de apoyo del modelo elástico de un cilindro (Modelo A)

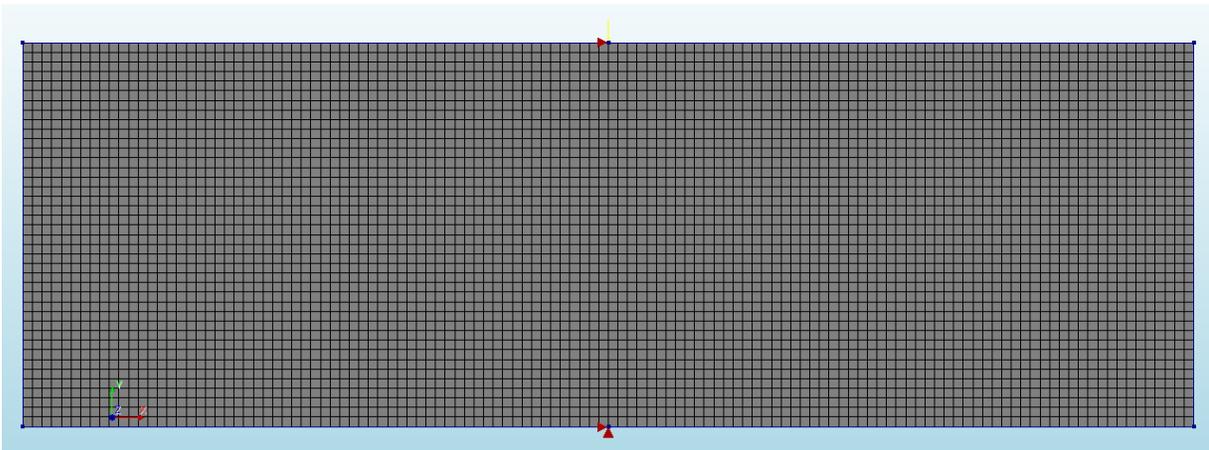


Figura 3.19 Malla de elementos finitos y condiciones de apoyo del modelo elástico de un bloque (Modelo B)

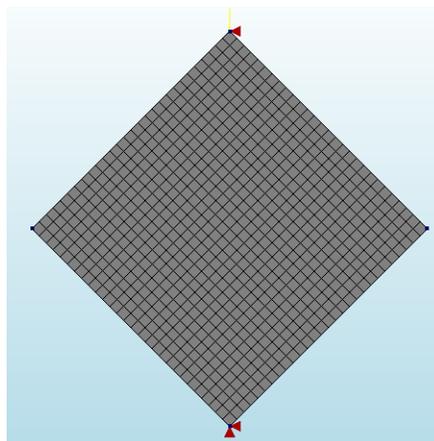


Figura 3.20 Malla de elementos finitos y condiciones de apoyo del modelo elástico de un murete (Modelo C)

### 3.4.1 Desarrollo de modelos elásticos de elemento finito de muretes a tensión

Con el objetivo de evaluar el efecto de la longitud del murete en su resistencia a compresión diagonal, se desarrollaron modelos de elementos finitos. Se modelaron 5 ensayos a compresión diagonal con diferentes longitudes de muretes. En los modelos

se consideró un módulo de elasticidad de 21,805 kg/cm<sup>2</sup> para el CCA, con base en los resultados experimentales. Asimismo, una relación de Poisson de 0.2, con base en la revisión de la literatura (Piekarczyk et al., 2000). Se utilizaron elementos isoparamétricos cuadriláteros de esfuerzo plano de cuatro nodos y con dos grados de libertad por nodo ( $u,v$ ). El tamaño de los elementos fue de 0.5 cm (Figura 3.21). Los desplazamientos  $u$  y  $v$  son los desplazamientos en la dirección  $x$  y  $y$ , respectivamente. Se restringió el nodo inferior en las dos direcciones ( $x,y$ ) y el nodo superior en la dirección  $x$ . Se les aplicó una carga que produjera un esfuerzo máximo de tensión en el centro de 4.65 kg/cm<sup>2</sup>. En la Tabla 3.4 se presentan las cargas aplicadas a cada modelo. Es importante resaltar que el objetivo de este análisis era comparar el efecto del tamaño del murete en la resistencia a compresión diagonal y se reconoce que probablemente para ensayos de gran tamaño podría no observarse la falla por tensión diagonal.

Tabla 3.4 Carga aplicada a los muretes

<b>Longitud murete (Lm) (cm)</b>	60	90	100	120	150
<b>Fuerza (P) (kg)</b>	100073.8	13340.5	14652.74	17430.33	21662.65

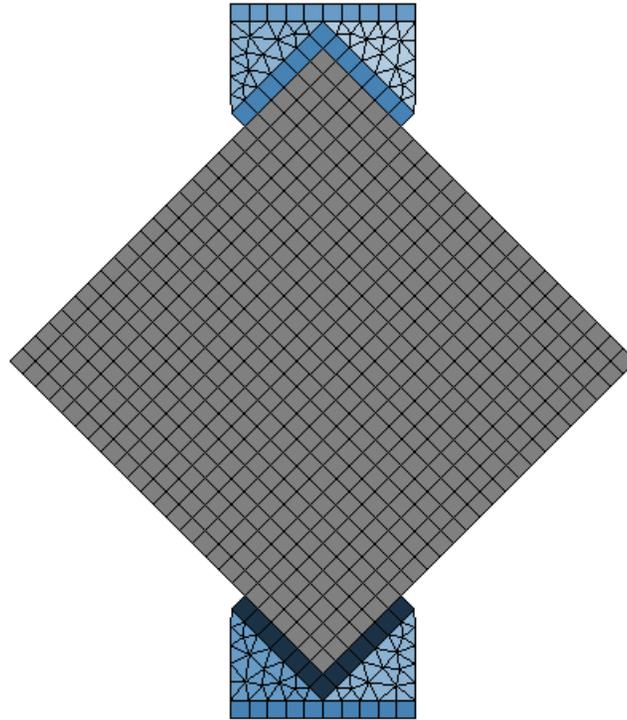


Figura 3.21 Modelado de muretes a tensión

## 4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados correspondientes a los ensayos experimentales de las propiedades mecánicas del CCA y de los modelos analíticos que describen el comportamiento del material.

### 4.1 Propiedades mecánicas del CCA

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos realizados para determinar las propiedades mecánicas del CCA.

#### 4.1.1 Densidad

En la Tabla 4.1 se presenta el peso seco y la densidad específica de los cubos de CCA. La densidad promedio fue de 591.55 kg/m<sup>3</sup> con un coeficiente de variación (C.V.) de 0.03.

Tabla 4.1 Peso seco y densidad específica del CCA

Cubo	Peso seco (g)	Densidad específica (kg/m <sup>3</sup> )
A1	623.30	592.07
M1	633.30	586.77
R1	634.40	580.63
1A	614.50	624.94
B1	580.00	581.65
B2	583.10	583.27
Promedio	630.33	591.55
C.V.	0.04	0.03

### 4.1.2 Resistencia a compresión axial

En la Tabla 4.2 se presenta el contenido de humedad y la resistencia a compresión axial del CCA ( $f_{CCA}$ ) de los cubos ensayados. La resistencia a compresión axial promedio fue de 5.28 MPa (53.86 kg/cm<sup>2</sup>) con un C.V. de 0.02.

Tabla 4.2 Resistencia a la compresión axial del CCA

Cubo	% Humedad	$f_{CCA}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
C1	8.42	53.01
D2	7.85	53.56
E2	8.37	55.02
Promedio	8.21	53.86
C.V.	0.04	0.02

### 4.1.3 Resistencia a tensión

En la Tabla 4.3 se presenta la resistencia a tensión del CCA ( $f_{tCCA}$ ). La resistencia a tensión promedio fue de 0.46 MPa (4.65 kg/cm<sup>2</sup>) con un C.V. de 0.08.

Tabla 4.3 Resistencia a tensión del CCA

Bloque	$f_{tCCA}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
T1B1	5.03
T2B1	4.96
T3B1	4.26
T3B2	5.03
T4B1	4.47
Promedio	4.65
C.V.	0.07

#### 4.1.4 Módulo de elasticidad

Para calcular el módulo de elasticidad del CCA se obtuvieron curvas esfuerzo-deformación de los prismas (Figura 4.1) de acuerdo con las especificaciones de la ASTM C1693-11. En la Figura 4.1 se presentan las curvas esfuerzo – deformación obtenidas del ensaye de prismas de CCA. Con dichas curvas se determinó el módulo de elasticidad del CCA de acuerdo con la ASTM C1693 (20).

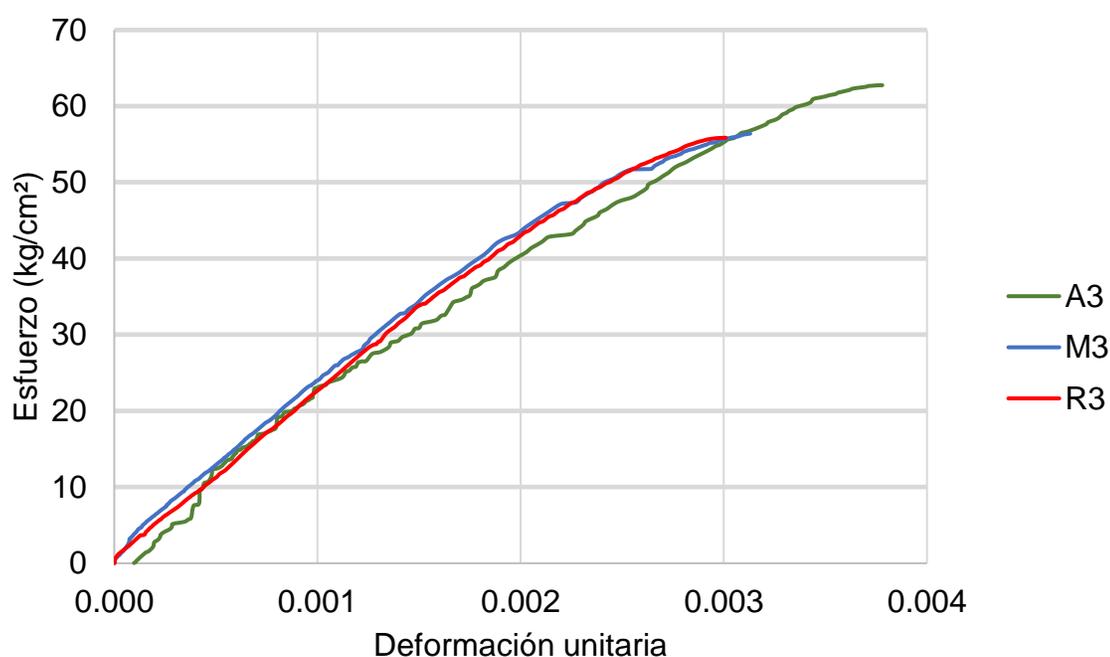


Figura 4.1 Curva esfuerzo-deformación de especímenes

En la Tabla 4.4 se presenta la resistencia a compresión axial ( $f_{CCA}$ ) y el módulo de elasticidad de los prismas de CCA ensayados. El módulo de elasticidad promedio fue de 2058 MPa (20993 kg/cm<sup>2</sup>) con un C.V. de 0.07.

Tabla 4.4 Módulo de elasticidad del CCA

Espécimen	fCCA (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_{cca}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
M3	56.39	22922.77
R3	55.85	21792.18
A3	62.74	18264
Promedio	58.33	20993
C.V.	0.07	0.07

## 4.2 Propiedades mecánicas de la mampostería

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos realizados para determinar las propiedades de la mampostería construida con bloques de CCA y mortero de pared delgada.

### 4.2.1 Resistencia a la compresión axial y módulo de elasticidad de la mampostería

En la Tabla 4.5 se presenta el área de aplicación de la carga de las pilas (A), la carga de falla (P), la resistencia a compresión axial obtenida de acuerdo con la norma mexicana ( $f_{mcca}$ ) y la resistencia a compresión axial corregida por el factor de esbeltez de la pila especificado en la norma ASTM C1314 ( $f_{mtcca}$ ) de las pilas ensayadas. El valor promedio de la resistencia a compresión axial de la mampostería fue de 5.22 MPa (53.22 kg/cm<sup>2</sup>) con un C.V. de 0.05.

Tabla 4.5 Resistencia a compresión axial promedio y módulo de elasticidad de las pilas de mampostería

Pila	A (cm <sup>2</sup> )	P (kg)	$f_{mcca}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_{mt\ cca}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
P1	596.0	29963.7	50.27	57.81	19359.46
P2	592.5	32616	55.05	63.31	20869.61
P3	592.5	32197.3	54.34	62.45	26530.85
		Promedio	53.22	61.2	22253.31
		C.V.	0.05	0.05	0.17

Para calcular el módulo de elasticidad del CCA se obtuvieron curvas esfuerzo-deformación de las pilas de mampostería (Figura 4.2) de acuerdo con las especificaciones de la ASTM E519. En la Figura 4.2 se presentan las curvas esfuerzo – deformación obtenidas del ensaye de pilas de mampostería de CCA. Con dichas curvas se determinó el módulo de elasticidad del CCA de acuerdo con la ASTM E519.

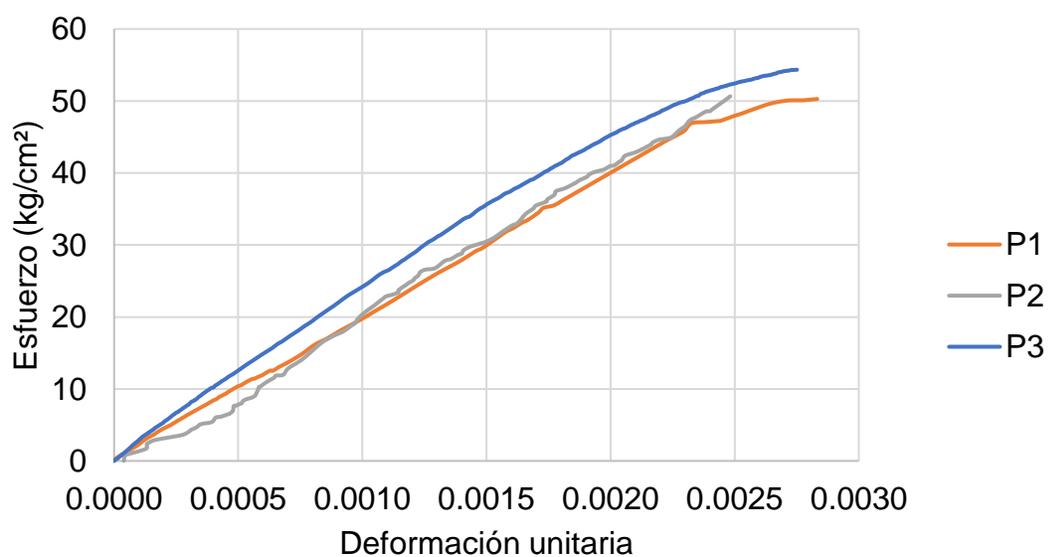


Figura 4.2 Curva esfuerzo-deformación de pilas de mampostería

En la Tabla 4.5 se presenta la resistencia a compresión axial de la mampostería ( $f_{mcca}$ ) y el módulo de elasticidad de la mampostería ( $E_m$ ). El módulo de elasticidad promedio fue de 2602 MPa (26530.85 kg/cm<sup>2</sup>) con un C.V. de 0.17.

#### 4.2.2 Resistencia a la compresión diagonal y módulo de cortante de la mampostería

En la Tabla 4.6 y Tabla 4.7 se presentan los resultados de los ensayos a compresión diagonal de los muretes correspondientes a las pruebas con muretes de 120 cm y 60 cm, respectivamente. En las tablas se presenta el tipo de falla observado, la carga de falla ( $P_{max}$ ), el espesor del murete (t), la longitud de la diagonal (D), el área transversal de la diagonal ( $A_D$ ) y la resistencia a compresión diagonal ( $v_m$ ). En el Apéndice C se presentan las imágenes de las fallas observadas en los muretes. El espécimen M1 120 fue un murete de 120 de longitud con el cabezal especificado en la norma ASTM E519 y el espécimen M2 120 fue un murete de 120 cm de longitud con un cabezal más alargado. Los especímenes M1 60, M2 60, M3 60, M4 60 y M5 60 fueron muretes de 60 cm de longitud con el cabezal especificado en la norma ASTM E519.

Tabla 4.6 Resistencia a la compresión diagonal de muretes de 120 cm

Murete	Tipo de falla	$P_{max}$ (kg)	t (cm)	D (cm)	$A_D$ (cm <sup>2</sup> )	$v_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
M1 120	Aplastamiento	15086.1	15	169.7	2535	5.95
M2 120	Aplastamiento	19702.4	15	169.7	2535	7.77

Tabla 4.7 Resistencia a la compresión diagonal de muretes de 60 cm

Murete	Tipo de falla	$P_{max}$ (kg)	t (cm)	D (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	$v_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
M1 60	Tensión diagonal	12539.30	15	84.85	1272.75	9.85
M2 60	Tensión diagonal	8652.05	15	84.85	1272.75	6.80
M3 60	Tensión diagonal	12659.20	15	84.85	1272.75	9.95
M4 60	Tensión diagonal	10984.80	15	84.85	1272.75	8.63
M5 60	Tensión diagonal	12738.00	15	84.85	1272.75	10.01
Promedio						9.05
C.V.						0.15

En la Figura 4.3 y la Figura 4.4 se presentan las curvas esfuerzo-deformación angular de muretes con longitud de 120 cm y 60 cm, respectivamente. Las deformaciones angulares se calcularon como el promedio de los acortamientos en la dirección de aplicación de la carga entre la longitud del murete.

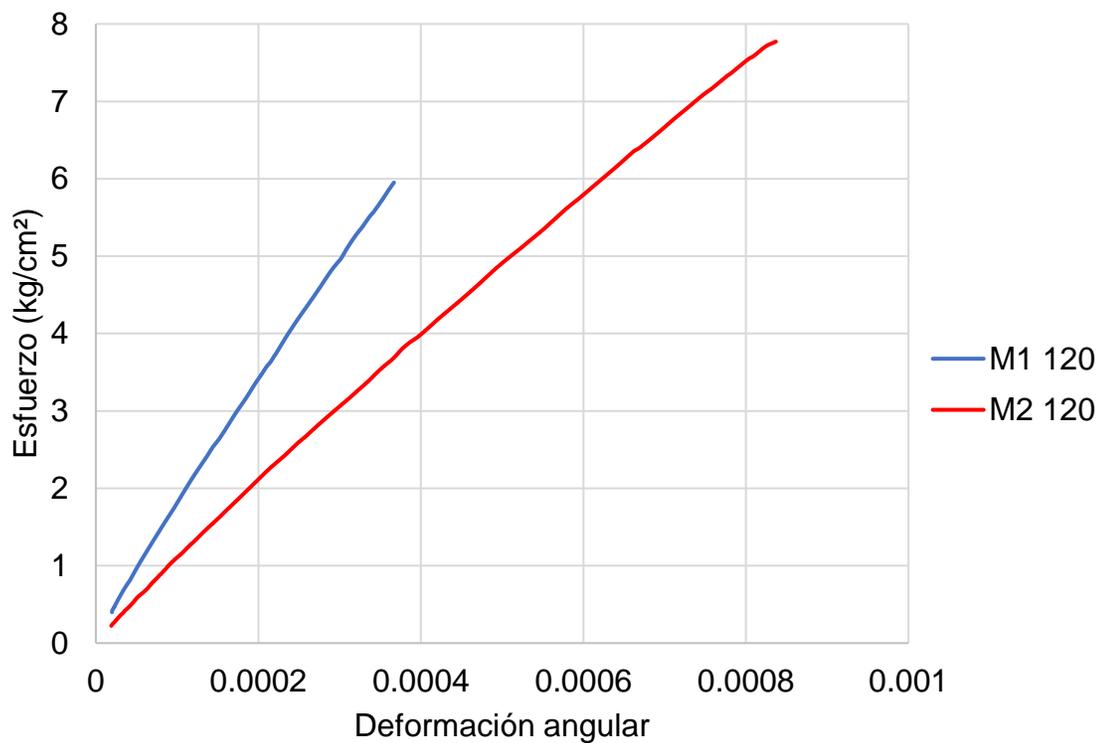


Figura 4.3 Curva esfuerzo-deformación angular de muretes de 120 cm

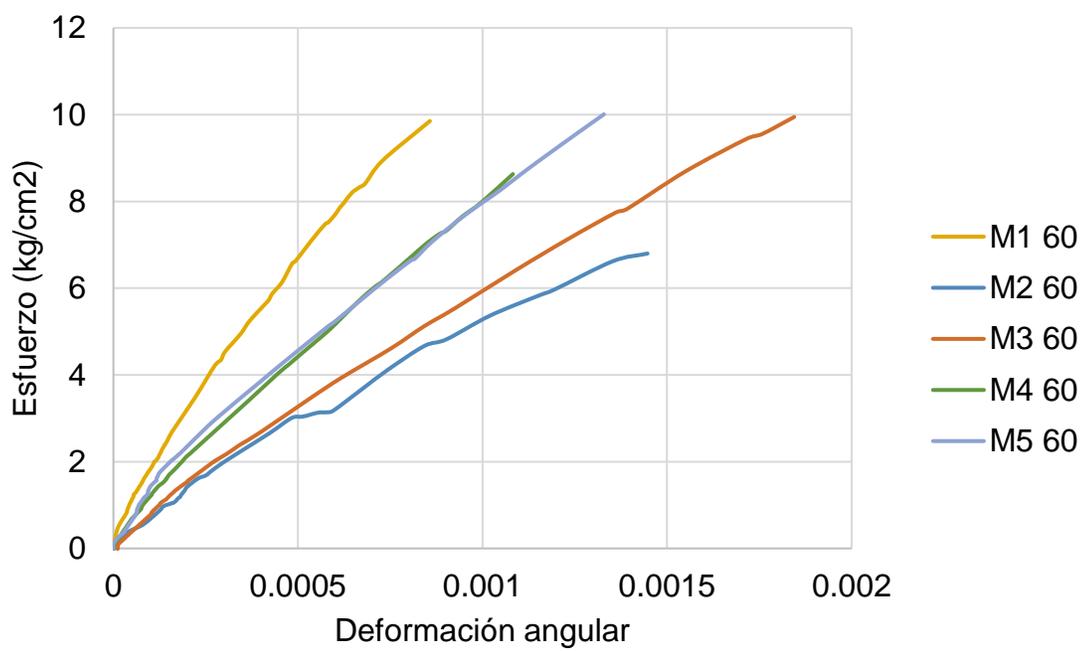


Figura 4.4 Curva esfuerzo-deformación angular de muretes de 60 cm

En la Tabla 4.8 y Tabla 4.9 se presentan los esfuerzos cortantes ( $\tau$ ), las deformaciones angulares ( $\gamma$ ) al nivel de esfuerzo especificado en la NMX-C-464-ONNCCE y los módulos de cortante calculados con dicha norma, para los muretes de 120 cm y 60 cm, respectivamente. En la Tabla 4.10 y la Tabla 4.11 se presentan los parámetros necesarios especificados en la norma ASTM E519-00 para calcular los módulos de cortante, para los muretes de 120 cm y 60 cm, respectivamente. Para los muretes de 60 cm se presentan los valores promedio y el coeficiente de variación.

Tabla 4.8 Módulo de cortante muretes 120 cm NMX C464

Murete	$\tau_2$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau_1$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\gamma_2$	$\gamma_1$	$G_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
M1 120	2.38	0.94	0.000136	0.00005	16671.56
M2 120	3.11	0.45	0.000388	0.00005	7865.08

Tabla 4.9 Módulo de cortante muretes 60 cm NMX C464

Murete	$\tau_2$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau_1$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\gamma_2$	$\gamma_1$	$G_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
M1 60	3.94	0.99	0.000323	0.00005	10813.50
M2 60	2.72	0.50	0.000433	0.00005	5807.87
M3 60	3.98	0.39	0.000625	0.00005	6243.71
M4 60	3.45	0.63	0.000502	0.00005	6253.32
M5 60	4.00	0.36	0.000611	0.00005	6501.67
Promedio					7124.01
C.V.					0.29

Tabla 4.10 Módulo de cortante muretes 120 cm ASTM E519

Parámetro	M1 120	M2 120
W (cm)	120	120
h (cm)	120	120
t (cm)	15	15
n	1	1
$A_n$	1800	1800
$P_{max}$ (kg)	15086.1	19702.4
$S_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )	5.92	7.74
$\Delta V$ (mm)	0.4145	0.94
$\Delta H$ (mm)	0.0099	0.27
g (mm)	1130	1130
$\gamma$	0.00037	0.00107
G (kg/cm <sup>2</sup> )	15775.06	7216.56

Tabla 4.11 Módulo de cortante muretes 60 cm ASTM E519

DATO	M1 60	M2 60	M3 60	M4 60	M5 60
W (cm)	60	60	60	60	60
h (cm)	60	60	60	60	60
t (cm)	15	15	15	15	15
n	1	1	1	1	1
$A_n$	900	900	900	900	900
$P_{max}$ (kg)	12539.3	8652.05	12659.2	10984.8	12738
$S_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )	9.85	6.80	9.94	8.63	10.01
$\Delta V$ (mm)	0.205786	0.235559	0.305739	0.0052257	0.318952
$\Delta H$ (mm)	0.10564	0.111752	0.136964	0.350993	0.133079
g (mm)	240	240	240	240	240
$\gamma$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G (kg/cm <sup>2</sup> )	7591.13	4696.65	5391.16	5813.85	5312.77
Promedio G (kg/cm <sup>2</sup> )	5761.11				
C.V.	0.19				

### 4.3 Modelos elásticos de elemento finito de piezas de CCA con diferente geometría

#### 4.3.1 ASTM C496

En la Figura 4.5 se presenta la distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) obtenidos del modelo computacional para el ensaye de resistencia a la tensión de un cilindro de acuerdo con la ASTM C496.

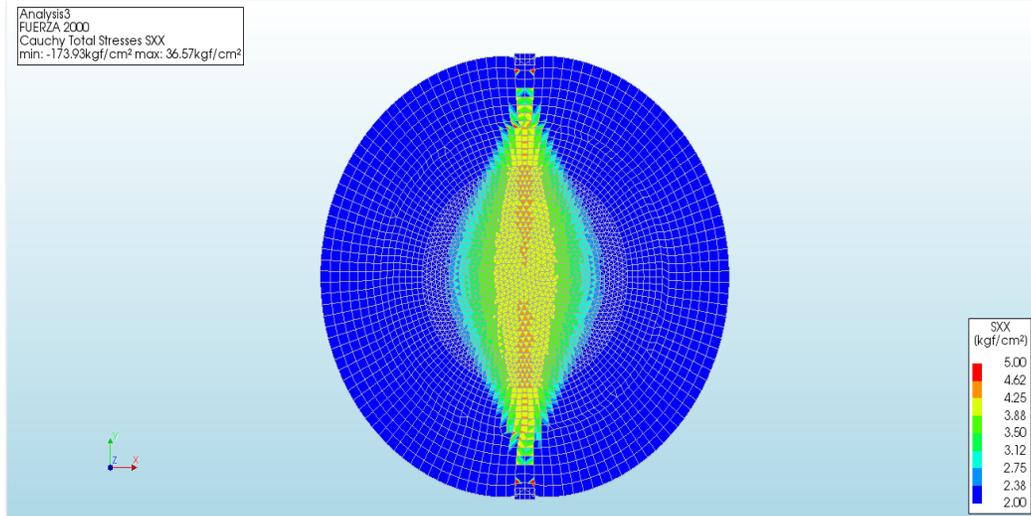


Figura 4.5 Distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) de un cilindro (ASTM C496)

En la Figura 4.6 se presenta la distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) a lo largo de la diagonal central del cilindro obtenidos con el modelo de MEF y se compara con el esfuerzo obtenido analíticamente con la ecuación especificada en la ASTM C496 (Ecuación 3.15). Se observa que la distribución de los esfuerzos  $\sigma_{11}$  es aproximadamente constante con un valor máximo de  $4.24 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que el valor de la resistencia a tensión analítica es  $4.24 \text{ kg/cm}^2$ .

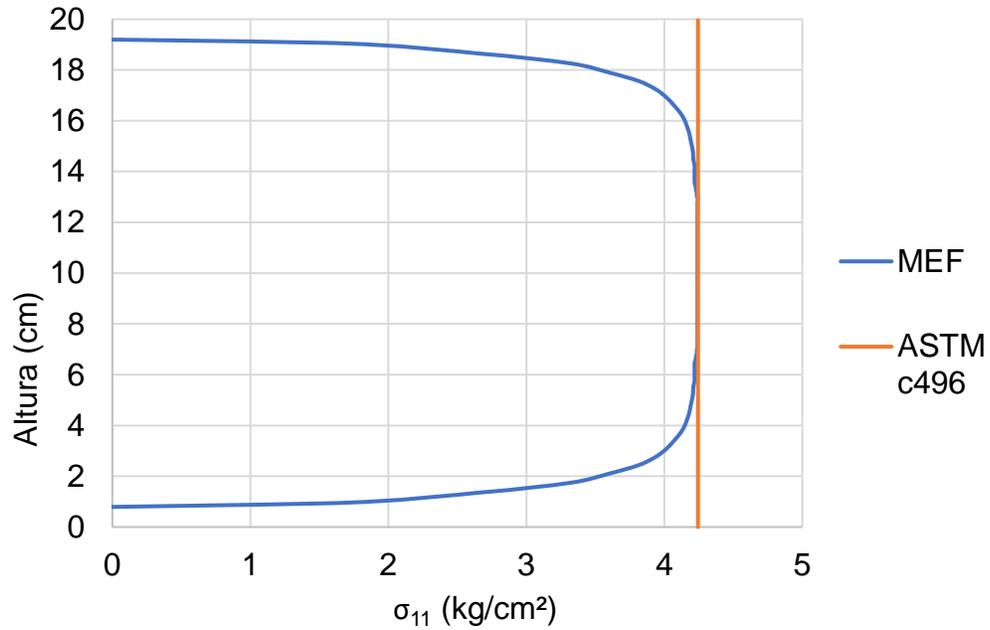


Figura 4.6 Esfuerzos a tensión obtenidos computacionalmente (MEF) y analíticamente (ASTM C496)

### 4.3.2 ASTM C1006

En la Figura 4.7 se presenta la distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) obtenidos del modelo computacional para el ensaye de resistencia a la tensión de un bloque de CCA de acuerdo con la ASTM C1006 (2001).

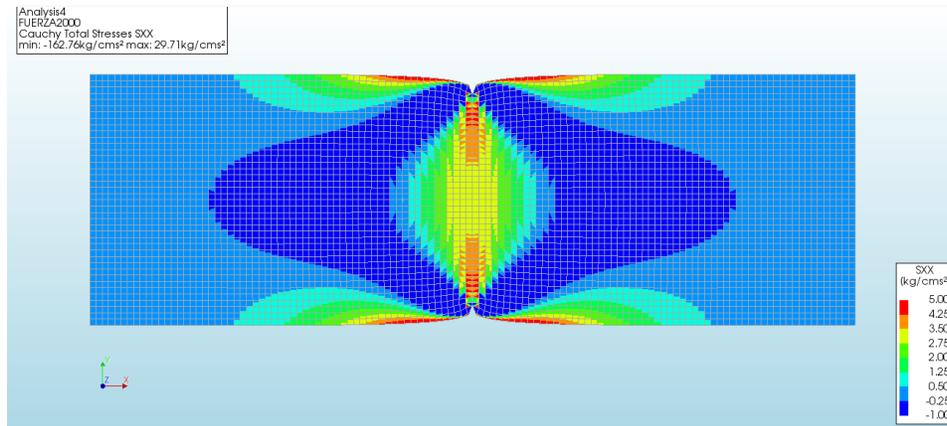


Figura 4.7 Distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) de un bloque (ASTM C1006)

En la Figura 4.8 se grafica la distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) al centro del bloque obtenidos con el modelo de MEF y se compara con el esfuerzo obtenido analíticamente con la ecuación especificada en la ASTM C1006 (Ecuación 3.16). Se observa que la distribución de los esfuerzos principales de tensión  $\sigma_{11}$  no es constante, con un valor máximo de 4.060 kg/cm<sup>2</sup> y un valor mínimo de 3.28 kg/cm<sup>2</sup> al centro del elemento ( $H/2$ ), mientras que el valor de la resistencia a tensión analítica es 4.24 kg/cm<sup>2</sup>.

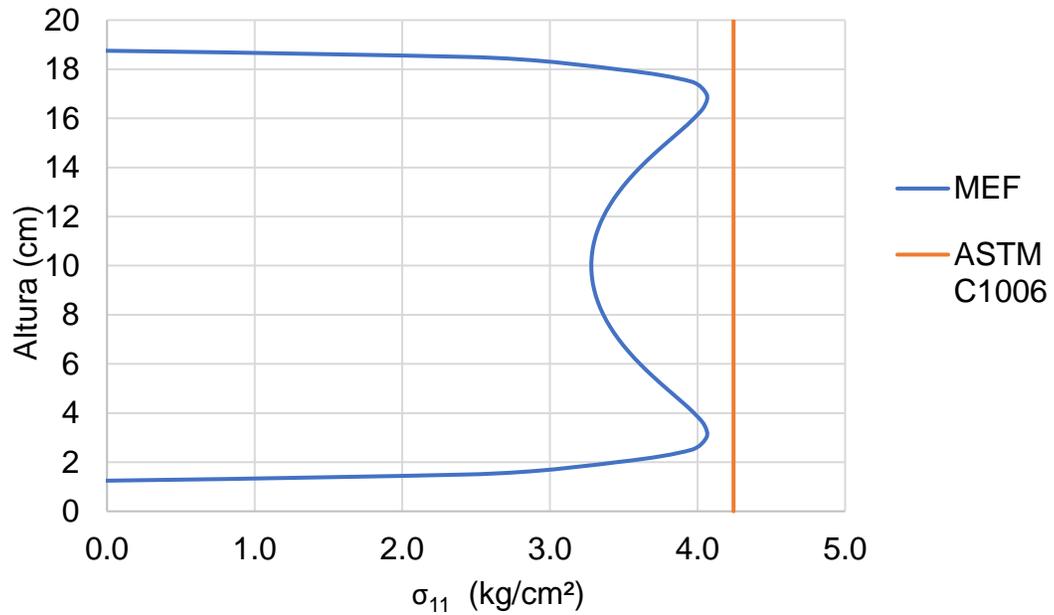


Figura 4.8 Esfuerzos a tensión obtenidos computacionalmente (MEF) y analíticamente (ASTM C1006)

### 4.3.3 ASTM E519

En la Figura 4.9 se presenta la distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) obtenidos del modelo computacional para el ensaye de compresión diagonal de un murete.

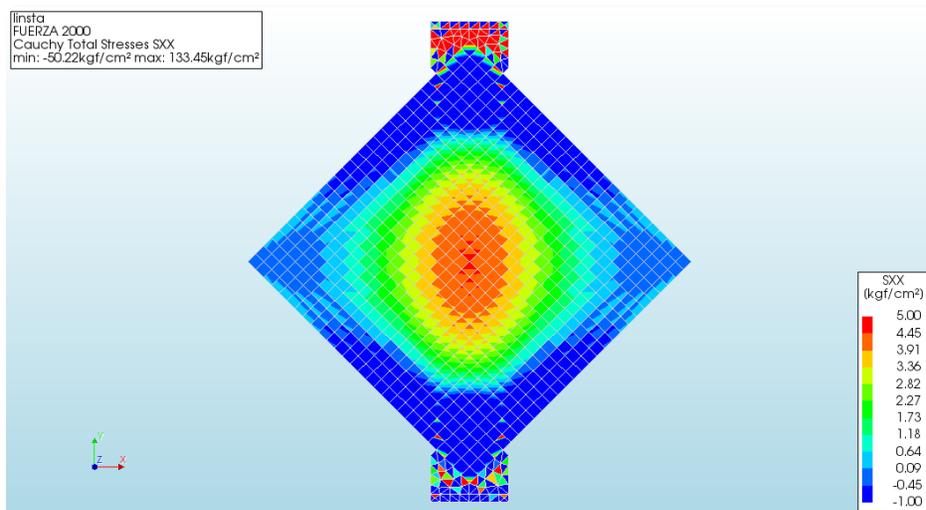


Figura 4.9 Distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) de un murete (ASTM E519)

En la Figura 4.10 se grafica la distribución de esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) sobre la diagonal del murete obtenidos con el modelo de MEF. Se compara con el esfuerzo obtenido analíticamente con la ecuación especificada en la ASTM E519 (Ecuación 3.17) y en la NMX-C-464 (Ecuación 3.18). Se observa que la distribución de los esfuerzos principales de tensión  $\sigma_{11}$  no es constante, con un valor máximo de 4.48 kg/cm<sup>2</sup> al centro del murete ( $H/2$ ), mientras que el valor de la resistencia a tensión analítica es 6.66 kg/cm<sup>2</sup> con la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 y de 4.71 kg/cm<sup>2</sup> con la norma ASTM E519.

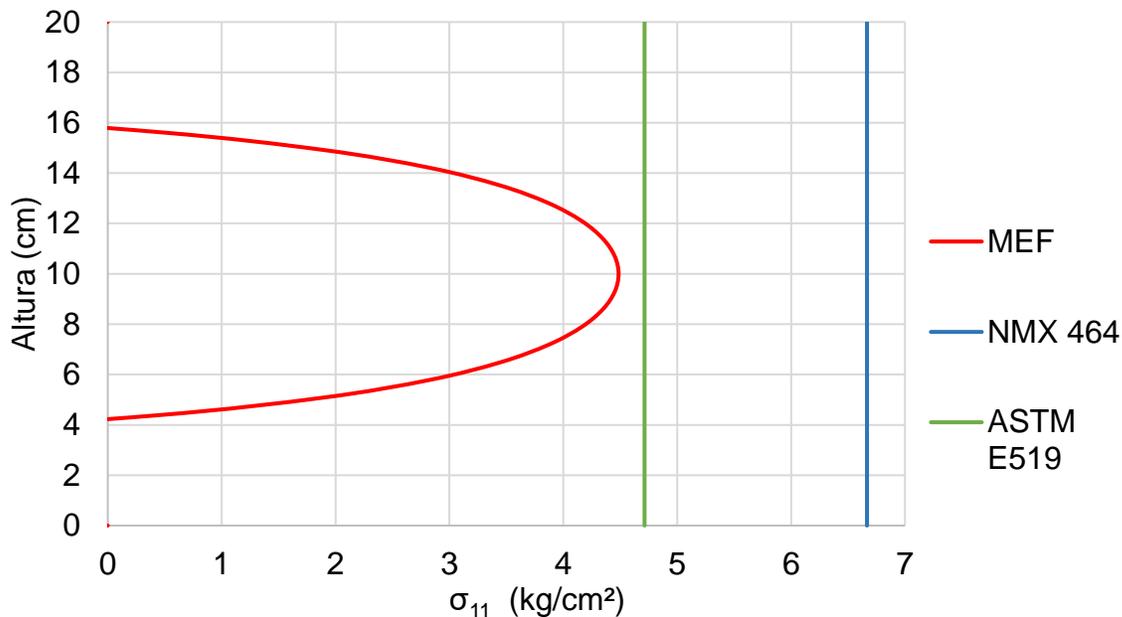


Figura 4.10 Esfuerzos a tensión obtenidos computacionalmente (MEF) y analíticamente (NMX C464 y ASTM E519)

#### 4.4 Modelos del Método de Elemento Finito de muretes de distinto tamaño

Se realizaron los modelos de 5 muretes de diferentes tamaños. Se les aplicó una carga que produjera un esfuerzo máximo de tensión en el centro de los muretes de 4.65 kg/cm<sup>2</sup>. En la Tabla 4.12 se presenta dicha carga para muretes de dimensiones de 60 cm x 60 cm hasta 150 cm x 150 cm. En la Figura 4.11 se comparan las distribuciones de esfuerzo al centro de los muretes para los diferentes valores de la resistencia a la compresión diagonal ( $v_m$ ).

Tabla 4.12 Carga que produce un esfuerzo máximo de tensión en el centro de los muretes de  $4.65 \text{ kg/cm}^2$

Longitud (Lm) (cm)	Diagonal (D) (cm)	Carga (P) (kg)	$v_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
60	84.85	7582.43	5.96
90	127.3	10041.24	5.26
100	141.4214	11028.95	5.20
120	169.7	13119.6	5.15
150	212.132	16305.22	5.12

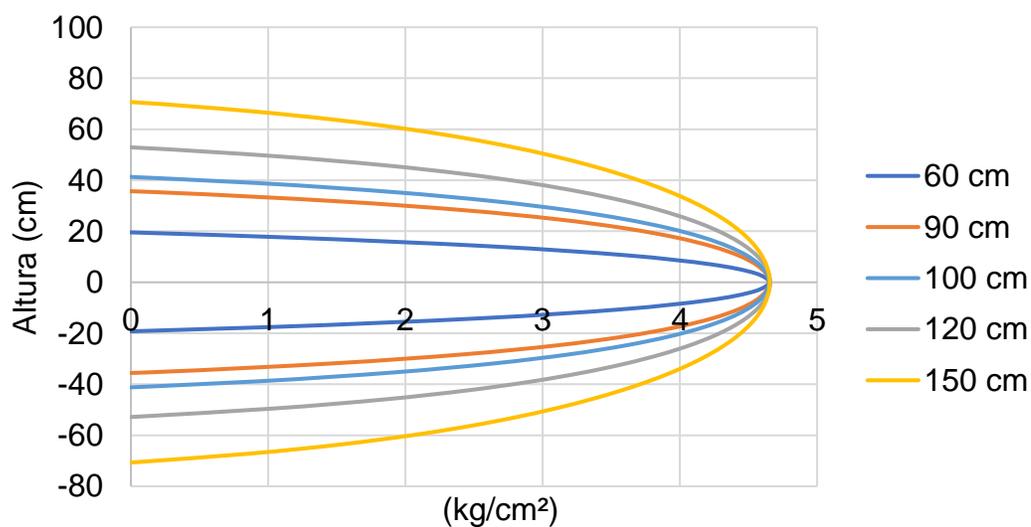


Figura 4.11 Distribución de esfuerzos en muretes de distinto tamaño que tienen un esfuerzo máximo a tensión ( $\sigma_{11}$ ) de  $4.65 \text{ kg/cm}^2$

## 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Humedad y resistencia a la compresión axial

En la Figura 5.1 se presenta la gráfica que relaciona la resistencia a compresión axial ( $f_{cca}$ ) con el contenido de humedad de la pieza (H). La gráfica incorpora valores que no se reportan en la resistencia a la compresión axial del capítulo anterior, ya que los porcentajes de humedad quedan fuera de la norma (APÉNDICE B. RESULTADOS DE VARIACIÓN DE LA HUMEDAD). Se observa que, a mayor contenido de humedad, menor resistencia a la compresión axial. Asimismo, se observa una correlación lineal entre la resistencia a compresión y el contenido de humedad para el intervalo estudiado.

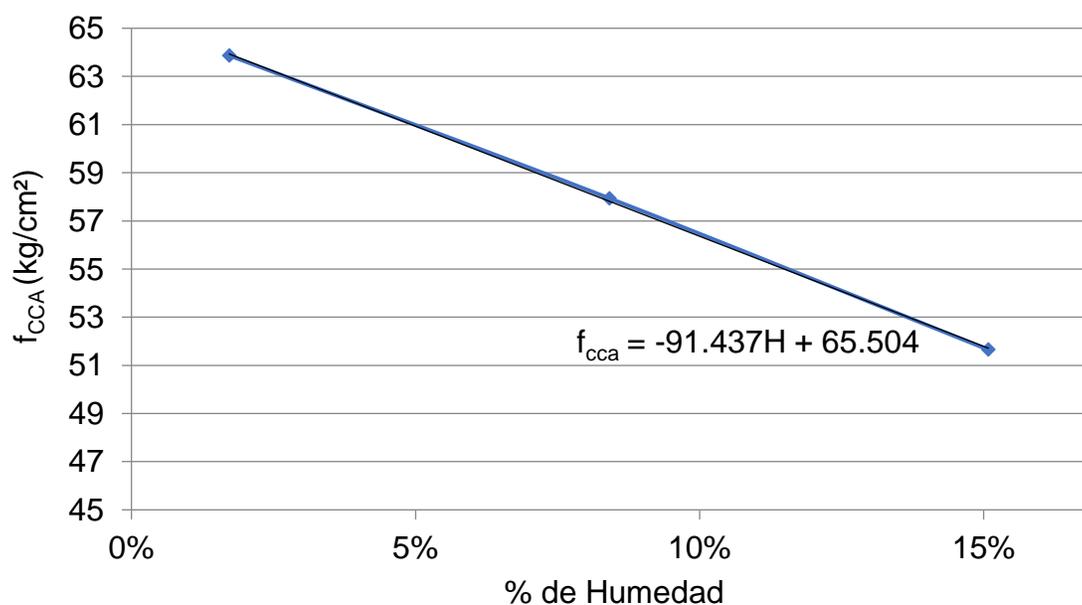


Figura 5.1 Humedad vs resistencia a la compresión axial del CCA

## 5.2 Resistencia a la compresión axial y a la tensión, y Módulo de elasticidad

La resistencia a tensión ( $f_{tCCA}$ ) y el módulo de elasticidad del CCA ( $E_{CCA}$ ) se pueden calcular a partir de las ecuaciones 2.1 y 2.3 del ACI (ACI 530-13). Sustituyendo la resistencia a compresión axial del CCA obtenida experimentalmente ( $f_{CCA} = 55 \text{ kg/cm} = 766.07 \text{ psi}$ ) se pueden obtener valores analíticos de  $f_{tCCA}$  y  $E_{CCA}$ .

$$f_{tCCA} = 2.4\sqrt{f_{CCA}} = 2.4\sqrt{766.07} = 66.43 \text{ PSI} = 4.67 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{CCA} = 6500f_{CCA}^{0.6} = 6500 \text{ PSI} = 24,574 \text{ kg/cm}^2$$

En la Tabla 5.1 se comparan los resultados obtenidos de las ecuaciones del ACI con los resultados experimentales. En la tabla se observa que los valores analíticos de la resistencia a tensión y el módulo de elasticidad del CCA se aproximan satisfactoriamente a los valores experimentales.

Tabla 5.1 Comparación de los valores de  $f_{tCCA}$  y  $E_{CCA}$  analíticos (ACI) y experimentales

	ACI	Experimental	ACI/Experimental
Resistencia a la tensión $f_{tCCA}$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	4.67	4.65	1
Módulo de elasticidad $E_{CCA}$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	24,574	20,993	1.17

En la tabla 5.2 se presenta la comparación de los resultados del ensaye de resistencia a compresión axial y módulo de elasticidad de piezas y pilas. Se observa que los valores obtenidos del ensaye de piezas y pilas son similares. En particular, se considera que la relación de módulos de elasticidad puede aproximarse a 1 si se incrementa el número de especímenes ensayados. Se concluye que no es necesario realizar ensayos de pilas de mampostería de CCA para determinar su resistencia a compresión axial y módulo de elasticidad.

Tabla 5.2 Comparación de los resultados de ensayos a compresión de piezas y pilas de CCA

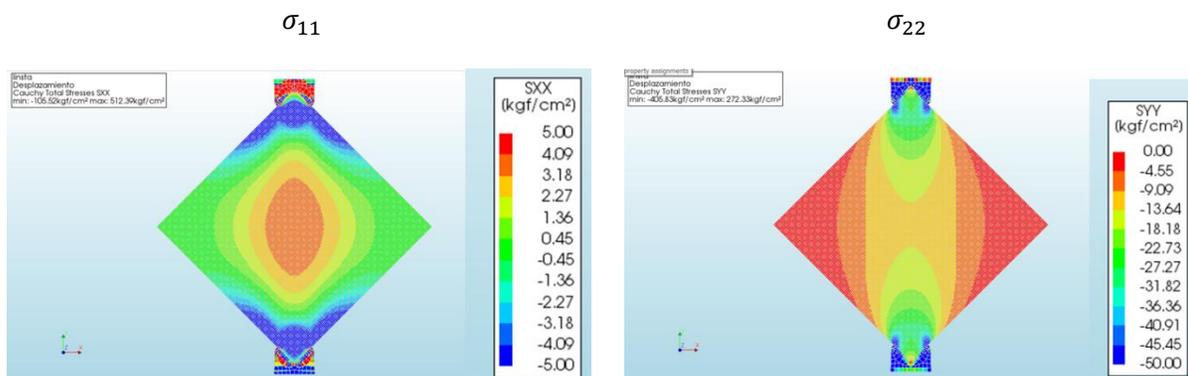
	Pieza	Pila	Pieza/Pila
Resistencia a la compresión axial ( $kg/cm^2$ )	53.86	53.22	1.01
Módulo de elasticidad ( $kg/cm^2$ )	20992.98	22253.31	0.94

### 5.3 Ensayo a compresión diagonal

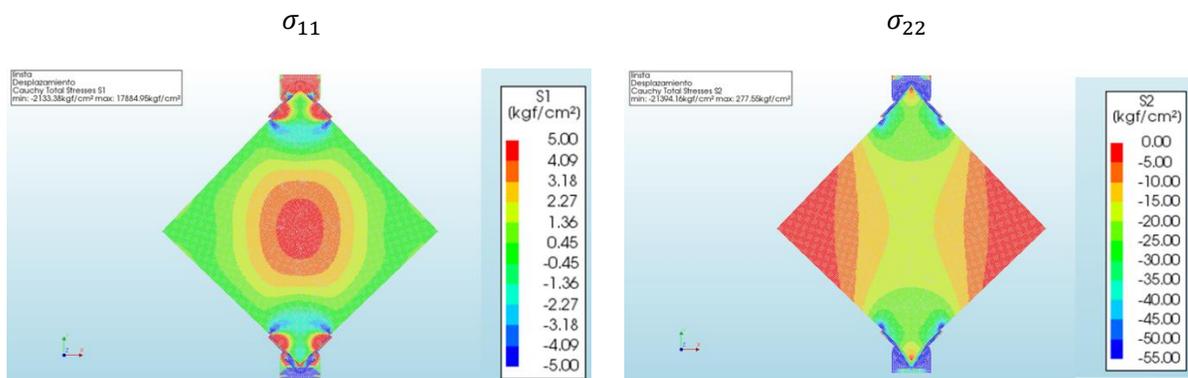
La norma ASTM E519 establece que las dimensiones de los muretes deben ser de 120 x 120 cm. Inicialmente se ensayó un murete con dichas dimensiones, sin embargo, se presentó una falla por aplastamiento en la zona cercana a los apoyos. Posteriormente, se hizo una modificación al cabezal colocándole placas de acero para aumentar el área de contacto entre el apoyo y el murete, de tal suerte que se puedan disminuir los esfuerzos de compresión, respetando las dimensiones de 120 x 120 cm. Este espécimen también presentó una falla por aplastamiento en la zona cercana a los apoyos.

Ante esta situación se elaboraron modelos de MEF de los dos muretes y se observó que los esfuerzos principales de compresión ( $\sigma_{22}$ ) son superiores a la resistencia a compresión axial del CCA. A partir de estos resultados se analizó la distribución de esfuerzos en muretes de distintas dimensiones. Se concluyó que un murete con dimensiones de 60 x 60 cm garantizaría que primero se presente la falla por tensión del CCA. En la Figura 5.2 se presentan la distribución de esfuerzos principales  $\sigma_{11}$  (tensión) y  $\sigma_{22}$  (compresión) de los muretes, aplicando las cargas de falla que se presentaron experimentalmente como se indica en la tabla 5.3.

## Murete de 120 cm con apoyo estándar



## Murete de 120 cm con apoyo modificado



## Murete de 60 cm con apoyo estándar

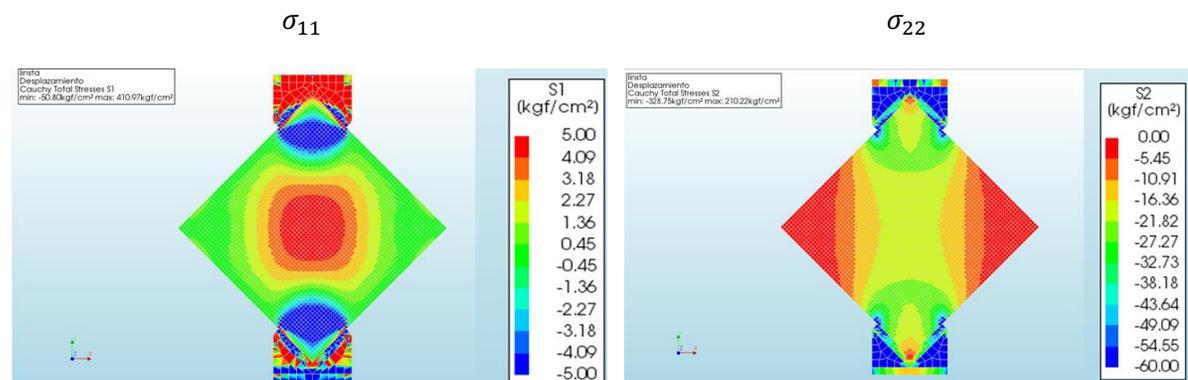


Figura 5.2 Distribución de esfuerzos principales de los muretes

En la Tabla 5.3 se comparan de los esfuerzos principales de tensión ( $\sigma_{11}$ ) y compresión ( $\sigma_{22}$ ) obtenidos con los modelos del MEF asociados a la carga de falla ( $P_{max}$ ) con la resistencia a tensión ( $f_{tcca}$ ) y compresión ( $f_{cca}$ ) del CCA, respectivamente. Se observa que, para los muretes de 120 cm de longitud, los esfuerzos de compresión exceden la resistencia a compresión del CCA ( $f_{cca}$ ) por más de un 20%, lo cual induce una falla por aplastamiento. Mientras que, para el murete de 60 cm, el esfuerzo de tensión excede la resistencia a tensión del CCA ( $f_{tcca}$ ), lo cual indica una falla por tensión diagonal. Lo anterior es consistente con lo observado durante los ensayos de los diferentes muretes de CCA.

Tabla 5.3 Comparación de los esfuerzos principales máximos y la resistencia del CCA para los muretes ensayados

Modelo	M1 120	M2 120	M1 60
$\sigma_{11}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	3.96	4.8	5.14
$\sigma_{11}/f_{tcca}$	0.85	1.03	1.1
$\sigma_{22}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	67.74	68.87	50.26
$\sigma_{22}/f_{cca}$	1.26	1.28	0.93

En el Apéndice C se presentan los patrones de agrietamiento observado en los muretes. Se analizaron los patrones de agrietamiento de los muretes de 60 cm y se concluyó que el patrón de agrietamiento depende de la ubicación de las juntas de

mortero de pared delgada del murete. Para los muretes con juntas de mortero en el centro, el agrietamiento inició cerca de los cabezales y posteriormente se propagó al centro del murete (Figura 5.3). Para muretes sin juntas de mortero al centro, el agrietamiento inició al centro del murete y la grieta fue paralela a la diagonal de los muretes (Figura 5.4).

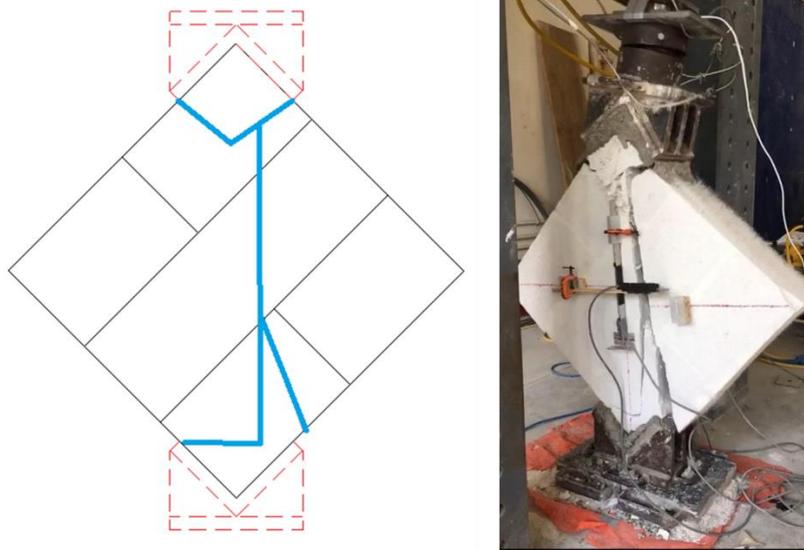


Figura 5.3 Patrón de agrietamiento para muretes con junta al centro

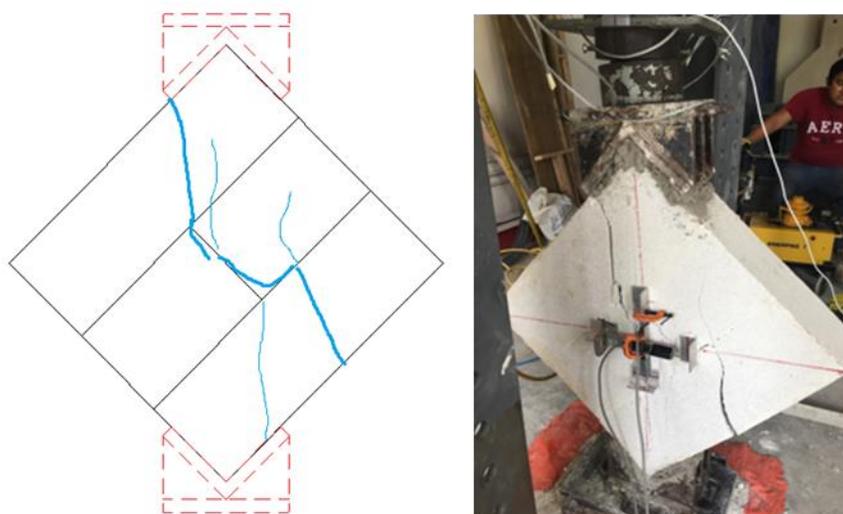


Figura 5.4 Patrón de agrietamiento para muretes sin junta al centro

Para poder entender el segundo patrón de agrietamiento, se realizó un análisis del estado de esfuerzos mediante el Círculo de Mohr de una partícula en el centro del murete (Figura 5.5). De este análisis se observó que en la dirección de  $45^\circ$  los esfuerzos son únicamente de compresión, por lo cual, podemos concluir que el agrietamiento se origina cerca de los apoyos y después se propaga al centro del murete. Aparentemente, el murete resiste más porque la junta de mortero incrementa la resistencia de la mampostería de CCA.

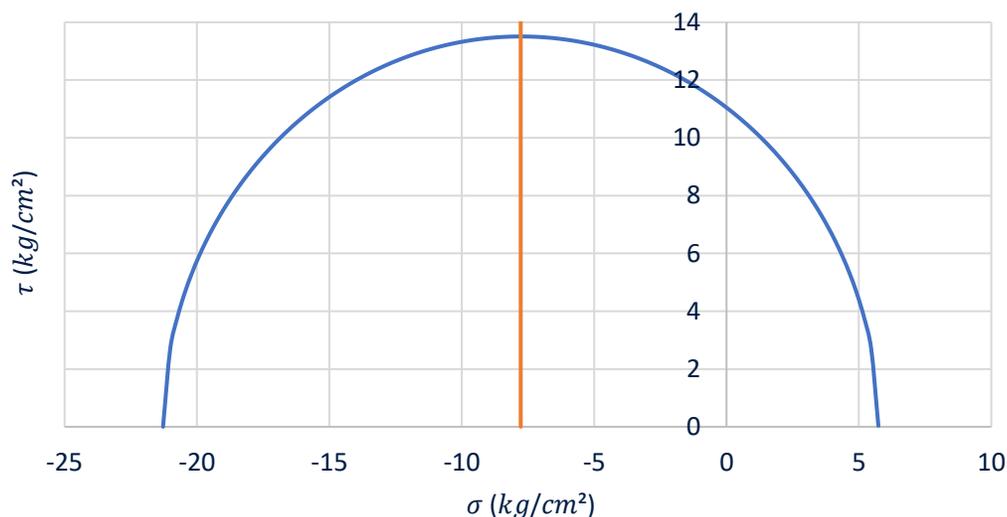


Figura 5.5 Estado de esfuerzos a  $45^\circ$

#### 5.4 Modelos de tensión de muretes

En la Figura 5.6 se presenta la carga que produce un esfuerzo principal a tensión al centro del murete de  $4.65 \text{ kg/cm}^2$ , para distintas longitudes de murete. Se observa que la carga necesaria para generar un esfuerzo de tensión igual a la resistencia a tensión del CCA aumenta conforme la longitud del murete aumenta. La relación entre la carga y la longitud del murete es lineal. Se realizó un ajuste de una función lineal utilizando

el método de mínimos cuadrados (Ecuación 5.1). En la Ecuación 5.1 se consideró un factor  $t/15$  para que esta ecuación sea aplicable a distintos espesores de muretes ( $t$ ), asumiendo un comportamiento elástico lineal.

$$P = (129.81 \cdot L_m + 1931.8) \frac{t}{15} \quad (5.1)$$

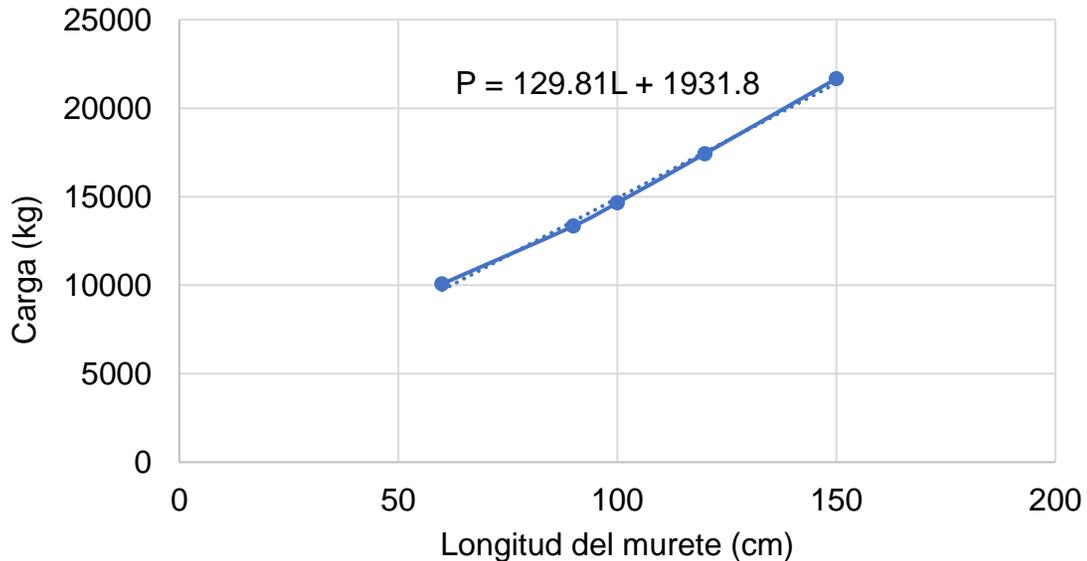


Figura 5.6 Longitud del murete vs carga

La resistencia a compresión diagonal ( $v_m$ ) se calcula como la carga (Ecuación 5.1) entre el área de la diagonal del murete ( $\sqrt{2} \cdot L_m \cdot t$ ).

$$v_m = \frac{(129.81 \cdot L_m + 1931.8) \frac{t}{15}}{\sqrt{2} L_m \cdot t} \quad (5.2)$$

La ecuación 5.2 corresponde a un valor de  $v_m$  en el cual se asume que la falla se produce cuando los esfuerzos principales de tensión al centro del murete alcanzan un valor de  $f_{tcca} = 4.65 \text{ kg/cm}^2$ . Para normalizar la ecuación 5.2 para cualquier valor de

$f_{tcca}$ , esta se multiplica por un factor  $f_{tcca}/4.65 \text{ kg/cm}^2$  y sustituyendo el espesor de los muretes modelados ( $t=15\text{cm}$ ), quedando:

$$v_{m1} = \left(1.32 + \frac{19.58}{L_m}\right) \cdot f_{tcca} \quad (5.3)$$

Similarmente, se ajustó una función polinómica para mejorar el ajuste de la función lineal (Ecuación 5.4). Las unidades de la ecuación 5.3 y 5.4 son kg y cm. En la Figura 5.7 se presenta la resistencia a compresión diagonal – longitud de murete obtenidos con los modelos de MEF y las ecuaciones 5.3 y 5.4.  $v_{m1}$  y  $v_{m2}$  se calcularon considerando que  $f_{tcca} = 4.65 \text{ kg/cm}^2$  y  $t = 15 \text{ cm}$ . Se observa que la resistencia a compresión diagonal tiende a ser asintótica conforme la longitud de los muretes aumenta. Es decir, para muretes de gran tamaño la resistencia no varía significativamente. Por otro lado, con la ecuación 5.4 se obtiene una mejor correlación de la resistencia a compresión diagonal que con la ecuación 5.3. y son válidas para un intervalo de tamaño de murete  $L_m \in [60, 150]$ .

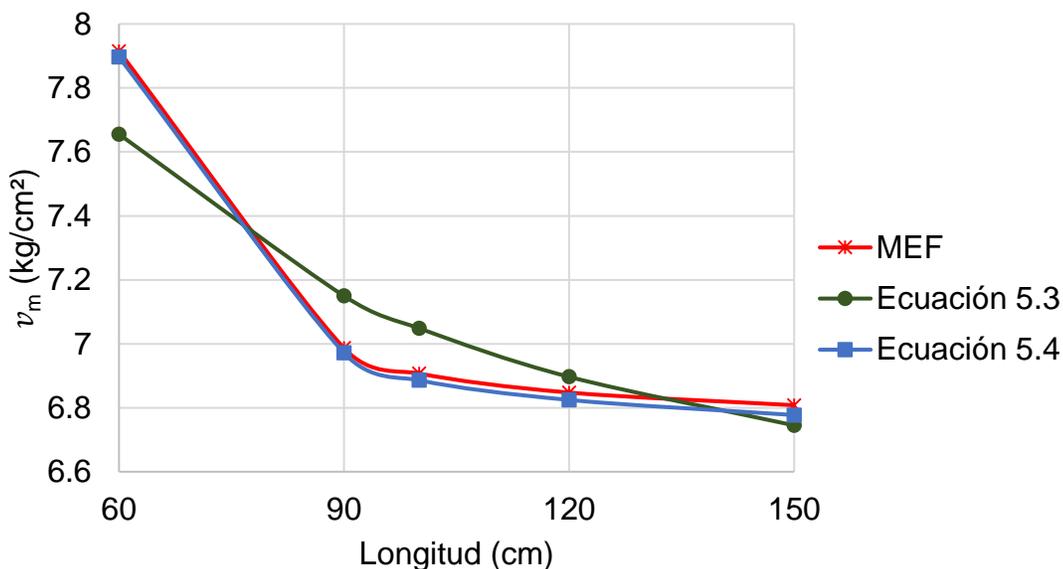


Figura 5.7 Longitud del murete vs resistencia a la compresión diagonal

Sin embargo, para mejorar el ajuste se puede utilizar una función polinómica de orden 2 que aproxime el valor de  $v_m$  (Ecuación 5.4):

$$v_{m2} = \left( \frac{87.6}{L_m} - 0.565 + 0.016L_m - 0.00004217L_m^2 \right) \cdot f_{tcca} \quad (5.4)$$

En la Tabla 5.4 se compara la resistencia a compresión diagonal obtenidos de manera experimental ( $v_m$ ) y analítica ( $v_{m2}$ ) (ecuación 5.4) de los muretes reportados en este trabajo y los ensayados por Hernández (2015). En esta tabla se puede observar que en promedio el valor experimental es 14% mayor que el valor analítico. Esta diferencia está asociada a la contribución del mortero de pared delgada que es más resistente que la pieza, como se pudo observar en los resultados de la prueba de resistencia a tensión del mortero.

Tabla 5.4 Revisión de la aproximación de la ecuación

Autor	L (cm)	$f_{tcca}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$v_m$ experimental (kg/cm <sup>2</sup> )	$v_{m2}$ analítico (kg/cm <sup>2</sup> )	$\frac{Experimental}{Analítico}$
Pérez (2019)	60	4.65	9.05	7.92	1.14
Hernández (2015)	100	3.54	6.03	5.27	1.14
	100	4.32	7.43	6.43	1.15
				Promedio	1.14

Aplicando el factor de 1.14 (obtenido de la tabla 5.4) a la ecuación 5.4 se obtiene una ecuación (Ecuación 5.5) que relaciona la resistencia a tensión de la pieza de CCA con relación a la resistencia a compresión diagonal de los muretes obtenida experimentalmente (en kg/cm<sup>2</sup>).

$$v_{mcca} = \left( \frac{99.864}{L_m} - 0.6441 + 0.01824L_m - 0.0000481L_m^2 \right) \cdot f_{tcca} \quad (5.5)$$

## 5.5 Modelos de pruebas de tensión

Se realizaron 3 modelos del MEF correspondientes a las 3 normas para determinar resistencias a tensión de materiales (ASTM C493, C1006 y E519). En dichos modelos se consideró que todos tenían una altura de 20 cm. Los resultados de los modelos permiten conocer la distribución de esfuerzos de tensión en los especímenes y compararlos con los esfuerzos máximos de tensión analíticos calculados con las normas ASTM.

En la Tabla 5.5 se presentan las resistencias calculadas con la norma ASTM ( $f_{t \text{ ASTM}}$ ), los esfuerzos máximos de tensión obtenidos de los modelos MEF ( $f_{t \text{ MEF}}$ ), la relación entre dichos valores ( $\frac{f_{t \text{ ASTM}}}{f_{t \text{ MEF}}}$ ) y el porcentaje de la altura de la sección que está sometida a esfuerzos de tensión. Se observa que la aproximación es mejor para el modelo del cilindro (ASTM C493), seguido por el del bloque (ASTM C1006). En ambas ecuaciones la resistencia se calculó como la carga aplicada entre el área de la sección transversal. El mejor ajuste en el modelo del cilindro se debe a que la ecuación analítica fue deducida del análisis de un cilindro. En la Figura 5.8 se presentan las distribuciones de esfuerzos de tensión para cada modelo obtenidas con el MEF. Los esfuerzos de compresión no se presentan. En dicha figura se observa que la distribución de esfuerzos es más uniforme en el modelo del cilindro; mientras que en el modelo del murete se observa una mayor variación en la distribución de esfuerzos de tensión. Por otra parte, con la ecuación especificada en la norma mexicana para calcular la resistencia a compresión diagonal (NMX-C-464-ONNCCE-2010) se obtiene un valor de  $v_m = 6.7 \text{ kg/cm}^2$ , que corresponde a una relación  $\frac{v_m}{f_{t \text{ MEF}}} = 1.5$ . Por lo tanto,  $v_m$  arroja un valor significativamente diferente con respecto a los esfuerzos máximos de tensión.

Tabla 5.5 Esfuerzos de tensión obtenidos con las ASTM y el MEF

Prueba	Pieza	$f_{t\text{ ASTM}}$	$f_{t\text{ MEF}}$	$\frac{f_{t\text{ ASTM}}}{f_{t\text{ MEF}}}$	% de la sección a tensión
ASTM C493	Cilindro	4.24	4.24	1.00	92
ASTM C1006	Bloque	4.24	4.06	0.96	85
ASTM E519	Murete	4.24	4.58	0.97	57.5

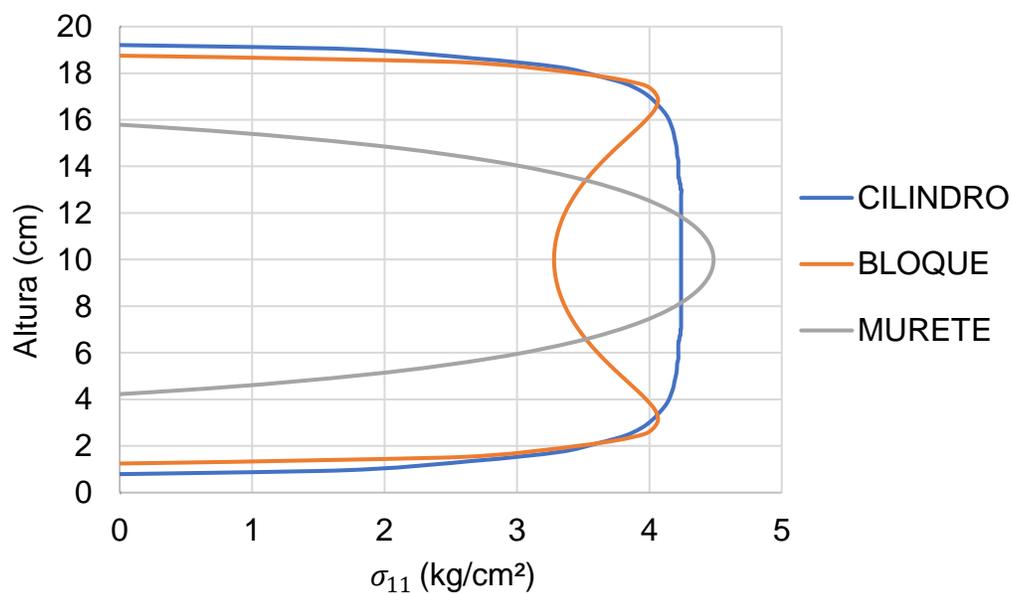


Figura 5.8 Distribución de esfuerzos de diferentes pruebas de tensión

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron las propiedades mecánicas del Concreto Celular de Autoclave mediante ensayos experimentales y modelos del Método de Elemento Finito. Para este propósito se realizaron ensayos experimentales para determinar: densidad, contenido de humedad, resistencia a la compresión axial, módulo de elasticidad y resistencia a la tensión del CCA, así como resistencia a la compresión axial y resistencia a la compresión diagonal de la mampostería de CCA. Se desarrollaron modelos del MEF de tres diferentes tipos de ensayos experimentales para determinar la resistencia a tensión de los materiales. Con base en los resultados experimentales y numéricos obtenidos de esta investigación se formulan las siguientes conclusiones:

1. La resistencia a compresión axial del CCA depende del contenido de humedad. A mayor contenido de humedad menor resistencia a compresión.
2. Las ecuaciones del ACI aproximaron satisfactoriamente el valor de la resistencia a tensión y el módulo de elasticidad del CCA obtenido experimentalmente en este trabajo. Las ecuaciones son función de la resistencia a compresión axial del CCA.
3. La resistencia a compresión axial y el módulo de elasticidad de pilas de CCA son similares a los obtenidos del ensaye de una pieza. Por lo tanto, se considera que no es necesario ensayar pilas para determinar dichas propiedades.
4. El ensaye de muretes con base en la norma ASTM E519 produce una falla por aplastamiento en los especímenes. En esta prueba se considera un tamaño de

murete de 120 cm por lado. Con el fin de observar la falla por tensión, es necesario utilizar un tamaño de murete menor al especificado en la ASTM E519. En este trabajo se propuso considerar muretes con una longitud de 60 cm con base en los resultados de los modelos del Método de Elemento Finito.

5. El mortero de pared delgada contribuye a la resistencia a compresión diagonal de los muretes. El mortero actúa como un refuerzo, incrementando la resistencia a compresión diagonal de la mampostería de CCA.
6. El patrón de agrietamiento en un murete sometido a compresión diagonal depende de la ubicación de las juntas de mortero de pared delgada. Se observó que, si existen juntas de mortero en el centro, el agrietamiento inició cerca de los cabezales y posteriormente se propagó al centro del murete. Si no existen juntas de mortero al centro, el agrietamiento inició al centro del murete y la grieta fue paralela a la diagonal del murete.
7. Se propone una ecuación para calcular la resistencia a compresión diagonal del CCA en función de la resistencia a tensión del CCA y el tamaño del murete. Conforme aumenta la resistencia a tensión, aumenta la resistencia a compresión diagonal de forma proporcional. Conforme aumenta la longitud del murete, disminuye la resistencia a compresión diagonal del CCA de forma asintótica.
8. Los esfuerzos máximos a tensión del CCA se aproximan correctamente con la norma ASTM C1006 (bloque) y los esfuerzos máximos a tensión de la mampostería con CCA con la norma ASTM E519 (murete). Por otra parte, el

valor de la resistencia a compresión diagonal calculado con la norma NMX es 1.5 veces mayor que el esfuerzo máximo de tensión.

9. La distribución de esfuerzos a tensión con respecto a la altura depende de la geometría del espécimen. El cilindro (ASTM C493) y el bloque (ASTM C1006) tienen una distribución de esfuerzos a tensión más uniforme y un porcentaje mayor de la sección transversal está a tensión en comparación con el murete (ASTM E519).

## 7 REFERENCIAS

Alcocer R.A. (2017). Ecuaciones de diseño por cortante para muros confinados de CCA. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

Al-Kashif M., Abdel-Mooty M., Fahmy E., Abou Zeid M. and Haroun M. (2012) Nonlinear Modeling and Analysis of AAC infilled Sandwich Panels for out of Plane Loads. "International Journal of Civil", Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 6, No. 4, 272-276.

Argudo J. (2003). Evaluation and synthesis of experimental data for autoclaved aerated concrete. PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin. Austin, Texas, USA.

ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Splitting Tensile Strength of Masonry Units, ASTM C 1006 (2001), West Conshohocken, PA, 2001.

ASTM - American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Autoclaved Aerated Concrete (AAC), ASTM C 1693, 2011.

ASTM - American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms, ASTM C1314-18, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM - American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, ASTM E 519 (2002), West Conshohocken, PA, 2002.

Bazant Z. P. y Planas J. (1998). Fracture and size effect, CRC Press, E.U.A.

Chim R.U. (2017). Comportamiento a cortante en muros confinados de concreto celular de autoclave: Efecto de la relación de aspecto. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

Drysdale G. Robert, Hamid A. Hamid (2008). Masonry Structures, Behavior and Design, 3° edición, The Masonry Society, Boulder Colorado.

Ferretti, D., Michelini, E., & Rosati, G. (2015). Cracking in autoclaved aerated concrete: Experimental investigation and XFEM modeling. Cement and Concrete Research, 67, 156–167.

GDF - Gobierno del Distrito Federal (2017), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, "Gaceta Oficial del Distrito Federal", México.

Gettu R., Shah S. (1997). "Fracture Mechanics". High performance concretes and applications. Shah S., Ahmad S. (Eds.), pp. 161 – 212, Edward Arnold, Gran Bretaña.

Hernandez M. García L. (2015). Block Celular AAC4 y AAC6, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (Informe Técnico No. 222/223)

Janaraj, T. & Dhanasekar, M., 2014. Finite element analysis of the in-plane shear behaviour of masonry panels confined with reinforced grouted cores. Construction and Building Materials, pp. 495-506.

Koudelka, T., Kruis, J., & Maděra, J. (2015). Coupled shrinkage and damage analysis of autoclaved aerated concrete. Applied Mathematics and Computation, 267, 427–435.

Lourenço, P. B. & Rots, J. G., 1997. Multisurface Interface Model for Analysis of Masonry Structures. "Journal of Engineering Mechanics", Issue 123, pp. 660-668.

Lourenço Paulo B., Rots Jan G., Blaauwendraad Johan (1998). Continuum model for masonry: parameter estimation and validation. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 124(6), 642-652.

Malyszko Leszek, Kowalska Edyta, Bilko Piotr (2017). Splitting tensile behaviour of autoclaved aerated concrete of different specimens' results. Construction and Building Materials 157. 1190-1198.

Marín, F. J., 2008. Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería de piezas de concreto. Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán.

N. Narayanan, K. R. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. "Cement & Concrete Composites" (22), 321-329.

Parker, J. E., Tanner J., Varela J. (2007). Evaluation of ASTM Methods to Determine Splitting Tensile Strength in Concrete, Masonry, and Autoclaved Aerated Concrete. "Journal of ASTM International", 4(2), 1-12.

Pérez Gavilán J., Flores L., and Alcocer S. (2015). An experimental study of confined masonry walls with varying aspect ratio. Earthquake Spectra, 31(2): 945-968.

Pierkarczyk, A., Drobiec J. and Kubica J. (2000). AAC Blocks Masonry Compressed Perpendicular and Parallel to the Bed Joints. 12<sup>th</sup> International brick/block masonry conference. Madrid, Spain.

Qu, X. y Zhao, X. (2016). Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review. *Construction and Building Materials*. 135(2017) 505 – 516.

Ricalde J. L. (2017). Flexión en muros confinados de concreto celular de autoclave: Efecto de la carga axial. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

Schober G. (2005) The most important aspects of microstructure influencing strength of AAC. Limbachiya and Roberts. Sägmühlstraße, Olching, Germany.

Shabbar Rana, Nedwell Paul, Zhangjian Wu. (2017). Mechanical properties of lightweight aerated concrete with different aluminium powder content. MATEC Web of Conferences, 120.

Shah S. P., Swartz S. E., Ouyang C. (1995). Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle materials. John Wiley and Sons, E.U.A.

TNO, 2011. User's Manual - Release 10.1, Delft: TNO Building and Construction Research, Department of Computational Mechanics, Delft, Holanda.

Wittmann F. H. y Gheorghita I. (1983). Fracture toughness of autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*. Volume 14, Issue 3. Pages 369-374.

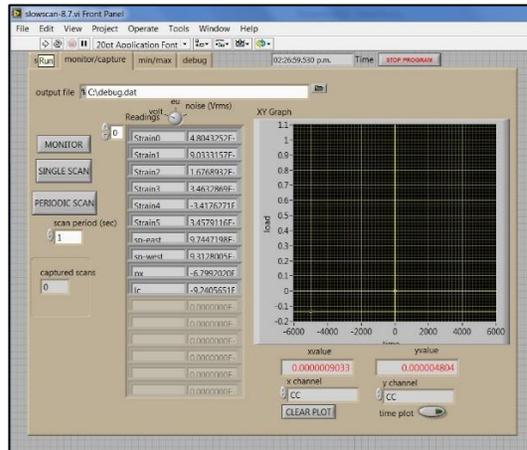
## APÉNDICE A. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos se realizó utilizando el equipo del Laboratorio de Mecánica de Materiales de la FIUADY de marca “National Instruments”, cuyos principales componentes se presentan en la Tabla A.1.

Tabla A.1 Sistema de adquisición de datos

Dispositivo	Fotografía
Chasis SCX2-1000	
Módulo 1520	
Bloque Terminal SCXI-1314	

LabView de National Instruments, versión 8.2



Dispositivo de entrada/salida multifunción



## APÉNDICE B. RESULTADOS DE VARIACIÓN DE LA HUMEDAD

En este apéndice se presentan resultados experimentales de ensayos adicionales que se hicieron a los presentados en la sección de resultados. Se ensayaron tres cubos que tenían diferente contenido de humedad y la resistencia a compresión axial de los cubos de CCA (Tabla B.1). Estos resultados no se presentan en el capítulo correspondiente ya que los contenidos de humedad están fuera de la norma ASTM.

Tabla B.1 Contenido de humedad y resistencia a compresión axial del CCA

	Humedad	$f_{CCA}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
R1	15.08%	51.65
M1	8.41%	57.94
A1	1.72%	63.87

## APÉNDICE C. PATRONES DE AGRIETAMIENTO DE MURETES

En este apéndice se presentan los patrones de agrietamiento correspondientes a los 5 ensayos de compresión diagonal de muretes de 60 cm de longitud.

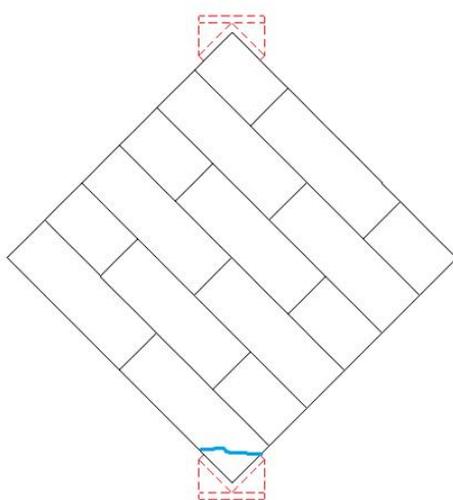


Figura C.1 Agrietamiento Murete M1 120

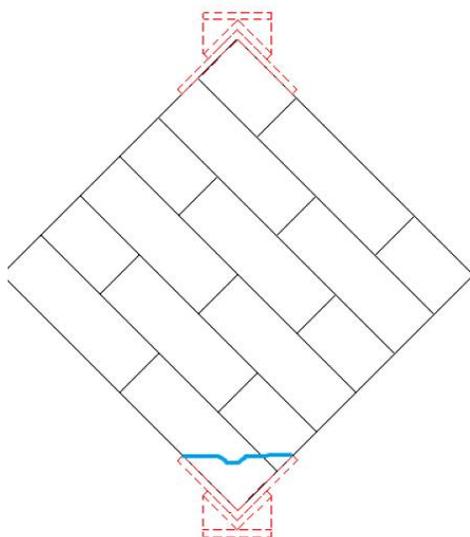


Figura C.2 Agrietamiento Murete M2 120

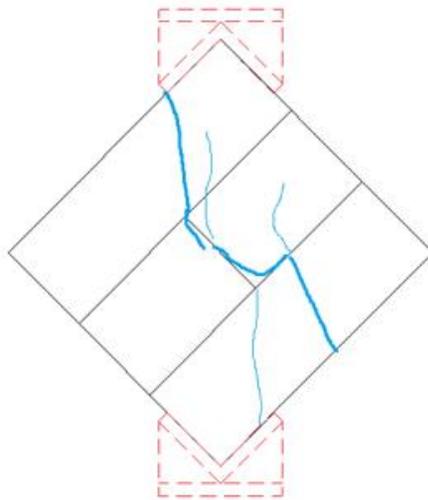


Figura C.3 Agrietamiento Murete M1 60

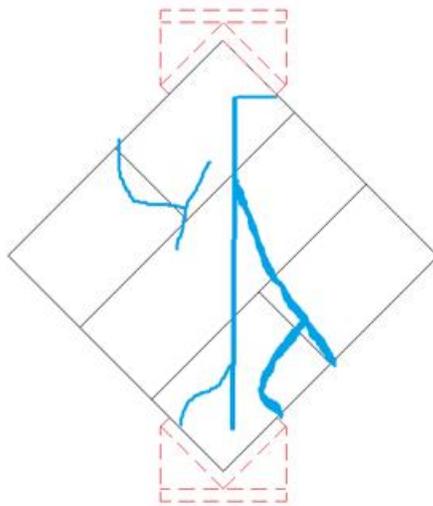


Figura C.4 Agrietamiento Murete M2 60

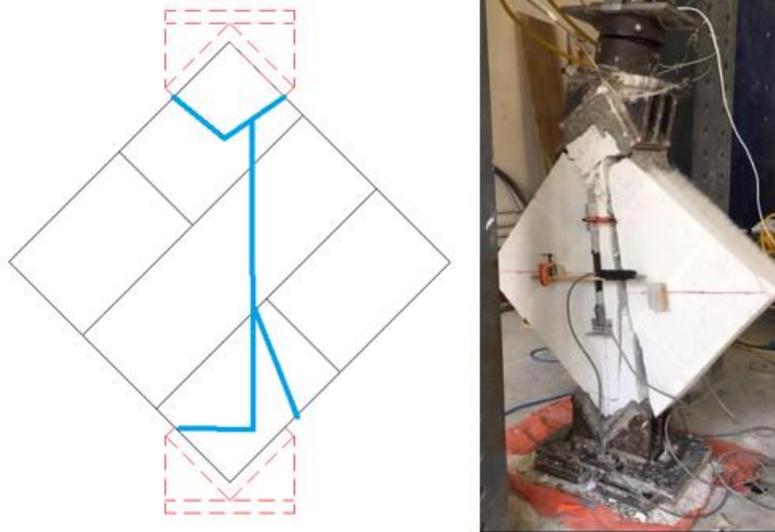


Figura C.5 Agrietamiento Murete M3 60

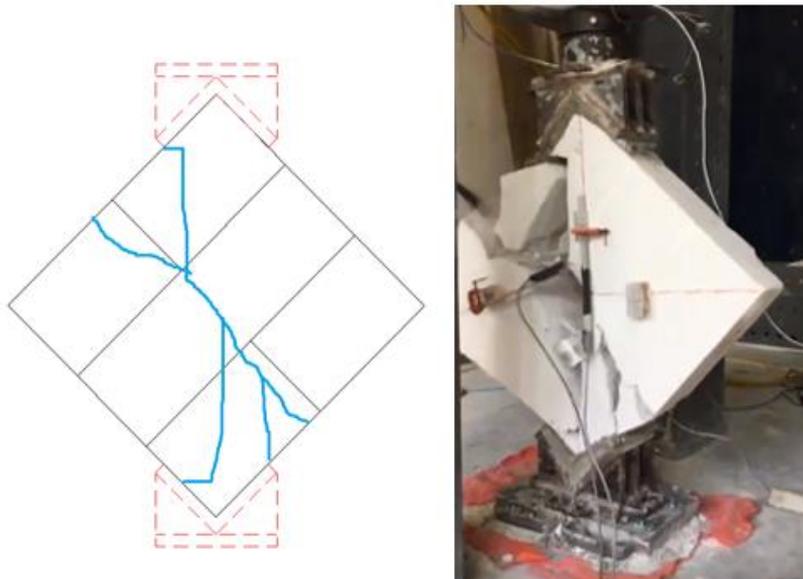


Figura C.6 Agrietamiento M4 60

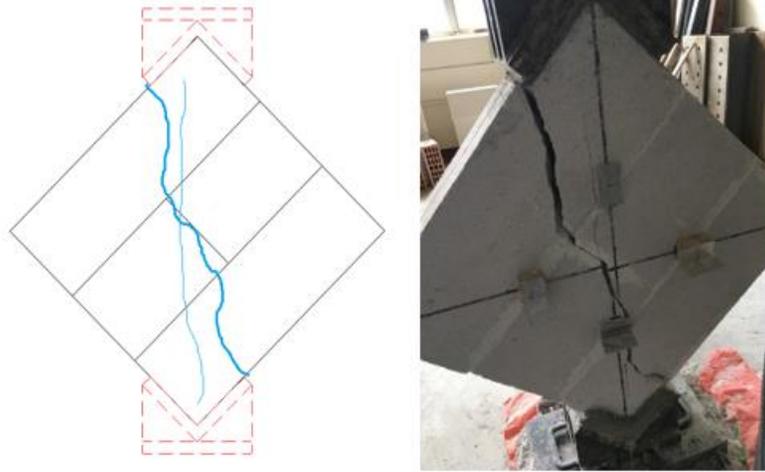


Figura C.7 Agrietamiento M5 60

## ANEXO A. ENSAYES DE COMPRESIÓN DIAGONAL

### HERNÁNDEZ (2015) CCA-4

En este anexo se presentan los resultados del ensaye de compresión diagonal de Hernández (2015) para mampostería con CCA-4.

ENSAYE A COMPRESION DIAGONAL DE MURETES									
Orden de Trabajo No. 776				Informe Técnico No. 160			Hoja No. 7 de 13		
Cliente XELLA MEXICANA, S.A. DE C.V.									
Tipo BLOCKS CONCRETO CELULAR CURADO EN AUTOCLAVE (AAC4)									
Identificación									
Cliente No.	IMCYC Especimen No.	Largo (cm)	Alto (cm)	Espesor (cm)	Diagonal (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kgf)	$\bar{v}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$v^*$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
MURETES AAC4	312 / 10	100.5	100.4	14.8	141.0	2 086.8	12 700	6.1	4.0
MURETES AAC4	312/ 11	100.5	100.3	14.8	141.0	2 086.8	10 700	5.1	
MURETES AAC4	312/ 12	100.5	100.5	14.9	141.0	2 100.9	10 100	4.8	
MURETES AAC4	312/ 13	100.5	100.5	15.0	141.5	2 122.5	13 000	6.1	
MURETES AAC4	312/ 14	100.5	100.5	15.0	141.5	2 122.5	16 000	7.5	
MURETES AAC4	312/ 15	100.5	100.5	15.0	141.5	2 122.5	9 200	4.3	
MURETES AAC4	312/ 16	100.5	100.5	15.0	141.5	2 122.5	14 500	6.8	
MURETES AAC4	312/ 17	100.5	100.5	15.0	117.0	1 755.0	14 200	8.1	
MURETES AAC4	312/ 18	100.5	100.5	15.0	117.5	1 762.5	14 700	8.3	
<p>Donde: <math>v^*</math> = Esfuerzo cortante resistente de diseño</p> <p>Fórmula: <math>v^* = \frac{\bar{v}}{1 + 2,5Cv}</math>      <math>\bar{v}</math> = Es el promedio de los esfuerzos resistentes de los muretes ensayados</p> <p><math>Cv = 0.23</math> (Coeficiente de variación de los esfuerzos resistentes de los muretes ensayados)</p>									
<p>Observaciones EL MUESTREO Y PROCEDENCIA DE LOS ESPECIMENES EMPLEADOS PARA LA ELABORACION DE LOS MURETES NO FUE RESPONSABILIDAD DEL IMCYC</p> <p>LAS PILAS FUERON ELABORADAS POR EL CLIENTE</p>									
<p>Referencias Norma Mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010</p> <p>Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería RCDF 2004</p>									
<p>Equipo LCO-001-01; LCO-058-03</p>									
<p>Realizó A.C.G.      Revisó Ing. Mario A. Hernández      Fecha 2015-05-14</p>									

Figura D.1 Resultados ensaye a compresión diagonal Hernández (2015)

# ANEXO B. ENSAYES DE COMPRESIÓN DIAGONAL

## HERNANDEZ (2015) CCA-6

ENSAYE A COMPRESION DIAGONAL DE MURETES									
Orden de Trabajo No. 776					Informe Técnico No. 160			Hoja No. 7 de 13	
Cliente XELLA MEXICANA, S.A. DE C.V.									
Tipo BLOCKS CONCRETO CELULAR CURADO EN AUTOCLAVE (AAC6)									
Identificación		Largo (cm)	Alte (cm)	Espesor (cm)	Diagonal (cm)	Área (cm²)	Carga (kgf)	$\bar{v}$ (kgf/cm²)	$v^*$ (kgf/cm²)
Cliente No.	IMCYC Especimen No.								
MURETES AAC6	312A / 10	100.6	100.5	15.0	141.5	2 122.5	14 700	6.9	4.9
MURETES AAC6	312A / 11	100.1	100.5	15.0	141.7	2 125.5	14 300	6.7	
MURETES AAC6	312A / 12	100.1	100.3	15.0	141.5	2 122.5	18 500	8.7	
MURETES AAC6	312A / 13	100.7	100.5	15.0	141.3	2 119.5	14 800	7.0	
MURETES AAC6	312A / 14	100.8	100.3	15.0	141.5	2 122.5	14 100	6.6	
MURETES AAC6	312A / 15	100.8	100.5	15.0	141.5	2 122.5	12 900	6.1	
MURETES AAC6	312A / 16	100.8	100.3	15.0	141.5	2 122.5	18 300	8.6	
MURETES AAC6	312A / 17	100.9	100.3	15.0	141.5	2 122.5	14 700	6.9	
MURETES AAC6	312A / 18	100.8	100.4	15.0	141.5	2 122.5	19 500	9.2	

Donde:  $v^*$  = Esfuerzo cortante resistente de diseño  
 $\bar{v}$  = Es el promedio de los esfuerzos resistentes de los muretes ensayados  
 $Cv = 0.20$  (Coeficiente de variación de los esfuerzos resistentes de los muretes ensayados)

Fórmula:  $v^* = \frac{\bar{v}}{1 + 2.5Cv}$

Observaciones	EL MUESTREO Y PROCEDENCIA DE LOS ESPECIMENES EMPLEADOS PARA LA ELABORACION DE LOS MURETES NO FUE RESPONSABILIDAD DEL IMCYC <b>LAS PILAS FUERON ELABORADAS POR EL CLIENTE</b>
Referencias	Norma Mexicana NMX-C-464-ONNCCCE-2010 Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería RCDF 2004
Equipo	LCO-001-01; LCO-058-03
Realizó	A.C.G.
Revisó	Ing. María A. Hernández
Fecha	2015-05-14

Figura E.1 Resultados ensaye a compresión diagonal Hernández (2015)

