



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ENSAYE DE MUROS DE MAMPOSTERÍA
CONFINADA CON DIFERENTE LONGITUD Y
USO DE PIEZAS MULTIPERFORADAS DE
ARCILLA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

PABLO OLALDE GUTIÉRREZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. JUAN JOSÉ PÉREZ GAVILÁN ESCALANTE



CD. UNIVERSITARIA, MEXICO D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

A mis papas:

Angélica Gutiérrez Anaya

Pablo Olalde Torres

Gracias por todo su apoyo y comprensión incondicional.

A mi hermana:

Julia Angélica Olalde Gutiérrez

Por sus opiniones oportunas, para que esto fuera posible.

A mis abuelitas:

Gudelia Anaya Santana (†)

Me hubiese gustado que vieras como terminaba esto, que tú lo viste iniciar.

Catalina Torres (†)

AGRADECIMIENTOS

A la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE), por darme la oportunidad de colaborar en este proyecto, además del apoyo de la beca recibida durante el desarrollo de los ensayos.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, en particular al el Laboratorio de Materiales por todo el apoyo técnico en la realización de estas pruebas.

Al Dr. Juan José Pérez Gavilán por su apoyo, dedicación y paciencia, para que este escrito fuera una realidad. También se le agradece la serenidad para aterrizar ideas sobre la presentación de resultados.

Al M.I. Leonardo E. Flores por toda la gran experiencia que apporto en el desarrollo de las pruebas, ya sea para la construcción de los modelos como en el análisis de resultados.

Al personal del Instituto de Ingeniería, Raymundo Mondragón, Salomón Trinidad, Agustín Muñiz y Eddy Grandy por su gran e indispensable ayuda y por todos esos buenos momentos que hicieron de este proyecto una experiencia muy divertida.

Al igual se le agradece al personal del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), a los Hermanos Olmos encargados del Laboratorio de Estructuras, a los becarios de Arquitectura Cecilia Tavera y Tomas por su apoyo en la instrumentación de los especímenes.

Agradecimiento especial a los becarios del Instituto de Ingeniería: Osiel Cruz por esa alineación de resultados que parecía imposible, y a Bernardo Orozco por su apoyo en el cálculo de los cilindros de concreto.

A mis profesores y sinodales: M.I. Octavio García ya que gracias a el me involucre en este proyecto, al Ing. Francisco Chacón que influyo en que me interesara la ingeniería estructural, a M.I. Ricardo Padilla por acercarme al método científico, al Ing. Juan Luis Cottier por esa vinculación con el desarrollo y prueba de materiales. Agradezco especialmente al Ing. Heriberto Esquivel por su apoyo durante la carrera.

A mis amigos:

A Evelyn Isidro por sus múltiples ayudas durante la carrera, Christopher Tzompantzi por todos esos sabios e imprudentes consejos que has compartido conmigo, Cristian Daniel Álvarez por ser tan directo y a la vez critico, Ángel Ignacio Nava por su sencillez, Robinson Pérez por esas ayudas en la computadora, aunque realmente agradezco su compañía y amistad por todos estos años.

Cecilia Correa por esos momentos de humor involuntario, Juan Carlos Alcerreca por hacerme un poco más responsable, Luis Ángel Camacho por hacerme un poco más irresponsable, gracias a ellos conocí las actividades que realizaba el Instituto.

José Antonio Alcalá por sus charlas interminables en donde nunca se llegaba a una conclusión, pero si se exigía sarcásticamente que terminara esta tesis, Tabaré Arrúa por soportarme y a Héctor Hernández porque si, y por su buen humor.

A Erandi Ramírez por su gran amistad y además por la paciencia para escucharme.

Karina Betzabeth M. Sánchez por su infinito apoyo durante mi servicio social, así como en la redacción de este documento, muchas gracias y te quiero mucho.

Odalís E. Mendoza por ayudarme a capturar esos números incomprensibles, Swini Uri Gutiérrez por esa gran filosofía de vida durante la emergencia de la influenza y a Esaú Vázquez por esa tranquilidad con la que se maneja siempre.

A Pamela Elizondo y Dario Romero por esa pequeña distracción y relajación que fue Taxco.

A Lizzie Paola Velasco por hacerme ver que siempre hay tiempo para todo, a las niñas biólogas Yadira Blanco, la señora Amalia y a su hija Fanny, Guadalupe Bribiesca, Viridiana Tapia, Cuayutitlali Ramírez, Erika L. Galicia, Edith Lorezana, Erika Peralta (La ama y señora de Escobilla), Rodolfo y Anselmo “Cachimba” por hacer muy divertida e interesante mi estancia en Mazunte y hacerme recordar mis obligaciones.

A Oscar Segura, Gabriel Vivaldo, Manuel Rodríguez y Germán Sierra por su ayuda y opiniones al tema mientras me encontraba laborando, y a mi tío Abundio Anaya por su apoyo desinteresado.

A Yelba Bolainez y a Jorge de la C. Guevara por darme la oportunidad de colaborar en un proyecto de la Facultad de Ingeniería mientras seguía la redacción de esta tesis.

ÍNDICE

INDICE	pág. v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	xi
INTRODUCCIÓN	2
ANTECEDENTES	2
MOTIVACIÓN	8
OBJETIVO	9
ALCANCES	10
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	12
1.1 ESPECÍMENES ANALIZADOS	12
1.1.1. Geometrías	13
1.1.2. Refuerzo Interno	14
1.1.3. Materiales propuestos	15
1.2 CIMENTACIÓN	16
1.3 MATERIALES UTILIZADOS	19
1.3.1. Elementos de la mampostería	19
1.3.1.1. <i>Piezas a compresión</i>	20
1.3.1.2. <i>Pilas a compresión</i>	21
1.3.1.3. <i>Muretes a compresión diagonal</i>	25
1.3.1.4. <i>Mortero</i>	28
1.3.2. Elementos de confinamiento	31
1.3.2.1. Castillos	33
1.3.2.2. Dalas y losa	35
1.4. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA PARA LAS PRUEBAS	36
1.4.1. Galgas extenso métricas	36
1.4.2. Micrómetros y Transductores	37
1.4.3. Arreglos de instrumentación	38
1.4.4. Elementos Ópticos	40

1.5.	APLICACIÓN DE CARGA	43
1.5.1.	Marco de Carga	43
1.5.1.1.	<i>Elementos para la aplicación de la carga</i>	43
1.5.1.2.	<i>Elementos para la transmisión de carga</i>	45
1.5.2.	Historial de cargas	47
2.	MODELOS MATEMÁTICOS DE ANÁLISIS	51
2.1.	INTRODUCCIÓN	51
2.2.	OBJETIVO	51
2.3.	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN LOS ESPECIMENES	52
2.3.1.	Mampostería	52
2.3.2.	Dalas y castillos	53
2.3.3.	Losa	53
2.3.4.	Viga de transmisión de carga	53
2.4.	MODELACIÓN POR METODO DE COLUMNA ANCHA	54
2.5.	MODELACIÓN POR ELEMENTO FINITO	55
2.5.1.	Geometrías	56
2.5.1.1.	<i>Secciones de mampostería</i>	56
2.5.1.2.	<i>Secciones de castillos</i>	58
2.5.1.3.	<i>Secciones de losa</i>	58
2.5.1.4.	<i>Secciones en viga</i>	60
2.5.2.	Condiciones de Frontera	62
2.5.2.1.	<i>Condición de empotramiento en cimentación</i>	62
2.5.2.2.	<i>Conexiones</i>	62
2.5.3.	Cargas aplicadas	64
2.5.4.	Distorsión obtenida y rigidez	65
2.6.	MODELACION POR ELEMENTO FINITO SIMPLIFICADO	66
3.	RESULTADOS GENERALES	68
3.1.	INTRODUCCIÓN	68
3.2.	PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS	68
3.3.	CURVAS DE HISTÉRESIS	69
3.4.	AGRIETAMIENTOS INICIALES	70
3.5.	ESFUERZOS CORTANTES	73
3.6.	RIGIDEZ EXPERIMENTAL	75

3.7.	RIGIDEZ TEORICA	76
3.7.1.	Rigidez con el Método de columna ancha	76
3.7.2.	Rigidez con el Método de los elementos finitos (MEF)	77
3.7.3.	Rigidez en MEF simplificado	78
3.8.	RIGIDEZ NORMALIZADA	80
3.9.	DEFORMADA EXPERIMENTAL	84
4.	CONCLUSIONES	92
4.1.	CONCLUSIONES GENERALES	92
4.2.	RECOMENDACIONES	93
APENDICES		
A.	MATERIALES ELASTICOS	95
A.1.	INTRODUCCIÓN	95
A.2.	PRINCIPIOS DE ELASTICIDAD	95
A.3.	RIGIDEZ DEBIDO A CORTANTE Y FLEXION EN COLUMNA ANCHA	98
A.4.	CONSIDERACIONES PARA MATERIAL COMPUESTO.	103
B.	DATOS DE MATERIALES UTILIZADOS	106
B.1.	ESPECÍMENES ANALIZADOS	106
B.2.	PILAS A COMPRESIÓN	107
B.3.	MURETES A COMPRESION DIAGONAL	108
B.4.	MORTERO	110
B.5.	CILINDROS DE CONCRETO	111
C.	RIGIDEZ LATERAL ANTE DISTINTOS NIVELES DE CARGA VERTICAL	114
C.1.	OBTENCIÓN DE LA RIGIDEZ LATERAL CON DIFERENTE NIVEL DE CARGA VERTICAL POR CICLOS	115
C.2.	CONCLUSIONES	119
BIBLIOGRAFIA		120

LISTA DE FIGURAS

Fig. I.1. Estimación de las fuerzas laterales a una estructura ocasionadas por sismo _____	5
Fig. I.2. Modelos de análisis ante cargas laterales _____	6
Fig. I.3. Planta arquitectónica y vista perspectiva de vivienda tipo _____	6
Fig. I.4. Esquema de rigideces en una vivienda _____	7
Fig. I.5. Relación de aspecto de muros H/L _____	8
Fig. 1.1. Geometría de los especímenes, acotaciones en cm. _____	13
Fig. 1.2. Armados de los castillos de los especímenes, dimensiones en mm. _____	14
Fig. 1.3. Armado de elementos de concreto _____	15
Fig. 1.4. Geometría de la viga de cimentación _____	16
Fig. 1.5. Colocación del armado de los castillos en los huecos de la viga de cimentación _____	17
Fig. 1.6. Detalle de las pilas y muretes en el sitio de construcción _____	19
Fig. 1.7. Arreglo de ubicación de muestras de pilas y muretes en los especímenes. _____	20
Fig. 1.8. Distribución estadística de las muestras de piezas a compresión _____	21
Fig. 1.9. Descripción dimensiones en pila, espesor altura. _____	21
Fig. 1.10. Consideraciones generales para el establecimiento de la elástica en la curva de esfuerzo-deformación unitaria. _____	22
Fig. 1.11. Distribución estadística de los resultados de las muestras de pilas a compresión _____	23
Fig. 1.12. Resultados de las muestras de pilas a compresión, por espécimen _____	24
Fig. 1.13. Componentes elásticas de las pilas _____	24
Fig. 1.14. Posicionamiento del murete para las pruebas de compresión diagonal _____	25
Fig. 1.15. Esquema de instrumentación óptica en muretes _____	25
Fig. 1.16. Distribución estadística de la resistencia a cortante de la mampostería _____	26
Fig. 1.17. Resistencia a la compresión diagonal por espécimen _____	27
Fig. 1.18. Componentes elásticas Gm _____	27
Fig. 1.19. Moldes de bronce para muestras de mortero. _____	28
Fig. 1.20. Distribución estadística de resistencia del mortero a compresión. _____	28
Fig. 1.21. Resultados generales de la resistencia del mortero _____	29
Fig. 1.22. Distribución de las muestras de mortero respecto a las hiladas de construcción de los especímenes. _____	30
Fig. 1.23. Procedimiento de muestreo de los cilindros en el ensaye, ejemplo ME1 _____	31
Fig. 1.24. Determinación del módulo de elasticidad en cilindros de concreto _____	32
Fig. 1.25. Medición y peso de los cilindros de concreto. _____	32
Fig. 1.26. Resistencia a compresión de los cilindros de concreto _____	34
Fig. 1.27. Componente elástica en cilindros de concreto _____	34
Fig. 1.28. Cimbrado de la losa y detalle de la tarima superior para anclaje. _____	35
Fig. 1.29. Detalle de circuito de galga extenso métrica _____	36
Fig. 1.30. Colocación de las galgas en las varillas de los castillos. _____	36
Fig. 1.31. Ubicación de las galgas en el armado del castillo _____	37
Fig. 1.32. Transductores utilizados micrómetro (DDP-50 ^a), y los transductores CDP _____	37
Fig. 1.33. Arreglos generales de instrumentación en los cuatro muros _____	39
Fig. 1.34. Modo de operación de la cámara de leds en los ensayos. _____	40
Fig. 1.35. Cámara receptora, y módulo de adquisición de datos del sistema Krypton-600 _____	41
Fig. 1.36. Arreglo de Led's para las pruebas de muros, para a) ME1, b) ME2, c) ME3 y d) ME4. _____	41

Fig. 1.37. Ubicación de los leds por franjas _____	42
Fig. 1.38. Actuador A1 empotrado en el muro de reacción en posición horizontal. _____	43
Fig. 1.39. Arreglo frontal y lateral del muro de reacción. _____	44
Fig. 1.40. Dimensiones superiores y vista isométrica del muro de reacción. _____	44
Fig. 1.41. Viga VL, con corte frontal y arreglo de union con actuadores _____	46
Fig. 1.42. Arreglo general de ensayos _____	47
Fig. 1.43. Historia de cargas laterales y distorsión _____	48
Fig. 2.1. Vista general del modelo ME1 por elementos finitos. _____	55
Fig. 2.2. Segmentación de los especímenes por tipo de material y geometría. _____	56
Fig. 2.3. Subdivisión de los elementos de mampostería. _____	57
Fig. 2.4. Sección tipo para los elementos de mampostería. _____	57
Fig. 2.5. Subdivisión de los elementos de los castillos. _____	58
Fig. 2.6. Seccionamiento de la losa, ejemplificado con el modelo ME1 _____	59
Fig. 2.7. Sección tipo para losa. _____	59
Fig. 2.8. Seccionamiento de la viga de transmisión de carga VL. _____	60
Fig. 2.9. Sección tipo para las placas de la viga VL. _____	60
Fig. 2.10. Seccionamiento de la plaza de conexión al actuador, y pretensado. _____	61
Fig. 2.11. Sección tipo para las placas de conexión y pretensado. _____	61
Fig. 2.12. Corte del muro con la losa de reacción y cimentación _____	62
Fig. 2.13. Ductos correspondientes para la losa de cada muro, en la viga de transmisión de carga. ____	63
Fig. 2.14. Zona de aplicación de carga en la placa de pretensado de la viga de transmisión. _____	64
Fig. 2.15. Evaluación de elasticidad para modelo Sin viga, presentando distorsión teórica en los transductores H1,H3,H4 y H5 para a)ME1, b)ME2, c) ME3 y d)ME4 _____	65
Fig. 2.16. Modelos de MEF simplificado, para los especímenes: a) ME1, b) ME2 y c) ME3, ME4. _____	66
Fig. 3.1. Curvas de histéresis de los especímenes: a) ME1, b) ME2, c) ME3 y d) ME4. _____	69
Fig. 3.2. Envoltentes de respuesta ante carga lateral en los muros. _____	70
Fig. 3.3. Patrón de agrietamientos en muros: a) ME1, b) ME2, c) ME3 y d) ME4. _____	71
Fig. 3.4. Aspecto final de los muros: a) ME1, b) ME2, c) ME3 y d) ME4. _____	72
Fig. 3.5. Envoltentes de respuesta en valores de esfuerzo. _____	73
Fig. 3.6. Envoltentes de respuesta normalizadas con esfuerzos cortantes de diseño. La línea punteada determina la zona de predicción de agrietamiento inicial. _____	74
Fig. 3.7. Rigidez experimental en cada espécimen. _____	75
Fig. 3.8. Rigidez teórica por método de columna ancha, visualizando rigidez experimental. _____	76
Fig. 3.9. Rigidez teórica por MEF, comparando rigidez experimental. _____	78
Fig. 3.10. Rigidez teórica de MEF simplificado con la rigidez experimental. _____	79
Fig. 3.11. Modelos de comparación para las rigideces en arreglo paralelo _____	80
Fig. 3.12. Comparativas con respecto a la rigidez de ME4, con el método de la columna ancha. _____	81
Fig. 3.13. Comparativas con respecto a la rigidez de ME4, con el método de elemento finito _____	82
Fig. 3.14. Comparación general de rigideces normalizadas con ME4 _____	83
Fig. 3.15. Distribución de los errores de exactitud en los muros. _____	85
Fig. 3.16. Obtención de curva elástica a partir de leds, ME1. _____	86
Fig. 3.17. Obtención de curva elástica a partir de leds, ME2. _____	87

Fig. 3.18. Obtención de curva elástica a partir de leds, ME3. _____	87
Fig. 3.19. Obtención de curva elástica a partir de leds, ME4. _____	88
Fig. 3.20. Deformada real del muro ME1, ciclo elástico $v=-2.42$ t. _____	89
Fig. 3.21. Deformada Real ME2, para ciclo elástico $v=2.99$ t. _____	89
Fig. 3.22. Deformada real en ME4, para ciclo elástico $v=7.33$ t. _____	90
Fig. AP.1. Regiones elásticas y plásticas, en una grafica esfuerzo deformación. _____	96
Fig. AP.2. Deformación por cortante en un plano. _____	97
Fig. AP.3. Viga en cantiléver, y sus componentes mecánicas de momento y cortante. _____	98
Fig. AP.4. Elemento en doble empotrado. _____	100
Fig. AP.5. Ejemplo de columnas de misma área transversal y diferente altura. _____	102
Fig. AP.6. Porcentaje de deformación que toma un material con respecto a su relación de aspecto. _	102
Fig. AP.7. Área Transformada de una sección compuesta de mampostería. _____	103
Fig. AC.1. Comportamiento de las rigideces laterales de acuerdo al nivel de carga vertical para ME1.	115
Fig. AC.2. Comportamiento de las rigideces laterales de acuerdo al nivel de carga vertical para ME2.	116
Fig. AC.3. Comportamiento de las rigideces laterales de acuerdo al nivel de carga vertical para ME3.	117
Fig. AC.4. Comportamiento de las rigideces laterales de acuerdo al nivel de carga vertical para ME4.	118

LISTA DE TABLAS

Tabla I.1. Clasificación de muros de mampostería según la función estructural. _____	2
Tabla I.2. Clasificación de muros de mampostería según su refuerzo. _____	3
Tabla I.3. Cronología de algunas investigaciones relevantes en materia de mampostería en México. __	4
Tabla 1.1. Esfuerzo a compresión y modulo elástico de la mampostería _____	23
Tabla 1.2. Valores promedio de esfuerzo a compresión diagonal, por espécimen _____	26
Tabla 1.3. Valores promedio para componente elástica en el concreto de los castillos. _____	33
Tabla 1.4. Resultados de esfuerzo a compresión, de los cilindros de dala y losa _____	35
Tabla 1.5. Nomenclatura general para los dispositivos de medición. _____	38
Tabla 1.6. Distancia de posición de los leds desde la parte superior, y leds asociados. _____	42
Tabla 1.7. Área transversal bruta por espécimen, contando el área de castillos. _____	47
Tabla 1.8. Cargas laterales aplicadas, resumen de historial de cargas. _____	49
Tabla 2.1. Valores promedio de las propiedades mecánicas para mampostería _____	52
Tabla 2.2. Valores promedio de modulo de cortante en muretes de mampostería, por espécimen. ____	52
Tabla 2.3. Valores promedio de las propiedades mecánicas para el concreto en castillos _____	53
Tabla 2.4. Valores promedio de las propiedades mecánicas del concreto para losa. _____	53
Tabla 2.5. Valores característicos del acero A-36 _____	53
Tabla 2.6. Propiedades de los materiales en muros y sus respectivas áreas de cortante y momento de inercia. _____	54
Tabla 2.7. Cargas laterales incluidas en la simulación _____	64
Tabla 3.1. Valores de las cargas de agrietamiento iniciales en los muros. _____	70
Tabla 3.2. Comparativas de la cortante resistente V_{mR} y de agrietamiento experimentales. _____	74
Tabla 3.3. Rigideces experimentales promedio por muro y ciclo. _____	75
Tabla 3.4. Rigidez teórica con el método de la columna ancha. _____	76
Tabla 3.5. Rigidez teórica en MEF para cada espécimen. _____	77
Tabla 3.6. Rigidez teórica con MEF simplificado _____	79
Tabla 3.7. Comparativa de rigidez lateral experimental, con respecto a ME4. _____	81
Tabla 3.8. Comparativa de rigidez lateral con método de columna ancha, con respecto a ME4. ____	81
Tabla 3.9. Comparativa de rigidez lateral con MEF, con respecto a ME4. _____	82
Tabla 3.10. Comparativa de rigidez lateral con MEF simplificado, con respecto a ME4. _____	82
Tabla 3.11. Comparativas geométricas, con respecto a ME4. _____	83
Tabla AC.1. Rigideces laterales en ciclos iniciare con diferente carga axial para el modelo ME1 ____	115
Tabla AC.2. Rigideces laterales en ciclos iniciare con diferente carga axial para el modelo ME2 ____	116
Tabla AC.3. Rigideces laterales en ciclos iniciare con diferente carga axial para el modelo ME3 ____	117
Tabla AC.4. Rigideces laterales en ciclos iniciare con diferente carga axial para el modelo ME4 ____	118

Introducción

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

Uno de los materiales con mayor diversidad de usos, desde la antigüedad hasta nuestros días, es la mampostería y se define como un material compuesto, integrado por piezas naturales o moldeadas artificialmente, acopladas entre si por un mortero adhesivo. Sus componentes han variado a largo del tiempo, desde rocas simples hasta las unidades industrializadas de arcilla y concreto, utilizándose ampliamente en la construcción de edificaciones.

El hecho de que la mampostería es un material elaborado por las manos del hombre invita a que se le agregue un efecto aleatorio sobre su calidad y resistencia para los propósitos de construcción. Esto hace de la mampostería un material interesante para estudiarlo a detalle.

El arreglo común de la mampostería en una edificación son los muros, estos se pueden definir por su función en una edificación. Una de las clasificaciones de muro es la del peruano San Bartolomé en 1994.

Tipo	Descripcion
Muros no cargadores	Los que no soportan carga vertical. Ejemplos: pretilas, bardas, parapetos, muros divisorios, etc.
Muros cargadores	Los que soportan cargas laterales y verticales, tanto en su plano como perpendiculares entre si. Ejemplos: muros confinados, muros reforzados, etc.
Muros diafragma	Se encuentran dentro de armazones estructurales de concreto y acero.

Tabla I.1. Clasificación de muros de mampostería según la función estructural. (San Bartolomé 1994).

Otra clasificación importante es de acuerdo al arreglo de refuerzo que tenga el muro, en los que además se relacionan con los métodos constructivos en cada región. Esta clasificación fue hecha por Tomazevic en 1999.

Tipo	Descripcion	Usado en
Muros confinados	Son aquellos en la que el refuerzo de acero se coloca dentro de elementos de concreto, de sección transversal pequeña, los cuales tienen dimensiones similares al muro. Este refuerzo de acero y concreto rodea al muro, lo confina.	Ampliamente usado en América Latina, en algunos países de Europa como Italia y Grecia, y en Asia en países como China e Indonesia.
Muros reforzados interiormente	En estos el acero de refuerzo se distribuye tanto vertical como horizontalmente, colocándolo entre las hiladas y dentro de las celdas de las piezas que conforman a la mampostería.	Este método constructivo es tomado única opción en países como Estados Unidos, Canadá, Nueva Zelanda y Japón.
Muros simples	Son muros sin ningún refuerzo de acero y de otro tipo, en la que se basa prácticamente en la resistencia de las piezas que lo conforman.	Estructuras temporales, comunidades pobres, autoconstrucción

*Tabla I.2. Clasificación de muros de mampostería según su refuerzo.
(Et al, Tomazevic 1999).*

En el siglo pasado, tras la segunda guerra mundial se estimularon a nivel mundial las investigaciones sobre la mampostería, normalmente por reacción ante desastres naturales ó incitados por el hombre.

Numerosos investigadores alrededor del mundo han hecho énfasis en el estudio del comportamiento de la mampostería, de acuerdo a la prioridad de cada región, aunque principalmente por los resultados obtenidos en sismos, que pueden ser buenos por una correcta elaboración y refuerzo o que lleven a daños considerables y colapso por malas prácticas constructivas y de diseño.

La investigación de la mampostería en México comenzó a partir de los años sesenta, después de los efectos sufridos en los sismos de 1957. Estas investigaciones fueron emprendidas por la Universidad Nacional Autónoma de México, a través del Instituto y Facultad de Ingeniería, continuando su labor hasta nuestros días. Se abarcaron en estos estudios la calidad de los elementos que conforman la mampostería, ensayes a diferentes arreglos de muros ya sean confinados, reforzados interiormente y muros diafragma.

La mayoría de las investigaciones se enfocaron: en los materiales existentes en México, que van del adobe hasta piezas industrializadas de arcilla y concreto; en el arreglo más utilizado de refuerzo que son los muros confinados.

Entre las investigaciones en México destacamos al Dr. Meli Piralla, que ha sido pionero en pruebas experimentales de mampostería, y estableció un estudio de muros de mampostería ante cargas cíclicas.

Investigadores	Año	Proyecto
Esteva	1961	Prueba en laboratorio de 47 muros a compresión axial.
Esteva	1966	Prueba de 27 muros diafragma a deformación cíclica.
Meli, Zeevaert y Esteva	1968	Disipación de energía en 18 muros, de concreto y ladrillo, ante carga cíclica.
Salgado y Meli	1969	Prueba de 48 muros en cargas alternadas.
Madinaveitia y Rodríguez	1970	26 muros de bloque de concreto, ladrillo de barro recosido macizo y hueco, y ladrillo asfáltico a carga axial.
Madinaveitia	1971	38 muros de ladrillo de barro hueco y bloque de concreto hueco, a cargas verticales excéntricas.
Meli y Hernández	1971	Propiedades mecánicas de piezas de mampostería de la Ciudad de México.
Meli y Reyes	1971	Estudio estadístico de pilas y muretes a compresión diagonal, con diferentes tipos de piezas.
Meli y Hernández	1975	Relación distorsión-agrietamiento en 20 muros y 200 muretes a compresión diagonal.
Hernández y Meli	1976	Carga lateral alternada en 15 muros de bloque de concreto y ladrillo de barro confinados.
Hernández	1977	Muros de bloques de concreto, con juntas de mortero de fibra de vidrio
Meli	1979	Recomendaciones para el diseño sísmico de estructuras de mampostería.
Bazán, Padilla Y Meli	1980	Estudios generales sobre el comportamiento del adobe como pieza en muros de mampostería en zonas rurales.
Hernández, Meli, Padilla y Valencia	1981	

Tabla. 1.3. Cronología de algunas investigaciones relevantes en materia de mampostería en México.

La importancia de estas investigaciones son sus aplicaciones en el diseño estructural y los procesos constructivos de la mampostería. Esto llevo a la normalización de las construcciones en mampostería en México, cuyas recomendaciones han sido aplicadas por diversos países para elaborar sus normas locales.

Una edificación consta de varios elementos, en el caso de vivienda se tienen los muros, columnas, losas, marcos, etc. Se analiza al conjunto de estos elementos como una estructura, en las que intervendrán los cálculos estructurales y de mecánica de materiales.

En el análisis estructural se estudian diversas causas que pueden afectar una edificación, como son el peso propio, el peso temporal y acciones accidentales (Fig. I.1), que se valúan como cargas. Los efectos a los que estará sometida una edificación son los desplazamientos y esfuerzos internos en los materiales que la conforman. Para llevar a cabo el análisis es necesario estimar las propiedades mecánicas de los materiales con los que se piensa se construirá la obra y así con todas estas disposiciones se podrá justificar la seguridad de la edificación.

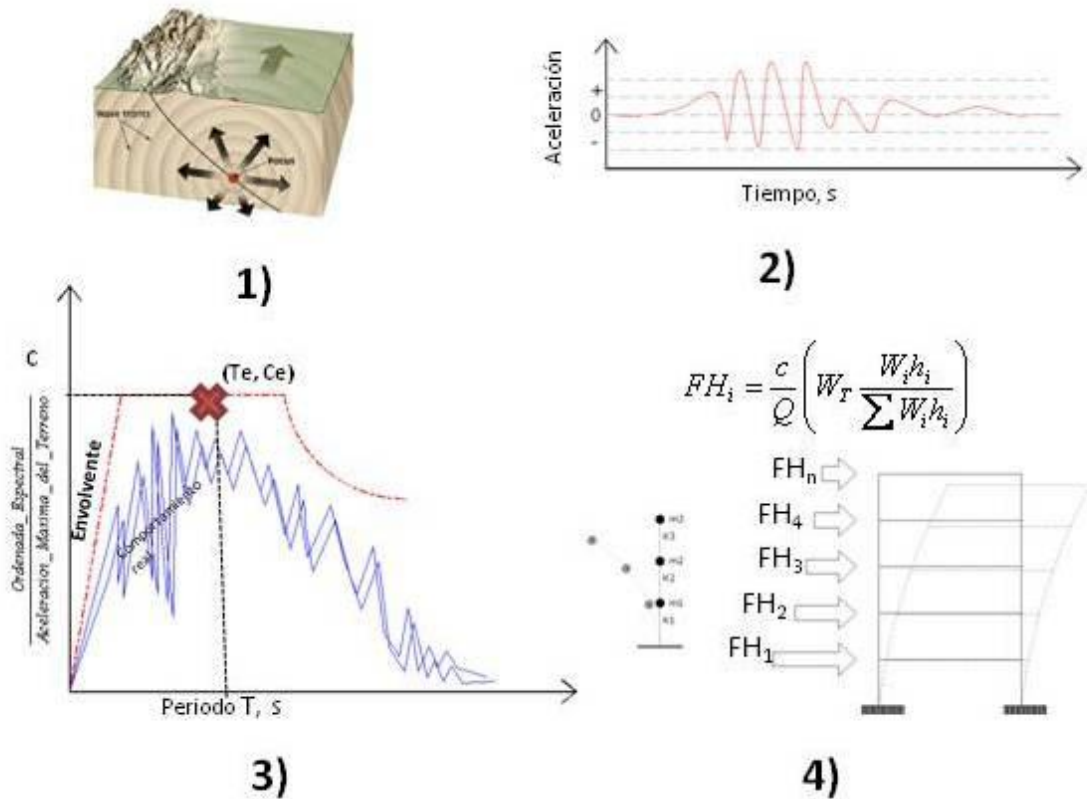


Fig. I.1. Estimación de las fuerzas laterales a una estructura ocasionadas por sismo: 1) Se toma en cuenta el origen del sismo y el tipo de suelo en que se hará el análisis¹, 2) Después se analizan el máximo histórico con acelerogramas, 3) Se elaboran espectros de diseño con las aceleraciones de suelo en la zona de análisis, 4) Se estiman fuerzas estáticas laterales en una estructura de acuerdo a su periodo natural de vibración en la zona de análisis.

Una de las teorías en mecánica de materiales es el comportamiento elástico lineal, que supone a un elemento deformarse proporcionalmente a la fuerza que se le aplica, y que al dejársele de aplicar regrese a su forma original, tal y como lo hace un resorte. Como no todos los materiales se comportan así, se busca un pequeño rango de desplazamientos donde sí ocurra dicha teoría y se le asigna una componente llamada **rigidez**, que es la razón de fuerza aplicada con los desplazamientos obtenidos en

¹ E. J. Tarbuck, Ciencias de la Tierra, Sismos

dicho material. Esto ha llevado al análisis de varios modelos que suponen el comportamiento ante cargas laterales.

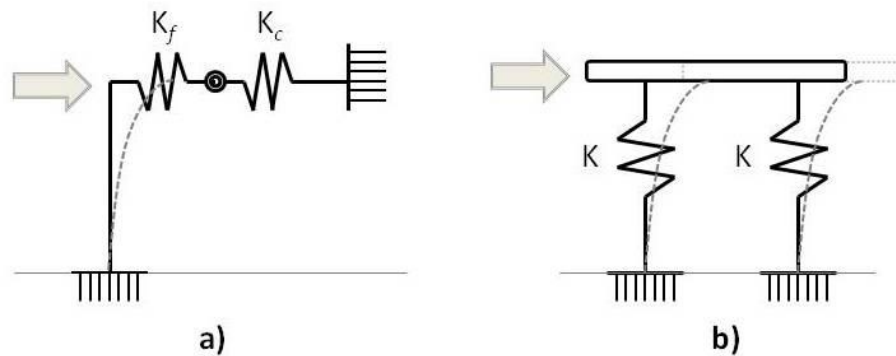


Fig. 1.2. Modelos de análisis ante cargas laterales: a) Modelo de columna ancha con rigidez por flexión (K_f) y cortante (K_c), b) Modelos de marco con losa rígida.

Con las estimaciones de carga lateral se establece en el diseño que las edificaciones se comporten homogéneamente y eviten lo posible torsión, esto llevo a la suposición de que sus desplazamientos fueran iguales por piso. Esto lleva a analizar elementos de una edificación para que su comportamiento sea normalizado y semejante. Para explicar esto, definimos la siguiente estructura (Fig. 1.3).

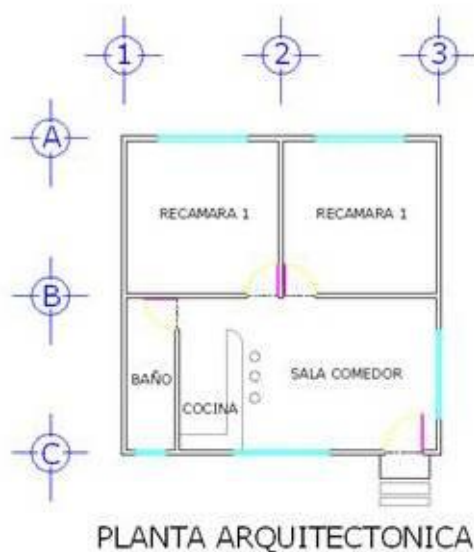


Fig. 1.3. Planta arquitectónica y vista perspectiva de vivienda tipo

En este sencillo modelo, se establece que cada elemento de la edificación tendrá una componente elástica de rigidez, en este caso las componentes de la edificación son los muros. De acuerdo al sentido de la carga lateral, las componentes de la edificación tomarán esta carga de acuerdo a su rigidez y posición.

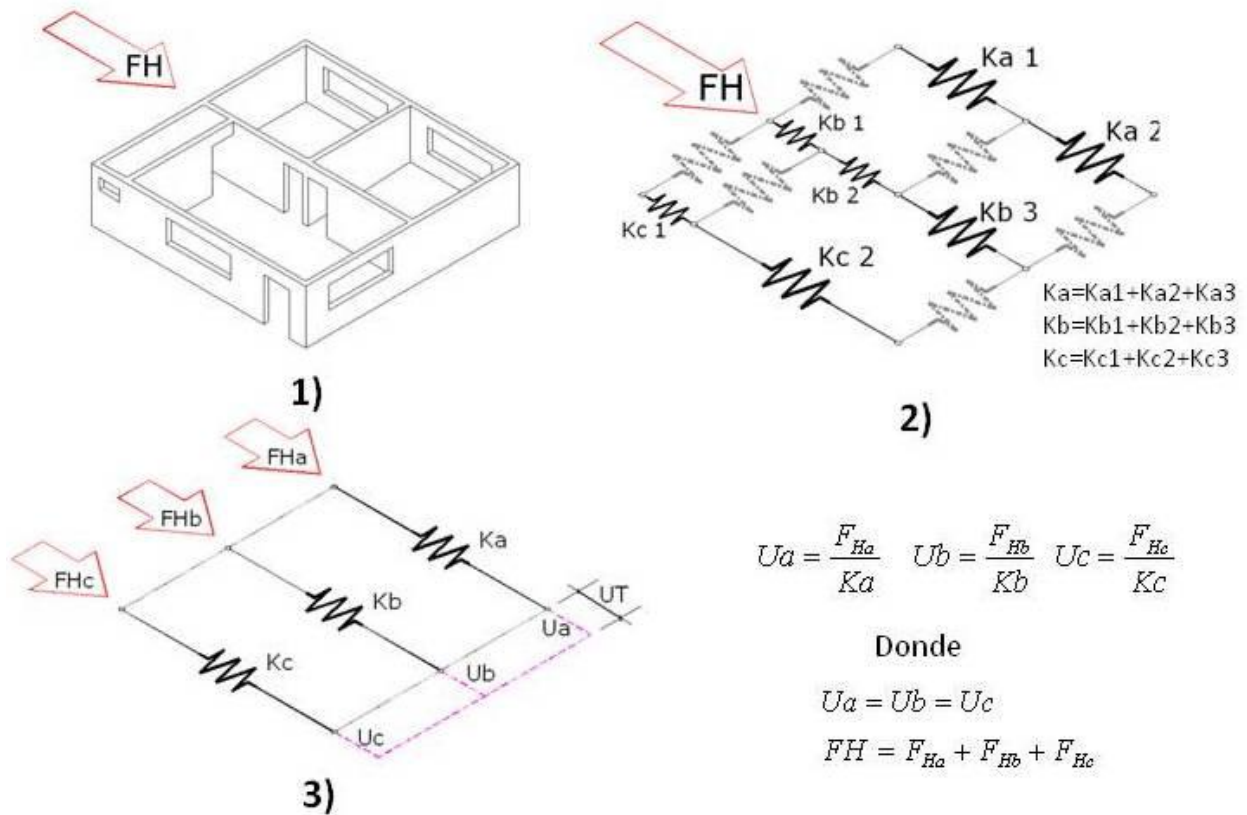


Fig. I.4. Esquema de rigideces en una vivienda, tomando una fuerza lateral FH en una dirección: 1) Simplificación de elementos estructurales, 2) Rigideces por eje, resaltando las que se utilizarán en la dirección de FH y 3) Reducción total de rigideces por eje y distribución de FH por eje.

Como se puede observar, la determinación de la rigidez para cada elemento de muros es vital para la consolidación de su diseño. Debido a la gran cantidad de tamaños y arreglos de muros su rigidez varía, lo que hace que en algunos casos se refuerce algún elemento para cumplir la suposición del desplazamiento homogéneo en cada piso.

Para el cálculo estructural de una edificación, es de gran utilidad el valor preciso de la rigidez lateral de cada elemento, determinando siempre el tipo de material y tipo de refuerzo, además de poder determinar las variaciones en el comportamiento debido a su relación de aspecto, es por ello que esta tesis se enfoca en los resultados obtenidos experimentalmente de rigidez lateral, en muros de diferente relación de aspecto y con un tipo de material utilizado actualmente en viviendas multifamiliares: el tabique de arcilla multiperforado de producción industrial.

MOTIVACIÓN

La vivienda es una de las mayores inversiones que una persona o familia hace en su vida, y es la base del desarrollo humano. Al ser la mampostería el material que se usa cotidianamente en construcciones del tipo de vivienda, las investigaciones sobre su comportamiento estructural tienen gran impacto para garantizar la seguridad de las personas que en ella habitan.

En los últimos años, la utilización de piezas multiperforadas de arcilla de fabricación industrial en la construcción de vivienda, ha creado cierta incertidumbre acerca del posible desempeño de este tipo de material en las construcciones, sobre todo si tomamos en cuenta que estas piezas han sido utilizadas en gran escala para complejos multifamiliares.

El planteamiento sobre el análisis de esta investigación se ha basado en considerar muros confinados, utilizando el tipo de pieza multiperforada de arcilla, teniendo variaciones de longitud, para tener resultados que enfoquen a la comparación de rigidez lateral de acuerdo a su relación de aspecto.

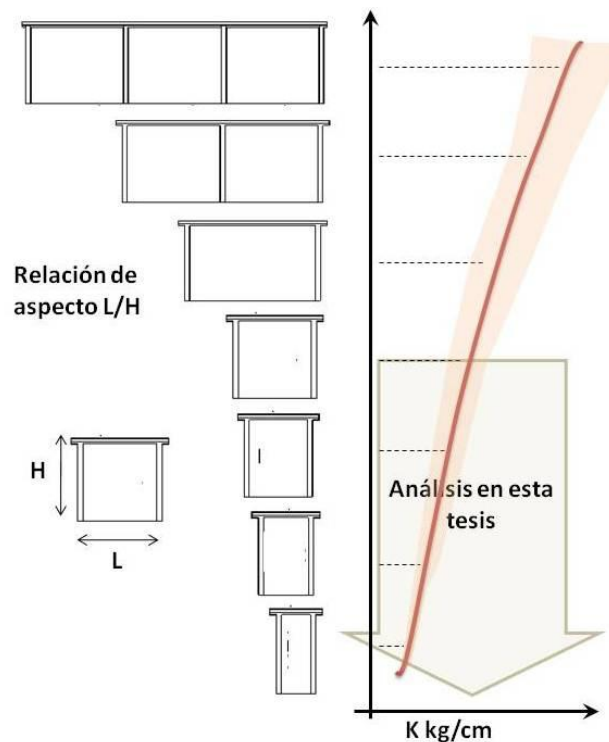


Fig. I.5. Relación de aspecto de muros H/L (H =altura, L = longitud), posible comportamiento de rigideces laterales, y zona de análisis.

Los procedimientos de análisis que se utilizarán para predecir el comportamiento teórico serán basándose en las pruebas a las piezas y materiales que conforman los especímenes. El modelo de

columna ancha y el Método del Elemento Finito (MEF), se manejarán en este caso para poder tener una simulación de desplazamientos con desarrollada exactitud, debido a que el rango elástico de desplazamiento lateral en la mampostería se encuentra cercano a la décima de milímetro.

OBJETIVO

El objetivo específico de este estudio será el obtener la rigidez de los muros de mampostería en su etapa elástica lineal comparando los resultados experimentales con los teóricos, considerando su relación de aspecto.

Se evaluará la calidad de los materiales que se utilizaron en su construcción para su análisis general en los modelos teóricos, las pruebas de calidad de materiales son:

- Pruebas a piezas de tabique multiperforado a carga axial, para obtener su resistencia a compresión.
- Pruebas a pilas de tabique multiperforado a carga axial para la obtención de su componente elástica, y su resistencia a la compresión.
- Pruebas a muretes de tabique multiperforado a tensión diagonal, para la obtención de su componente elástica de cortante, y su resistencia al cortante.
- Pruebas a los morteros utilizados en la construcción de los muros, a carga axial, para verificar resistencia a compresión.
- Pruebas a cilindros de concreto correspondientes a castillos, dadas y losa, a carga axial, para obtener su componente elástica y su resistencia a compresión.

Durante las pruebas se analizará la distribución de grietas en los especímenes, que indican cuál fue su falla o esfuerzo al que estuvo sometido.

Se compararán los resultados experimentales de esfuerzos de cortante con los recomendados por las Normas Técnicas vigentes para mampostería, los cuales se basan en el agrietamiento inicial de los muros.

Para la simulación en el **rango elástico lineal** de los especímenes, se hará un modelo virtual al cual se le agregarán las propiedades obtenidas de las piezas que conformaron el modelo experimental, para esto, se utilizará un programa de cómputo comercial avanzado utilizando el método del elemento finito (Halibulah 2005) para compararlos los desplazamientos, deformaciones y distorsiones de los modelos en simulando las pruebas de carga lateral para cuatro muros. También se utilizará el modelo matemático de columna ancha para determinar rigideces laterales y comparar desplazamientos.

Se compararan rigideces laterales, normalizando los resultados con respecto al muro de relación de aspecto igual a 1, que son la base para la variedad de relaciones de aspecto.

ALCANCES

La siguiente investigación tiene el propósito de obtener los resultados experimentales variando relación de aspecto, aunque la serie de ensayos es muy general implicando teoría plástica de deformación, para efectos de esta tesis se acotara en su etapa elástica lineal. Se utilizaran modelos matemáticos simples, para la aproximación de resultados teóricos.

Para la serie de ensayos se evaluaron siete muros que forman parte del programa del proyecto de la SMIE y CENAPRED, en este caso esta acotado a los muros analizados en el Instituto de ingeniería de la UNAM, el cual consto de cuatro modelos. Los modelos restantes fueron ensayados en el CENAPRED y serán sujetos a análisis por parte del Instituto de Ingeniería.

Los resultados obtenidos serán relevantes para la utilización práctica de este material en futuras construcciones y para evaluar las ya existentes. Este estudio servirá para la recomendación de seguridad estructural en las miles de viviendas que utilizan este tipo de piezas.

Capitulo /

Descripción del Proyecto

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En este capítulo se hablará, en general, de las geometrías de los especímenes analizados, el tipo de materiales para el proyecto, algunas pruebas preliminares para la verificación de las calidades del concreto y las piezas para la mampostería. Se ejemplificará el mecanismo de prueba, desde la instrumentación, el arreglo con actuadores hidráulicos que simularán carga laterales y el historial de carga a utilizar.

El programa general de ensayos experimentales se planteó en diversas etapas cubriendo varias series de muros a tamaño natural de mampostería confinada incluyendo el uso de piezas macizas de arcilla de fabricación artesanal, piezas extruidas huecas de arcilla y bloques huecos de concreto. En esta etapa sólo se cubrió el estudio de piezas multiperforadas de arcilla extruida.

1.1 ESPECÍMENES ANALIZADOS

Las variables y nombres de los modelos estudiados son:

- 1) Modelo ME1: mampostería de tabique extruido multiperforado de arcilla, $L/H=0.46$;
- 2) Modelo ME2: mampostería de tabique extruido multiperforado de arcilla, $L/H=0.66$;
- 3) Modelo ME3: mampostería de tabique extruido multiperforado de arcilla, $L/H=0.83$;
- 4) Modelo ME4: mampostería de tabique extruido multiperforado de arcilla, $L/H=1$;

La nomenclatura significa: “Muro de arcilla Extruida” y un número para diferenciar la relación de aspecto.

Para cada espécimen se detallara su geometría y armado. En estos especímenes se deja una losa de 10 cm de espesor, para su anclaje en una viga de transmisión de cargas, esta losa sobresale 20 cm del ancho efectivo del muro, esta arreglo de losa fue para forzar al agrietamiento en las esquinas superiores de los muros y que este no fuera similar a la realidad.

1.1.1. Geometrías

Para la geometría de los muros se planteo el estudio de muros de distintas longitudes. Por lo tanto se plantearon especímenes con relaciones de aspecto altura a longitud de: 0.46, 0.66, 0.83, 1.0. Se presentan los resultados de los primeros cuatro especímenes.

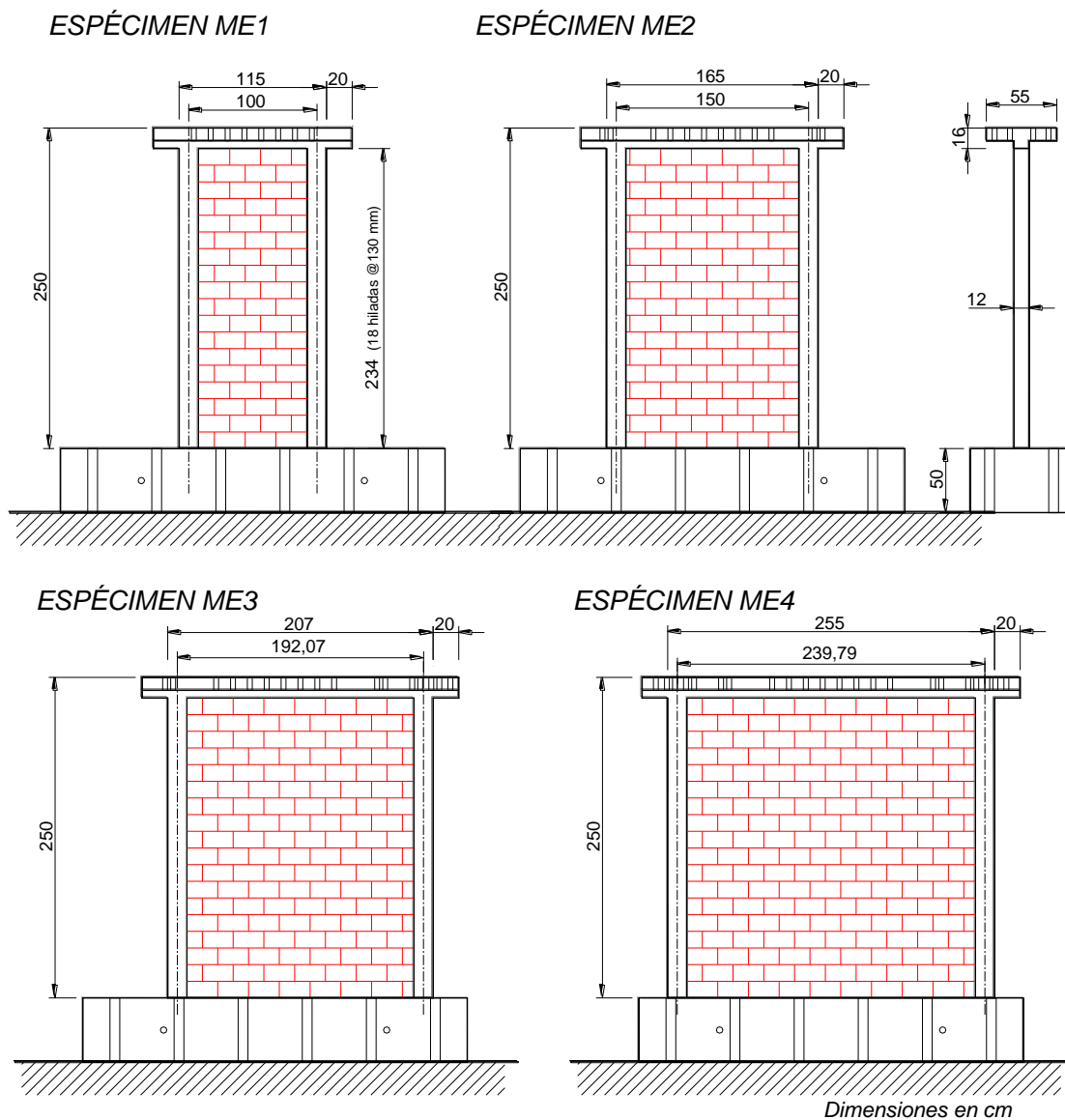


Fig. 1.1. Geometría de los especímenes, acotaciones en cm.

1.1.2. Refuerzo Interno

Los armados de castillos se plantearon de cuatro barras del numero 4 (1.27 cm de diámetro), con escuadras de 7 cm en la zona de dala y estribos del numero 2 (0.635 cm) a cada 18 cm. Para los traslapes de dala con los castillos se opto por escuadras de 15 cm.

Se propusieron armados robustos en muros confinados para evitar una posible falla por flexión y obligar a la falla de cortante, de acuerdo a las cargas de diseño de los ensayes. La estimación del área de acero de los castillos se realizó al inicio de la propuesta de ensaye, tomando valores muy altos de la posible resistencia a cortante de las piezas de mampostería. La cuantía de acero transversal mediante estribos y su separación se ajustó a las NTCDF (2004)¹.

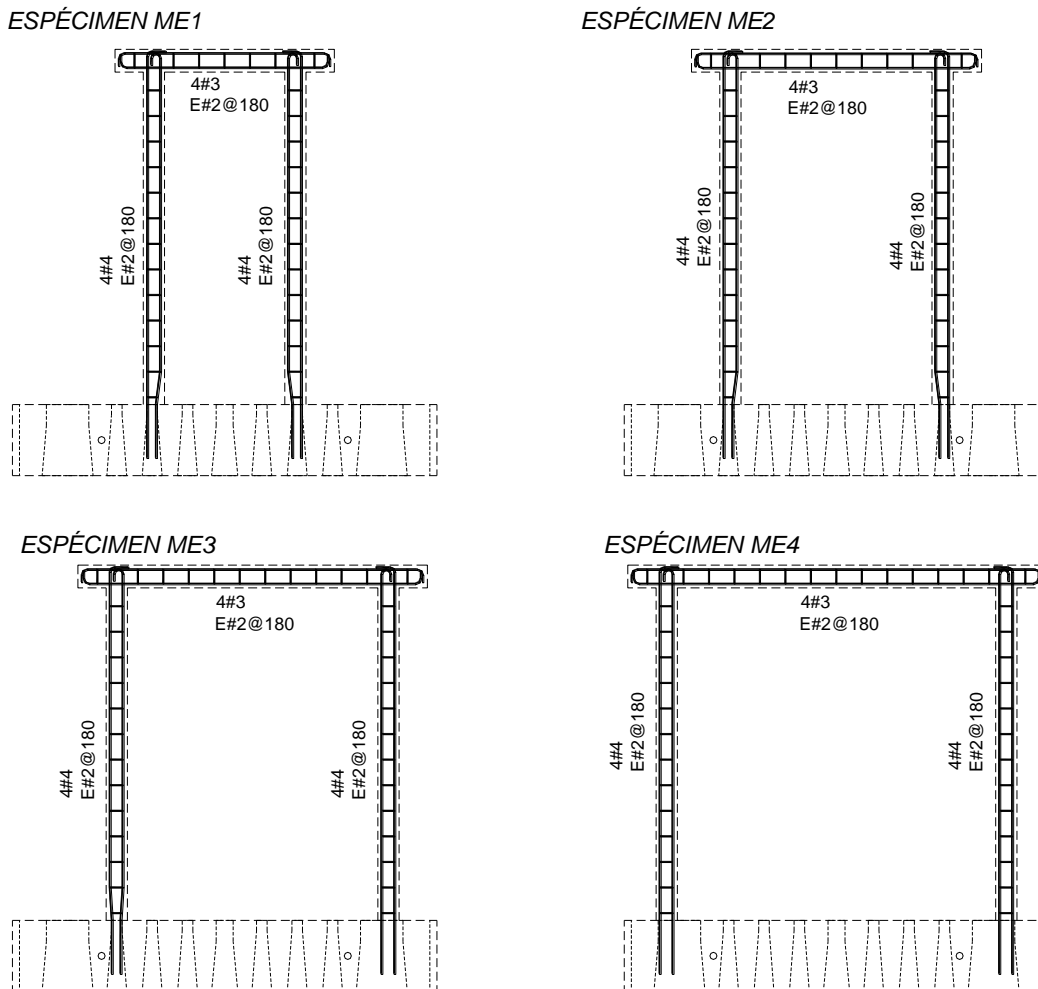


Fig. 1.2. Armados de los castillos de los especímenes, dimensiones en mm.

¹ Normas Tecnicas Complementarias del Distrito Federal 2004, Mampostería

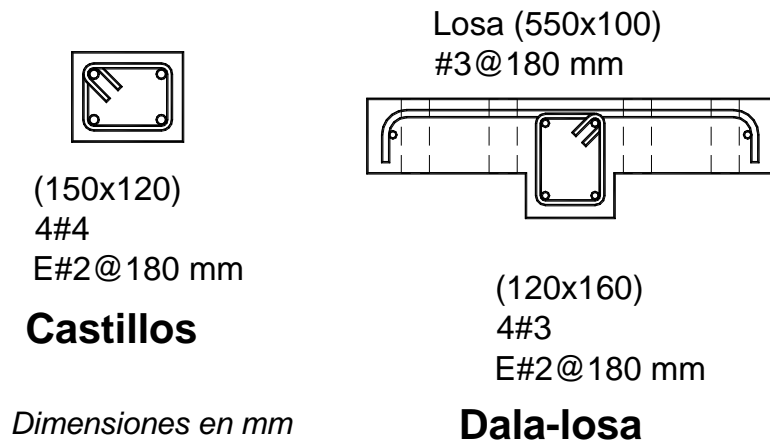


Fig. 1.3. Armado de elementos de concreto

1.1.3. Materiales propuestos

Las propiedades de diseño de los materiales propuestos para la construcción de los modelos fueron:

- Concreto de vigas de cimentación, $f_c' = 300 \text{ kg/cm}^2$
- Concreto de castillos y dala, $f_c' = 150 \text{ kg/cm}^2$
- Acero longitudinal de castillos y dala $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
- Alambión de estribos de castillos y dala $f_y = 2100 \text{ kg/cm}^2$
- Tabique extruido de arcilla, $f_p^* = 127 \text{ kg/cm}^2$
 $f_m^* = 55 \text{ kg/cm}^2$
 $v_m^* = 3.3 \text{ kg/cm}^2$
- Mortero 1:¼:3 $f_b' = 85 \text{ kg/cm}^2$

Cabe señalar que el concreto fue hecho en obra, por medio de revolvedora y la dosificación fue manual, la colocación de concreto en castillos y losa fue la tradicional mediante el uso de recipientes de 20 l. En el caso del mortero se arneó arena necesaria para la dosificación indicada cada vez que se requería tomando muestras y supervisando la dosificación por cada mezcla hecha.

1.2 CIMENTACIÓN

Para la fijación de los especímenes en la losa de reacción, se utilizó de un dispositivo con una rigidez lateral superior a los especímenes para ser concebido como empotramiento para los muros de mampostería, este dispositivo es una viga de cimentación, hecha de concreto de resistencia nominal $f'c = 300 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$, en la cual además pueden ser empotrados los elementos del muro como lo son el armado de los castillos.

Estas vigas de cimentación han sido ampliamente utilizadas en los experimentos estructurales con muros de mampostería, sobre todo en los laboratorios de estructuras del CENAPRED, del cual fueron tomadas a préstamo para estos ensayos en el Instituto de ingeniería.

Una de las principales ventajas de este sistema es la reutilización de las vigas, para experimentos posteriores, por lo cual existe un especial cuidado en el empotramiento de los elementos de refuerzo de los muros de mampostería, como lo son los castillos.

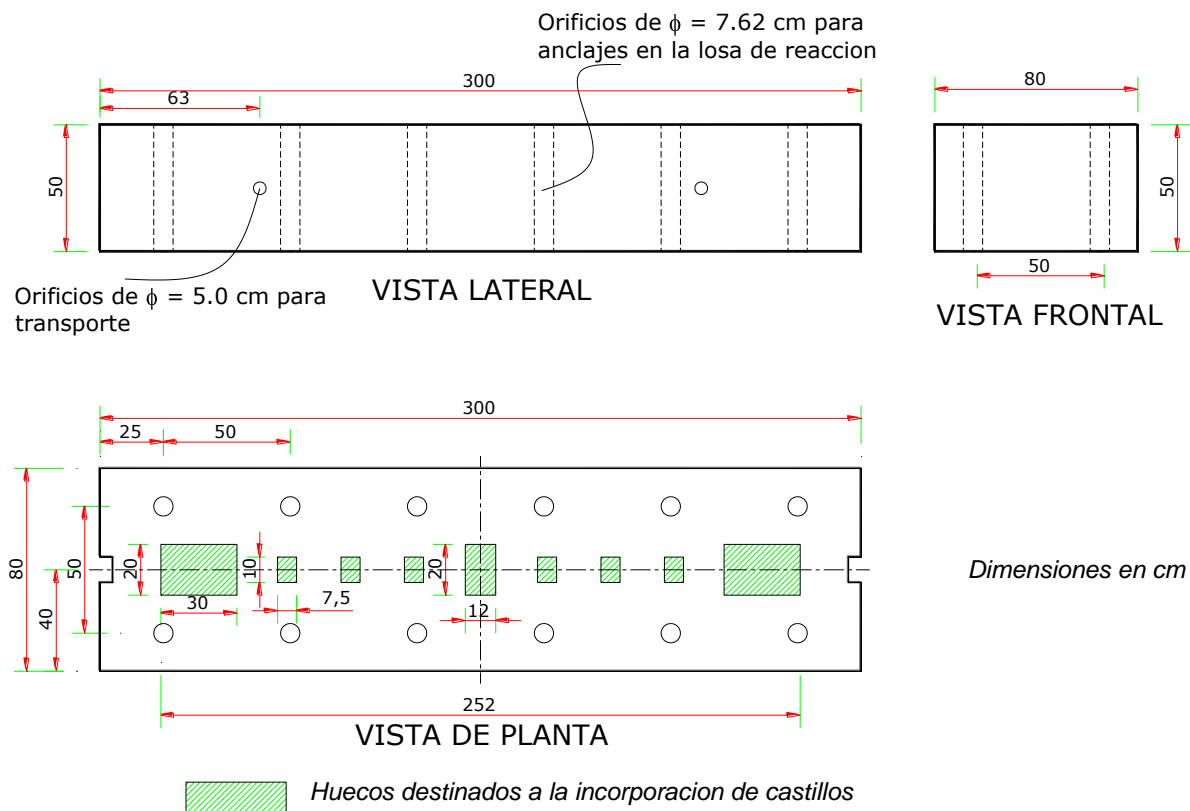


Fig. 1.4 Geometría de la viga de cimentación, con la posición de los huecos para la incorporación de los elementos de los muros de mampostería.

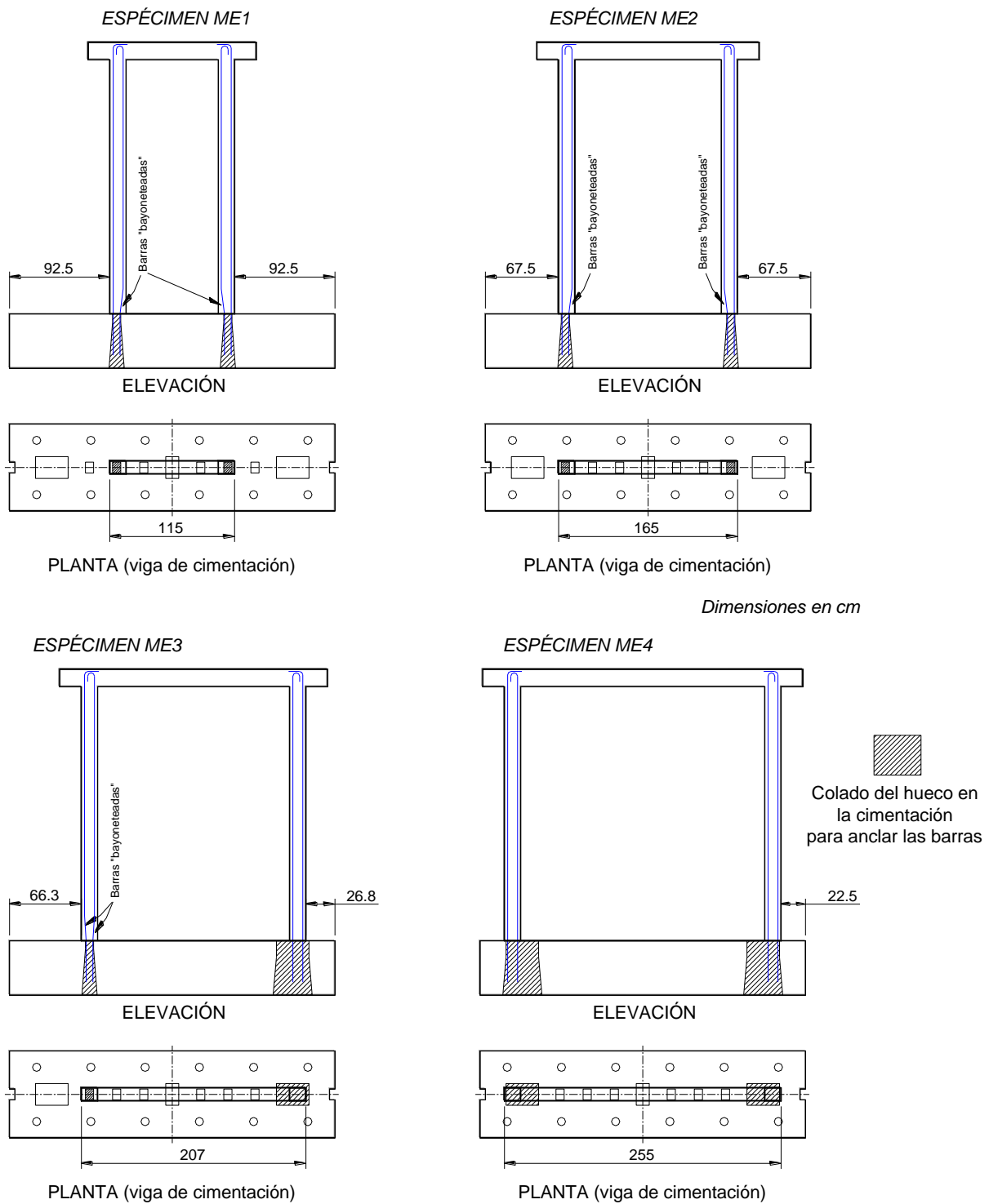


Fig. 1.5. Colocación del armado de los castillos en los huecos de la viga de cimentación

Debido a sus dimensiones, que contempla un volumen de 1.113 m^3 de concreto, el peso estimado de la viga es de 2.7825 ton_f , por lo que su transporte es necesario con sistema enganche para grúas. Este sistema de viga de cimentación cuenta con dos orificios de 5 cm de diámetro en los extremos, para su transportación. Con esta facilidad de transporte se pudo construir los muros de los ensayos de forma simultánea, y solo se dejaba en sitio el modelo correspondiente a ser analizado, además de su fácil retiro para ubicar el siguiente espécimen en serie del programa de ensayos.

La instalación de los castillos estuvo determinada por las dimensiones de los muros, en algunos casos los huecos de la viga de cimentación no correspondían a las medidas necesarias, por lo cual se optó por arreglos en bayoneta, para su adecuada inclusión. En el caso del espécimen ME3, el modelo resultó asimétrico, por lo que fue necesario un arreglo distinto a los demás, también este muro fue el primero en la serie de ensayos.

Los huecos de la cimentación se rellenaron con concreto $f'_c = 300 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ hecho en obra, en su totalidad para los que contenían los armados de los castillos, en los otros huecos que no se utilizaron se dejó un tapón de 10 cm , con la misma calidad de concreto. El ancho del muro tuvo siempre prioridad sobre los extremos de la cimentación.

1.3 MATERIALES UTILIZADOS

Cada uno de los materiales que conforman los ensayos tenía que ser analizado de forma particular, para tener en cuenta su calidad, resistencia, elementos mecánicos y ser contenida en los análisis matemáticos, sobre todo para insertar datos base a la simulación detallada por ordenador. Estos resultados de materiales serán comentados de acuerdo a lo que componían en su etapa de construcción.

1.3.1. Elementos de la mampostería

Aunque la mampostería comprende todo el arreglo de piezas, el material que las une y su confinamiento, este apartado se refiere a solo los componentes como las piezas de arcilla extruida. Estas pruebas contienen la necesidad de encontrar su componente elástica, su componente de cortante, así como la resistencia a la compresión general de las piezas.

El proceso de ensayos de los materiales para mampostería, se efectuó de acuerdo a las NTCDF (2004) para el diseño y construcción de estructuras de mampostería, para obtener los fundamentos de resistencia a la compresión, a la compresión diagonal así como la calidad del mortero utilizado en la construcción. En esta normativa se aconseja una cierta medida para cada muestra de la mampostería según los datos que se desea obtener, estas medidas establecen el concepto de pilas y muretes. Las pilas es un conjunto de por lo menos tres piezas sobrepuestas, con una relación de altura-espesor entre dos y cinco, de forma en que se analice la componente elástica de este arreglo aplicando carga axial sobre este arreglo. Los muretes son un arreglo de piezas de mampostería donde se tiene una relación de altura-espesor igual a uno, o sea aproximadamente cuadrado, en donde la carga se aplica a los extremos de los muretes en diagonal.



Fig. 1.6. Detalle de las pilas y muretes en el sitio de construcción.

Para la selección de las muestras de pilas y muretes, se tomaron las mas representativas, considerando la posición de las piezas de acuerdo a las hiladas de mampostería hechas en los especímenes, que en su caso abarcasen la mayor parte de la geometría del muro. Las pilas y muretes eran fabricados al mismo

tiempo que el muro, de hecho, en las hiladas equivalentes se hacían las muestras, de acuerdo al arreglo de la siguiente figura.

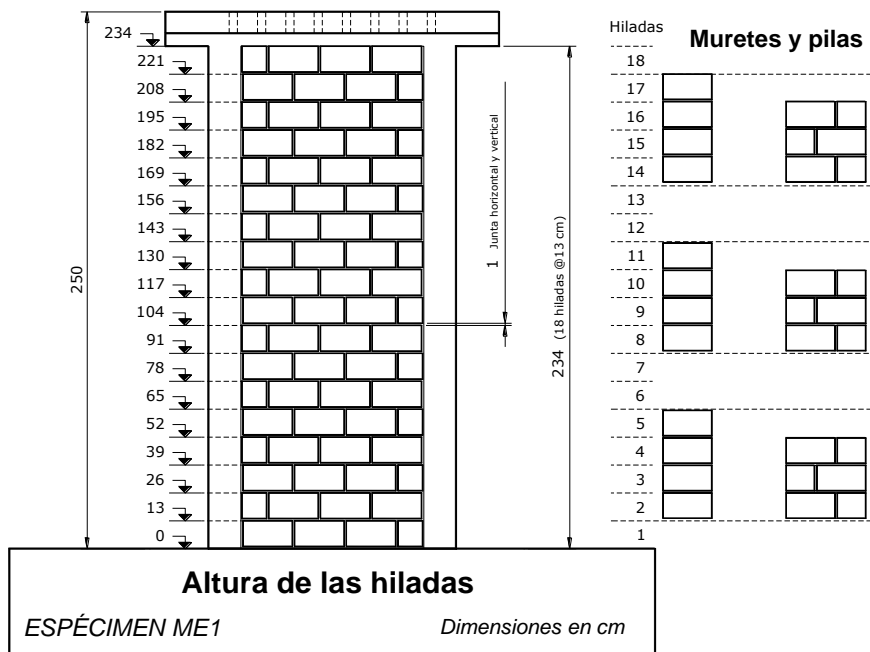


Fig. 1.7. Arreglo de ubicación de muestras de pilas y muretes en los especímenes, ejemplo grafico con ME1.(Flores 2008, et al)

1.3.1.1. Piezas a compresión

De todo el conjunto de piezas de mampostería comprendido, que se utilizo para la construcción de los cuatro especímenes, se tomaron una muestra de 20 piezas, las cuales se midieron, se pesaron y se ensayaron. Las medidas estándar de cada pieza corresponden a 12 x 12 x 23 cm. Se obtuvo una resistencia a la compresión promedio de $f_p = 190.6 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$, aplicando las recomendaciones para el esfuerzo de diseño de estas piezas se tomo la siguiente expresión:

$$f_p^* = \frac{f_p}{1 + 2.5C_p} \quad \text{donde } C_p > 0.2 \quad (1.1)$$

A pesar de que en los ensayos se tuvo un coeficiente de variación $C_p = 0.11$, se toma el $C_p > 0.2$ debido a que en la elaboración de las piezas existe control de calidad, por su producción industrial.

Esto nos arroja el esfuerzo de diseño $f_p^* = 127 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$, con el siguiente rango de frecuencias estadísticas de los datos de esfuerzo a compresión.

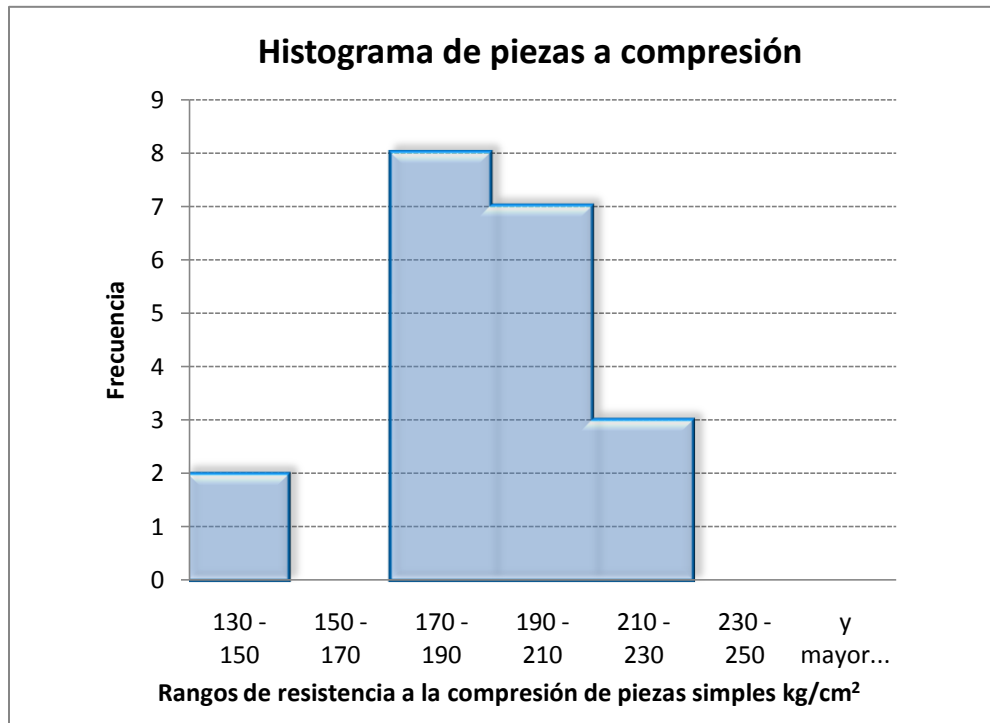


Fig. 1.8. Distribución estadística de las muestras de piezas a compresión

1.3.1.2. Pilas a compresión

Las pilas para estas pruebas están diseñadas de acuerdo a recomendaciones de esbeltez de las Normas Técnicas para mampostería², aproximando su relación de esbeltez a 4, buscando el factor correctivo de 1,00. La pila esta conformada por cuatro piezas con medidas de 12 cm, unidas con 0,5 cm de mortero de clase 1, del cual se hablara mas adelante. Con esto la relación de altura espesor llega a 4.16, debido a la altura aproximada de 50 cm.

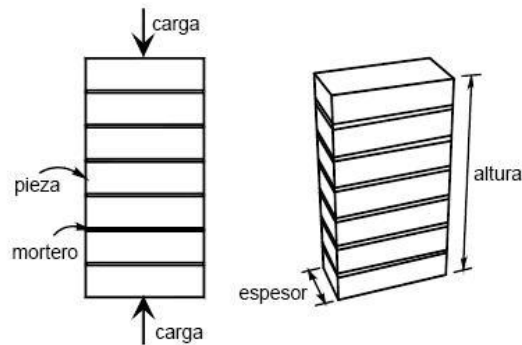


Fig. 1.9. Descripción dimensiones en pila, espesor altura.

²NTCDF Mampostería, Capítulo 2.8.1.1 Ensaye de pilas con piezas y morteros que se emplearan en obra.

Para las pruebas, se colocó un sistema de instrumentación formado por dos transductores con carrera de 5 cm, para medir sus desplazamientos de acuerdo a la carga ejercida. Las pilas estaban cabeceadas correctamente con azufre para probarse a compresión, dando tres precargas de 2 ton_f, esto en la máquina universal de pruebas del Instituto de Ingeniería.

Los resultados obtenidos arrojan un promedio de $f_m = 76.18 \text{ kg/cm}^2$, con un coeficiente de variación de $C_m = 0.10$, pero se utiliza el $C_m \geq 0.15$ debido a que su fabricación es de tipo industrial. Se utiliza la siguiente expresión para el esfuerzo de diseño³.

$$f_m^* = \frac{f_m}{1 + 2.5C_m} \quad \text{donde } C_m > 0.15 \quad (1.2)$$

Teniendo, por lo tanto un esfuerzo de diseño de $f_m^* = 56.35 \text{ kg/cm}$, tomando los promedios de cada espécimen.

Para la componente elástica se tomaron los datos los transductores mediante el sistema de adquisición TDS. Este sistema realiza una lectura de datos cada 2 s, a todos los instrumentos conectados a la pila, sea los transductores para desplazamiento vertical como la misma celda de carga de la máquina universal. Con estos datos se obtiene la curva esfuerzo-deformación unitaria, con lo que se obtiene la componente elástica de la mampostería en conjunto.

Las recomendaciones generales para el establecimiento de la elástica son mediante un rango de datos de acuerdo al promedio de esfuerzo bruto de las pilas. En este caso se toma el intervalo de datos de el punto $(\sigma_1, 0.00005)$ a el punto $(\sigma_2 = 0.4f_m, \epsilon_2)$ para la aproximación lineal, que da como resultado la componente elástica.

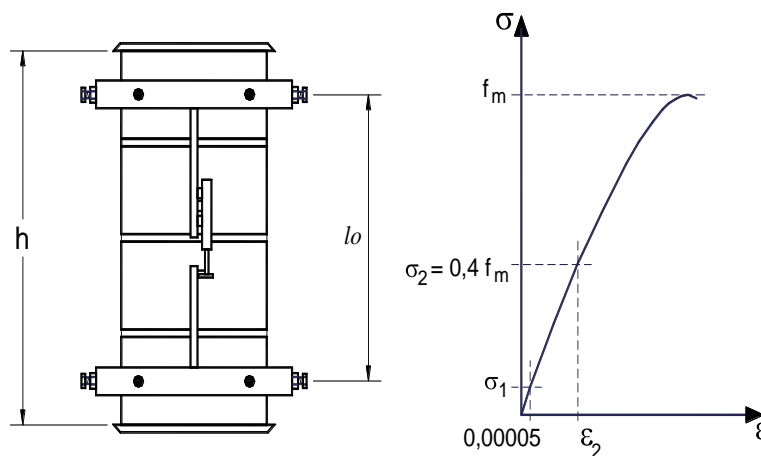


Fig. 1.10. Consideraciones generales para el establecimiento de la elástica en la curva de esfuerzo-deformación unitaria.

Los resultados generales promediados, para su utilización en los modelos matemáticos son los siguientes:

³ ONNCE 2002 Anteproyecto de Norma Mexicana- Resistencia a compresión y modulo de elasticidad de pilas de mampostería de barro y concreto.

Muro	f_{m_p} kg/cm ²	$f_{m^*_p}$ kg/cm ²	E_{m_p} kg/cm ²
ME1	76.09	56.4	43347.00
ME2	72.44	52.7	44557.00
ME3	76.48	56.8	43715.66
ME4	79.71	59.5	44065.66

Tabla 1.1. Esfuerzo a compresión y modulo elástico de la mampostería promedio, para los modelos matemáticos

La distribución estadística de los resultados de pilas se muestra a continuación, tomando en cuenta la prueba a esfuerzo a compresión.

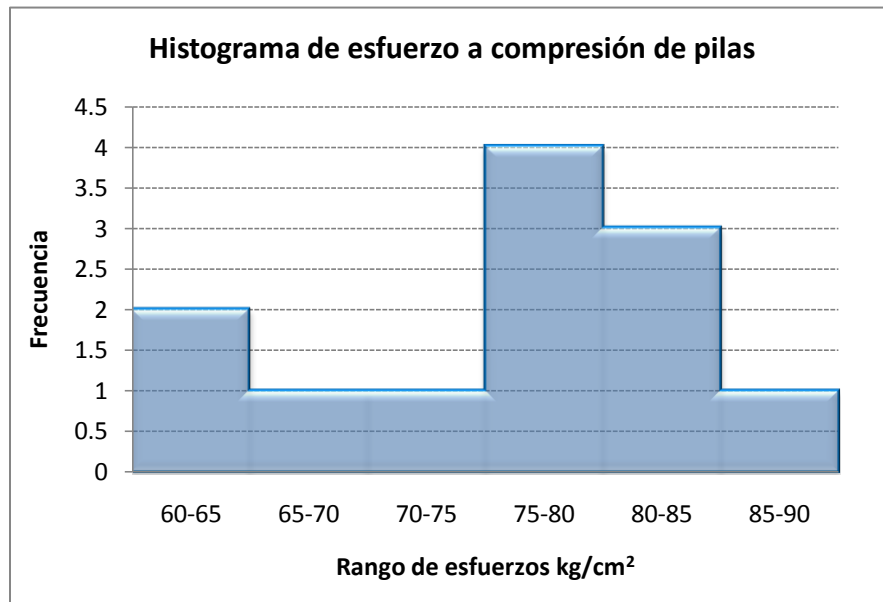


Fig. 1.11. Distribucion estadistica de los resultados de las muestras de pilas a compresion

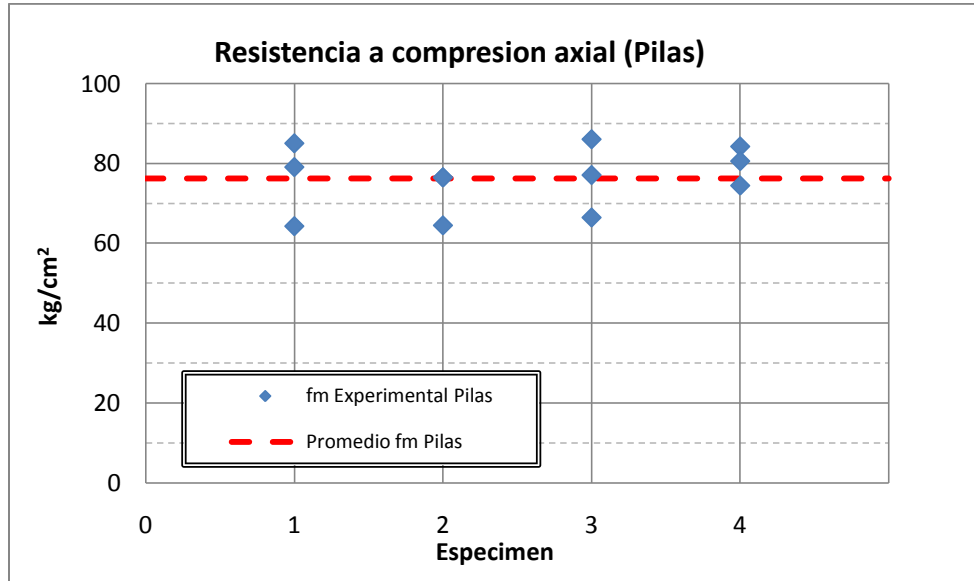


Fig. 1.12. Resultados de las muestras de pilas a compresion por especimen

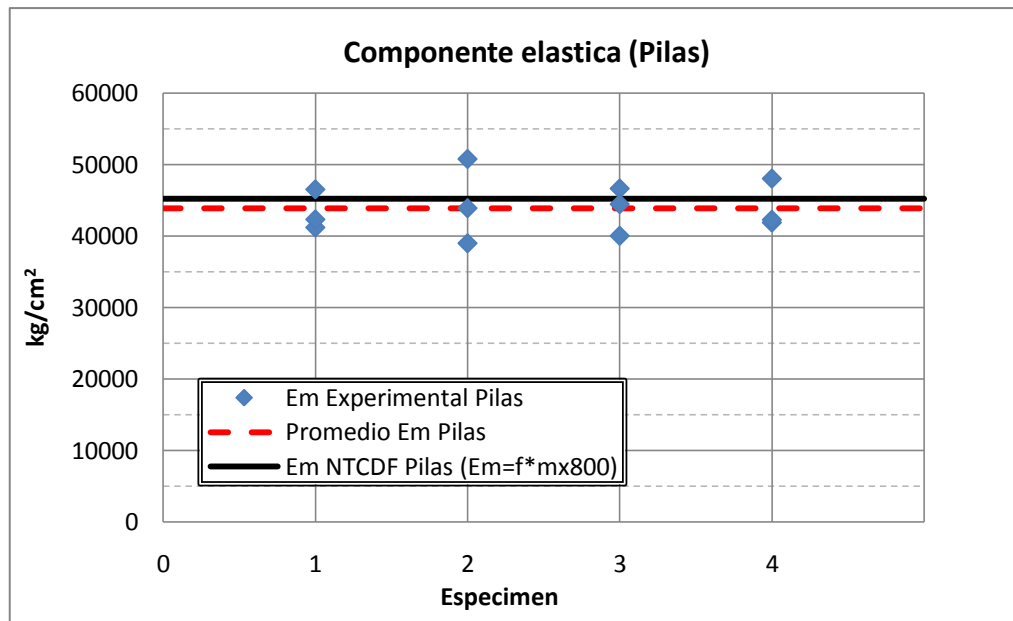


Fig. 1.13. Componentes elasticas de las pilas, por especimen

1.3.1.3. Muretes a compresión diagonal

El procedimiento para la obtención del valor de esfuerzo cortante de diseño, consiste en unan prueba de muretes cuadrados a compresión diagonal. Esto es aplicando carga en dos esquinas opuestas mediante cabezales de acero. Al igual que las pilas, estas piezas están unidas con mortero de clase I. La relación altura-longitud debe tender o ser 1, es por ellos que las dimensiones de estos muretes son de 37.63 x 37.69 x 11.85 cm en promedio.

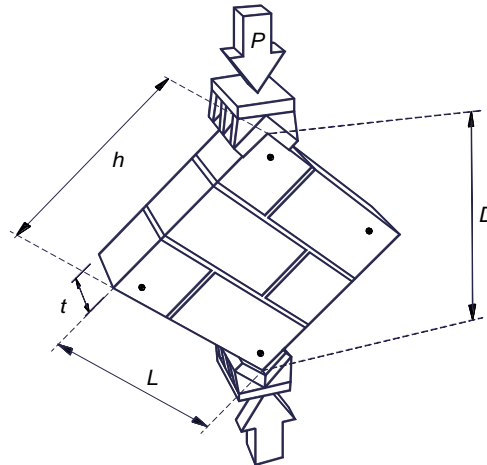


Fig. 1.14. Posicionamiento del murete para las pruebas de compresión diagonal.

Para la instrumentación de los muretes se requirió de un sistema óptico de adquisición de datos, que es la cámara Krypton 600. En este caso se colocaron leds en las zonas de los muretes más convenientes para medir su deformación vertical y horizontal, en la figura 1.15 se observa el arreglo general para muretes. Del sistema óptico de leds se hablara mas adelante.

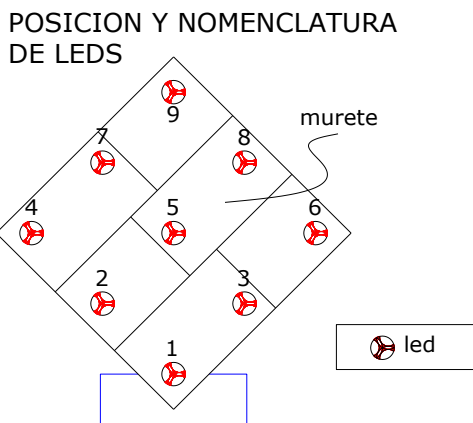


Fig. 1.15. Esquema de instrumentación óptica en muretes

Se obtuvo un esfuerzo cortante promedio de $V_m = 4.98 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$, debido a la recomendación el coeficiente de variación se toma mayor a 0.2. Así se tiene un esfuerzo a cortante de diseño de $V_m^* = 3.32 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$, tomando la siguiente recomendación.

$$V_m^* = \frac{V_m}{1 + 2.5C_m} \quad \text{donde } C_m > 0.2 \quad (1.3)$$

También se analizaron los módulos de cortante (G), contemplando una zona de comportamiento elástico en las deformaciones obtenidas con los leds. Estas componentes G, son muy pequeñas y no corresponden a un modulo de Poisson en rango elástico, comparándolas con los módulos elástico en las pilas. Cabe señalar que normalmente en pruebas de mampostería a tensión diagonal estas componentes son bajas y ocurre lo antes mencionado.

Especimen	Vmp kg/cm ²	Vm* _p kg/cm ²	Gm kg/cm ²
ME1	4.66	3.1	4772.10
ME2	5.01	3.34	4623.69
ME3	5.28	3.52	6484.02
ME4	4.95	3.3	4718.81

Tabla 1.2. Valores promedio de esfuerzo a compresión diagonal, por espécimen

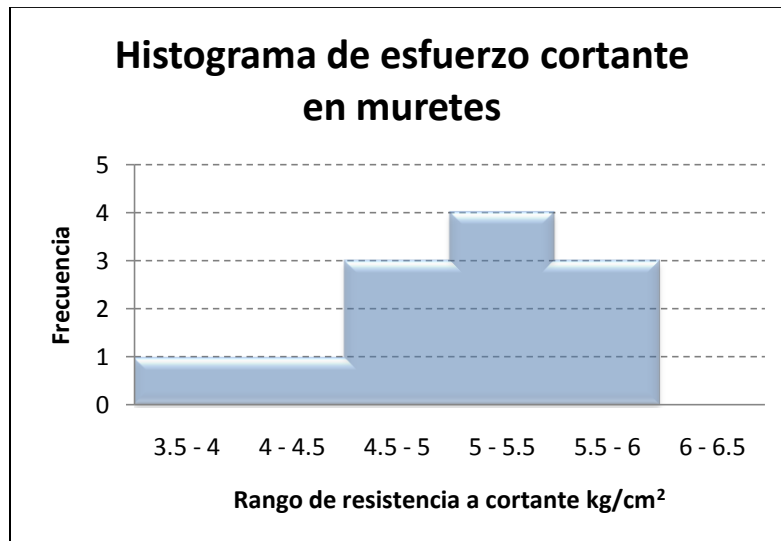


Fig. 1.16. Distribución estadística de la resistencia a cortante de la mampostería

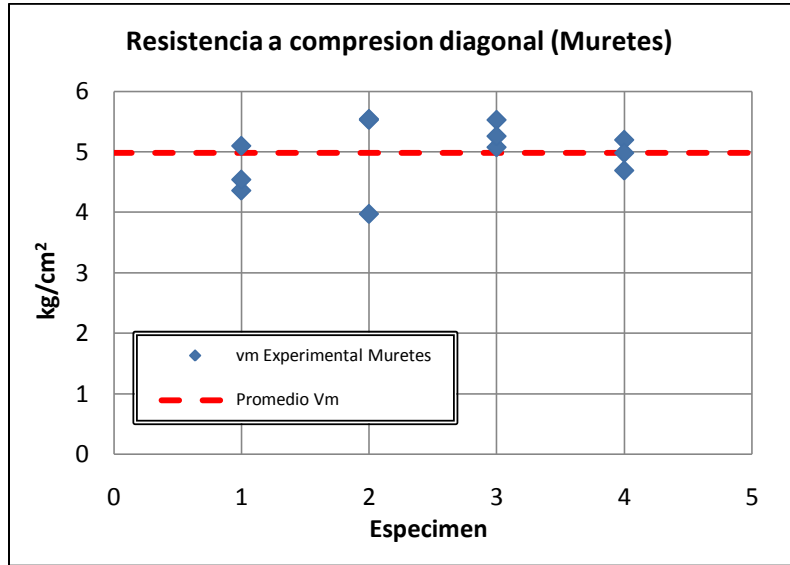


Fig. 1.17. Resistencia a la compresion diagonal por especimen

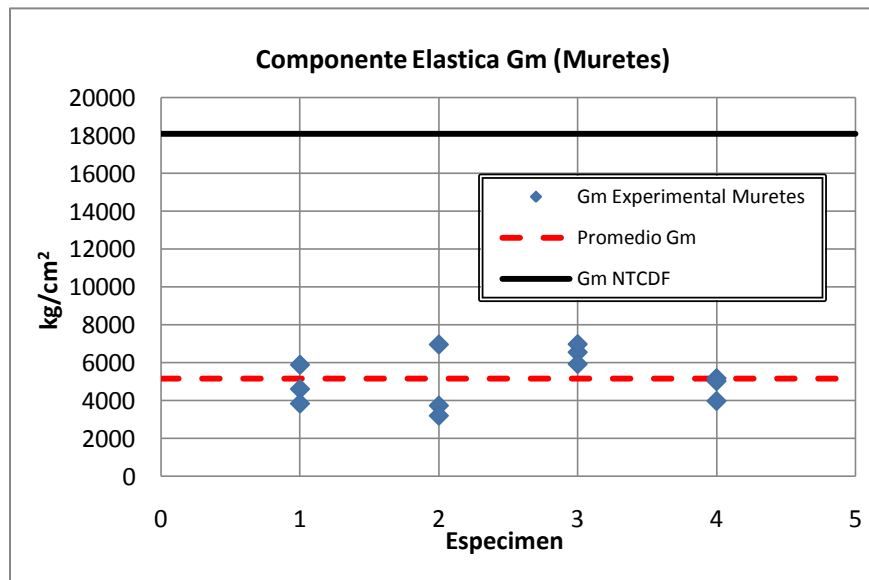


Fig. 1.18. Componentes elasticas Gm por especimen

1.3.1.4. Mortero

El mortero es parte esencial para la mampostería, y de la calidad de este depende las características a comparar de la mampostería. El diseño de la mezcla se baso en el mortero **clase I**, el cual tiene la siguiente dosificación de 1 : ¼ : 3, esto significa las fracciones correspondientes de cemento: cal: arena, o sea, por cada unidad de cemento de tendrá un cuarto de cal y tres de arena.



Fig. 1.19 Moldes de bronce para muestras de mortero⁴.

Las muestras consisten en recabar mezcla de mortero para en tres cubos de 5 cm de arista, en moldes de bronce impregnados con aceite desmoldante. Cada muestra se toma por cada mezcla de mortero realizada para la construcción de los muros, además de hacer referencia a que hiladas de cada muro corresponden.

Se realizaron 12 muestras de mortero durante toda la construcción de los cuatro muros, para la ubicación en los muros de la mezcla donde fueron tomadas, se puede observar en la figura 1.22 los diagramas de ubicación respecto a hiladas.

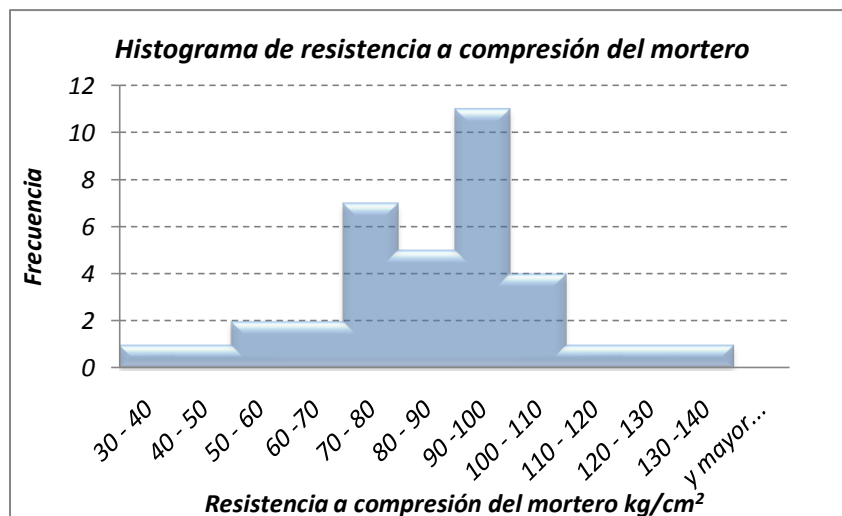


Fig. 1.20. Distribución estadística de resistencia del mortero a compresión.

⁴ Pinzuar.com, Molde triple para cubos de cemento PC-111

Los resultados de las muestras arrojan una resistencia al esfuerzo a compresión promedio de $f_b=84.6$ kg/cm^2 , que utilizando la consideración para esfuerzo de diseño, de acuerdo a la norma NMX-C-128-1997 ONNCE, se tiene:

$$f_j^* = \frac{f_b}{1 + 2.5C_j} \quad \text{donde } C_j > 0.2 \quad (1.4)$$

Esta consideración, da el resultado de esfuerzo a compresión de diseño de $f_j^*= 52.3$ kg/cm^2 .

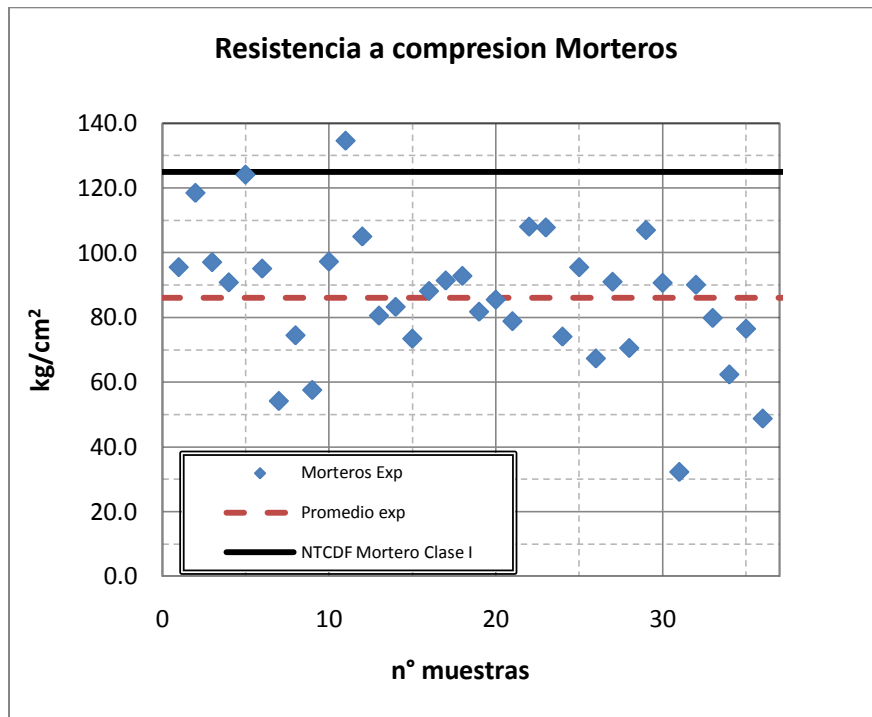


Fig. 1.21. Resultados generales de la resistencia del mortero

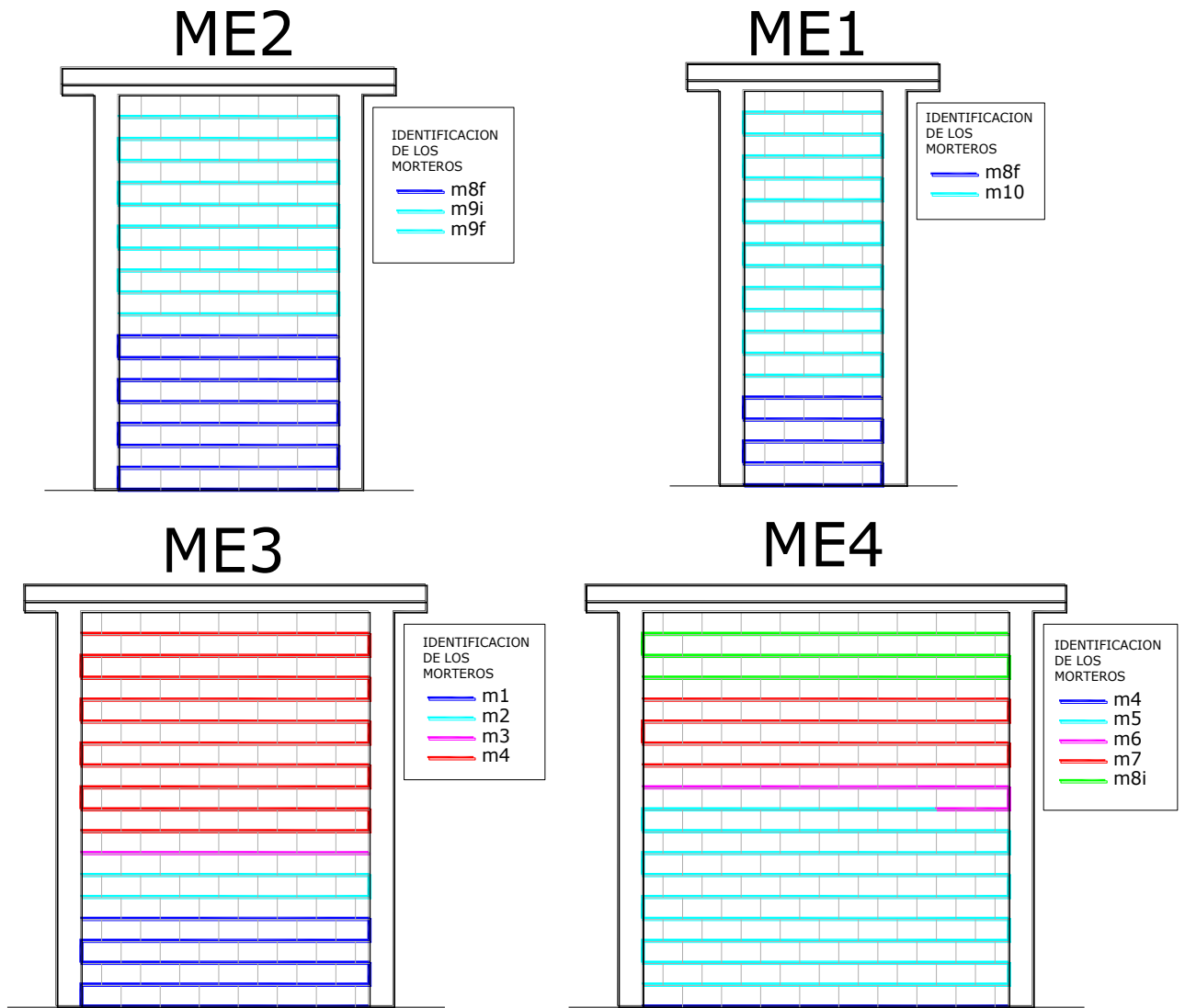


Fig. 1.22. Distribución de las muestras de mortero respecto a las hiladas de construcción de los especímenes.

1.3.2. Elementos de confinamiento

Los elementos de confinamiento de la mampostería corresponden a los castillos y dala. En este caso, para la transmisión de la carga fue necesario construir una pequeña losa para el anclaje de la viga de acero que conecta a los actuadores.

El muestreo fue por muro y se baso en recabar muestras de los elementos castillos, dala y losa al momento de ser colados durante la construcción de los especímenes en el laboratorio. De los elementos castillos se tomaron cuatro muestras y del elemento dala y losa solo tres, esto, debido a que realmente de estos concretos el que será analizado en el espécimen final seria el de los castillos.

Cabe señalar que estos concretos fueron hechos en obra, con un proporcionamiento 1: 2: 2 ½: ¾ utilizando una revolvedora con capacidad de ½ bulto de concreto (100 l), para un esfuerzo ultimo de diseño de $f'_c = 150 \text{ kg/cm}^2$.

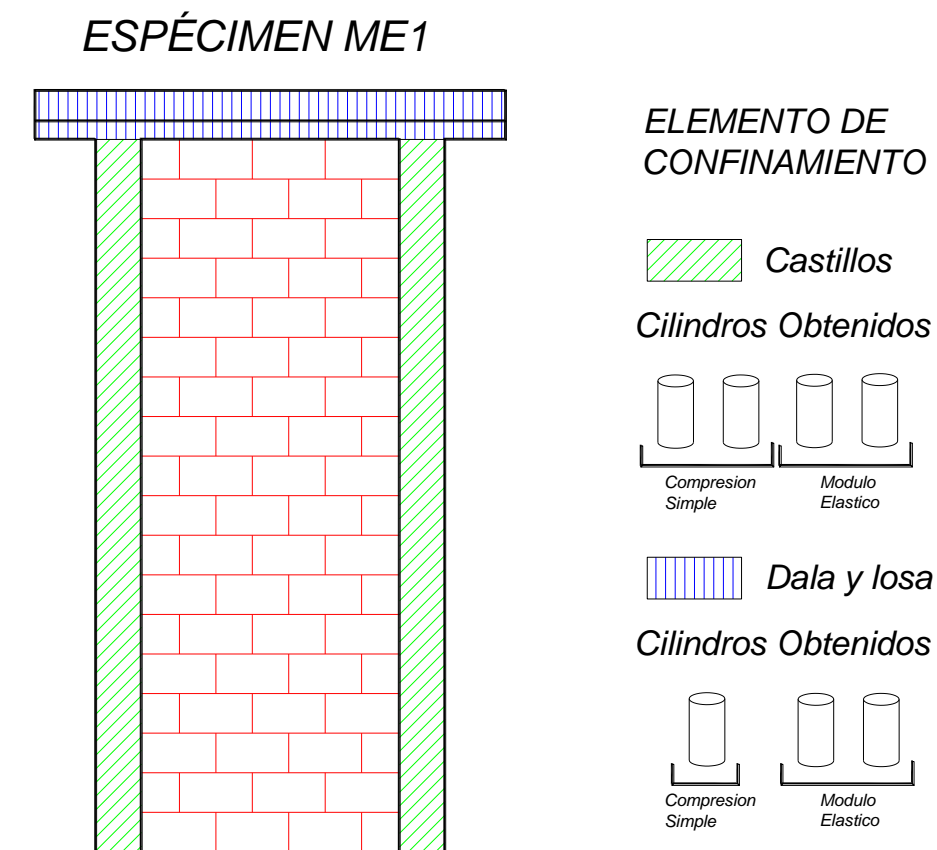


Fig. 1.23. Procedimiento de muestreo de los cilindros en el ensaye, ejemplo ME1.

Para los cilindros de concreto, ya sea de castillos o dala y losa, se obtuvieron componentes elásticas de acuerdo a el procedimiento de las normas NMX-C-109-2004 ONNCE, referente al cabeceo y curado de los cilindros y NMX-V-128-1997 ONNCE que refiere la determinación del modulo de elasticidad y relación de Poisson. El procedimiento es básicamente, una aproximación lineal a los datos recabados en cada prueba de modulo elástico, ubicando sus limites numéricos de acuerdo a la figura 1.24.

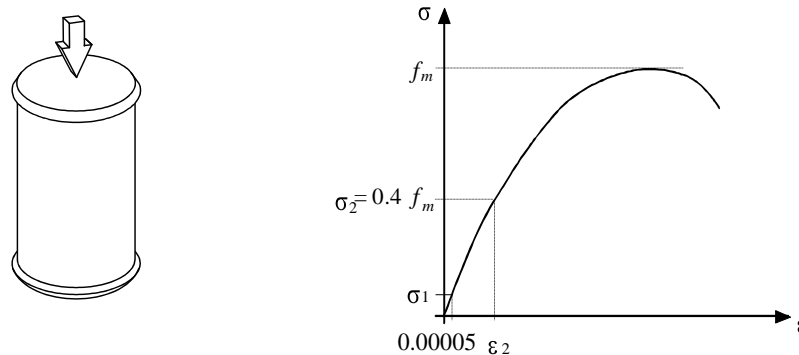


Fig. 1.24. Determinación del modulo de elasticidad en cilindros de concreto, con los acotamientos indicados.

Para la prueba fueron utilizados dos transductores: uno de 5 cm de carrera para la variación de los desplazamientos verticales y el otro de 2.5 cm de carrera ubicado en forma horizontal para la relación Poisson. En este caso el arreglo de la instrumentación de los cilindros se tiene solo un transductor vertical con un resorte en el costado opuesto al cilindro, esto hace que los datos de desplazamiento sean divididos entre dos para poder traducirlos correctamente como el desplazamiento total sufrido por el cilindro.



Fig. 1.25. Medición y peso de los cilindros de concreto.

1.3.2.1. Castillos

Para el concreto de los castillos se busco la resistencia $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$, con un volumen para dos castillos y cuatro cilindros de pruebas. Por lo tanto, existen cuatro cilindros por espécimen, de los cuales dos cilindros fueron destinados a prueba a compresión simple y los restantes para pruebas de componente elástica. Cada cilindro tiene 15.172 cm de diámetro por 30.37 cm de altura en promedio, y fueron probados después de 28 días del colado de los castillos. Su nomenclatura fue C1,...,4 de acuerdo a su pertenencia a algún espécimen.

Cabe señalar que todos los castillos tienen las dimensiones de 12 x 15 x 234 cm. En las pruebas para los cuatro cilindros se seleccionaron solo dos para la determinación de la componente elástica y otros dos para el esfuerzo a compresión y de diseño.

Muro	Cilindros	$f'c$ kg/cm ²	E_c kg/cm ²	$f'c_p$ kg/cm ²	E_{c_p} kg/cm ²
ME1	C1	341.51		334.63	116075
	C2	335.61	112624		
	C3	326.67			
	C4	334.74	119526		
ME2	C1	201.56	107525	216.42	103394.5
	C2	225.41			
	C3	214.25	99264		
	C4	224.48			
ME3	C1	184.73		184.68	100737
	C2	183.44	101323		
	C3	187.63			
	C4	182.92	100151		
ME4	C1	250.60	110933	233.52	110211
	C2	235.56			
	C3	223.54	109489		
	C4	224.36			

Tabla 1.3. Valores promedio para componente elástica en el concreto de los castillos.

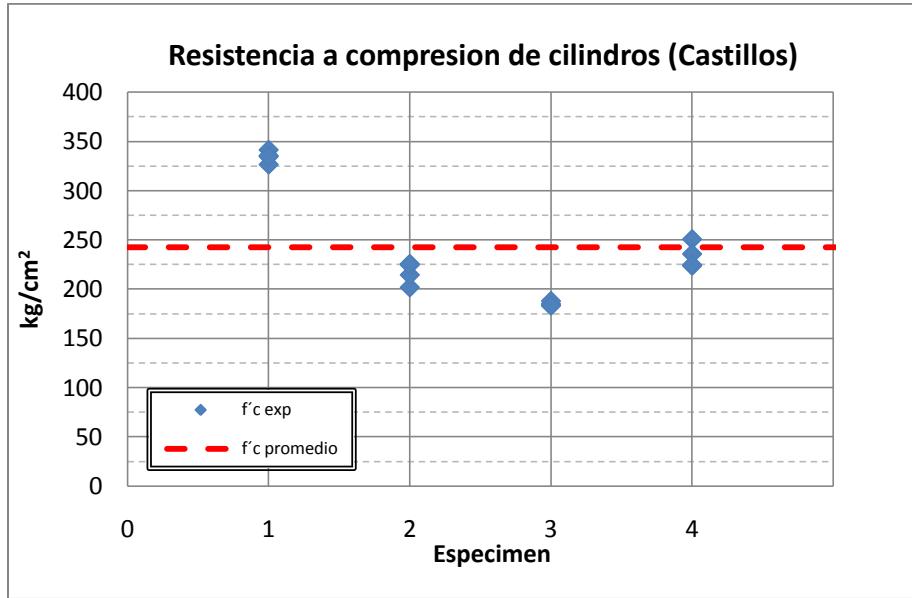


Fig. 1.26. Resistencia a compresión de los cilindros de concreto para castillos, por espécimen.

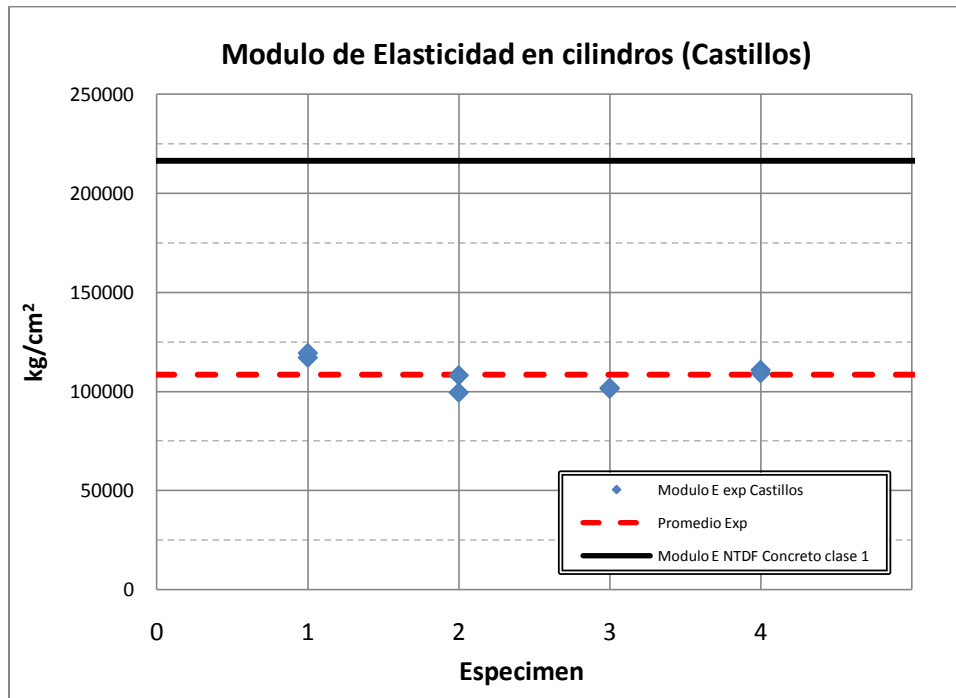


Fig. 1.27. Componente Elástica de cilindras de concreto, por espécimen..

1.3.2.2. Dalas y losa

De acuerdo al sistema constructivo, después del colado de los castillos se deja un pequeño remate para el colado de la dala, en este caso se incluyó con el colado de la losa. En este caso se diseñó un concreto para $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, debido a que se está buscando una rigidez superior para que no influya en como se deforme el muro.



Fig. 1.28. Cimbrado de la losa y detalle de la tarima superior para anclaje.

De cada colado del sistema dala y losa se incluyó volumen para tres cilindros de prueba, de los cuales se les probó para su esfuerzo a compresión. Las dimensiones de los cilindros fueron 15.24 cm de diámetro y 30.442 cm de altura en promedio. Los resultados generales de esfuerzo a compresión son los siguientes:

Muro	Cilindro	$f'c$ kg/cm ²	E_{cal} kg/cm ²	$f'c_{prom}$ kg/cm ²	E_{prom} kg/cm ²
ME1	LZC1	278.78	243587.91	281	216972.59
	LZC2	275.05			
	LZC3	289.57	190357.28		
ME2	LZC1	317.48	278459.99	292	261438.86
	LZC2	341.73			
	LZC3	216.35	244417.73		
ME3	LZC1	329.15	259968.64	327	281076.86
	LZC2	320.20			
	LZC3	333.08	302185.08		
ME4	LZC1	250.96	285132.83	276	274482.77
	LZC2	350.64			
	LZC3	225.41	263832.70		

Tabla 1.4. Resultados de esfuerzo a compresión, de los cilindros de dala y losa

1.4. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA PARA LAS PRUEBAS

Para cada ensaye se utilizó un arreglo específico de instrumentación para los desplazamientos más significativos para los análisis posteriores. Estos arreglos comprenden desde transductores para la medición de desplazamientos en arreglos de forma horizontal, vertical y diagonal, así como galgas extensométricas para la comprobación de los esfuerzos de fluencia del acero en el interior de los castillos. Una de las virtudes de este análisis fue la utilización de instrumentos ópticos para medir desplazamientos con amplia precisión en la parte central de los especímenes.

1.4.1. Galgas extenso métricas

Las galgas extensométricas, conocidas también como *strain gauges*, son elementos metálicos en forma de placa que contienen un pequeño circuito eléctrico, y funcionan debido a las variaciones en la resistencia eléctrica cuando las piezas a las que están sujetas son deformadas.

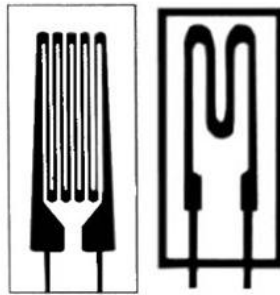


Fig. 1.29. Detalle de circuito de galga extenso métrica

Cabe señalar que estos sensores son utilizados en el rango elástico debido a la limitante del material que normalmente es metálico.



Fig. 1.30. Colocación de las galgas en las varillas de los castillos.

Para el experimento se utilizaron arreglos de seis galgas por castillo de confinamiento, o sea, 12 galgas en los extremos de los castillos, prácticamente en las esquinas de los muros, ya que ahí comienza la falla general del muro.

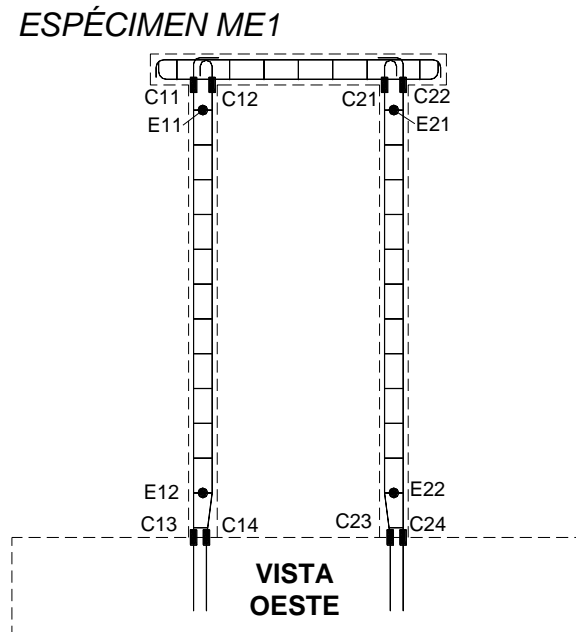


Fig. 1.31. Ubicación de las galgas en el armado del castillo, este arreglo es similar a todos los especímenes.

1.4.2. Micrómetros y Transductores

Los transductores son elementos mecánico eléctricos, que traducen un desplazamiento físico de un vástago, en impulsos eléctricos, esto debido al fenómeno de la inductancia.

En este caso, para la prueba se utilizaron dos tipos de transductores, unos son los micrómetros, que funcionan de forma mecánica, de forma que se pueden leer en tiempo real debido a una caratula que poseen, pero a su vez, registran los desplazamientos en archivos de datos, y los transductores normales, los cuales no tienen caratula, y solo se pueden leer por la adquisición de datos. Las medidas de la carrera de sus vástagos fueron de 25, 50, 100 y 200 mm, de acuerdo a su posición en el muro de acuerdo a su posible desplazamiento.



Fig. 1.32. Transductores utilizados micrómetro (DDP-50^a), y los transductores CDP⁵

⁵ Tokyo Sokky Kenkyujo, Transductores de desplazamiento, ficha técnica DDP, CDP

1.4.3. Arreglos de instrumentación

Los arreglos generales constan de un sistema de transductores, a la que se llamo instrumentación física, en donde se instrumenta el espécimen de las zonas donde es primordial analizar sus desplazamientos.

Este arreglo general se toma de acuerdo a las dimensiones del tablero del modelo. En los casos de los muros ME1 y ME2 se toma un acomodo con dos crucetas en las zonas inferior y superior del tablero para su deformación diagonal, esto debido ala esbeltez que tienen. En los casos ME3 y ME4, esta instrumentación diagonal se basa en solo una cruceta general. En estos sistemas de pistones, se mide también el abombamiento general del muro, que se va presentando a lo largo de la prueba, se le denomina con el micrómetro AB, ubicado en la parte media del muro de acuerdo a su altura. De acuerdo a su utilidad en la prueba cada instrumento tiene su nomenclatura, *ver Tabla 1.5.*

Nomenclatura	Dispositivo	Mide
H	Transductor	Desplazamiento horizontal
V	Micrometro	Desplazamiento vertical
D	Micrometro	Desplazamiento diagonal interno
AB	Micrometro	Abombamiento
R	Transductor	Rotación superior
MIC	Micrometro	Rotación inferior
DES	Transductor	Deslizamiento base
CIM	Transductor	Cimentación

Tabla 1.5. Nomenclatura general para los dispositivos de medición.

Para los desplazamientos laterales fue necesario el uso de 4 transductores a diferentes alturas del muro, pero de mas importancia los transductores denominados H1 y H2, ya que estos miden el desplazamientos superior del muro, o general, en el caso de los demás transductores horizontales son para verificar las variaciones de los desplazamientos respecto a la altura.

Las mediciones verticales, evalúan los efectos de la carga a compresión ejercida en algunos puntos de la prueba, así como para ver su rotación con las cargas a compresión combinadas con las de cortante.

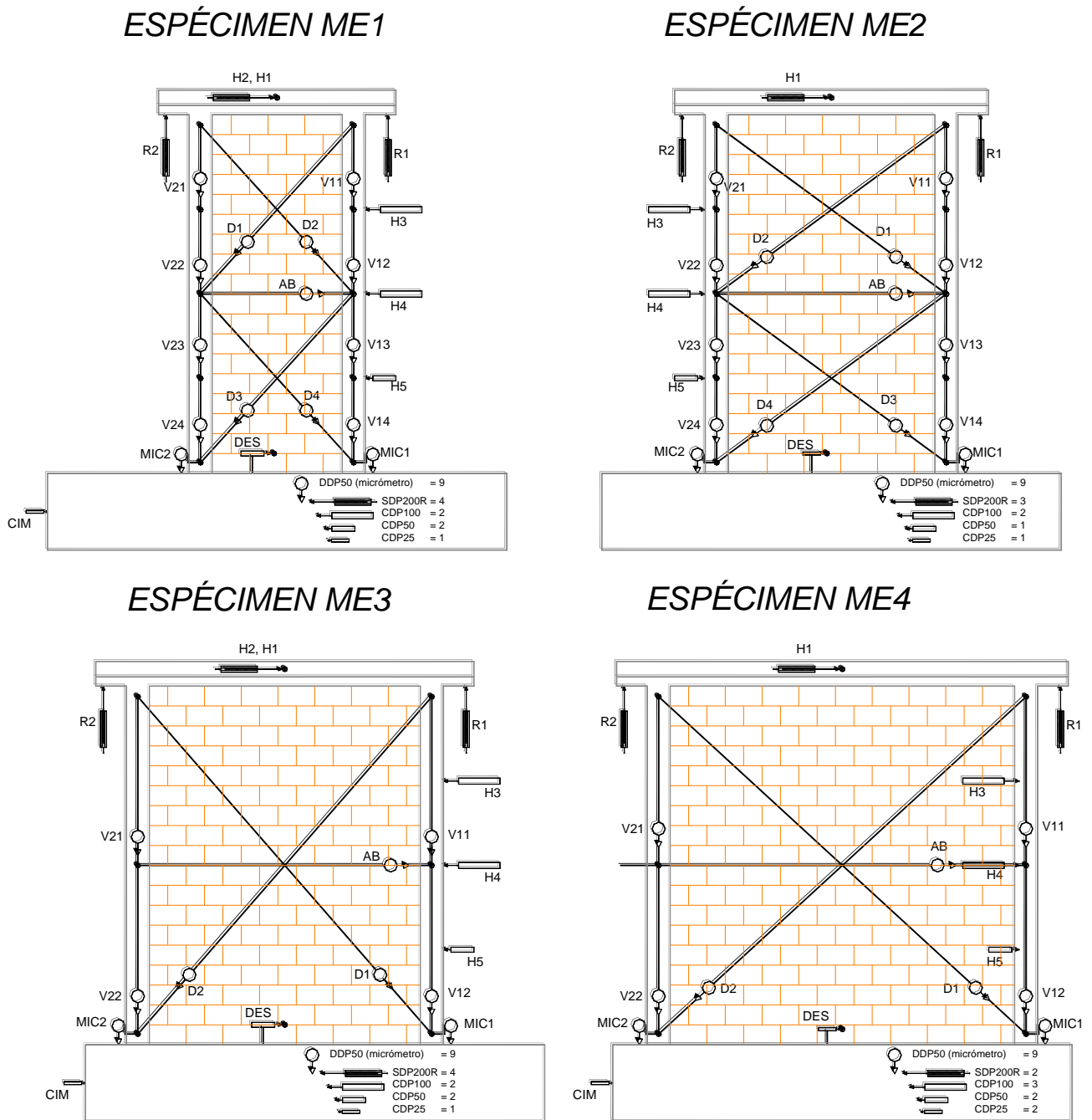


Fig. 1.33. Arreglos generales de instrumentación en los cuatro muros. (Flores, et al. 2008)

1.4.4. Elementos Ópticos

La instrumentación óptica se contempla por tres partes principales: leds de posición en el espécimen, la cámara y el modulo de adquisición de datos.

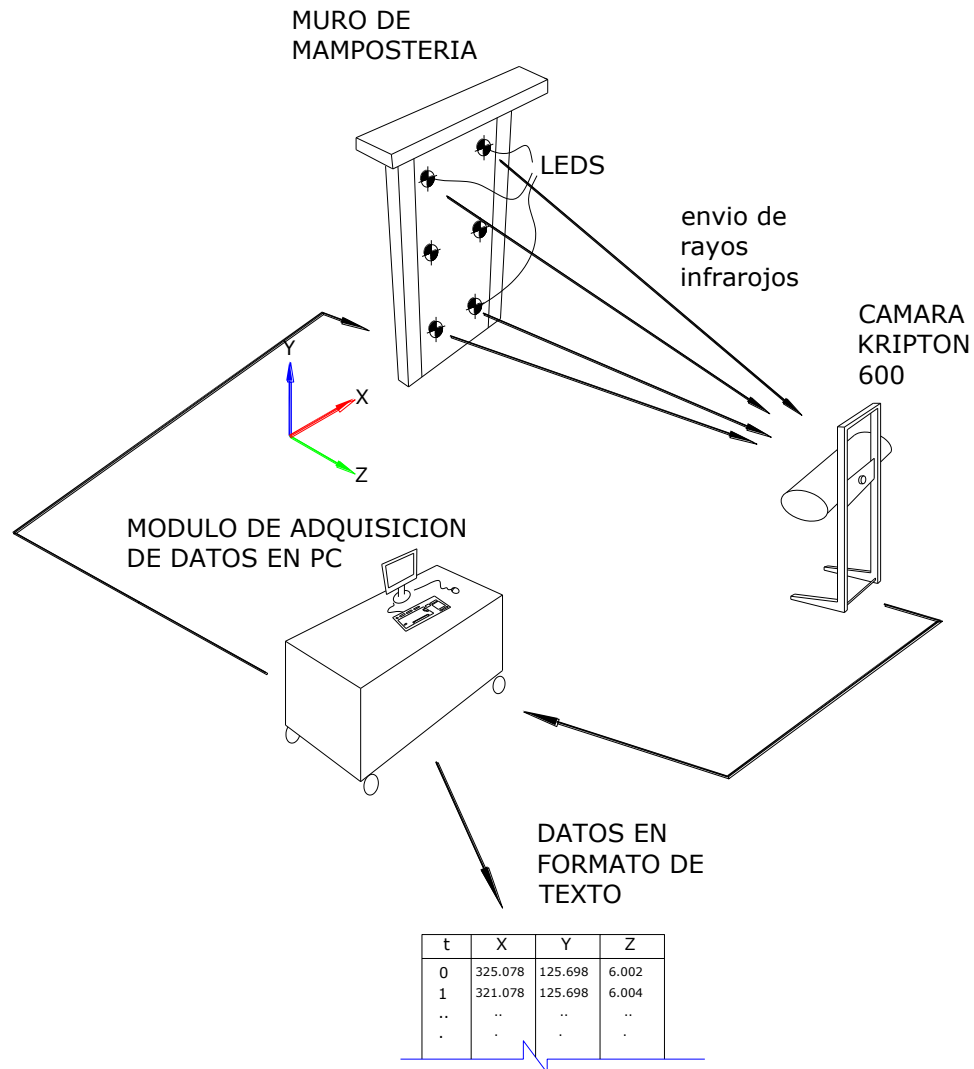


Fig. 1.34. Modo de operación de la cámara de leds en los ensayos.

El funcionamiento es el siguiente, los leds son elementos que se basan en el manejo de la luz infrarroja y mandan pulsaciones a una cámara que recibe su posición en tres dimensiones, y esta es registrada en la computadora, así durante el transcurso del experimento se toman datos de posición de todos los leds que se hayan conectado al sistema óptico a razón de 10 lecturas cada segundo, o sea 10 lecturas de posición en tres dimensiones cada segundo en cada led que se haya incluido en el ensayo.

La cámara tiene un sistema coordinado en el cual el plano XY representa la superficie del espécimen a analizar, y el eje Z es simplemente una distancia de posición de la cámara respecto al muro.

Una de las principales ventajas de este sistema es la precisión de 0.0001 de mm, por la cual en tres dimensiones parece apta para desplazamientos pequeños ó imperceptibles.



Fig. 1.35. Cámara receptora, y modulo de adquisición de datos del sistema Krypton-600⁶

Para el experimento se utilizaron cerca de 32 led's para analizar la parte central de los paneles de cada muro.

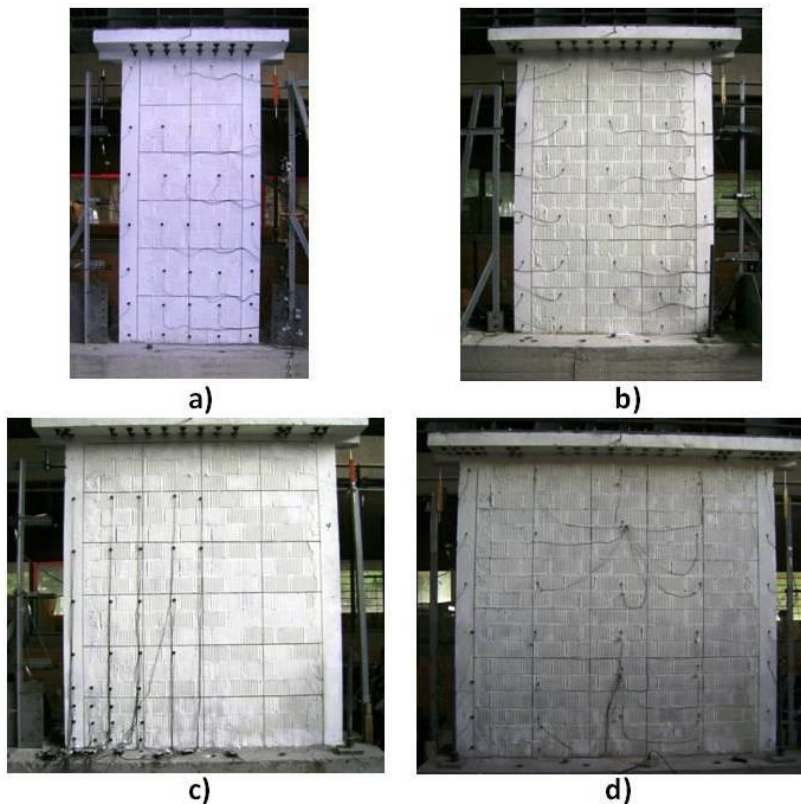


Fig. 1.36. Arreglo de Led's para las pruebas de muros, para a) ME1, b) ME2, c) ME3 y d) ME4.

Como se puede observar, la posición de los leds fue en una especie de cuadrícula. De este arreglo podemos tomar franjas horizontales como referencia a las distancias desde la parte superior de los

⁶ Krypton Electronic Engineering NV, Guía de Software

muros hasta su base. Estos leds tienen una numeración, y no en todos tuvo un orden de acuerdo a su ubicación y numero consecutivo. La tabla 1.6 muestra la numeración de los leds por franja asociados a la distancia X.

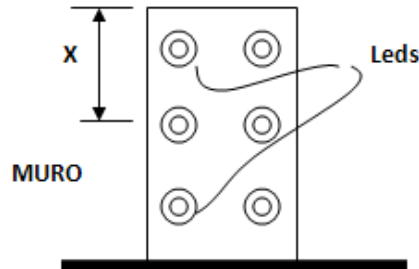


Fig. 1.37. Ubicación de los leds por franjas, de acuerdo a una distancia desde la parte superior de un muro.

ME1	leds asociados	ME2	leds asociados
x cm		x cm	
10.311	1,2,3,4	9.396	1,2,3,4,5
60.116	5,6,7,8,9	60.151	6,7,8,9,10
98.915	10,11,12,13,14	98.226	11,12,13,14,15
139.547	15,16,17,18,19	138.453	16,17,18,19,20
175.463	20,21,22,23,24	175.995	21,22,23,24,25
203.654	25,26,27,28,29	203.6	26,27,28,29,30
229.558	30,31,32,33,34	228.95	31,32,33,34
240	35	240	35

ME3	leds asociados	ME4	leds asociados
x cm		x cm	
44.406	26,27,28,29,33	8.063	21,1,2,3,27
85.078	23,24,25,30,34	59.29	22,4,5,6,28
122.95	20,21,22,31	98.86	23,7,8,9,29
162.972	17,18,19,32	136.89	24,10,11,12,30
188.316	13,14,15,16	178.82	25,13,14,15,31
201.988	9,10,11,12	203.8	26,16,17,18,32
213.942	5,6,7,8	227.72	34,19,20,33
227.121	1,2,3,4	240	35
240	35		

Tabla 1.6. Distancia de posición de los leds desde la parte superior, y leds asociados.

1.5. APLICACIÓN DE CARGA

En este apartado se explicara la forma de aplicación de cargas sobre los especímenes, así como el historial llevado a cabo durante las pruebas.

1.5.1. Marco de Carga

Para la adecuada aplicación de las cargas continuas, que se dispusieron a lo largo las pruebas se resolvió un arreglo estructural donde se dispondrán de ciertos elementos que ejercerán carga, la transmitirán o simplemente servirán de conexión. Los elementos que conforman el marco de carga, se denominaran de acuerdo a la función que realizan en los ensayos.

1.5.1.1. Elementos para la aplicación de la carga

- **Actuador hidráulico MTS (A1)**, manipulado por ordenador, con capacidad de 200 ton, con 41.5 cm de carrera. Esta fijado al muro de reacción mediante un sistema de tres varillas enroscadas de 5.08 cm de diámetro, pretensadas en 20.0 ton_f a una placa conexión de acero A-36 con dimensiones de 114.8 X 64.8 cm y de 7.62 cm de espesor, la cual esta ranurada de forma múltiple en cuadrícula, y con cuerda para tornillos de de 3.81 cm de diámetro con la cual se adhiere el actuador, mediante cuatro tornillos antes indicados. Este arreglo sirve para la aplicación de la carga lateral en los ensayos conectando el cabezal del actuador en la viga de unión para la loza de los especímenes. Denominación de este arreglo es A1. Ver Fig. 1.38.

MURO DE REACCION

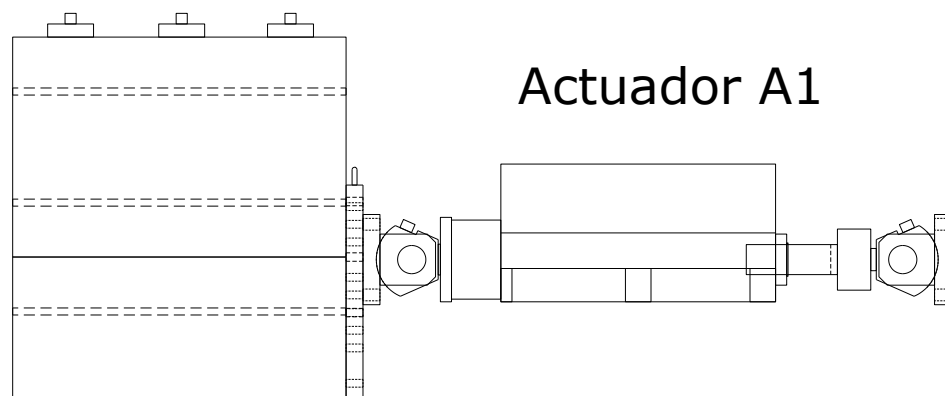


Fig. 1.38. Actuador A1 empotrado en el muro de reacción en posición horizontal.

- **Muro de de reacción**, el cual consta de ocho bloques de concreto con dimensiones de 1.5 x 1.5 x 1.0 m, con huecos internos de 0.643 x 0.617 x 1.0 m. En este muro de amplia rigidez se incorporo el actuador A1 para carga lateral. Debido a la amplia diferencia de rigideces y masa

del muro de reacción con respecto a la de los modelos, se dispuso a que fuese simulado como un empotramiento.

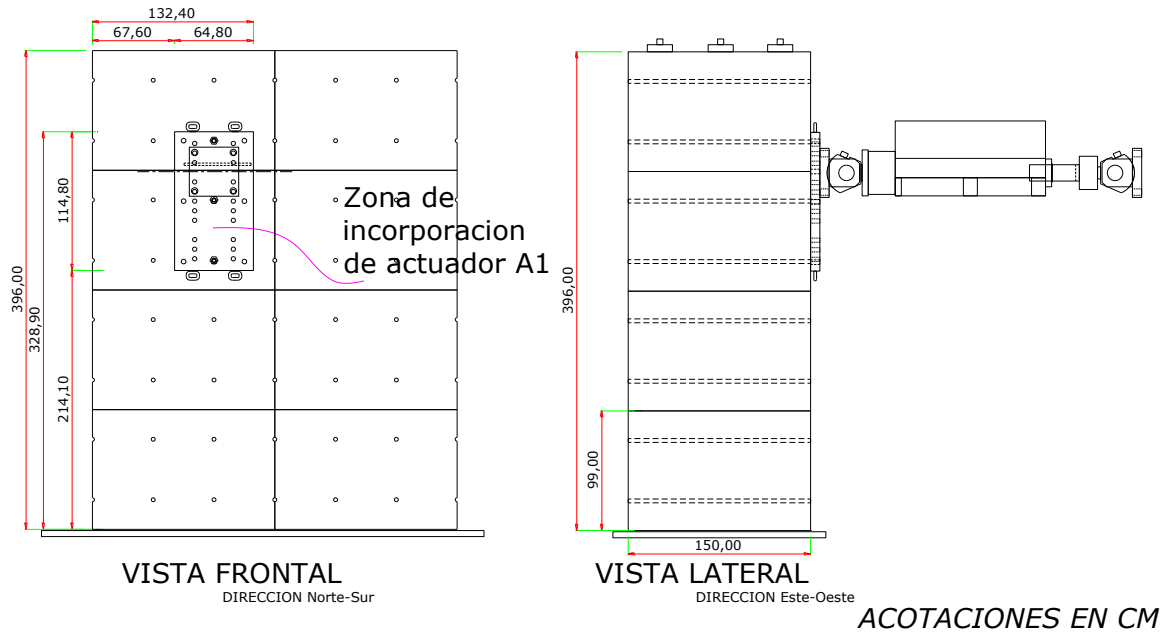


Fig. 1.39. Arreglo frontal y lateral del muro de reacción.

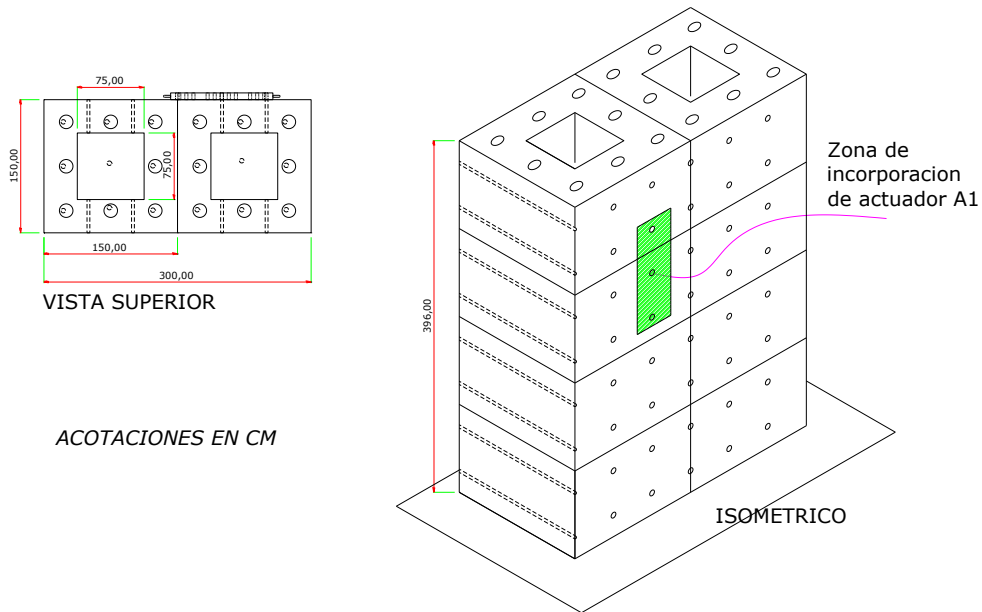


Fig. 1.40. Dimensiones superiores y vista isométrica del muro de reacción.

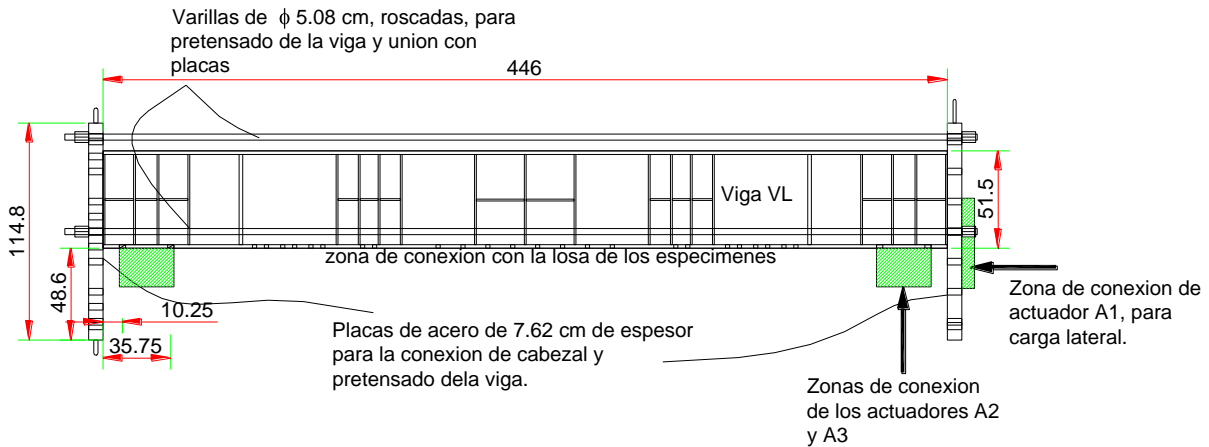
- **Dos actuadores hidráulicos MTS (A2, A3)**, manipulados por ordenador, ambos con capacidad de 50.0 ton_f, y con 27.05 cm de carrera. Esta fijado a la losa de reacción del laboratorio (nivel de piso) en una base de concreto de 20.0 cm de espesor en la que descansa una placa conexión de acero A-36 con dimensiones de 114.8 X 64.8 cm y de 7.62 cm de espesor ranurada en cuadrícula, con cuerda para tornillos de 3.81 cm de diámetro, esta base esta anclada a la losa de reacción mediante varillas roscadas, con la cual se anclan los actuadores de forma vertical. Estos actuadores están articulados en su parte inferior de modo tal que permiten el giro, por ende el desplazamiento lateral, mas no el movimiento en a los costados Los cabezales de estos actuadores se conectaran a la viga de unión de la losa para los especímenes, con la función de transmitir carga axial. La aplicación de la carga será sincronizada para evitar en lo menor posible momentos de flexión en el los especímenes debido a la ubicación de los actuadores en los extremos de los especímenes. Denominación A2 y A3.

1.5.1.2. Elementos para la transmisión de carga

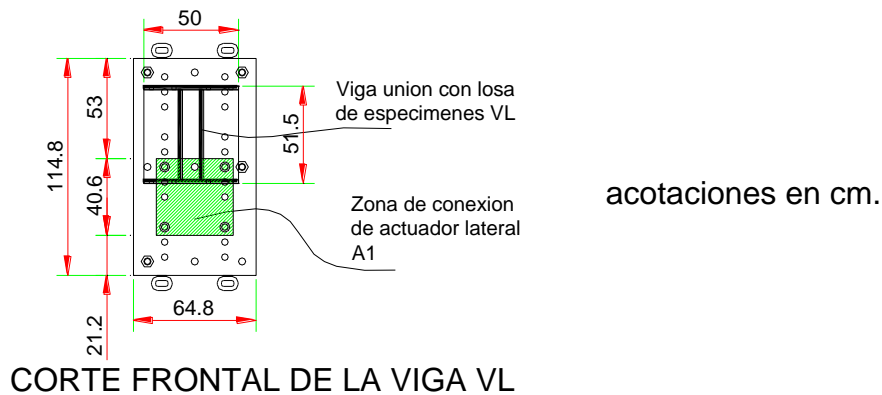
- **Viga unión para losa (VL)**, de acero A-36 Doble I, de fabricación en taller, con un peralte de 51.5 cm, un ancho de patín de 50.0 cm y 446.0 cm de longitud. Sus espesores son de 1.905 cm en sus patines y 0.95 cm en sus almas, las cuales están separadas 10.25 cm una de la otra. Esta conformada por atiesadores intermedios, y orificios de 1 pulgada (2.54 cm) para anclajes. La viga de acero forma parte del laboratorio de materiales del Instituto de Ingeniería y se ha utilizado previamente para diferentes experimentos, se tuvo que adecuar la losa de los especímenes para que la viga se pudiera utilizar en los ensayos.

El anclaje de la viga a los especímenes será con un juego de tornillos de 1.58 cm de diámetro (5/8 pulg) y longitud de 15.2 cm, con acero de alta resistencia (grado 60) con tuerca y rondana. Durante la construcción de los muros se adecuaron los orificios que existen en la viga a la losa de cada espécimen, copiando detalladamente su ubicación para concordaran perfectamente. Además de los tornillos se manejo de una lechada de concreto para incrementar la superficie de contacto entre la losa y la viga. Con esto se tendría agregado a la conexión de los tornillos una componente de fricción que garantiza la adecuada transmisión de carga.

Para la conexión del cabezal del actuador A1, se agregaron dos placas de acero en los extremos de la viga, que además sirven para el pretensado a 5 ton_f de la viga. La transmisión de la carga lateral se dará en la intersección del patín inferior de la viga con la losa, de acuerdo a la posición de la conexión del actuador A1. La transmisión de carga axial será con los actuadores A2 y A3 en donde sus cabezales se conectaron directamente a la viga en los extremos de esta, mediante tornillos de acero de alta resistencia de 5.08 cm de diámetro. Denominación VL.



VISTA LATERAL DE LA VIGA VL, CON SUS PLACAS DE PRETENSADO.



CORTE FRONTAL DE LA VIGA VL

Fig. 1.41. Viga VL, con corte frontal y arreglo de unión con actuadores.

La nomenclatura de ubicación dentro del laboratorio fue de acuerdo a la convención de rumbos geográficos, así pues, el muro de reacción se ubica en la zona sur del laboratorio, y la cabina de mando en la dirección este.

El arreglo del marco de carga está dispuesto para simular las acciones de carga lateral y ejercer una carga axial durante las pruebas. Su colocación general en todas las pruebas se muestra en la figura 5, en donde se establece la posición de los actuadores respecto al espécimen.

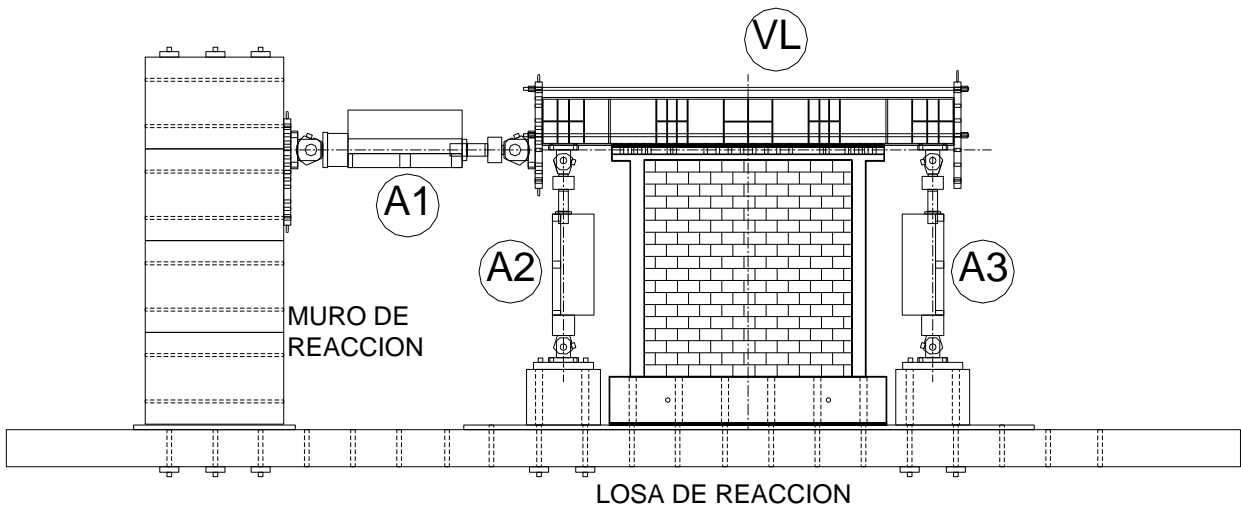


Fig. 1.42. Arreglo general de ensayos.

El actuador A1 se encarga de la aplicación sistemática de la carga lateral en los muros, la carga es transmitida a la viga VL, y esta con la conexión a la losa del muro lo trasmite en su eje superior. Los actuadores ejercen una carga axial o contraponen el peso de la viga según sea el caso especial en el programa de ensayos, estos actuadores permiten el desplazamiento horizontal del espécimen durante el ensaye.

1.5.2. Historial de cargas

Para el procedimiento de prueba se tuvo que proponer las cargas laterales que se iban a ser adecuado, para analizar los modelos de forma pausada, respecto a su etapa de prueba, sea la etapa elástica como la plástica. Se sugiere en el apéndice A.7 de las NTCDF referentes a mampostería, un protocolo de ensayos, basados en cargas calculadas de esfuerzos de fluencia de la mampostería, en el caso de la etapa elástica en fracciones de este. Para la etapa plástica se recurre a manejar el ensaye por distorsiones, con tal de llevar los modelos al máximo posible de repeticiones de carga.

ESPECIMEN	L cm	t cm	A _T cm ²
ME1	115	12	1380
ME2	207	12	2484
ME3	210	12	2520
ME4	255	12	3060

Tabla 1.7. Área transversal bruta por espécimen, contando el área de castillos.

Para el historial de cargas aplicadas, se baso en la suposición de la cortante de diseño sobre área bruta (v_m^*), para lo que a los modelos se les tomo el valor de $v_m^* = 1.7 \text{ kg/cm}^2$ para ME1 y ME2, $v_m^* = 3 \text{ kg/cm}^2$ para ME3 y ME4, teniendo variación de la carga axial sobre todos los muros de $\sigma = 0, 2.5, 5$ y 10 kg/cm^2 para la etapa elástica, y al final se establecía la carga axial de $\sigma = 5 \text{ kg/cm}^2$ para la etapa plástica o destructiva.

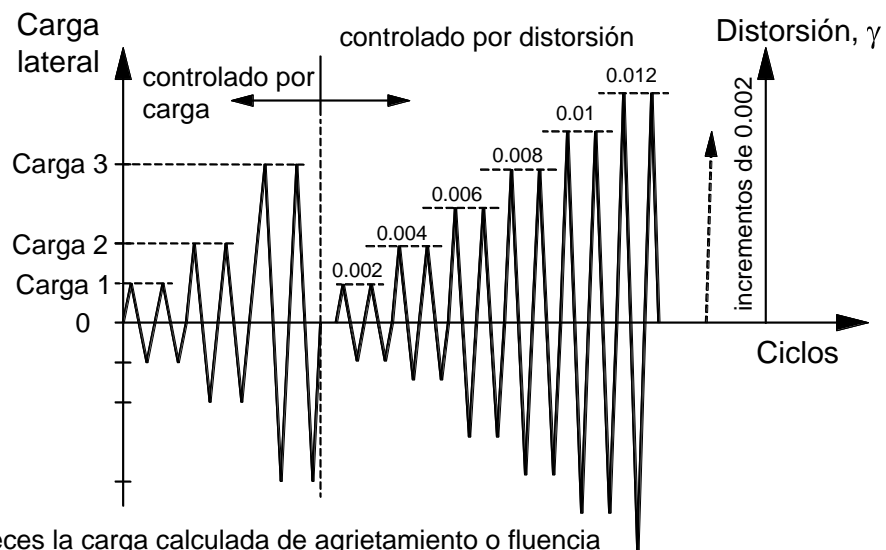
Con los datos de v_m^* , la carga axial y el área bruta basados en la geometría de los muros, se utiliza la ecuación que recomiendan las NTCDF referentes a mampostería en su capítulo 6.4.2 referente a cargas laterales:

$$V_{mR} = F_R (0.5v_m^* A_T + 0.3P) \leq 1.5F_R v_m^* A_T \tag{1.5}$$

Donde $F_R = 0.7$ Factor de resistencia recomendado (1)

- V_{mR}** Fuerza cortante de diseño resistente que toma la mampostería (kg)
- v_m^*** Cortante de diseño sobre área bruta, supuesta (kg/cm^2)
- A_T** Área bruta de la sección transversal del muro (cm^2)
- P** Carga axial sobre el muro (kg)

Estas suposiciones de la fuerza cortante V_{mR} fueron las que se tomaron como aplicación, con la recomendación de $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ de la carga para aplicación real. Estas aplicaciones fueron cíclicas, están determinados como negativos y positivos de acuerdo a la dirección de aplicación en el historial de cargas. Por ejemplo el ciclo +1, contenía la aplicación de la carga lateral en un sentido y otro que se le denominaba ciclo -1, misma que se repetía en el ciclo +/-2 con solo el $\frac{1}{4}$ de la carga de V_{mR} supuesta. Así con los siguientes ciclos se daba un incremento en fracciones de V_{mR} hasta el valor estimado.



- Carga 1 = 0.25 veces la carga calculada de agrietamiento o fluencia
- Carga 2 = 0.5 veces la carga calculada de agrietamiento o fluencia
- Carga 3 = carga de agrietamiento o primera fluencia (experimental)

Fig. 1.43. Historia de cargas laterales y distorsión

En el momento en que se supera la carga **VmR** de agrietamiento se termina la fase elástica del ensaye, durante este periodo el espécimen se va deteriorando y se hace llegar a la falla total.

A continuación se muestra las tablas resumidas de historial de cargas, cabe señalar que cada ciclo tiene su parte negativa y positiva, de acuerdo a la dirección de la aplicación.

Etapa	Ciclos	Carga Axial σ <i>kg/cm²</i>	VmR <i>kg</i>	Carga Lateral Ejercida <i>kg</i>		
ME1						
<i>Elástica</i>	1-4	$\sigma=0$	1100	275	-	550
	5-8	$\sigma=2.5$	2100	525	-	1050
	9-12	$\sigma=5$	3100	775	-	1550
	13-16	$\sigma=10$	5100	1275	-	2550
<i>Plástica</i>	16-des	$\sigma=5$	3100	775	-	1550
ME2						
<i>Elástica</i>	1-4	$\sigma=0$	1600	400	-	800
	5-8	$\sigma=2.5$	3100	775	-	1550
	9-12	$\sigma=5$	4500	1125	-	2250
	13-16	$\sigma=10$	7300	1825	-	3650
<i>Plástica</i>	16-des	$\sigma=5$	4500	1125	-	2250
ME3						
<i>Elástica</i>	1-4	$\sigma=0$	7000	1750	-	3500
	5-8	$\sigma=2.5$	8900	2225	-	4450
	9-12	$\sigma=5$	10800	2700	-	5400
	13-16	$\sigma=10$	14600	3650	-	7300
<i>Plástica</i>	16-des	$\sigma=5$	10800	2700	-	5400
ME4						
<i>Elástica</i>	1-4	$\sigma=0$	4600	1150	-	2300
	5-8	$\sigma=2.5$	6900	1725	-	3450
	9-12	$\sigma=5$	9200	2300	-	4600
	13-16	$\sigma=10$	13800	3450	-	6900
<i>Plástica</i>	16-des	$\sigma=5$	9200	2300	-	4600

Tabla 1.8. Cargas laterales aplicadas, resumen de historial de cargas.

Capítulo **2**

Modelos Matemáticos de Análisis

2. MODELOS MATEMÁTICOS DE ANÁLISIS

2.1. INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos son una forma de establecer una predicción de un fenómeno cualquiera. En este caso será el comportamiento elástico lineal de un muro, que se puede analizar con la mecánica de materiales básica.

Para comparar los resultados a detalle se baso en una simulación mediante el uso del método del elemento finito, al que se puedan agregar la mayor cantidad de fisonomías de los muros

El método del elemento finito (MEF) se usa ampliamente en el análisis estructural, así como a una amplia gama de fenómenos físicos como lo son la transferencia de calor, flujo de fluidos, el magnetismo y el potencial eléctrico. Este método consiste básicamente en idealizar un elemento continuo por un conjunto de elementos finitos con nodos especificados. En el caso de las estructuras, el MEF es una aplicación del método de los desplazamientos, los desplazamientos desconocidos son traslaciones o rotaciones nodales o derivaciones de éstos. Pueden ser elementos barra o cascarones, de acuerdo a las dimensiones con las que se requiera ocuparse.¹

2.2 OBJETIVO

El objetivo es establecer como están hechos los modelos matemáticos de los especímenes, ya sea con método de columna ancha o con ayuda de un software especializado en el MEF, buscando que los comportamientos en dichos modelos sean para la parte elástica de las pruebas.

Se tomaran en cuenta las dimensiones, propiedades de materiales, aplicaciones de las cargas, y condiciones de frontera que existieron para el modelo físico.

¹ Capítulo 17 Metodo del Elemento Finito, Ghali y Neville IMCYC 1997

2.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN LOS ESPECIMENES

En este apartado de se muestran las propiedades mecánicas que se incluyeron en los análisis, estas propiedades se obtuvieron de las pruebas preliminares vistas en el capítulo 1, siendo extendidas en el apéndice B, de este texto.

2.3.1. Mampostería

Las propiedades de esta sección son las más importantes para el proyecto. El peso específico de este material se toma a partir de un promedio de los materiales de piezas simple con el mortero, debido a que así esta físicamente. Cabe señalar que se tomo el modulo de Cortante con la recomendación de las NTCDF para mampostería, de la relación de Poisson (ν) ajustada a 0.25, tomando como base la ley de Hooke generalizada. Los valores a tomar son los siguientes:

Espécimen	γ_m kg/cm^3	f_m kg/cm^2	ν_m kg/cm^2	E_m kg/cm^2	$G_m=0.4E_m$ kg/cm^2
ME1	8.15E-04	76.09	4.66	43347.00	17338.80
ME2	8.15E-04	72.45	5.01	44557.00	17822.80
ME3	8.15E-04	76.49	5.28	43715.67	17486.27
ME4	8.15E-04	79.72	4.95	44065.67	17626.27

Tabla 2.1. Valores promedio de las propiedades mecánicas para mampostería

Los datos experimentales de modulo de cortante normalmente no se incluyen en un análisis ya que no cumplen el concepto de material elástico. Debido a que se puede incluir esta característica en modelos de elemento finito como material anisótropo se presentan los valores de G experimental para mampostería.

Espécimen	G_m kg/cm^2
ME1	4772.10
ME2	4623.69
ME3	6484.02
ME4	4718.81

Tabla 2.2. Valores promedio de modulo de cortante en muretes de mampostería, por espécimen.

2.3.2. Dalas y castillos

La calidad del concreto utilizado sufrió variaciones para cada modelo, estas variaciones fueron respetadas para la simulación por ordenador. En el material de concreto se utilizaron los valores experimentales de las pruebas, sin el contemplado de diseño por concreto. Se utiliza una relación de Poisson de 0.25.

Espécimen	γ_c <i>kg/cm³</i>	f'_c <i>kg/cm²</i>	E_c <i>kg/cm²</i>	G_c <i>kg/cm²</i>
ME1	1.94E-03	334.63	116075	46430
ME2	1.86E-03	216.42	103394.5	41357.8
ME3	1.87E-03	184.68	100737	40294.8
ME4	1.87E-03	233.52	110211	44084.4

Tabla 2.3. Valores promedio de las propiedades mecánicas para el concreto en castillos

2.3.3. Losa

La sección de la losa, es la zona de contacto para la transmisión de cargas, por lo que la calidad de material era superior al resto de los demás materiales. Físicamente este material se elaboro en un solo día, al igual que todas sus muestras.

Espécimen	γ_{cl} <i>kg/cm³</i>	f'_{cl} <i>kg/cm²</i>	E_{cl} <i>kg/cm²</i>	G_{cl} <i>kg/cm²</i>
ME1	1.91E-03	281.13	216972.59	86789.036
ME2	1.93E-03	291.85	261438.86	104575.544
ME3	1.98E-03	327.48	281076.86	112430.744
ME4	1.96E-03	275.67	274482.77	109793.10

Tabla 2.4. Valores promedio de las propiedades mecánicas del concreto para losa.

2.3.4. Viga de transmisión de carga

Para la viga VL, se tomo en consideración que se trata de acero A-36, estandarizado en sus propiedades. Para esto se tiene:

Peso especifico <i>kg/cm³</i>	Esfuerzo de fluencia				E_s <i>kg/cm²</i>	G_s <i>kg/cm²</i>
	F_y <i>kg/cm²</i>	F_u <i>kg/cm²</i>	F_{y_e} <i>kg/cm²</i>	F_{u_e} <i>kg/cm²</i>		
7.85E-03	2531.03	4077.80	3796.58	4485.58	2038901.9	784193.0

Tabla 2.5. Valores característicos del acero A-36

2.4 MODELACIÓN POR METODO DE COLUMNA ANCHA

Para la modelación matemática de los muros se utiliza la fórmula de la rigidez ante carga lateral, que se puede analizar en el apéndice A.

$$K = \left[\frac{H^3}{12EI} (4 - 3\xi) + \frac{H}{GA_C} \right]^{-1} \quad (\text{A.43})$$

Antes se deben de hacer las consideraciones de que los muros son un material compuesto de cambio de sección, factor de forma para área de cortante, vistas en el apéndice AP.4. De cada material tenemos los módulos de elasticidad obtenidos experimentalmente y su geometría final, de lo que obtenemos.

Muro	Ec kg/cm ²	Em kg/cm ²	A cm ²	Ac cm ²	I cm ⁴
ME1	116075	43347	1971	1264	2970781.87
ME2	103394.5	44557	2467	1795	7296550.70
ME3	110211	43715.66	2953	2216	13206129.89
ME4	100737	44065.66	3624	2748	24904375.79

Tabla 2.6. Propiedades de los materiales en muros y sus respectivas áreas de cortante y momento de inercia.

Para este caso se usa la recomendación de las NTC 2004 de mampostería, con respecto al valor de módulo de cortante G, en la que se recomienda la relación $G=0.4E$.

Para un análisis detallado se puede tomar los valores de G igual al experimental.

Incluyendo los valores en la ecuación 2.1, se obtienen los siguientes resultados de rigidez variando el valor de ξ de 0 a 1, de acuerdo si es cantiléver o doble empotrado.

Este componente de rigidez, servirá para comparar con los resultados experimentales en muros, por lo que es necesario ajustar las unidades de K en kg/cm para todos los resultados.

2.5 MODELACIÓN POR ELEMENTO FINITO

La modelación se llevo a cabo utilizando un software especializado en MEF (Halibulah 2005), esta simulación consta de arreglos geométricos para la adecuada consideración de conjunto de los elementos finitos, así como el establecimiento del tipo de materiales y sus propiedades. Todas las características para esta simulación se tomaron del proyecto geométrico así como de las pruebas previas para los materiales utilizados en cada espécimen. En este apartado se expondrán las consideraciones tomadas para la simulación.

Para comparar resultados y efectos que pudieran hacer detalles como la viga y el sistema de anclaje, también se utilizo una simulación sin este nivel de detalle. Esto hace que el modelo tenga un rango máximo y mínimo de resultados.

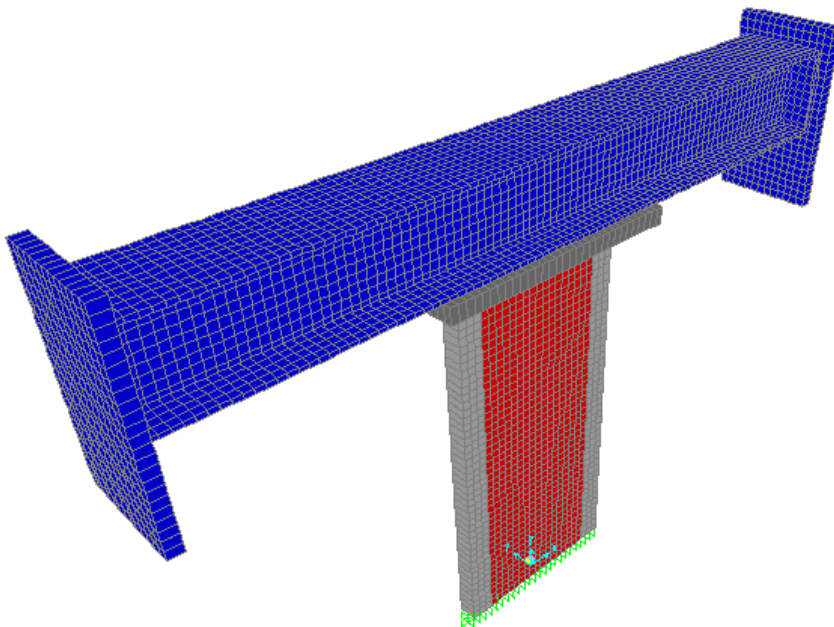


Fig. 2.1. Vista general del modelo MEF por elementos finitos.

2.5.1. Geometrías

La geometría en general, se basa en el plano de referencia que es en si el tablero de cada espécimen. De ahí se considero un seccionamiento tipo área, adecuado para la precisión de la simulación. Las divisiones de acuerdo a geometría recomendadas, eran prácticamente de el tamaño de las piezas de mampostería, pero para una mayor exactitud, es necesario una mayor cantidad de subdivisiones, debido a las dimensiones en múltiplos de 5 se consideraron fragmentos de 5 x 5 cm, que es el limite máximo para una correcta solución.

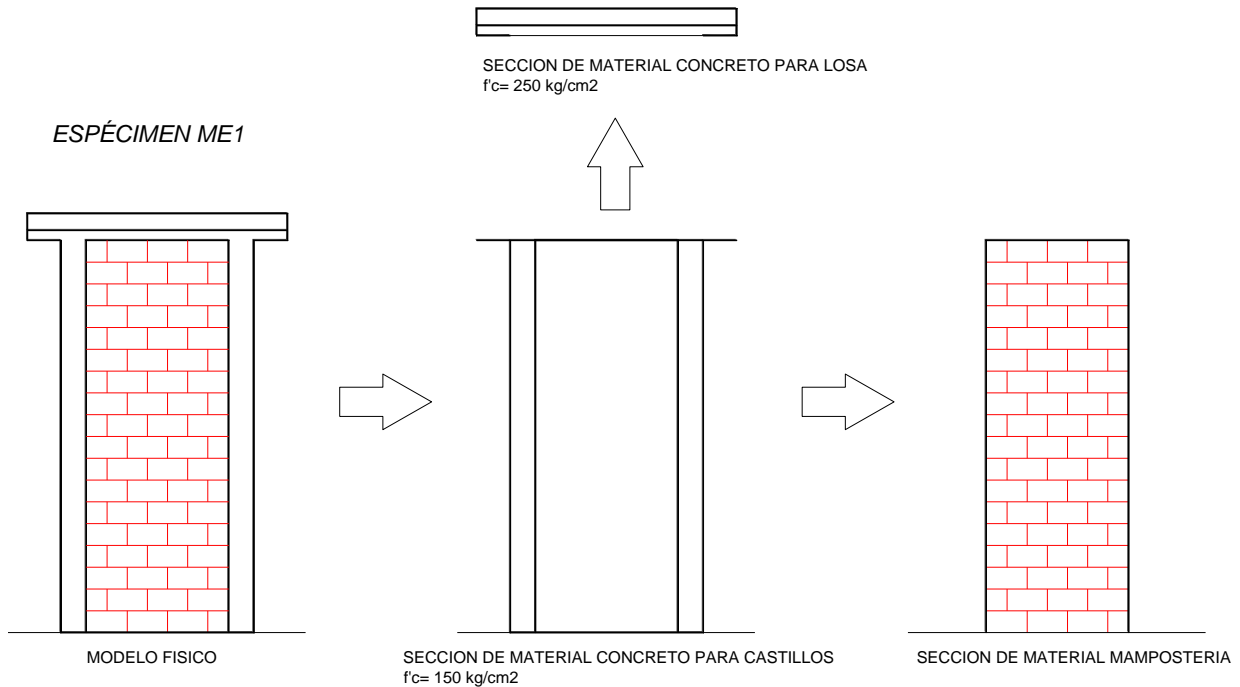


Fig. 2.2. Segmentación de los especímenes por tipo de material y geometría.

2.5.1.1. Secciones de mampostería

Para el seccionamiento de la mampostería, parte esencial del modelo, se tomo en cuenta una sección tipo cascarón, con un espesor de 12 cm, tal cual es físicamente. Se tomaron las dimensiones de cada tablero con sus diversas geometrías sea el caso 234 x 85 cm para el modelo ME1, 234 x 135 cm para ME2, 234 x 177 cm para ME3 y 234 x 225 cm para ME4, subdividiéndolas en pequeños cuadros de 5 x 5 cm a excepción del muro ME3, el cual tiene una geometría distinta y se tuvo que ajustar a una geometría similar, mas sin embargo se busco la misma dimensión de cascaron.

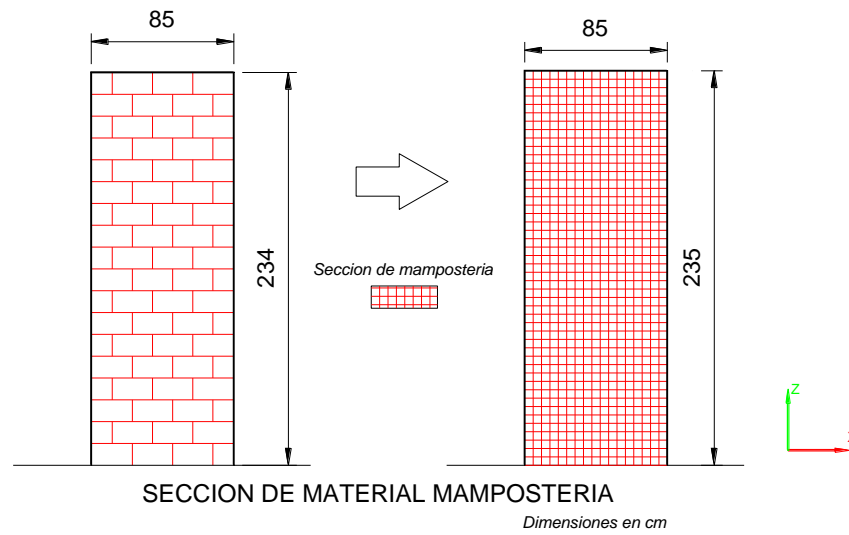


Fig. 2.3. Subdivisión de los elementos de mampostería.

En general los cascarones tienen la dimensión de 5 x 5 cm por 12 cm de espesor, con cuatro nodos específicos de unión con otros elementos, en el sistema coordenado que se muestra.

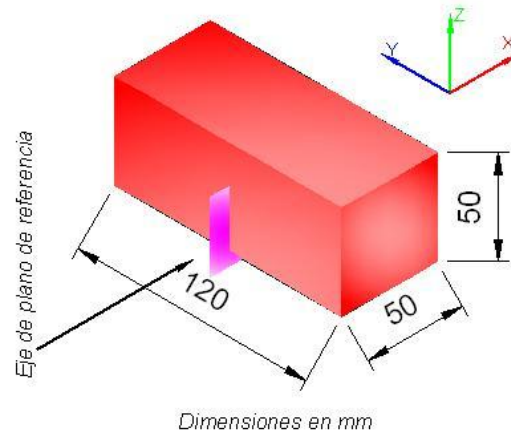


Fig. 2.4. Sección tipo para los elementos de mampostería.

2.5.1.2. Secciones de castillos

Las secciones de castillos tienen medidas semejantes en todos los modelos en todos se tiene la altura de 234 cm con un ancho por castillo de 12 cm, ya que son los elementos de confinamiento, por lo que su seccionamiento es similar a los elementos cascaron de la mampostería, para que sea relacionado, ya que también tiene el mismo espesor de esta y fueron subdivididos de igual manera en cuadros de 5 x 5 cm.

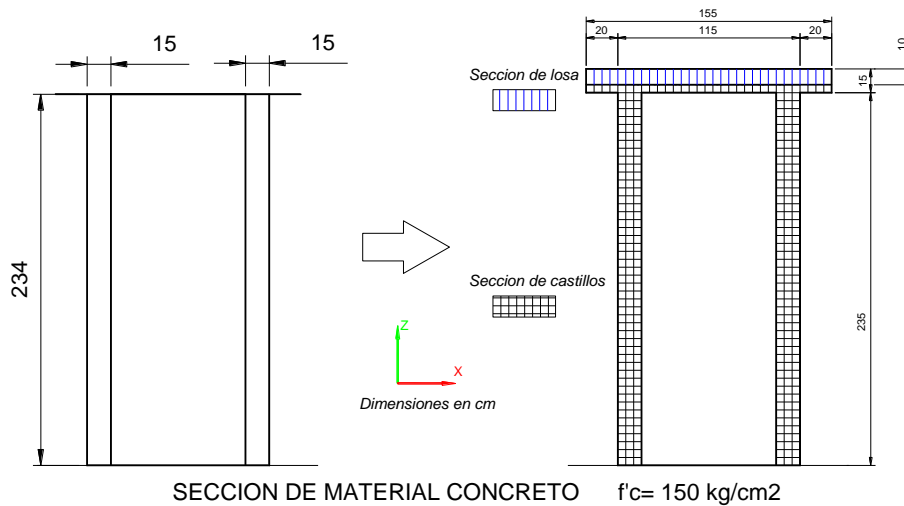
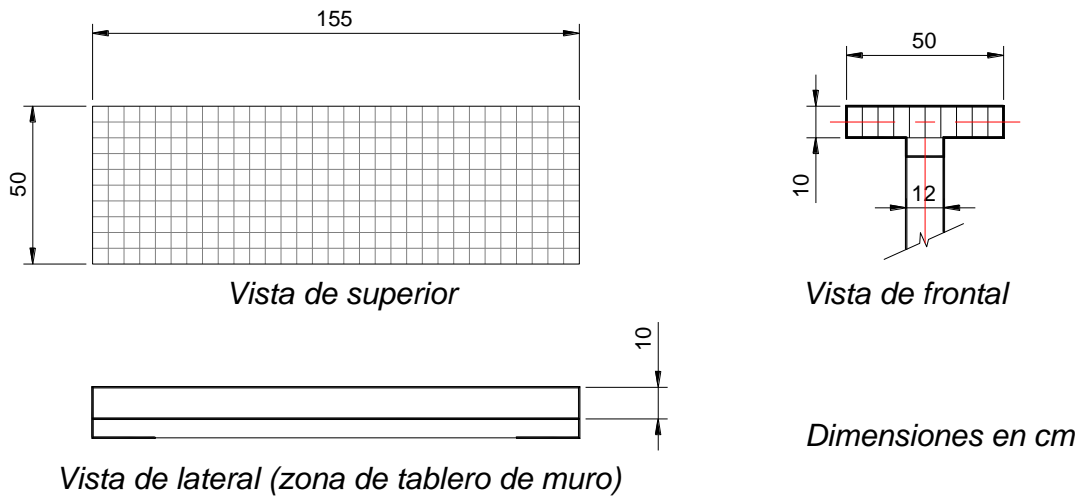


Fig. 2.5. Subdivisión de los elementos de los castillos.

2.5.1.3. Secciones de losa

En la sección de losa se cambió la referencia a un plano perpendicular al de los tableros, tal cual es en el modelo físico. Este modelo tiene más condicionamiento por la parte del plano de contacto con la viga de transmisión de cargas VL, debido a que las uniones de contacto fueron una plancha de mortero y un sistema de anclaje por medio de tornillos de acero de alta resistencia de 2.54 cm de diámetro, este sistema varía de acuerdo a la longitud del muro tal sea.

Las dimensiones en el caso del ancho físicamente corresponden a 55 cm, se ajustó a 50 cm en el programa. Para las longitudes se tienen 155 cm para la losa del modelo ME1, 205 cm para ME2, 247 cm para ME3 y 255 cm para ME4, se toma en cuenta los 20 cm de libre que tienen las dalas de los muros. El espesor corresponde a 10 cm nominal, aunque parte de las dalas eran también de este material para la losa.



SECCION DE MATERIAL LOSA $f'c= 250 \text{ kg/cm}^2$

Fig. 2.6. Seccionamiento de la losa, ejemplificado con el modelo ME1

De igual manera las secciones de placa se establecieron en cuadros de 5 x 5 cm, solo ahora con 10 cm de espesor.

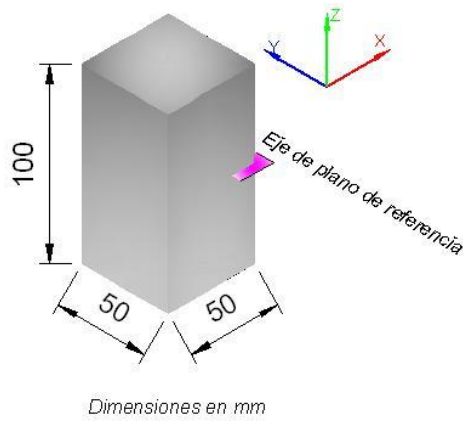


Fig. 2.7. Sección tipo para losa.

2.5.1.4. Secciones en viga

La viga de transmisión de carga es la parte extra del modelo a analizar, pero se toma en cuenta para la correcta aplicación de cargas. Debido a que es lo suficientemente rígida como para que sufra deformaciones importantes respecto a la rigidez de los modelos de mampostería y la carga que se aplica. Por continuidad con el modelo se sigue seccionando en elementos semejantes a 5 x 5 cm. Las dimensiones totales de la viga son 446 cm, se tomaron las dimensiones específicas de la viga doble I, siendo prescindible de los atiesadores que también conforman la viga.

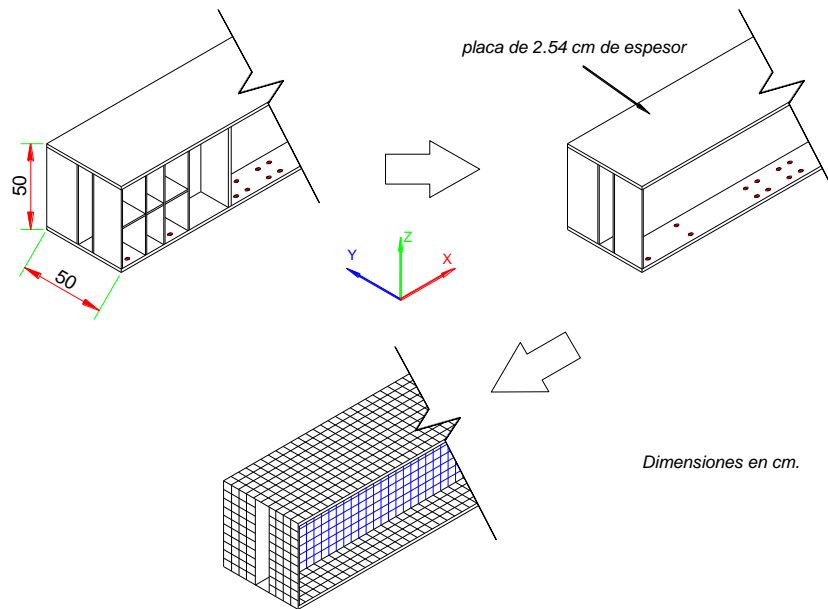


Fig. 2.8. Seccionamiento de la viga de transmisión de carga VL.

Los elementos cascaron se tomaron en dos planos diferentes, con el espesor de 2.54 cm (1 pulg.). También se ubico la viga a una distancia de XX cm para la simulación de los anclajes de la losa del muro con la viga con su parte de mortero.

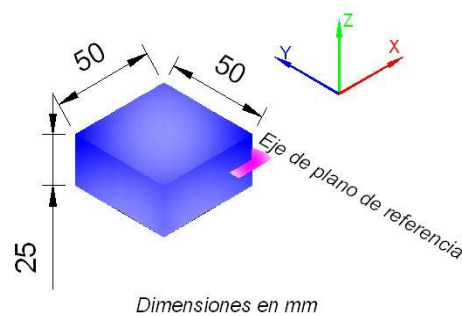
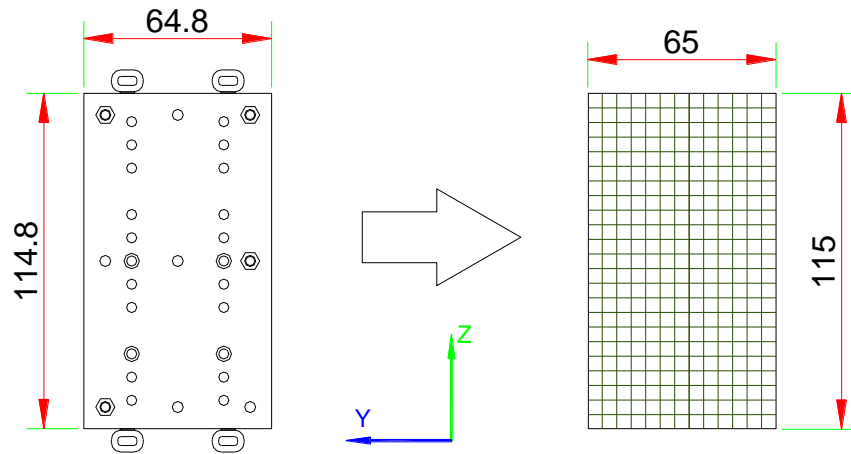


Fig. 2.9. Sección tipo para las placas de la viga VL.

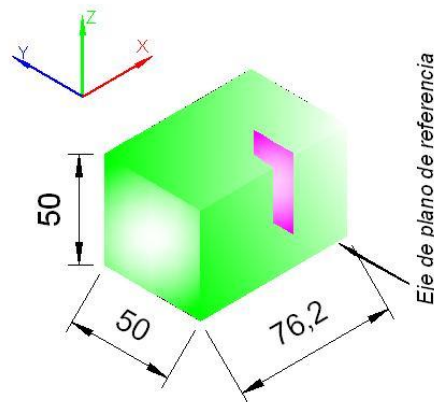
Las viga en sus extremos cuenta con placas de acero de 7.62 cm de espesor, con un sistema de orificios para unión. Esta placa fue utilizada para el pretensado de la viga, además que en estas placas se uno el actuador principal que ejerce la carga lateral. El detalle es que la aplicación de la carga lateral esta distribuida en un cuadro de 40.5 x 40.5 cm y no precisamente en el centro de placa, por lo que también era necesario simular esta placa para la correcta aplicación de cargas.



Dimensiones en cm.

Fig. 2.10. Seccionamiento de la plaza de conexión al actuador, y pretensado.

De igual forma se adopta un arreglo para conformar cuadros de 5 x 5 cm, siendo conformes con todo el modelo.



Dimensiones en mm

Fig. 2.11. Sección tipo para las placas de conexión y pretensado.

2.5.2. Condiciones de Frontera

2.5.2.1. Condición de empotramiento en cimentación

La base de los muros está sujeta a una viga de cimentación sólida, hecha de concreto de alta resistencia, y con dimensiones suficientes como para que un objeto, sea un muro de mampostería ligera, sea sumamente insignificante respecto a la rigidez que tendría la viga de cimentación, que a su vez está anclada, por medio de varillas roscadas pretensadas y con una cama de mortero previa sobre su base, a una losa de reacción, con cerca de 40 cm de peralte, hecha también de concreto de alta resistencia. Una de las revisiones físicas, fue la colocación de un transductor de desplazamiento en la base de la viga de cimentación, para detectar sus posibles deslizamientos, en este caso imperceptibles.

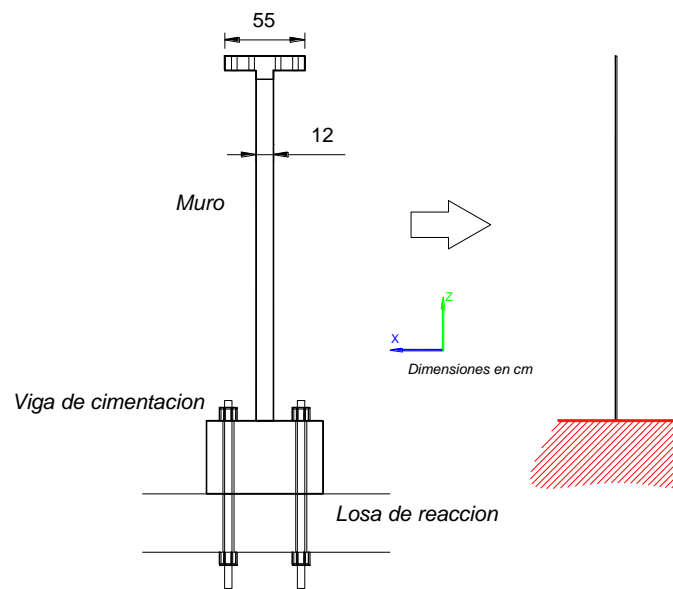


Fig. 2.12. Corte del muro con la losa de reacción y cimentación, se contempla igual a un empotramiento.

La viga se simuló como un empotramiento, restringiendo todos los grados de libertad en los ejes de referencia y los referentes a rotación.

2.5.2.2. Conexiones

Para las conexiones se tuvieron dos en particular: la de contacto de las placas de pretensado y las de la viga de transmisión de carga con la losa de los especímenes.

- **Conexión Viga-Losa**

Las conexiones de la viga a la losa, físicamente fueron hechas con tornillos de 1.905 cm de diámetro, de alta resistencia (Acero A-60). El sistema de conexión varía según la longitud de la losa, debido a que el la

viga VL, tiene un tramado de orificios preestablecido, y estos se ajustan a la necesidad que la conexión del muro y la viga sea simétrico.

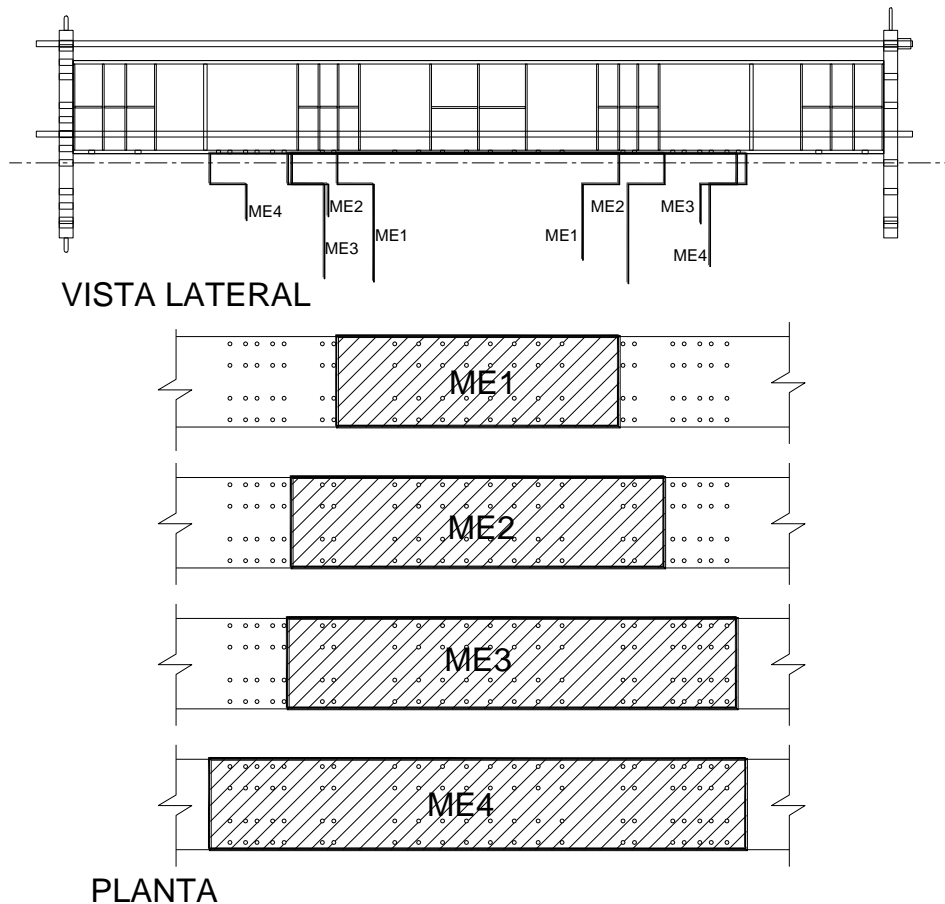


Fig. 2.13. Ductos correspondientes para la losa de cada muro, en la viga de transmisión de carga.

La conexión viga y losa se simulo, tomando en cuenta cada uno de los tornillos que se utilizaron, uniendo las zonas de mallado de ambas partes con una separación de 2 cm, similar a la que existe debido a la cama de mortero. A esta unión se le puso una limitante de conexión que iguala los desplazamientos en los tres ejes, mas deja libre la rotación.

- **Conexión Placas de Viga**

Al igual que la conexión Viga-Losa, se estableció la limitación de grados de libertad, solo para igualar desplazamientos, más no rotaciones. En este caso la conexión con las mallas fue idealizada como si estuviese unida en las esquinas de la placa.

2.5.3. Cargas aplicadas

Para la aplicación de las cargas, para ser lo más semejantes al modelo real, se tomaron como cargas por área. Así, en el caso de la carga lateral, esta se aplica directamente sobre una de las placas de pretensados de la viga de transmisión de carga, ya que esta área esta dirigida al eje donde converge la losa del muro y la viga VL.

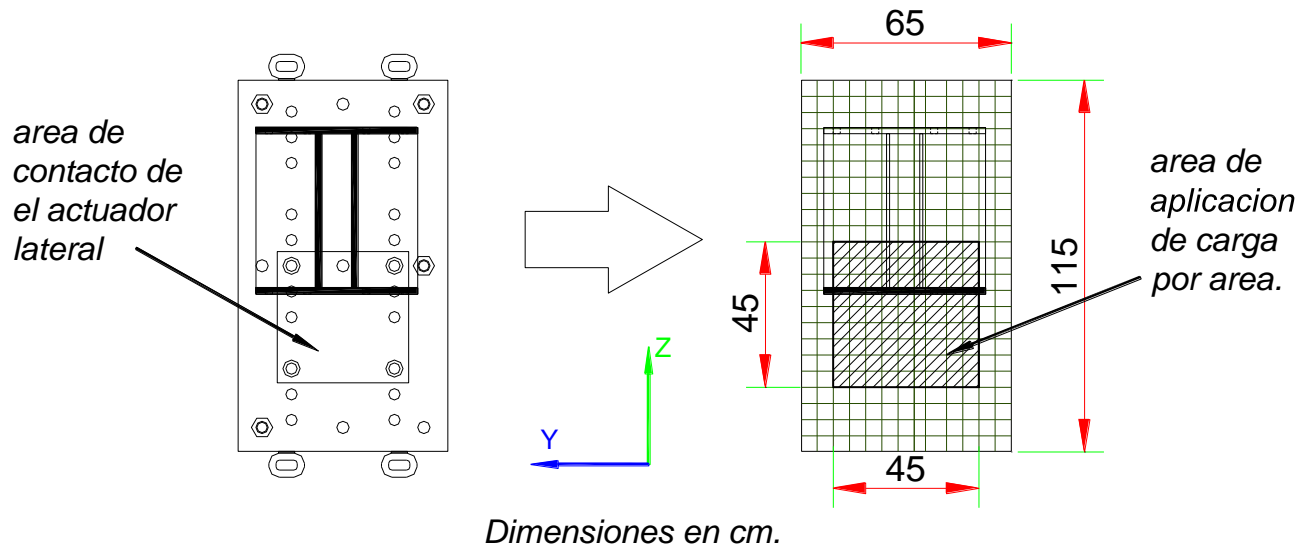


Fig. 2.14. Zona de aplicación de carga en la placa de pretensado de la viga de transmisión.

Para el caso de carga lateral, se trato se simular tal cual fueron las direcciones de aplicación de esta. El proyecto cuenta con un historial de cargas en el que se hace atraer y empujar el muro lateralmente, con el actuador A1 progresivamente, respecto al valor de la fuerza ejercida. Debido a las limitantes del análisis elástico no es lógico simular el historial de cargas completo, pero en definitiva las cargas representativas de los cuatro modelos. Aquí un ejemplo de los valores de carga lateral, estos a su vez tiene sus partes en dirección opuesta, en la simulación cambiaron de signo.

Carga por área <i>kg/cm²</i>	Área <i>cm²</i>	Carga Total <i>kg</i>
0.5	2025	1000
0.98	2025	2000
1.48	2025	3000
1.97	2025	4000
2.46	2025	5000

Tabla 2.7. Cargas laterales incluidas en la simulación

2.5.4. Distorsión obtenida y rigidez

El MEF de los muros es exclusivamente elástico lineal, por lo que sus desplazamientos serán proporcionales linealmente. Como sabemos, este tipo de análisis no reproduce una curva histerética, pero, por revisión del modelo, se aplicaron las cargas de igual forma que en los ensayos, con carga lateral positiva (jalando el muro) y negativa (empujando el muro), ya que la aplicación de estas cargas presentara sus desplazamientos en ambos sentidos y estos deben ser iguales.

En este caso obtengo distorsión, emulando los transductores H1, H3, H4 y H5.

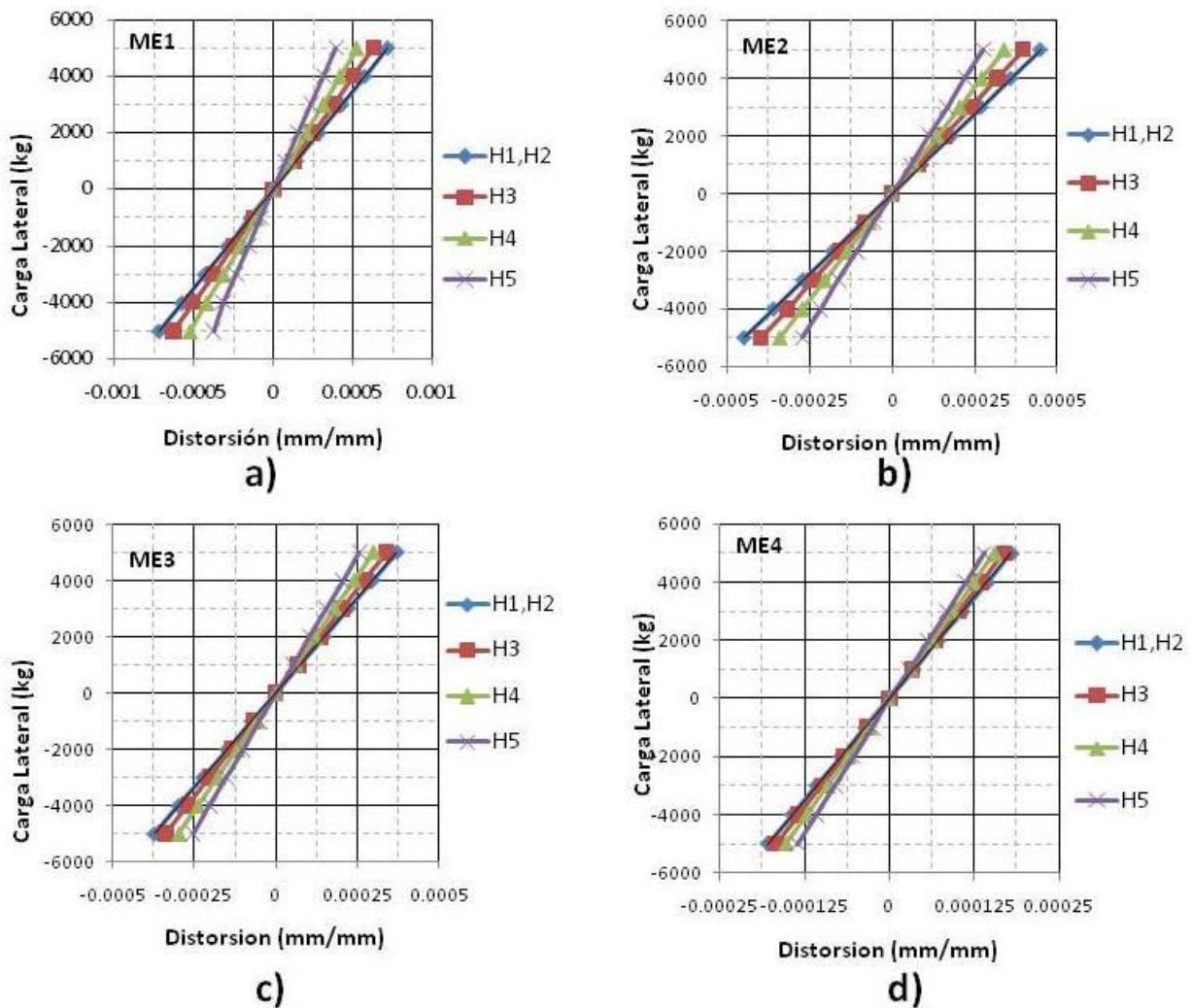


Fig. 2.15. Evaluación de elasticidad para modelo Sin viga, presentando distorsión teórica en los transductores H1,H3,H4 y H5 para a)ME1, b)ME2, c) ME3 y d)ME4

De acuerdo con lo establecido en el apéndice A, la rigidez de los muros será dada por su desplazamiento, en este caso lineal basta con graficar los desplazamientos en la zona que asemeja al transductor H1.

2.6 MODELACION POR ELEMENTO FINITO SIMPLIFICADO

El M.I. Antonio Taveras Montero, en su tesis de maestría “Revisión de las recomendaciones para modelar y analizar estructuras de mampostería confinada ante carga lateral” hace un pronunciamiento sobre el análisis de elemento finito, en el cual se recomienda el uso simplificado de elementos finitos de aspecto cuadrado en los elementos de muros. Si el elemento no tiene relación de aspecto cuadrada, pues se divide en elementos los más cuadrados posibles.

Para la serie de ensayos los modelos de elemento finito simplificado serian de la siguiente geometría.

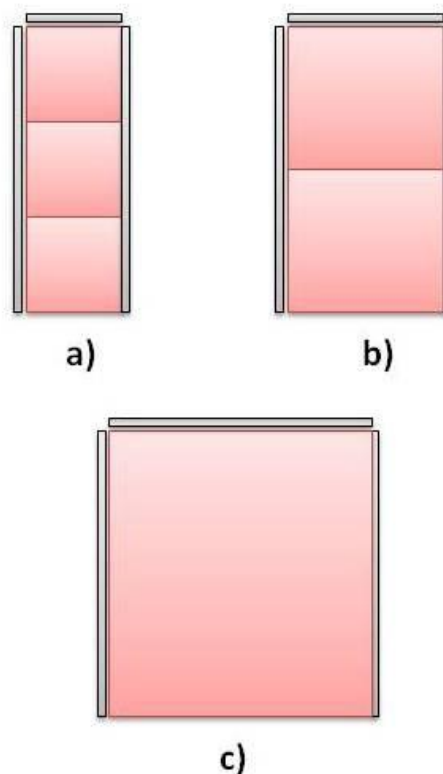


Fig. 2.16. Modelos de MEF simplificado, para los especímenes: a) ME1, b) ME2 y c) ME3, ME4.

Los elementos de confinamiento se toman como elementos barra, con las propiedades físicas y geométricas de los castillos, y son ligados en las intersecciones del elemento de mampostería.

La mampostería será el único elemento al que se le diseñe detalladamente.

Capitulo **3**

Resultados Generales

3. RESULTADOS GENERALES

3.1. INTRODUCCIÓN

La serie de ensayos del proyecto del SMIE-IIUNAM-CENAPRED fueron planeados para obtener resultados de comportamiento de cada muros y que estos fueran comparados entre si, buscando una correspondencia de la respuesta ante cargas laterales y su relación de aspecto.

Para la presentación de estos resultados, se utilizan las respuestas de los desplazamientos horizontales en los muros. La instrumentación requerida para este fin son los transductores horizontales en la parte superior de cada espécimen, que indican el comportamiento general del muro, y el arreglo de leds en el plano, que nos indicara su comportamiento en un sector específico de un espécimen.

Cabe señalar que gran parte de la instrumentación va encaminada a observar el comportamiento inelástico de los especímenes, por lo que para el objetivo de esta tesis se utilizara solo una parte para obtener resultados en etapa elástica.

Los modelos matemáticos presentados en el capítulo anterior, servirán para comparar los resultados de los muros experimentales, con los casos generales de utilizar el módulo de cortante recomendado por las NTCDF en mampostería y el módulo de cortante experimental.

3.2. PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS

Los ensayos se realizaron entre los meses de Mayo y Junio del 2008, teniendo ya preparados los cuatro especímenes desde finales de Abril del mismo año, esto por los días de curado o resistencia a 28 días requeridos. Para cada espécimen se instrumentaba detalladamente a lo largo de una semana en donde, además, se colocaba el marco de carga. Cada ensaye duraba en promedio de 6 a 10 hrs ya que en cada pico de carga se median agrietamientos y por lo tanto se hacia una pausa en el mecanismo de carga.

3.3. CURVAS DE HISTÉRESIS

De acuerdo al sistema de cargas cíclicas, los desplazamientos horizontales tendrán valores positivos y negativos. Se estableció que al momento que el actuador empujaba al muro, este sería denominado como negativo, y en caso contrario, al ser el muro el atraído por el actuador este se le denominaba ciclo positivo, esto de acuerdo al sistema de referencia de la instrumentación.

Las cargas cíclicas, produjeron curvas de histéresis a lo largo de los ensayos. Estas curvas se hacen comparando el desplazamiento horizontal con la carga lateral. En este caso estas curvas se refieren con la distorsión, que es la razón de desplazamiento horizontal con la altura de los especímenes.

Las curvas histeréticas se pueden observar en la figura 3.1, en la que podemos ver como entre menor relación de aspecto se tienen lazos más estables.

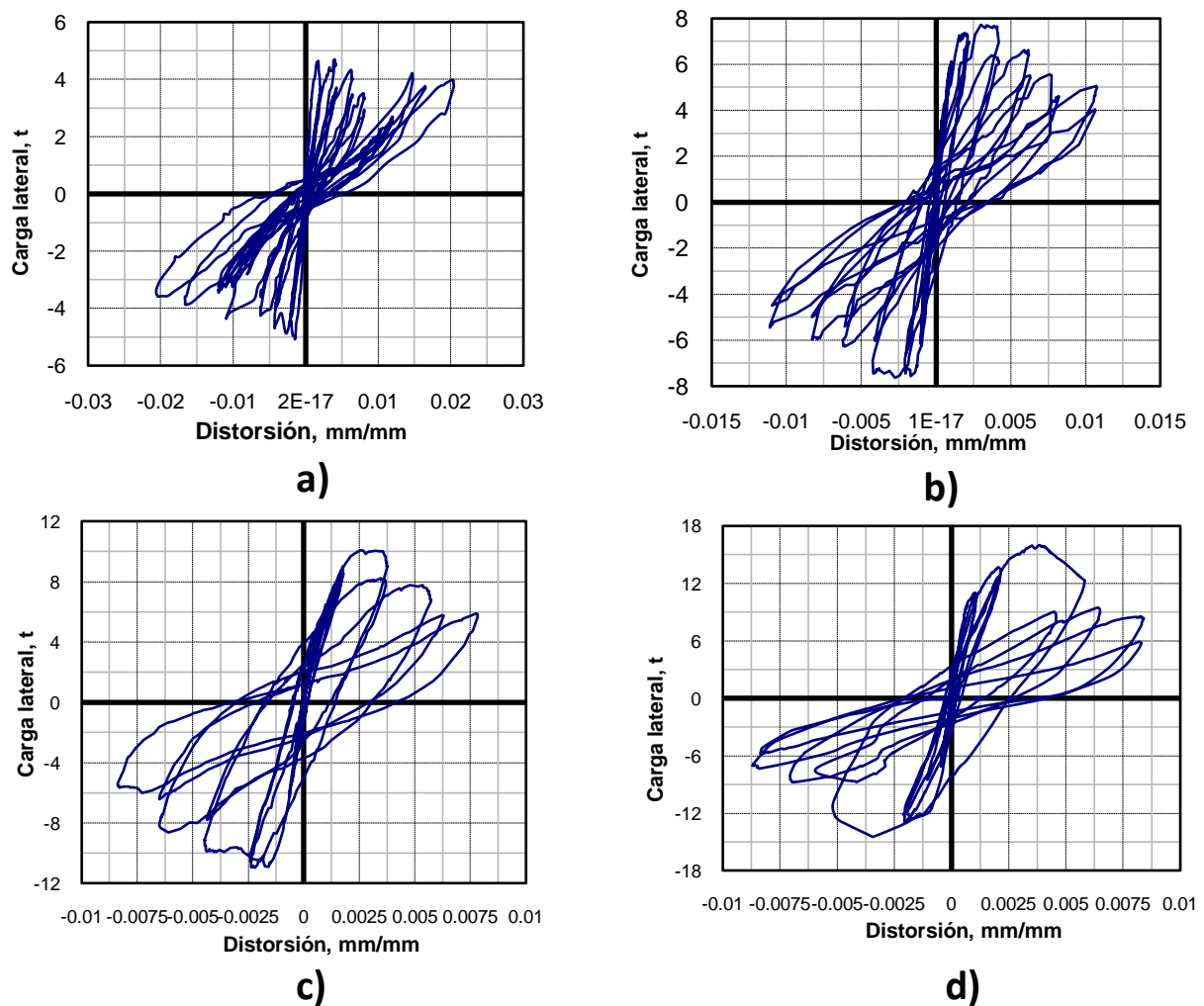


Fig. 3.1. Curvas de histéresis de los especímenes: a) ME1, b) ME2, c) ME3 y d) ME4.

A las curvas histeréticas les corresponde unas curvas envolventes, realizadas con los puntos máximos de desplazamiento y carga en cada ciclo, para cada muro. En la figura 3.2 se observa las envolventes de respuesta en ciclo positivo.

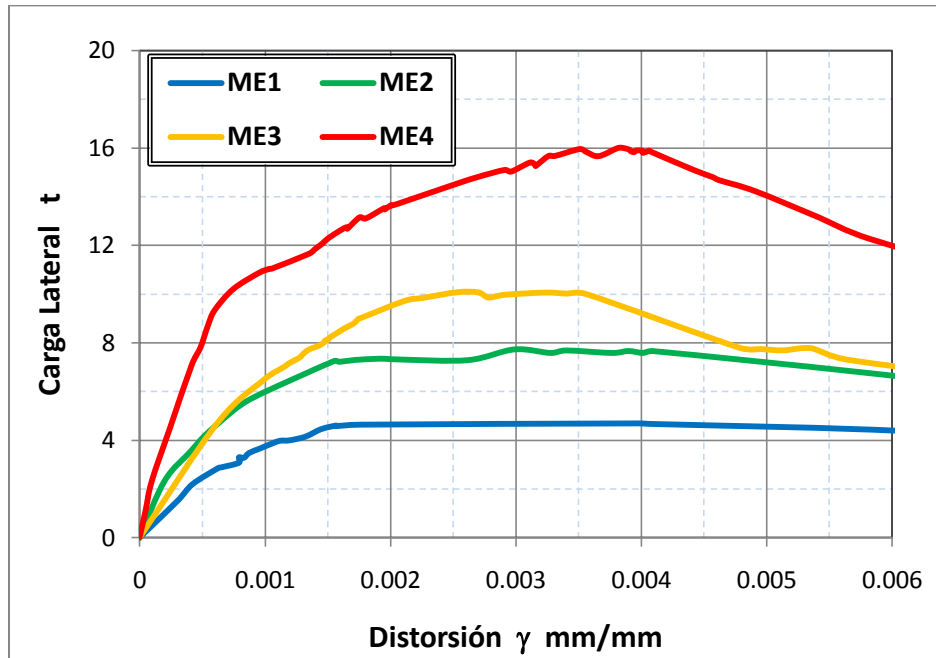


Fig. 3.2. Envolventes de respuesta ante carga lateral en los muros.

3.4. AGRIETAMIENTOS INICIALES

Normalmente, los agrietamientos sufridos en un muro de mampostería se consideran como el límite elástico de la deformación, ya que el material queda fracturado y no responden sus desplazamientos de forma consistente.

Especímen	Ciclo	Agrietamiento		A la falla	
		Vagr, T	γagr, mm/mm	Vmáx, t	γVmax, mm/mm
ME1	+	4.6	0.00157	4.7	0.004
	-	-5.1	-0.00147	-5.1	-0.0015
ME2	+	7.25	0.00155	7.7	0.003
	-	-7.41	-0.0014	-7.6	-0.0027
ME3	+	9.01	0.00176	10.1	0.0025
	-	-10.91	-0.00158	-11	-0.0022
ME4	+	10.24	0.00077	16	0.0038
	-	-7.05	-0.00045	-14.4	-0.0034

Tabla 3.1. Valores de las cargas de agrietamiento iniciales en los muros.

Los patrones de agrietamiento de los modelos se muestran en la figura 3.3, estos patrones indican la totalidad de las grietas presentadas sobre los muros durante los ensayos.

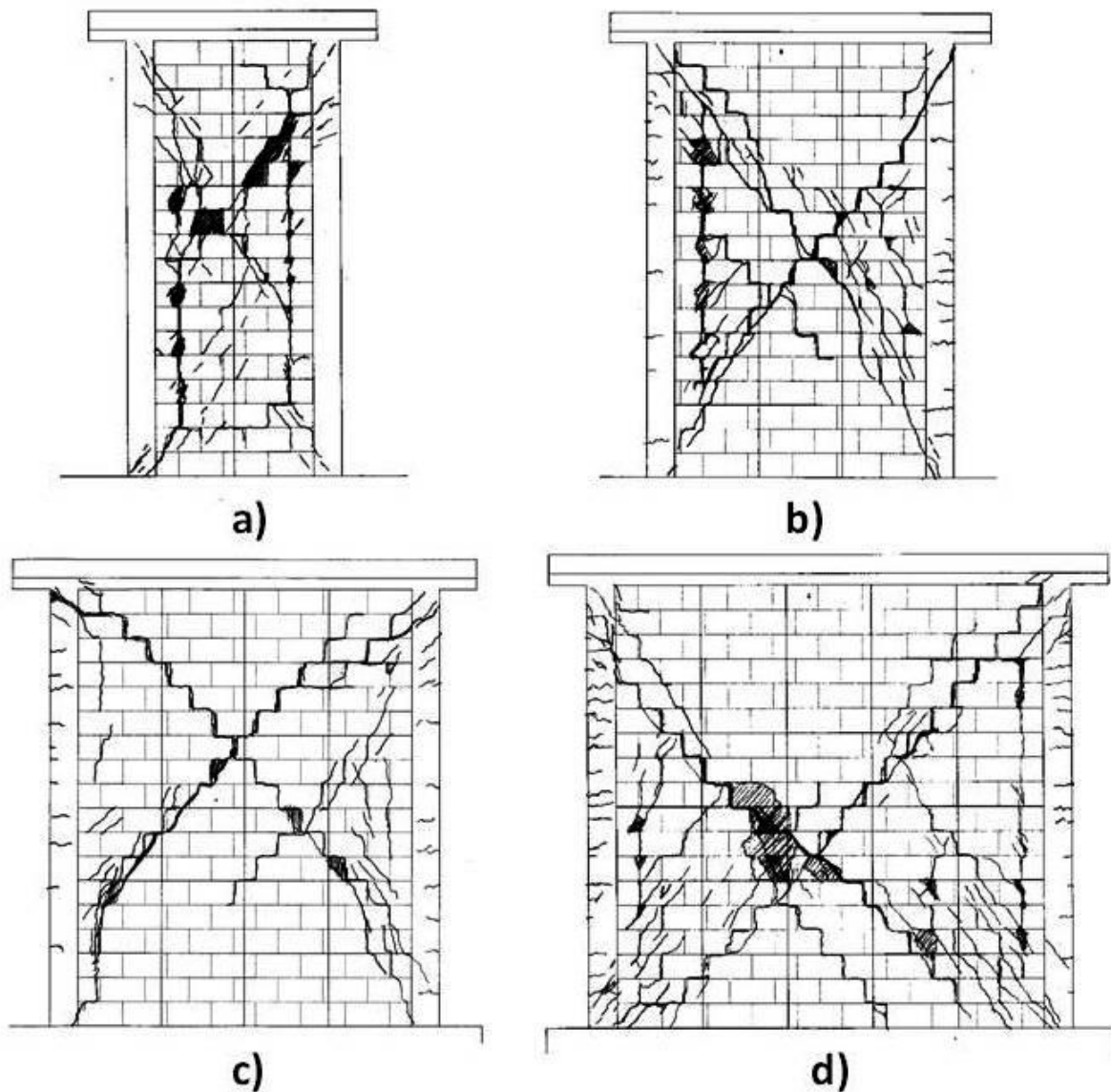


Fig. 3.3. Patrón de agrietamientos en muros: a) ME1, b) ME2, c) ME3 y d) ME4.

Los agrietamientos iniciales se presentaron en la parte central del panel de los muros, y conforme se aumentaban las cargas estas tendían a alargarse hasta el centro de los muros de forma diagonal. Los agrietamientos iniciales eran reportados en bitácora, al establecer agrietamientos inclinados bien definidos.

En todos los muros se presentaron grietas verticales paralelas a los castillos en la zona de mampostería, en etapas finales con gran daño en la mampostería, estas iniciaban en la parte inferior de los muros y

conforme se incrementaba la carga ascendían hasta la parte superior degradando el confinamiento. El aspecto final se puede observar en la Fig. 3.4.

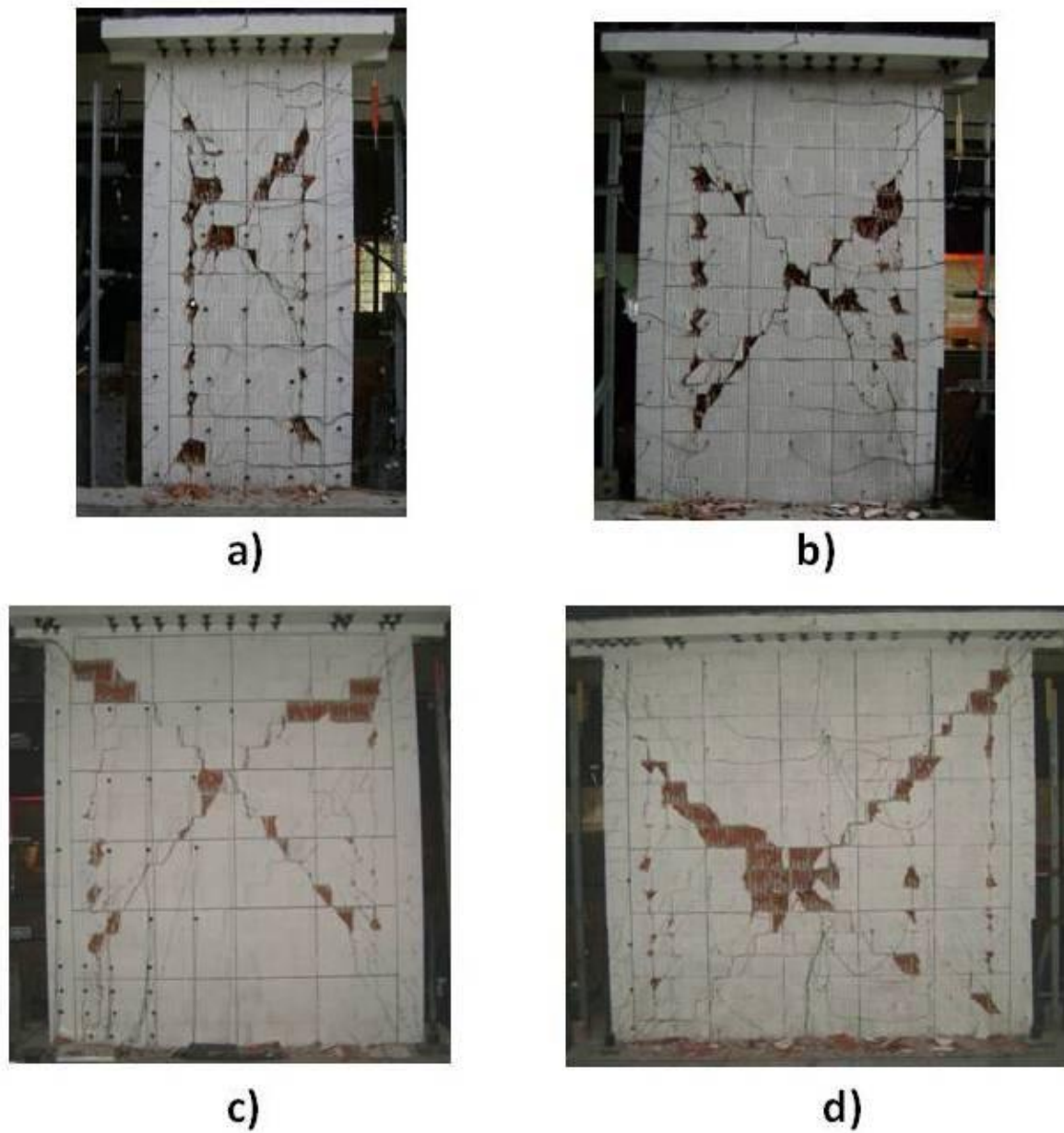


Fig. 3.4. Aspecto final de los muros: a) ME1, b) ME2, c) ME3 y d) ME4.

La forma practica de calcular la carga agrietamiento inicial, se hace con el uso de la cortante resistente (V_{mR}) de las NTCDF, para esto hay que normalizar las cargas laterales aplicadas, a esfuerzos cortantes.

3.5. ESFUERZOS CORTANTES

Para visualizar los esfuerzos cortantes en los muros, se normalizaron las envolventes de respuesta con el área transversal de los muros, en la figura 3.5 se presenta los esfuerzos ante carga lateral y además se ubican los agrietamientos iniciales

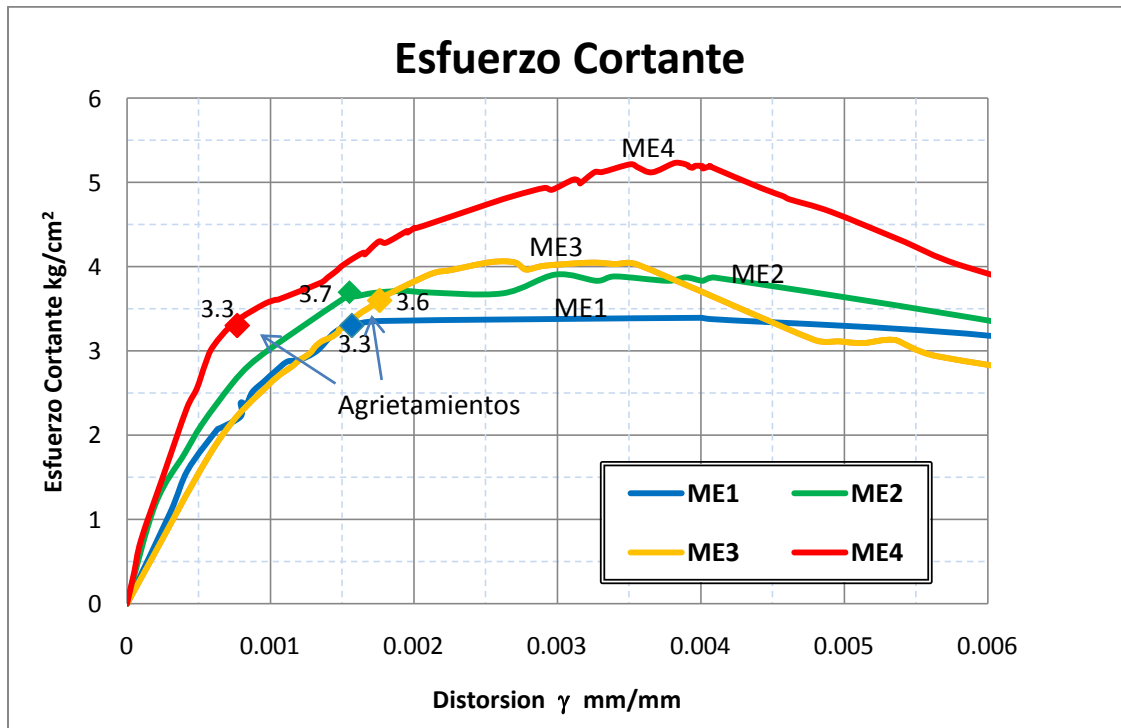


Fig. 3.5. Envolventes de respuesta en valores de esfuerzo.

En las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTCDF 2004) referente a mampostería se establece una expresión con la cual se predice el esfuerzo cortante de agrietamiento inicial. Cabe señalar que esta ecuación no determina el cortante máximo o resistente de un muro, sólo el agrietamiento diagonal y aunque interviene el área transversal del muro, no considera variación por su longitud. Esta ecuación fue vista en el capítulo 1.

$$V_{mR} = F_R (0.5v_m^* A_T + 0.3P) \leq 1.5F_R v_m^* A_T \tag{1.5}$$

Con el criterio de dicha normatividad y proponiendo un factor de reducción de resistencia unitario ($F_R = 1$) y se divide entre el área transversal (A_T), dando un esfuerzo cortante de diseño, v_m^* , y un esfuerzo vertical σ , asociado a la carga axial sobre el muro (P) y el área transversal¹.

¹ Ensayo de muros de mampostería de distinta longitud: cinemática y rigidez lateral, JJ Pérez Gavilán y otros (2009)

La ecuación simplificada del esfuerzo cortante resistente será:

$$V_{mR} = 0.5v_m^* + 0.3 \sigma \tag{3.1}$$

Para utilizar esta expresión, se sabe que en lo general, el esfuerzo de carga axial sobre el muro hasta su etapa destructiva tuvo un valor $\sigma = 5 \text{ kg/cm}^2$ aproximadamente, por lo que tendrá relevancia las variaciones de la cortante de diseño, vista en el capítulo 1. Los resultados de comparación entre la cortante resistente V_{mR} y la cortante de agrietamiento experimental se muestran en la tabla 3.2.

Espécimen	L, cm	L/H	f_b kg/cm ²	v_m^* kg/cm ²	V_{mR} kg/cm ²	$v_{agr}^{(+)}$ kg/cm ²	$v_{agr}^{(-)}$ kg/cm ²	$v_{agr}^{(+)}/V_{mR}$	$v_{agr}^{(-)}/V_{mR}$
ME1	115	0.5	65	3.11	3.05	3.3	3.7	1.08	1.21
ME2	165	0.7	90	3.34	3.17	3.7	3.7	1.17	1.17
ME3	207	0.9	93	3.52	3.26	3.6	4.4	1.10	1.35
ME4	255	1.1	84	3.3	3.15	3.3	2.3	1.05	0.73

Tabla 3.2. Comparativas de la cortante resistente V_{mR} y de agrietamiento experimentales.

Si normalizamos los esfuerzos cortantes experimentales sobre cortante resistentes, obtenemos la proporción a la que estamos alejados del valor de diseño. En la figura 3.6 podemos apreciar que en la mayoría de los casos el esfuerzo cortante de agrietamiento se encuentra un 45% en promedio arriba del esfuerzo de diseño.

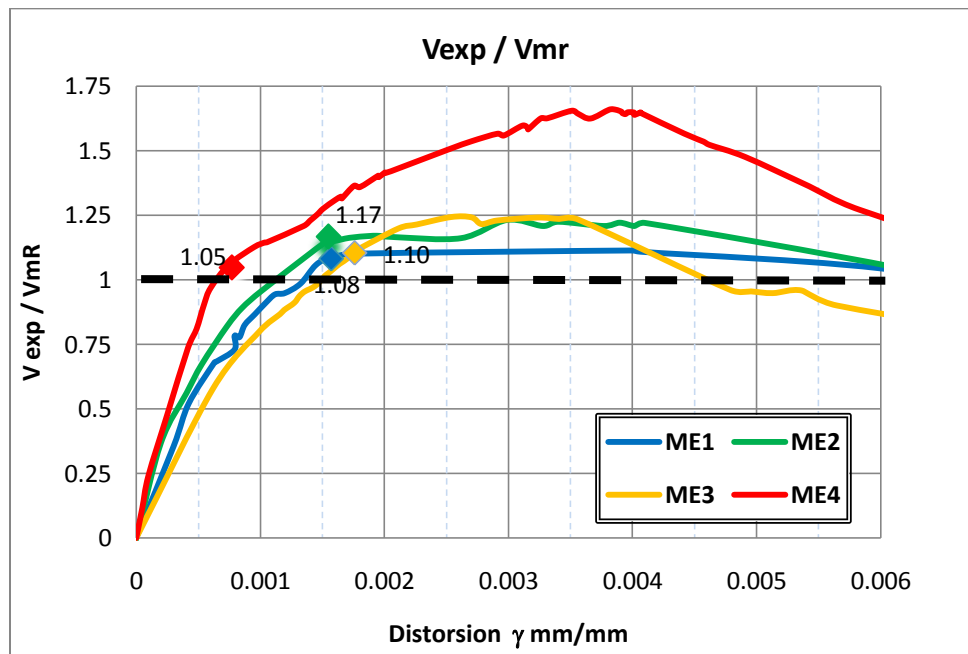


Fig. 3.6. Envolturas de respuesta normalizadas con esfuerzos cortantes de diseño. La línea punteada determina la zona de predicción de agrietamiento inicial.

3.6. RIGIDEZ EXPERIMENTAL

Para la rigidez experimental se optó por encontrar la zona elástica lineal de las envolventes de respuesta. En este caso se toman en cuenta los dos ciclos negativo y positivo. Estas rigideces eran limitadas en un principio por las zonas de agrietamiento inicial, para efectos de linealidad se toma el principio del 40% de la carga máxima aplicada para obtener dicha curva. Las rigideces al 40% de los especímenes se muestran en la tabla 3.3.

Especimen	Rigidez 40% kg/cm			Rigidez 75% kg/cm			Rigidez camb.pen kg/cm		
	Ciclo (+)	Ciclo (-)	Promedio	Ciclo (+)	Ciclo (-)	Promedio	Ciclo (+)	Ciclo (-)	Promedio
ME1	20827	12980	16904	16046	13824	14935	11972	14106	13039
ME2	38501	23619	31060	25530	24324	24927	19114	22677	20896
ME3	30914	36260	33587	23575	36747	30161	22599	29008	25804
ME4	70605	66653	68629	34066	50407	42237	46652	48629	47640

Tabla 3.3. Rigideces experimentales promedio por muro y ciclo.

Teniendo en cuenta la relación de aspecto de cada muro, estas rigideces pueden ser comparadas entre si, como se muestra en la figura 3.7.

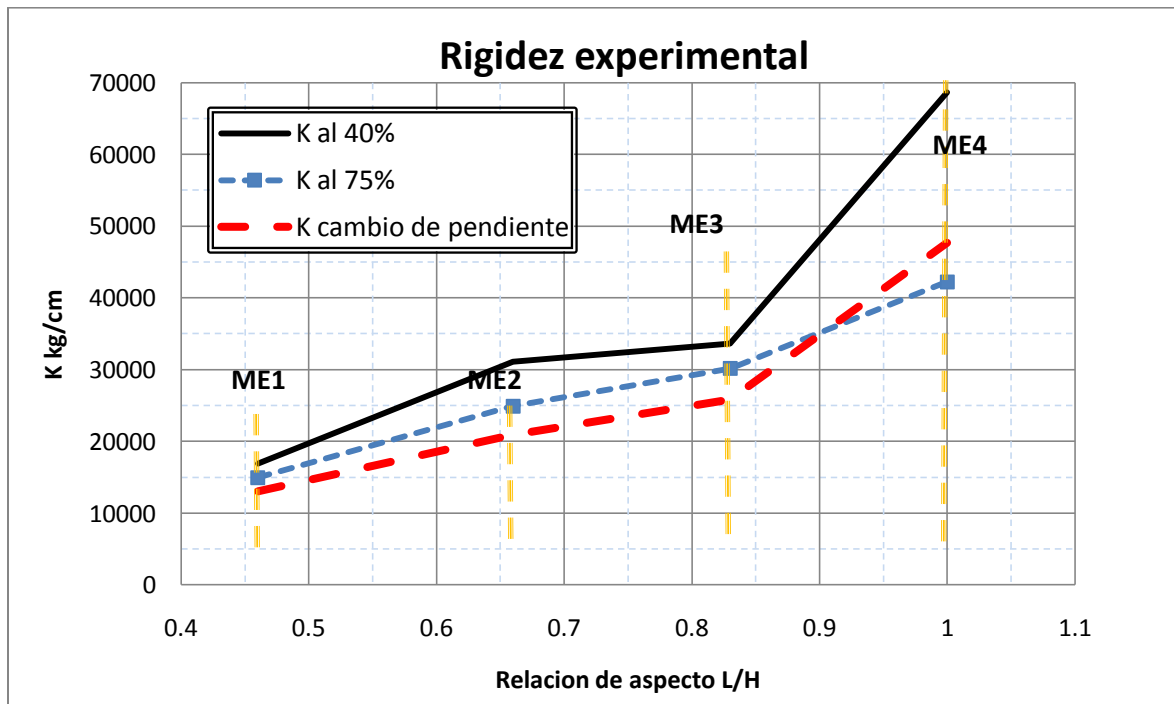


Fig. 3.7. Rigidez experimental en cada espécimen.

3.7. RIGIDEZ TEORICA

3.7.1. Rigidez con el Método de columna ancha

Las principales rigideces laterales teóricas con las que se procede a comparar resultados son las que tiene que ver con el método de la columna ancha aplicando principios de la mecánica de materiales. Para los modelos se tuvieron dos casos principales. Uno tomando en cuenta el módulo de cortante recomendado por las NTCDF ($G=0.4 E$) y el encontrado experimentalmente con los muretes a tensión diagonal. Como se vio en el capítulo 2, se dejó variar el nivel de empotramiento para tener un margen de valor de diseño.

Especímen	Rigidez kg/cm			
	Con $G=0.4E$		Con $G \text{ exp}$	
	D. Empotrado*	Cantiliver	D. Empotrado*	Cantiliver
ME1	48322	20306	20521	13233
ME2	87509	43983	30807	23207
ME3	118420	67508	53486	40514
ME4	161951	104988	51131	44040

*D. Empotrado: Rigidez Lateral suponiendo una columna Doblemente empotrada

Tabla 3.4. Rigidez teórica con el método de la columna ancha.

La comparativa con los modelos experimentales se pueden visualizar en la Fig. 3.8.

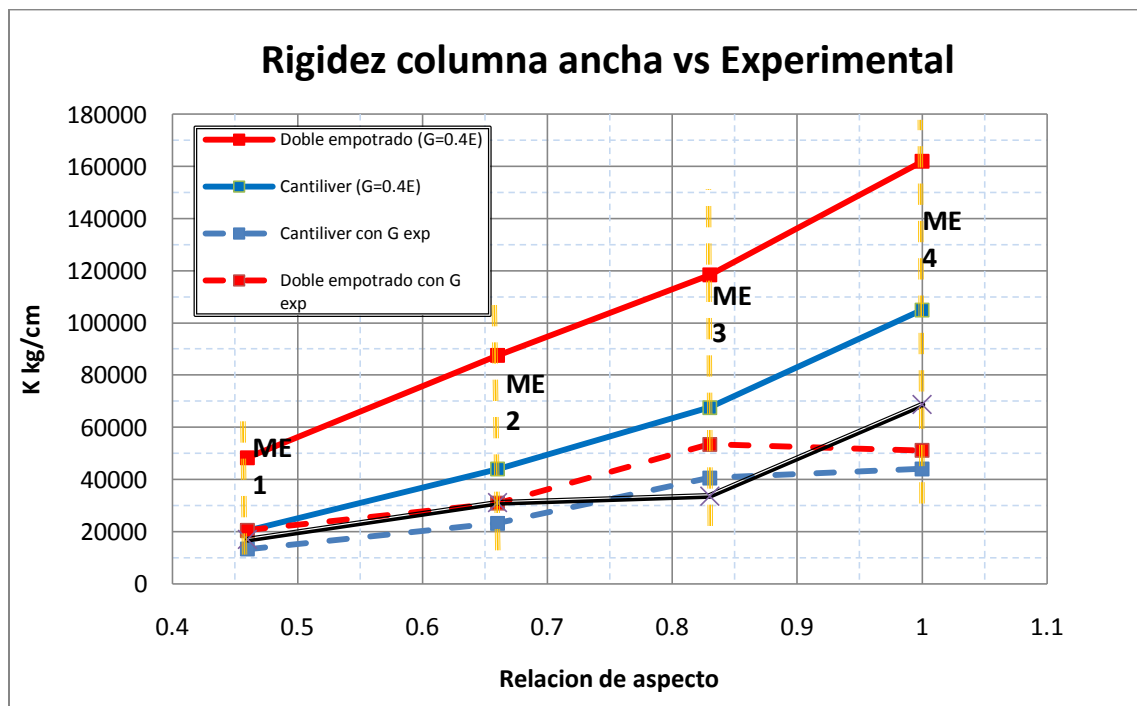


Fig. 3.8. Rigidez teórica por método de columna ancha, visualizando rigidez experimental.

Como podemos ver, la utilización de los valores del módulo de cortante G experimentales, hacen aproximarse los resultados del modelo matemático al experimental.

Con este método pareciera que para relaciones de aspecto iguales a 1, la predicción tiende a divergir, lo que en cambio para elementos cortos como ME1 logra hacer una cierta aproximación.

3.7.2. Rigidez con el Método de los elementos finitos (MEF)

Para el MEF se establecieron, al igual que para el método de la columna ancha, dos casos de módulo de cortante, estos son el teórico y experimental. A diferencia del modelo analítico de columna ancha, en el que sólo se modifican valores numéricos, en el caso del MEF la simulación adopta las propiedades del material como material elástico. El módulo de cortante se calcula con base en el módulo de Poisson y el de elasticidad evitando que G tome valores menos a $0.33 E$.

Debido a que el valor del módulo de cortante experimental es muy inferior al recomendado por NTCDF de $G=0.4E$ y no se encuentra dentro del rango de comportamiento elástico ($0.33 E$, $0.5 E$), para el caso de G experimental se establecieron las propiedades de la mampostería como material anisotrópico, cambiando sus propiedades sobre el plano del muro y su dirección lateral. (G_{12})

Los resultados se enuncian en la tabla 3.5.

Espécimen	Rigidez kg/cm	
	Con $G=0.4E$	Con G exp
ME1	22168	14440
ME2	46296	31847
ME3	55866	44643
ME4	116279	56818

Tabla 3.5. Rigidez teórica en MEF para cada espécimen.

De forma similar al de columna ancha al utilizar los valores del modulo de cortante experimental se tuvo una mayor aproximación a los resultados experimentales. La comparativa con la rigidez experimental nos revela una divergencia en los muros largos, como el ME4, pero en valores cercanos a la relación de aspecto menor la simulación predice el comportamiento de una manera muy consistente. Ver figura 3.9.

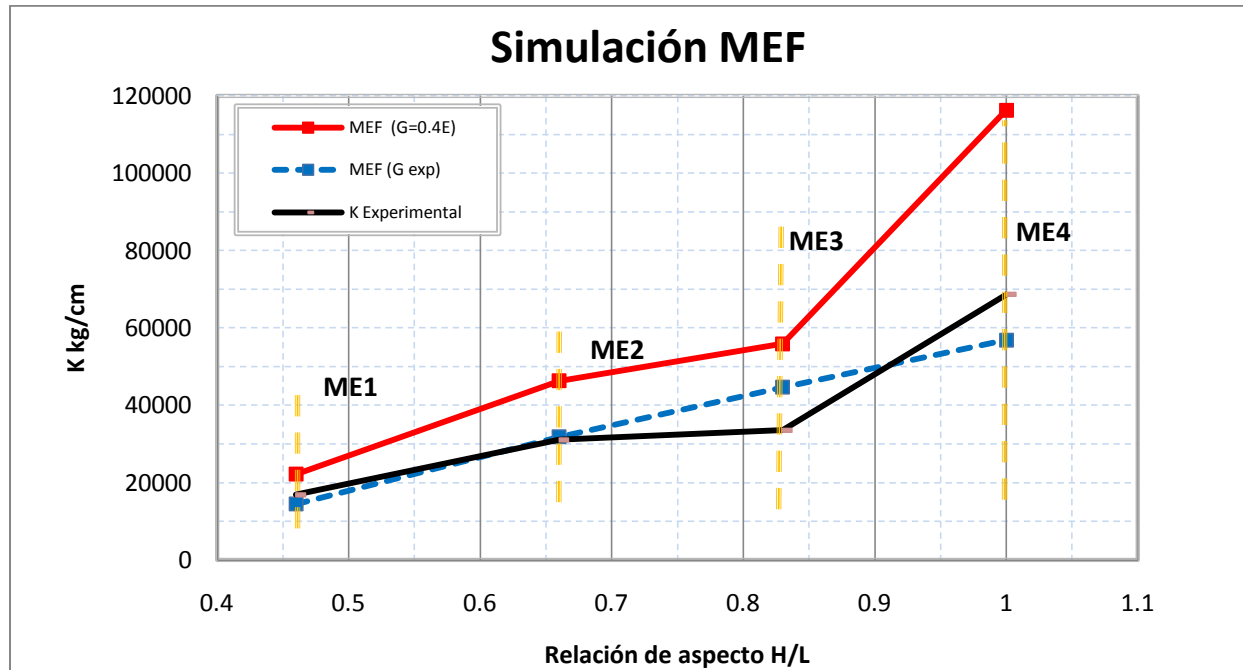


Fig. 3.9. Rigidez teórica por MEF, comparando rigidez experimental.

Cabe señalar que el MEF, fue una malla muy fina, para el tamaño real de cada espécimen, por lo que se supone que el comportamiento será similar al real. Podemos prestar atención a la importancia del valor del módulo de cortante experimental, que ha hecho que en todos los modelos se aproximen al real.

3.7.3. Rigidez en MEF simplificado

En el trabajo de Taveras (Taveras 2008), se hace un pronunciamiento sobre el análisis de elemento finito, en el cual se recomienda el uso un modelo simplificado. El modelo consiste en utilizar el menor número de elementos finitos en un panel (mampostería entre castillos) pero conservando una relación de aspecto de los elementos cercana a uno. Esta relación de aspecto garantiza el buen comportamiento numérico de los elementos finitos. En dicho modelo, los castillos son modelados con elementos prismáticos tipo viga.

Para este caso, las propiedades que se integraron a dicho modelo, fueron las del modulo de cortante experimental de la mampostería, ya que previamente hemos observado como tienden a ser mas aproximadas a la real. Los valores de la rigidez del MEF simplificado se aprecian en la tabla 3.6.

Espécimen	$K_{TAV} G=0.4E$ kg/cm	$K_{TAV} G_{exp}$ kg/cm
ME1	23923	18868
ME2	44643	32468
ME3	109289	52632
ME4	125000	56180

Tabla 3.6. Rigidez teórica con MEF simplificado

La comparativa del resultado experimental tiende a una similitud con los modelos de MEF presentados anteriormente.

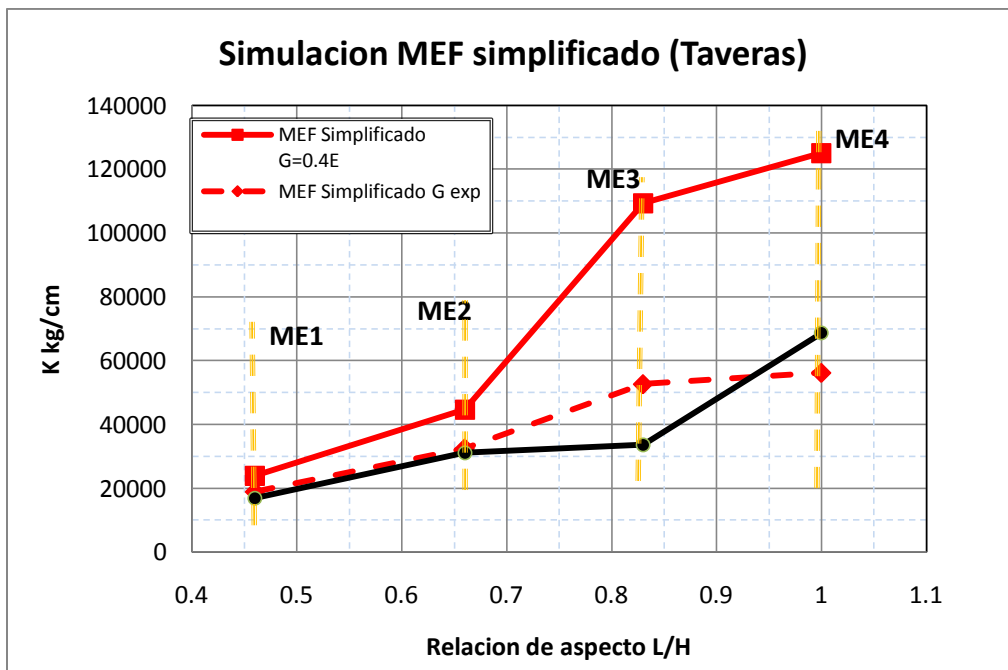


Fig. 3.10. Rigidez teórica de MEF simplificado con la rigidez experimental.

3.8. RIGIDEZ NORMALIZADA

En el análisis de cualquier estructura, lo que nos interesa es cuánto cortante toma cada muro, esto depende de las rigideces laterales relativas. Con esta idea en mente, se hace una comparativa de lo que tomaría de cortante cada uno de los muros en relación con lo que toma el ME4. Esto es, se calculan las rigideces relativas de los muros con respecto a la del muro ME4. En la Fig. 3.11 se muestran los modelos utilizados.

Los valores de rigidez lateral utilizados en cada muro son los valores de los modelos matemáticos más aproximados al cálculo de la rigidez experimental. La Fig. 3.11 muestra las proporciones de los muros ME1, ME2 y ME3 con respecto al muro ME4. Se tiene que comparar siempre muros diferentes, ya que con rigidez similar tendería a tomar la mitad de la rigidez en este arreglo.

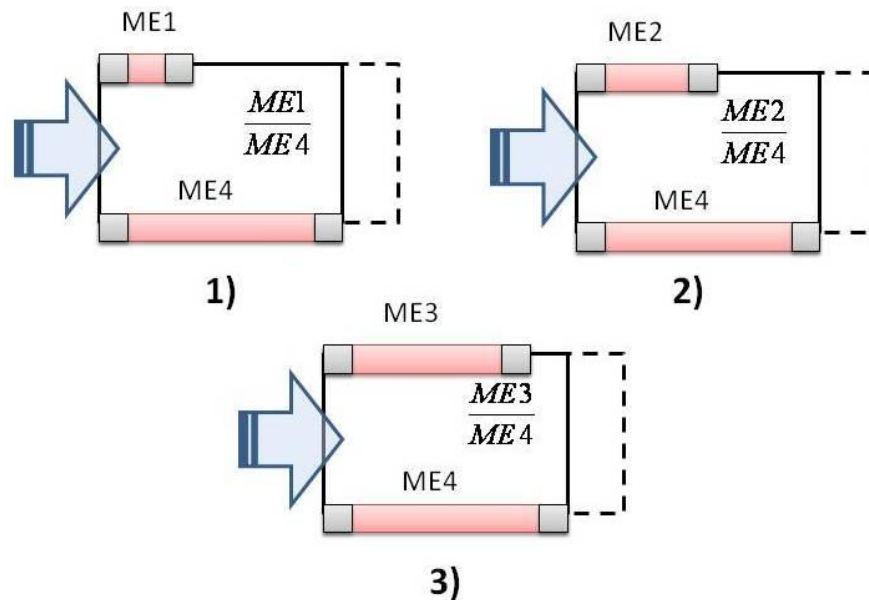


Fig. 3.11. Modelos de comparación para las rigideces en arreglo paralelo: 1) ME1 Vs ME4, 2) ME2 vs ME4 y 3) ME3 vs ME4

La relación usada para comparar las rigideces de los muros fue la siguiente:

$$\%ME_i = \left(\frac{ME_i}{ME_4 + ME_i} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Las rigideces que se obtuvieron experimentalmente se compararon con respecto a ME4 y sus resultados se utilizaran como referencia para todas las comparativas.

Experimental	
Muro / ME4	% de rigidez lateral
	ME1
ME2	31
ME3	33

Tabla 3.7. Comparativa de rigidez lateral experimental, con respecto a ME4.

Primero compararemos las rigideces obtenidas por el método de la columna ancha con las experimentales también normalizadas.

Columna Ancha		
Muro / ME4	% de rigidez lateral	
	G=0.4E	G exp
ME1	16	23
ME2	30	35
ME3	39	48

Tabla 3.8. Comparativa de rigidez lateral con método de columna ancha, con respecto a ME4.

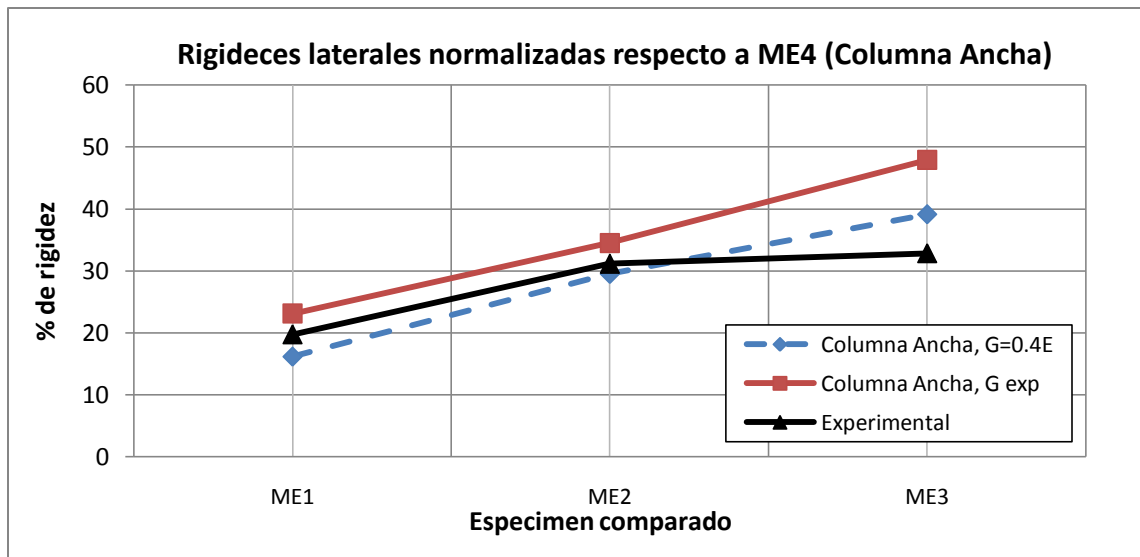


Fig. 3.12. Comparativas con respecto a la rigidez de ME4, con el método de la columna ancha.

Se puede observar que existe una consistencia en la proporción de rigideces en los modelos de columna ancha que utilizan la $G = 0.4 E$, acercándose mas a la distribución de rigideces que se da en la experimental.

En las comparativas con el MEF, se presentan las rigideces obtenidas con los diversos arreglos en los modelos de simulación.

Método de Elemento Finito		
Muro / ME4	% rigidez lateral	
	G=0.4E	G exp
ME1	16	20
ME2	28	36
ME3	32	44

Tabla 3.9. Comparativa de rigidez lateral con MEF, con respecto a ME4.

También se hace la comparativa con el MEF simplificado, en el cual también se calculo con los valores de el módulo de cortante experimental y teórico.

MEF Simplificado		
Muro / ME4	% de rigidez lateral	
	G=0.4E	G exp
ME1	16	25
ME2	26	37
ME3	47	48

Tabla 3.10. Comparativa de rigidez lateral con MEF simplificado, con respecto a ME4.

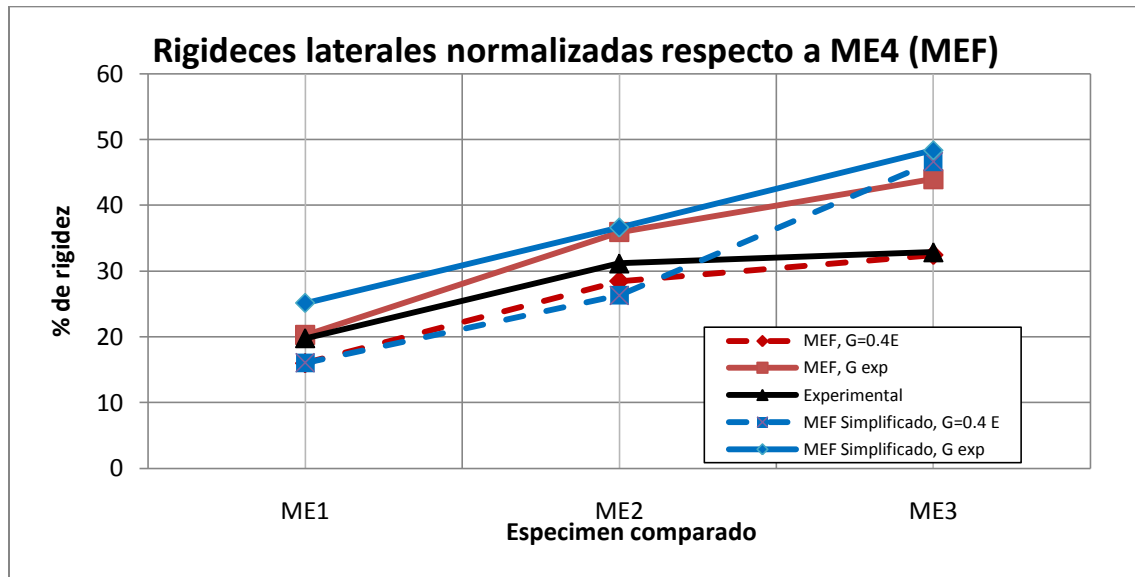


Fig. 3.13. Comparativas con respecto a la rigidez de ME4, con el método de elemento finito

Al igual que en el método de columna ancha, al utilizar G=0.4 E en el calculo de rigideces se acerca mas a la distribución que se da experimentalmente.

Una de las formas en las que hace esta comparativa de relación de aspecto es el método simplificado, de las NTCDF en mampostería.

$$F_{AE} = 1; \quad \text{Si } \frac{H}{L} \leq 1.33 \quad (3.3)$$

$$F_{AE} = \left(1.33 \frac{L}{H}\right)^2; \quad \text{Si } \frac{H}{L} > 1.33 \quad (3.4)$$

El factor F_{AE} se utiliza para modificar el área transversal de un muro, dando una proporción de acuerdo a su relación de aspecto. Al modificar el área, en los análisis se modifica por ende la rigidez lateral.

Relaciones Geométricas		
Muro / ME4	% de rigidez lateral	
	NTCDF	Geométrico
ME1	14	31
ME2	33	39
ME3	45	45

Tabla 3.11. Comparativas geométricas, con respecto a ME4.

En la figura 3.14 comparamos esta relación de áreas con las más representativas en cada modelo, de hecho se incluye la solo variación de la longitud, a la que llamaremos relación geométrica.

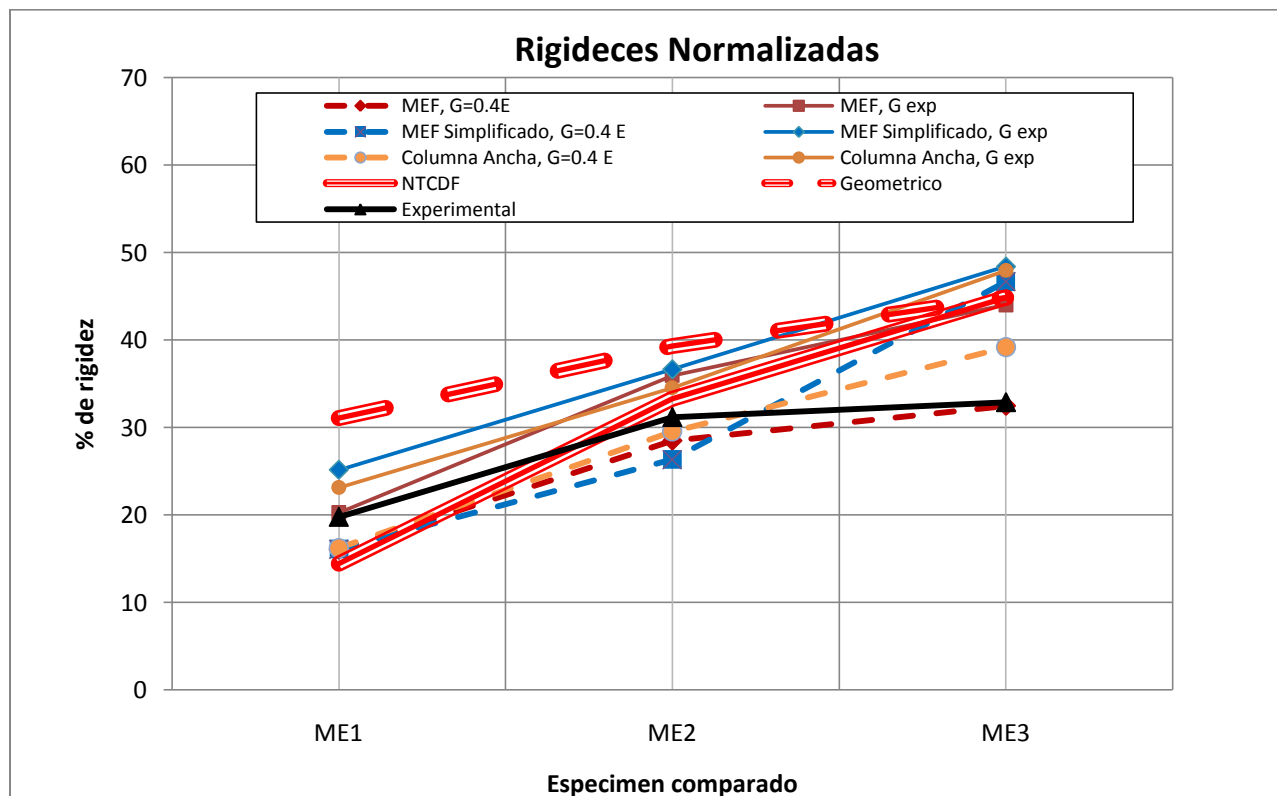


Fig. 3.14. Comparación general de rigideces normalizadas con ME4

La gráfica nos dice que, de acuerdo al experimento, el muro ME1 debe tomar el 20% y el resto el ME4 el muro ME2 debe tomar el 32% y el ME3 el 33%. La baja evidente en la rigidez del ME3 se atribuye a al bajo modulo de elasticidad del concreto de los castillos de ese muro. Esa baja en rigidez, sin embargo, no parece estar representada adecuadamente en los modelos de columna ancha, solo en el caso de elemento finito con $G=0.4E$ parece reaccionar adecuadamente.

La curva etiquetada como Geométrico, se refiere a las rigideces de los muros calculadas como proporcional a su área. La marcada como NTCDF, calcula las rigideces proporcional a su área efectiva. Los valores para ME1 y ME2 difieren debido al factor F_{AE} que el NTCDF especifica si $H/L > 1.33$ que es el caso de los muros ME1 y ME2, esto ya no se cumple para el ME3, por lo que el geométrico y NTCDF coinciden conforme los muros sean mas largos.

La relación sugerida por las NTCDF en su método simplificado, ignora la rigidez a flexión, pero eso no es válido si el muro es corto. Eso es lo que quiere corregir el factor F_{AE} . Según el experimento, la corrección se excedió un poco al reducir excesivamente la rigidez lateral de los muros cortos.

El efecto de usar G experimental es que los muros cortos toman más cortante, esto se explica porque al reducir G se reduce más rápidamente la rigidez lateral de los muros largos que la de los cortos, porque la participación de la deformación por cortante es mucho mayor que en los muros cortos.

A la inversa, los modelos con $G=0.4E$ dan lugar a cortantes mas bajos en los muros cortos que lo que podría esperarse de los experimentos. Porque la rigidez de los muros largos se sobreestima. El sobre diseñar los muros cortos es en general una buena idea, ya que errores pequeños en la construcción de muros cortos da lugar a una variación importante en su resistencia.

3.9. DEFORMADA EXPERIMENTAL

Una de las novedades en estos ensayos fue la utilización de Leds para la medición de los desplazamientos en la parte interna de los panales de los muros. Estos Leds tienen una gran sensibilidad a los movimientos (cerca de +/- 0.002 cm), por lo que inflúan en ellos hasta el caminar cerca del muro durante la prueba así como la iluminación del lugar. Cabe señalar que miden directamente la ubicación espacial de los Leds, y para obtener los desplazamientos de tiene que restar la ubicación inicial.

Para un ciclo en particular se compararon las posiciones de los Leds con las posiciones en la malla del MEF ($G=0.4 E$), para compararlos y obtener un error de exactitud relativo al teórico.

$$\%ee = \left[\frac{\Delta_{exp} - \Delta_{teo}}{\Delta_{teo}} \right] \times 100 \quad (3.5)$$

Donde Δ_{exp} es el desplazamiento experimental

Y Δ_{teo} es el desplazamiento teórico.

Los resultados muestran que la sensibilidad de los Leds en la zona inferior de los muros hace que tengan errores cercanos al 100%. Esto es debido a que en un modelo elástico y analítico esa zona tiene desplazamientos muy pequeños, al compararlos con los resultados experimentales aun teniendo desplazamientos semejantes, la mínima diferencia hace que el error de exactitud relativo se eleve mucho más que en cifras más grandes. En la Fig. 3.15 podemos observar la distribución de los errores de exactitud en el muro.

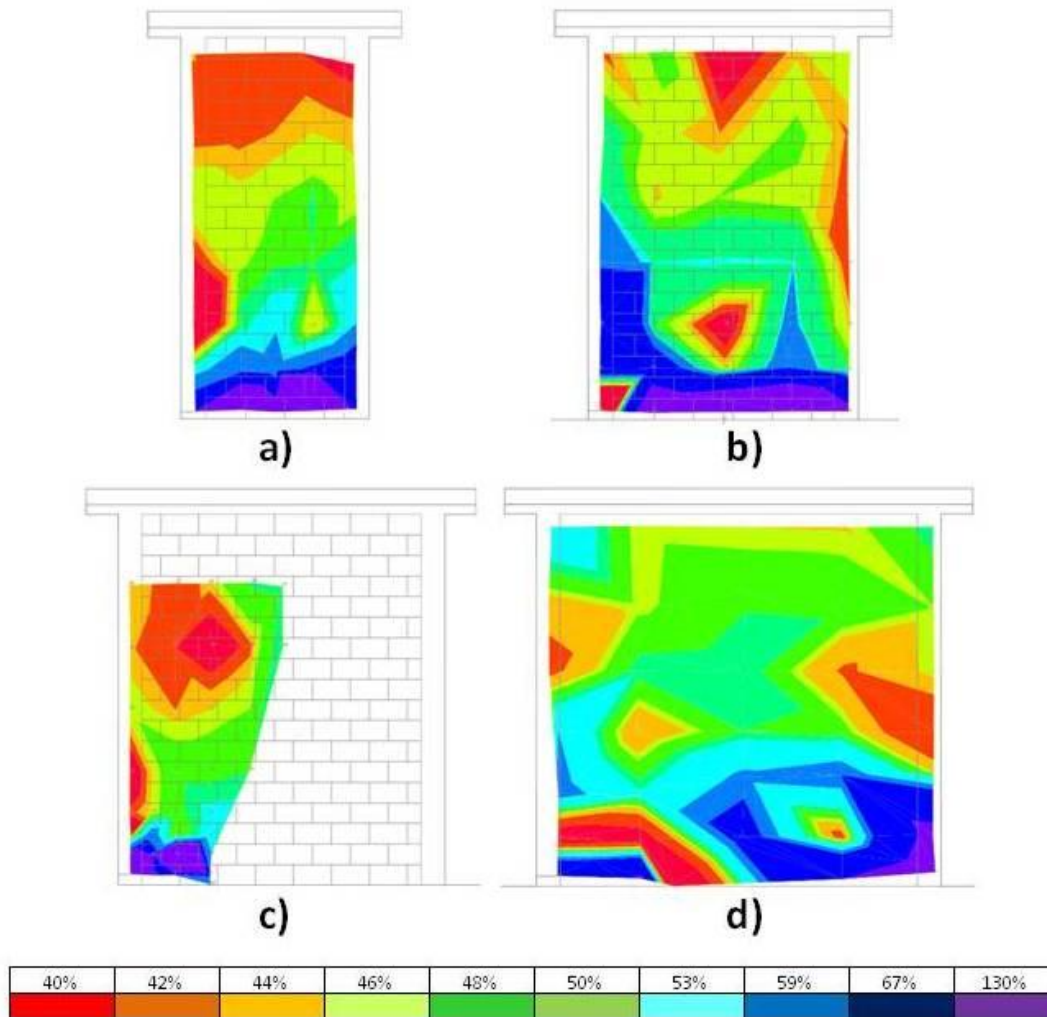


Fig. 3.15. Distribución de los errores de exactitud en los muros, para ciclo de 1 ton, para a) ME1, b) ME2, c) ME3 y d) ME4.

Cabe señalar que para la obtención de estos picos, se utilizó la parte elástica de las pruebas. En esa etapa se variaba la carga axial hasta $\sigma=10 \text{ kg/cm}^2$, y se aplicaban pequeñas variaciones a la carga lateral. Las variaciones de la carga axial no influyeron en el cambio de la rigidez lateral y eso se puede observar en las curvas histeréticas de la Fig. 3.1. en los ciclos iniciales.

Al tener puntos de desplazamiento en todo lo alto del muro se buscó observar la curva elástica. Para esto se obtuvo un promedio de los desplazamientos en el centro de los muros de acuerdo a su arreglo y

se comparo con las curvas elásticas obtenidas con el método de la columna ancha, ayudándonos con la ecuación A.34. del apéndice A.3.

$$\Delta_{TOTAL} = \frac{P}{6EI} (a^3 - 3H^2a + 2H^3) + \frac{P}{GA_c} (H - a) - \frac{PH}{4EI} (H - a)^2 \xi \quad (A.39)$$

Donde **a**, es la distancia variable de la losa a la base

H, es la altura del muro

P, la carga lateral aplicada

E, Modulo de elasticidad de la sección transformada

I, Momento de inercia de la sección transformada

G, Modulo de cortante de la sección transformada

Ac, área de cortante

ξ , Factor de cantiliver o doble empotrado, en este caso se tomo $\xi=0$

En la presentación de la curva elástica se eligieron distintos valores de carga lateral en cada muro, cuidando que estas fueran la mayor carga y por ende diera el mayor desplazamiento de la etapa elástica de la prueba de los muros. Los resultados se pueden observar en las Fig. 3.16 a Fig. 3.19.

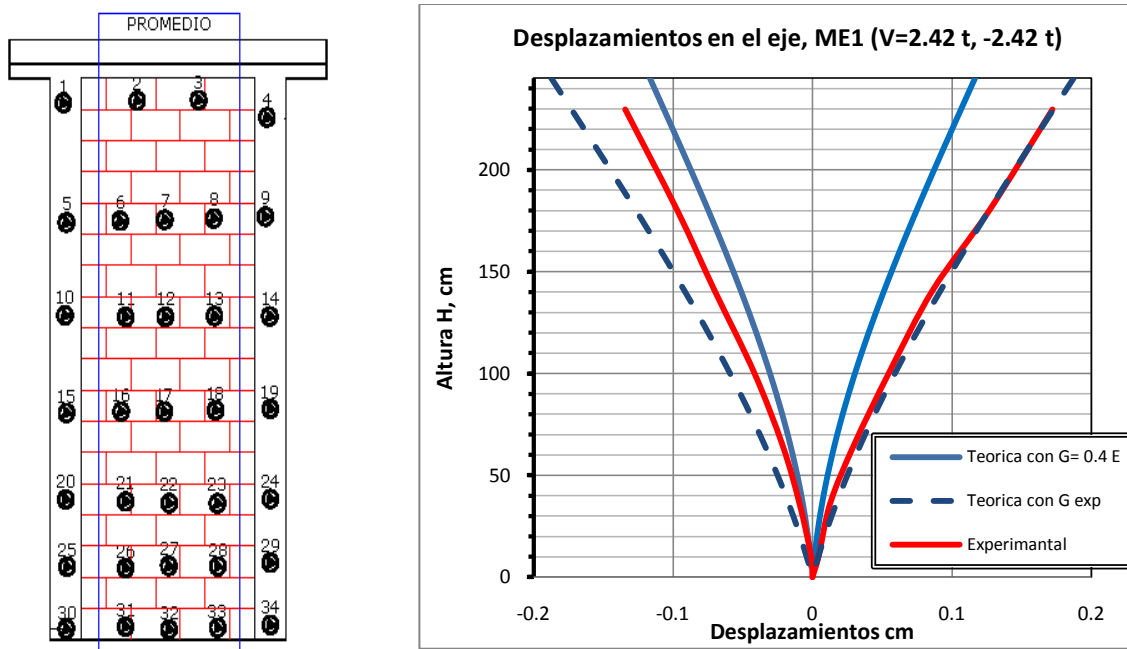


Fig.3.16. Obtención de curva elástica a partir de leds, ME1.

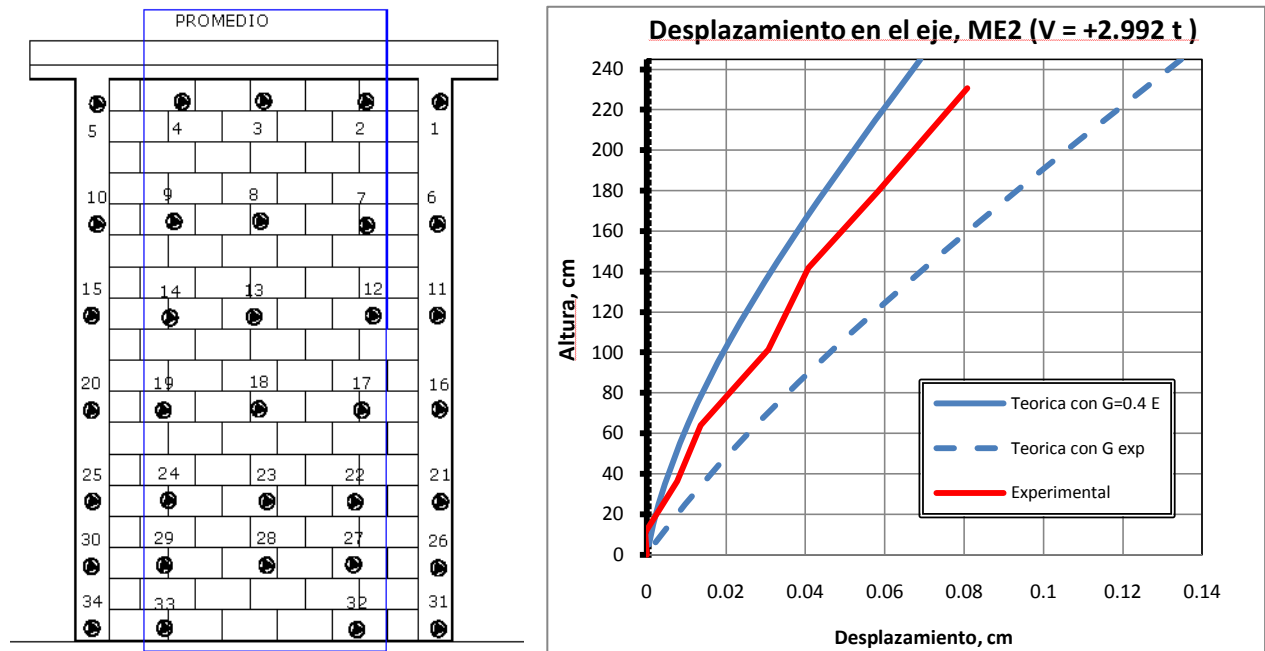


Fig. 3.17. Obtención de curva elástica a partir de leds, ME2.

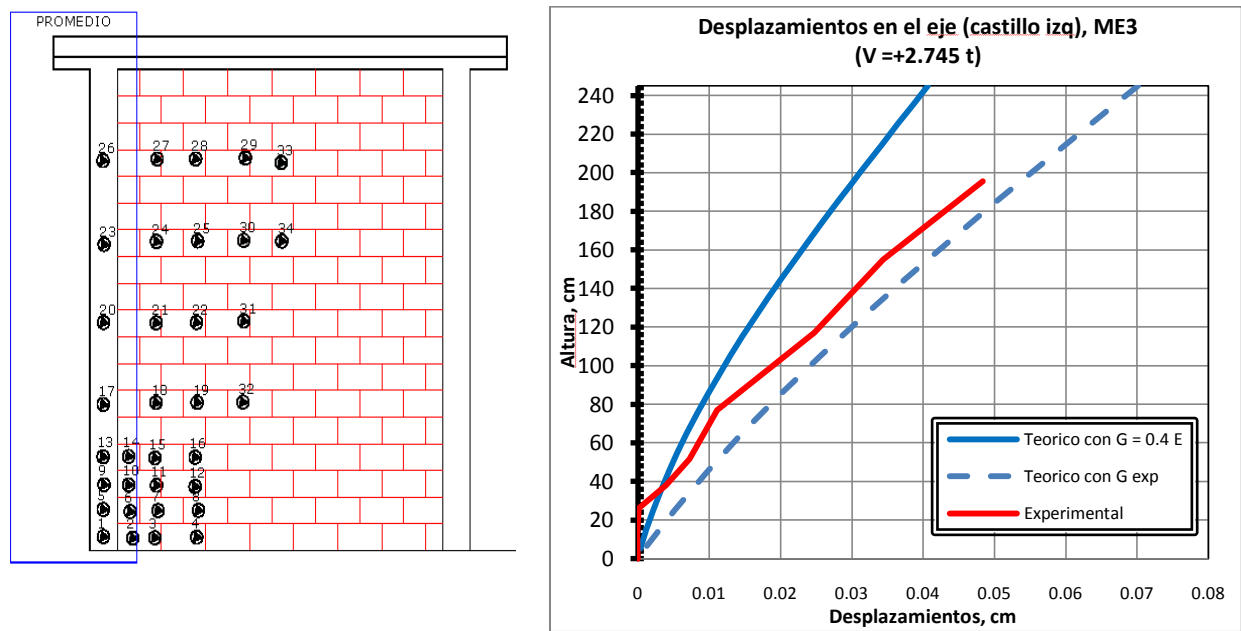


Fig. 3.18. Obtención de curva elástica a partir de leds, ME3.

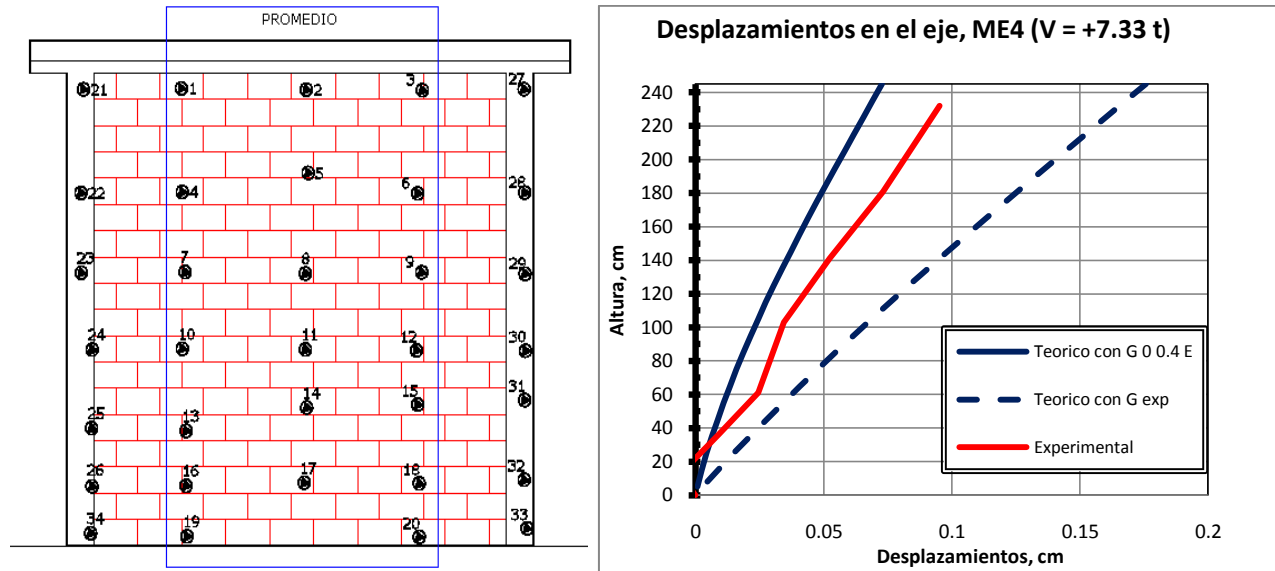


Fig.3.19. Obtención de curva elástica a partir de leds, ME4.

Podemos observar en estas graficas que conforme la longitud de los muros crece, en la base se tienen menores desplazamientos, por lo general cerca de los 20 a 30 cm de distancia de la base, lo que indica una mayor resistencia en esa zona de proporcional al crecimiento del área transversal de los muros.

Por ultimo visualizaremos como fue la deformación interna en los muros. Utilizando los desplazamientos obtenidos en arreglos de leds, en un ciclo máximo de su comportamiento elástico, estos desplazamientos se insertan en la malla del MEF para que este método interpole los puntos entre leds y dibuje una deformada aproximada a la real en dicho ciclo. Estos ciclos de carga máxima corresponden a los que se obtuvieron en para la curva elástica de acuerdo a cada carga en los muros. En este caso los desplazamientos se exageraron 500 de su valor real para ser representados de forma clara.

Cabe señalar que el arreglo de leds utilizado en el espécimen ME3 no pudo ser utilizado plenamente, ya que en este modelo los leds no se colocaron uniformemente en toda el área del panel del muro.

Se pueden observar las Fig. 3.12, 3.13 y 3.14, en las cuales se tiene una característica común, no es una deformación plana.

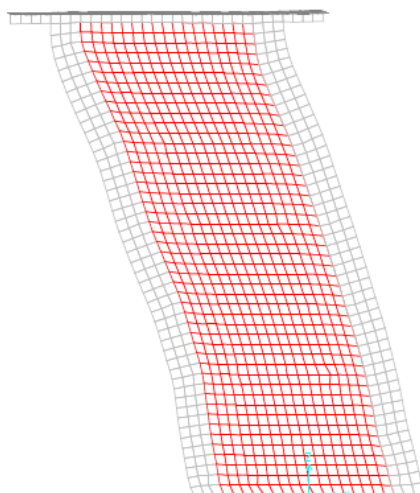


Fig. 3.20. Deformada real del muro ME1, ciclo elástico $v = -2.42 t$.

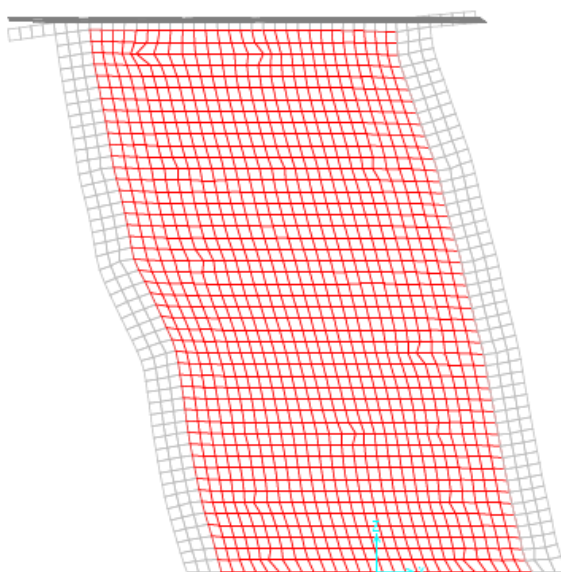


Fig. 3.21. Deformada Real ME2, para ciclo elástico $v = 2.99 t$.

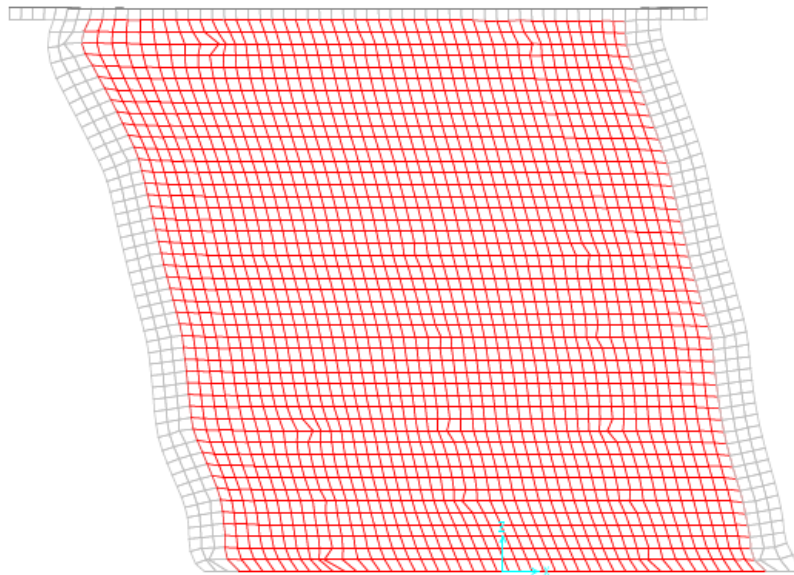


Fig. 3.22. Deformada real en ME4, para ciclo elástico $v=7.33 t$.

Como podemos observar, en la zona de transición de los materiales en el panel del muro, de concreto a mampostería, existe un cambio en la deformación general, que hace que el muro en su totalidad no se comporte como una sección plana.

Recordemos que el principio de sección plana es vital para el análisis en etapa elástica y en cuerpos homogéneos e isotropos, que es con lo que se ha estudiado parte del comportamiento de la mampostería.

Capitulo **4**

Conclusiones

4. CONCLUSIONES

4.1. CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados que arrojan los ensayos de los cuatro especímenes de mampostería, llevan a las siguientes conclusiones.

1. Las piezas de mampostería, en arreglo de pilas y muretes, arrojan resultados bajos, con respecto a las nominales de diseño.
2. La calidad del mortero, de acuerdo a las resistencias obtenidas, corresponde a la clase II
3. El valor de los módulos de elasticidad de los castillos son bastante consistentes
4. Los agrietamientos iniciales en los muros, siempre fueron diagonales, lo que indica el comportamiento de los muros de mampostería depende de su resistencia a al cortante.
5. Aunque con cuatro muros es difícil identificar una tendencia clara, se aprecia que las resistencias relativas a la nominal son mayores en los muros más largos.
6. El uso del modulo de cortante experimental en cálculos analíticos para rigidez lateral es recomendable para muros de relación de aspecto menor, pero en relación con otros cálculos no es muy preciso, ya que a pesar de que aproxima al resultado real, cuando se comparan entre los especímenes sus rigideces, el orden y tendencia que tienen es mas parecida a la relación geométrica de los muros. Esto quiere decir que el valor del modulo de cortante de la mampostería es tan pequeño, que obliga a darle una significativa relevancia a la calidad del concreto en castillos.
7. El método simplificado, recomendado por las NTCDF, son una buena tendencia del comportamiento de los muros experimentalmente de acuerdo a su relación de aspecto, sobre todo en los cercanos a la relación igual a 1, pero se aleja en los valores de relación de aspecto menores, ya que los castiga.
8. Los desplazamientos reales de los especímenes en su superficie, evaluadas en una malla, indican que la deformación no es igual en todo el conjunto del muro, no hay una clara deformación plana, esta tiene una gran diferencia en el concreto y mampostería.
9. Se observa una concentración de las deformaciones de los muros en los primeros 30 cm (cambio brusco de pendiente) que los modelos numéricos no pueden reproducir.
10. Los desplazamientos laterales se presentaron consistentemente entre los valores de desplazamiento obtenidos utilizando $G=0.4E$ y G_{exp} .

11. En los modelos de columna ancha utilizando el G experimental, no son estrictamente válidos, ya que las formulas fueron producidas suponiendo un material elástico e isótropo. Sería necesario obtener fórmulas explícitas de la deformación de muros con material ortotrópico.

4.2. RECOMENDACIONES

Para el plantear las recomendaciones se basara en un enfoque practico, para elaborar diseños estructurales y supervisiones de obra en construcciones de mampostería. Las recomendaciones son las siguientes:

- 1) Supervisar rigurosamente la calidad de los materiales utilizados en obra, ya que la alta o baja resistencia de los materiales que conforman una estructura afectan directamente el comportamiento general de esta.
- 2) Para efectos de diseño, en la mampostería es aconsejable utilizar las propiedades de los materiales que se obtengan experimentalmente, por ejemplo de un lote que se utilizados para una obra.
- 3) En muros de relación de aspecto menor a 0.66 es necesario reforzarlos e inclusive cambiar el tipo de material en ellos, ya sea para poder elevar su rigidez o que esta no sea imprecisa.
- 4) La estimación de cortante resistente, de las NTCDF, es consistente en los muros con relación de aspecto cercano a 1, por lo que esa estimación es recomendable en esos casos.

Apéndice **A**

Materiales Elásticos

A. MATERIALES ELASTICOS

A.1. INTRODUCCIÓN

Por definición un material elástico es aquel que recobra su tamaño y su forma originales cuando deja de actuar sobre el una fuerza deformante¹. En este apéndice se hará un breve resumen de las ecuaciones necesarias para obtener desplazamientos elásticos lineales en los muros utilizando el concepto de la columna ancha

A.2. PRINCIPIOS DE ELASTICIDAD

En 1676, el ingles Robert Hooke estableció una relación de un resorte considerándolo material elástico con su desplazamiento, esta relación se establece como:

$$K = \frac{F}{S} \quad (\text{A.1})$$

Donde **F** es la fuerza ejercida **s**, su desplazamiento y **K** la relación proporcional entre estas (rigidez).

Para 1807, Thomas Young formó con estos principios, una relación basada en la deformación unitaria de varios materiales, la cual se le conoce como modulo de Young (E).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad (\text{A.2})$$

En donde σ es la relación de la fuerza sobre un área, y ϵ es la deformación unitaria de un elemento.

Con estas bases pudo delimitar la etapa elástica de materiales, que es donde se cumple dicha relación.

¹ Tippens Física, Elasticidad pag. 290.

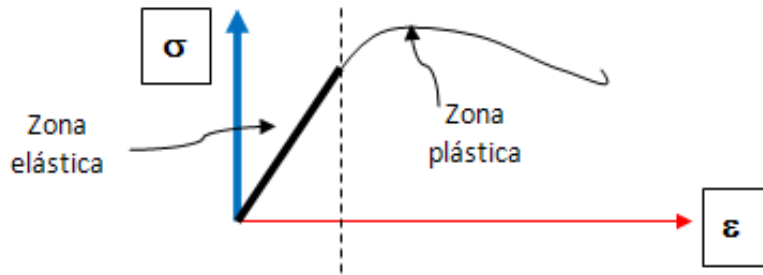


Fig. AP.1. Regiones elásticas y plásticas, en una grafica esfuerzo deformación.

Pero no todo puede ser líneas y resortes en la generalidad de materiales existentes, por lo que para plantear estas relaciones en volúmenes de materiales se llega a el modulo de Poisson (ν), en honor al francés Simeón Denis Poisson.

Establece que entre la deformación unitaria ocasionada por un esfuerzo axial existe una relación con las deformaciones unitarias laterales.

$$\epsilon_z = -\nu\epsilon_x \quad \nu = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \tag{A.3}$$

$$\epsilon_z = -\nu\epsilon_y \quad \nu = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_y} \tag{A.4}$$

si
$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \tag{A.5}$$

por lo tanto
$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} \tag{A.6}$$

La ecuación A.6 se refiere a un análisis tridimensional, pasándolo a un análisis plano tendríamos:

Donde
$$\sigma_z = \sigma_y > \sigma_x \tag{A.7}$$

entonces
$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} (1 - \nu) \tag{A.8}$$

Pero no solo existen deformaciones ortogonales a la aplicación de esfuerzo. Existe también un esfuerzo que se basa en solo los giros sobre las caras de este cubo de esfuerzos, este esfuerzo se le llama esfuerzo cortante. El cual se define como:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{A.9}$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, γ es el ángulo de giro y G la componente elástica al corte, o modulo de cortante.

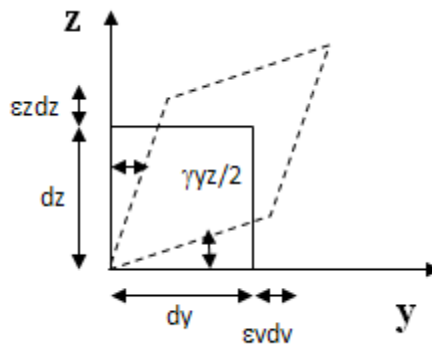


Fig. AP.2. Deformación por cortante en un plano.

Si un material es homogéneo e isotrópico, la deformación por cortante se distribuirá uniformemente, como lo muestra la figura AP.2. En un cuerpo con cortante pura, su deformación unitaria máxima sería:

$$\epsilon_{MAX} = \frac{\gamma_{zy}}{2} \quad (A.10)$$

Con la ecuación A.9 de cortante tendríamos que la deformación máxima sería:

$$\epsilon_{MAX} = \frac{\tau_{zy}}{2G} \quad (A.11)$$

Si un cuerpo es sometido a esfuerzo de cortante puro, sin que influyan en el esfuerzo axial, su deformación máxima en un plano sería:

$$\epsilon_{MAX} = \frac{\tau_{zy}}{E} (1 + \nu) \quad (A.12)$$

Igualando A.11 en A.12 se tiene que:

$$\epsilon_{MAX} = \frac{\tau_{zy}}{2G} = \frac{\tau_{zy}}{E} (1 + \nu) \quad (A.13)$$

Obteniéndose la relación:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (A.14)$$

Para el caso tridimensional, el valor de ν está acotado por el índice volumétrico ó modulo de compresibilidad volumétrica, que es la aplicación de un esfuerzo ortogonal (en la que todos los esfuerzos son iguales) en la ecuación A.6, de forma que la deformación que se obtenga sea la volumétrica.

El modulo al que se llega es:

$$Kv = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \tag{A.15}$$

Con esto el término ν tiene como máximo 0.5, lo que indicaría que Kv tiende al infinito. El valor de ν que se asocia a materiales como la mampostería es **0.25 considerándolo elástico**, y es comúnmente aceptado en los cálculos teóricos.

A.3. RIGIDEZ DEBIDO A CORTANTE Y FLEXION EN COLUMNA ANCHA

Para calcular desplazamiento en general, por conservación de energía utilizando el método de trabajo virtual tenemos:

$$\Delta = \int \frac{nN}{AE} dx + \int \frac{mM}{EI} dx + \int \frac{vV}{GA_C} dx + \int \frac{tT}{GJ} dx \tag{A.16}$$

Se omiten las deformaciones por esfuerzo axial y torsionante:

$$\Delta = \int \frac{mM}{EI} dx + \int \frac{vV}{GA_C} dx \tag{A.17}$$

Calculando desplazamiento lateral para un elemento empotrado con longitud H , al que se le aplica una carga P lateralmente.

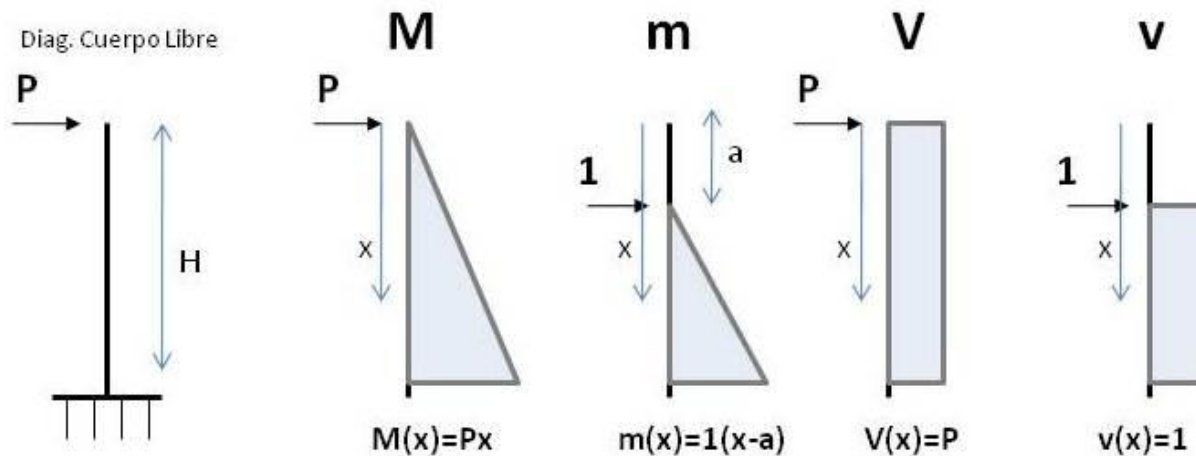


Fig. AP.3. Viga en cantiléver, y sus componentes mecánicas de momento y cortante.

Debido al momento flexionante, tenemos su desplazamiento lateral a lo largo del elemento, utilizando la integración con trabajo virtual.

$$\Delta_{flexion} = \int_a^H \frac{mM}{EI} dx \quad (A.18)$$

$$\Delta_{flexion} = \int_a^H \frac{(x-a)(Px)}{EI} dx = \frac{P}{EI} \left[\frac{x^3}{3} - \frac{x^2a}{2} \right]_a^H \quad (A.19)$$

$$\Delta_{flexion} = \frac{P}{EI} \left[\left(\frac{H^3}{3} - \frac{H^2a}{2} \right) - \left(\frac{a^3}{3} - \frac{a^3}{2} \right) \right] = \frac{P}{EI} \left(\frac{a^3}{6} - \frac{H^2a}{2} + \frac{H^3}{3} \right) \quad (A.20)$$

Finalmente se obtiene, que los desplazamientos laterales por flexión son:

$$\Delta_{flexion} = \frac{P}{6EI} (a^3 - 3H^2a + 2H^3) \quad (A.21)$$

Donde a , es una posición con respecto a la altura de la columna.

Para el desplazamiento lateral a causa de la fuerza cortante, utilizamos nuevamente la integración por trabajo virtual.

$$\Delta_{Cortante} = \int_a^H \frac{vV}{GA_c} dx \quad (A.22)$$

$$\Delta_{Cortante} = \int_a^H \frac{(1)(P)}{GA_c} dx = \frac{P}{GA_c} [x]_a^H \quad (A.23)$$

Finalmente, el desplazamiento lateral por cortante será.

$$\Delta_{Cortante} = \frac{P}{GA_c} (H - a) \quad (A.24)$$

Con los desplazamientos por flexión y cortante, se tiene el desplazamiento total para un columna en cantiliver.

$$\Delta_{cantiliver} = \Delta m + \Delta v \quad (A.25)$$

$$\Delta_{cantiliver} = \frac{P}{6EI} (a^3 - 3H^2a + 2H^3) + \frac{P}{GA_c} (H - a) \quad (A.26)$$

Recordemos que la integral de trabajo virtual es una analogía de la doble integración para encontrar desplazamiento debido a momento y cortante. Para el ángulo de giro suponemos la siguiente integral sencilla.

$$\theta_{Cantiliver} = \int_a^H \frac{M}{EI} dx \quad (A.27)$$

$$\theta_{Cantiliver} = \int_a^H \frac{Px}{EI} dx = \frac{P}{EI} \left(\frac{x^2}{2} \right)_a^H \quad (A.28)$$

$$\theta_{Cantiliver} = \frac{P}{EI} \left[\frac{H^2}{2} - \frac{a^2}{2} \right] \quad (A.29)$$

Cabe señalar que por cortante en el elemento idealizado como columna no se tienen componentes de momento para suponer giro, por lo que el giro por cortante es cero. Su giro sería:

$$\theta_{Cantiliver} = \frac{P}{2EI} (H^2 - a^2) \quad (A.30)$$

Pensando en un elemento doble empotrado, que se desplaza en un extremo, se restringe el giro en $a=0$,

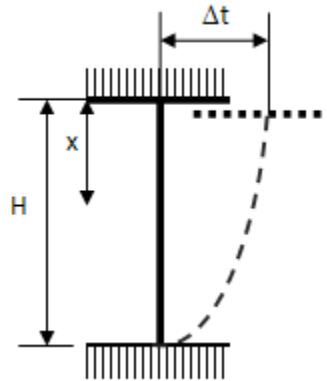


Fig. AP.4. Elemento en doble empotrado.

Se genera un giro de empotramiento (θ_e), al que le correspondería:

$$\theta_{Cantiliver} + \theta_{empotrado} = 0 \quad (A.31)$$

Este giro de empotramiento es causado por un momento de empotramiento M_e , del cual obtenemos el desplazamiento debido a la acción de este giro, valuado en la altura H.

$$\theta_{empotrado} = \int^H \frac{M_e}{EI} dx \quad (A.32)$$

$$\theta_{empotrado} = \frac{M_e H}{EI} \quad (A.33)$$

Con la ecuación A.31 y la A.30 en $x=0$, sustituyendo el valor de empotramiento de A.33.

$$\left[\frac{P}{2EI} (H^2 - a^2) \right]_{en\ x=0} + \frac{M_e H}{EI} = 0 \quad (A.34)$$

$$M_e = -\frac{PH}{2} \quad (A.35)$$

En este caso la componente de cortante es nula ya que no existe fundamento de cortante.

$$\Delta t = \int_a^H \frac{M_e(x)}{EI} dx = \int_a^H -\frac{PH(x)}{2EI} dx \quad (A.36)$$

$$\Delta t = \frac{PH}{4EI} (H - a)^2 \quad (A.37)$$

Así, para un elemento doble empotrado se tiene:

$$\Delta_{em} = \Delta_{cantiliver} - \Delta t \xi \quad (A.38)$$

Al término Δt se le agrego el término ξ , esto para referenciar la ecuación de desplazamiento en si es cantiléver $\xi=0$, y si es doble empotrado $\xi=1$.

$$\Delta_{TOTAL} = \frac{P}{6EI} (a^3 - 3H^2a + 2H^3) + \frac{P}{GA_C} (H - a) - \frac{PH}{4EI} (H - a)^2 \xi \quad (A.39)$$

De acuerdo a la ley de Hooke, la rigidez de un material esta dada por la relación de una fuerza con un desplazamiento. Para obtener la rigidez lateral debida a la carga P , tenemos:

$$K = \frac{P}{\Delta_{TOTAL}} \quad (A.40)$$

El desplazamiento en $a=0$, seria:

$$\Delta_{TOTAL}(a = 0) = \frac{PH^3}{12EI} (4 - 3\xi) + \frac{PH}{GA_C} = P \left[\frac{H^3}{12EI} (4 - 3\xi) + \frac{H}{GA_C} \right] \quad (A.41)$$

Por lo tanto:

$$K = \frac{P}{P \left[\frac{H^3}{12EI} (4 - 3\xi) + \frac{H}{GA_C} \right]} \tag{A.42}$$

Y finalmente tenemos la ecuación de rigidez ante cargas laterales de un material, con la referencia ξ , para cantiléver y doble empotrado.

$$K = \left[\frac{H^3}{12EI} (4 - 3\xi) + \frac{H}{GA_C} \right]^{-1} \tag{A.43}$$

El concepto de la columna ancha aborda la relación de aspecto de la geometría del material, con el comportamiento que tenga en proporción por flexión y cortante. Debido a que si a un elemento con una sección transversal constante se le varía su longitud, y se le aplican cargas similares, el porcentaje que tomen los desplazamientos por cortante y por flexión variarían. Entre menor sea la longitud con respecto a su área transversal el elemento se regirá por cortante, y entre mayor longitud se regirá por flexión.

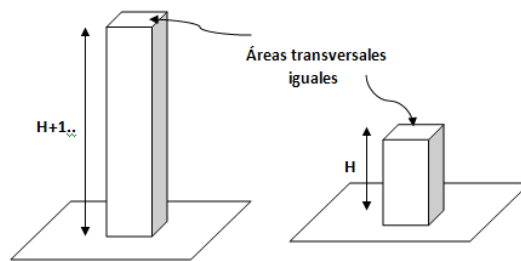


Fig. AP.5. Ejemplo de columnas de misma área transversal y diferente altura.

A la relación de la longitud del material con su área transversal se le llama relación de aspecto. Normalmente se toma un elemento del área transversal, por ejemplo en muros de mampostería es la altura del muro entre su ancho (H/b).

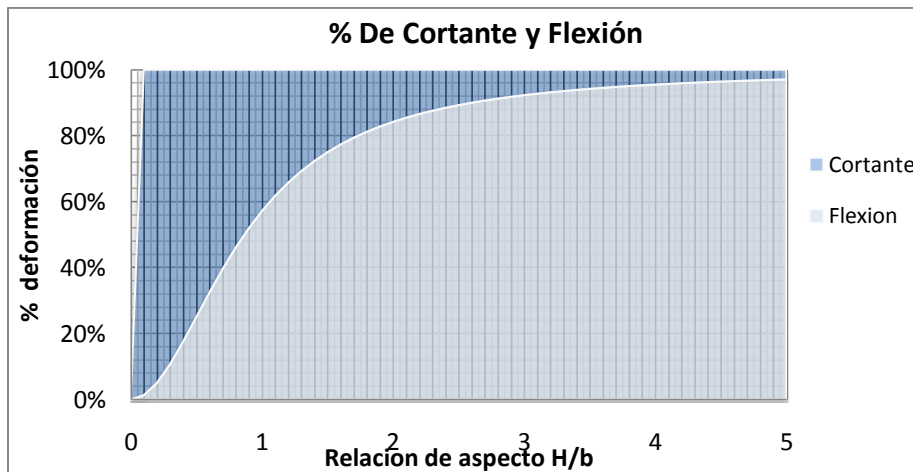


Fig. AP.6. porcentaje de deformación que toma un material con respecto a su relación de aspecto.

Esto nos dice que para elementos con relación de aspecto menor a 1, tiene una gran relevancia la deformación por cortante.

A.4. CONSIDERACIONES PARA MATERIAL COMPUESTO.

Cuando un elemento esta compuesto por varios tipos de materiales se busca una relación en los materiales para convertirlos en uno y proceder a los análisis. Para el caso de los muros de mampostería utilizaremos la siguiente expresión que relaciona los módulos de elasticidad de materiales que la conforman.

$$n = \frac{E_1}{E_2} \tag{A.44}$$

Donde E_1 y E_2 son los módulos de elasticidad de los materiales y n su relación.

Que se obtiene de la igualación de energía en el área transversal de un material sometido a momento flexionante. Se utiliza el modulo elástico de la mampostería como base y se transforma el área del material compuesto al área equivalente si solo fuera de mampostería.

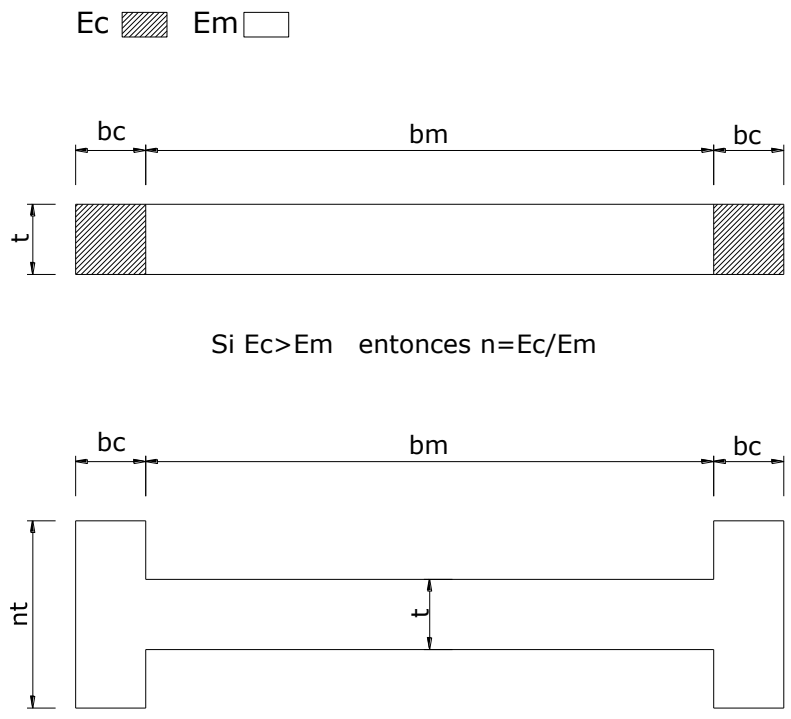


Fig. AP.7. Área Transformada de una sección compuesta de mampostería.

Con este cambio de sección se pueden obtener los datos de área transversal,

$$A = 2ntbc + tbm \tag{A.45}$$

Y para inercia usando ejes paralelos.

$$I = \frac{tbm^3}{12} + 2 \left[\frac{ntbc^3}{12} + ntbc \left(\frac{bm + bc}{2} \right)^2 \right] \quad (\text{A.46})$$

Otra consideración que se toma es el factor de forma de cortante, al que generalmente se le escribe:

$$k = \frac{A}{I^2} \int_A \frac{Q(y)^2}{t(y)^2} dA \quad (\text{A.47})$$

Donde Q , es el momento estático de la sección

t , espesor de la sección

A , área de la sección transversal

I , momento de inercia de la sección

Y el area de cortante se escribe como:

$$A_c = \frac{A}{kf} \quad (\text{A.48})$$

De acuerdo a la recomendación hecha por Taveras 2004 en su tesis de maestría, en la que incita utilizar la siguiente aproximación del factor de forma en mampostería:

$$kf = \frac{6}{5} [1 + \alpha(n - 1)] \quad (\text{A.49})$$

Donde n , es la relación $n=E_c/E_m$

α , es la relación $\alpha=bc/bm$

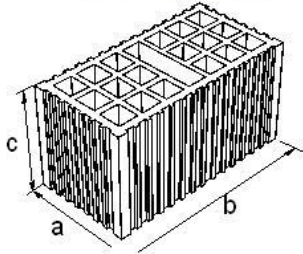
Apéndice **B**

Datos de los Materiales Utilizados

B. DATOS DE MATERIALES UTILIZADOS

B.1. ESPECÍMENES ANALIZADOS

Piezas de mampostería



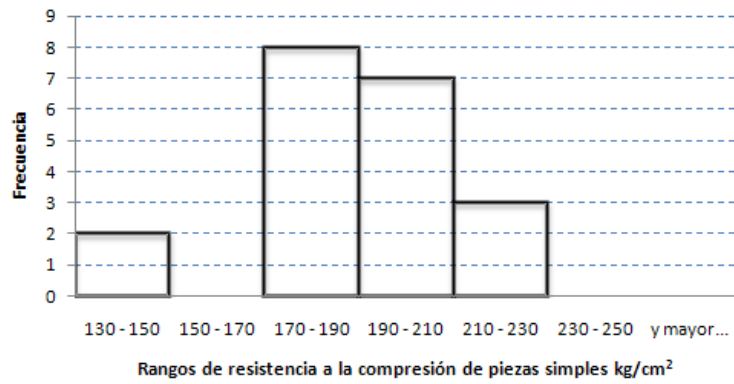
Proyecto: Muros SMIE para calibrar modelos de análisis
Fecha de ensayo: 22 y 23 de julio de 2008
Tipo de material: Arcilla extruida multiperforada
Vel. carga | escala | coefic: 17 t/min | 100 | 80

Esfuerzo f_p = 190.6 kg/cm²
 $f_p^* = f_p / (1 + 2.5c_p) =$ 127.08 kg/cm² con control de calidad $c_p > 0.2$
 sin control de calidad $c_p > 0.3$
 artesanal $c_p > 0.35$

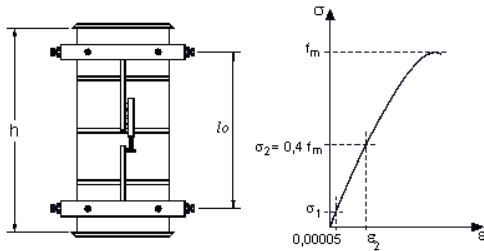
Pieza No.	Dimensiones, cm			Peso, kg	Carga, kg	Area cm ²	Peso Vol. bruto kg/m ³	Esfuerzo kg/cm ²
	a	b	c					
1	11.75	22.51	11.80	2.571	52000	264.5	824	196.6
2	12.03	22.82	12.10	2.587	50600	274.5	779	184.3
3	11.62	22.75	11.90	2.788	47500	264.4	886	179.7
4	11.92	22.75	11.92	2.548	37600	271.2	788	138.7
5	11.73	22.50	11.80	2.568	38200	263.9	825	144.7
6	11.81	22.64	11.92	2.557	50500	267.4	803	188.9
7	11.80	22.64	11.88	2.524	53500	267.2	795	200.3
8	11.65	22.38	11.86	2.566	55800	260.7	830	214.0
9	11.70	22.50	11.76	2.553	58800	263.3	825	223.4
10	11.73	22.70	11.90	2.533	48200	266.3	799	181.0
11	11.74	22.54	11.80	2.568	50800	264.7	822	191.9
12	11.75	22.66	11.78	2.599	52200	266.3	829	196.1
13	11.72	22.85	11.80	2.671	50000	267.7	846	186.8
14	11.92	22.63	11.84	2.551	50800	269.6	799	188.4
15	11.62	22.40	11.71	2.610	51800	260.2	856	199.1
16	11.77	22.65	11.84	2.558	54400	266.6	810	204.1
17	11.90	22.68	11.90	2.528	51200	269.9	787	189.7
18	11.86	22.69	11.92	2.559	49900	269.1	798	185.4
19	11.72	22.58	11.76	2.553	57500	264.6	821	217.3
20	11.83	22.64	11.92	2.554	54100	267.8	800	202.0
Promedio	11.8	22.6	11.9	2.58	50770	266.5	816	190.6
Coef var.	0.01	0.01	0.01	0.02	0.10	0.01	0.03	0.11

Histograma de piezas a compresión

Clase σ kg/cm ²	Frecuencia
130 - 150	2
150 - 170	0
170 - 190	8
190 - 210	7
210 - 230	3
230 - 250	0
y mayor...	0



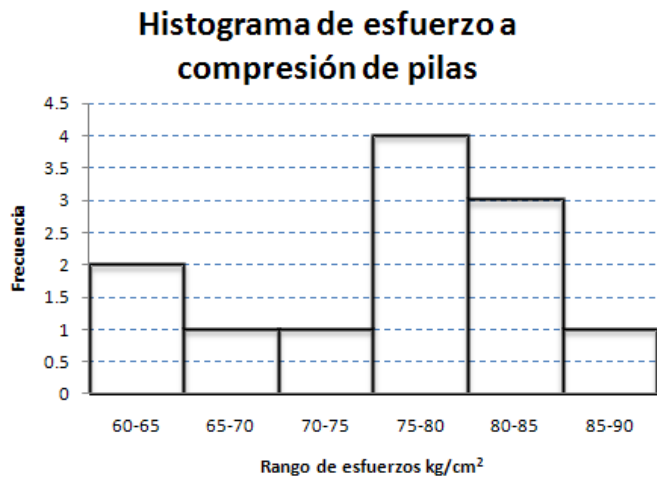
B.2. PILAS A COMPRESIÓN



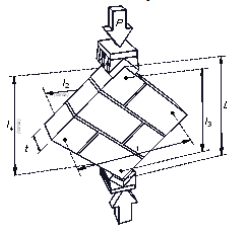
Proyecto: Muros SMIE para calibrar análisis
 Tipo de material: Tabique extruido de arcilla multiperforado
 $f_p^* = 127$ kg/cm²
 Resist. mortero 28 días: $f_b' = 108$ kg/cm² (promedio general)
 $f_m^* = f_m / (1 + 2.5c_m) = 55.41$ kg/cm² ($c_m \geq 0.15$)
 $E_m = 43921$ kg/cm² (promedio general)

Pila	Dimensiones cm			Area Bruta cm ²	Carga kg	fm kg/cm ²	Em kg/cm ²	ε fm
	a	b	h					
ME1-P1	12	23	50	276	17728	64	41192	0.00284
ME1-P2	12	23	50	276	23460	85	46528	0.00272
ME1-P3	12	23	50	276	21815	79	42321	0.0031
ME2-P1	12	23	50	276	21100	76	50791	0.00228
ME2-P2	12	23	50	276	21101	76	43899	0.00227
ME2-P3	12	23	50	276	17784	64	38981	0.00266
ME3-P1	11.6	22.6	50	262.16	22550	86	46653	0.00249
ME3-P2	12	23	50	276	21265	77	44465	0.00309
ME3-P3	12	23	50	276	18328	66	40029	0.00287
ME4-P1	12	23	50	276	20537	74	41882	0.00253
ME4-P2	11.6	22.6	50	262.16	22075	84	42271	0.00313
ME4-P3	11.6	22.9	49.6	265.64	21395	81	48044	0.00263
Promedio						76	43921	
Coef. De variacion						0	0.07982	

Clase kg/cm ²	Frecuencia
60-65	2
65-70	1
70-75	1
75-80	4
80-85	3
85-90	1
y mayor...	0



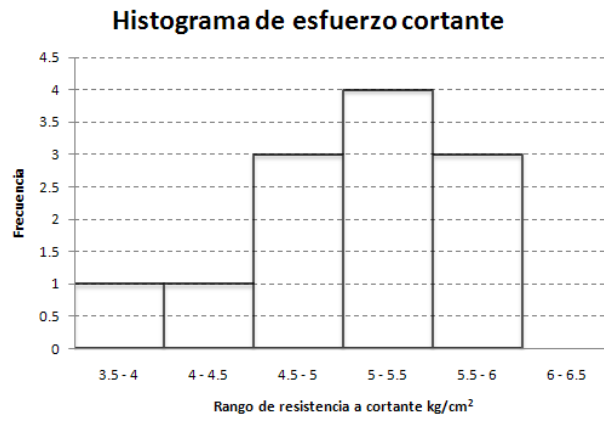
B.3. MURETES A COMPRESION DIAGONAL



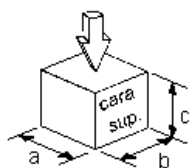
Proyecto: Muros SMIE para calibrar
 Tipo de material: Arcilla extruida multiperforada
 Mortero C:Cal:A : 1 : ¼ : 3
 Mortero 28 días: $f'_b = 82.9$ kg/cm² (promedio)
 $v_m^* = v_m / (1 + 2.5c_v) = 3.32$ kg/cm² ($c_v \geq 0.2$)
 $G_m = 5150$ kg/cm²
 De las pilas: $E_m = 43921$ kg/cm²

Murete	Dimensiones, cm				Área diag. A = t D, cm ²	Carga, kg	Esf. cortante v , kg/cm ²	Esf. de diseño, v_m^* kg/cm ²	Módulo de cortante, G_m kg/cm ²	Mor- tero, f_b' kg/cm ²	Módulo E_m kg/cm ²	Gm/ E_m
	L	h	D	t								
ME1-M1	38.0	37.4	52.3	11.9	619.8	2700	4.36					
ME1-M2	37.5	37.2	52.5	11.9	622.1	3170	5.10	3.11	4772	64.9	43347	0.11
ME1-M3	37.8	37.2	57.1	11.9	676.6	3070	4.54					
ME2-M1	37.4	38.0	53	11.9	628.1	3470	5.53					
ME2-M2	37.5	37.4	52.3	11.9	619.8	2460	3.97	3.34	4624	90.2	44557	0.10
ME2-M3	37.2	37.5	52.7	11.9	624.5	3460	5.54					
ME3-M1	38.3	37.4	53.0	11.9	628.1	3470	5.53					
ME3-M2	37.3	37.2	52.4	11.9	620.9	3150	5.07	3.52	6464	92.6	43716	0.15
ME3-M3	37.5	37.2	52.5	11.9	622.1	3270	5.26					
ME4-M1	37.8	37.0	52.8	11.9	625.7	3250	5.19					
ME4-M2	37.9	37.6	53.1	11.9	629.2	2950	4.69	3.30	4719	84.0	44066	0.11
ME4-M3	37.4	37.5	52.2	11.9	618.6	3080	4.98					
Promedio								3.32	5149.66	82.93	43921.33	0.12
Coefficiente de variación								0.05	0.17	0.15	0.01	0.18

Clase kg/cm ²	Frecuencia
3.5 - 4	1
4 - 4.5	1
4.5 - 5	3
5 - 5.5	4
5.5 - 6	3
6 - 6.5	0
y mayor...	0



B.4. MORTERO



Proyecto: Muros SMIE, arcilla extruida multiperforada

Espécimen: ME1, ME2, ME3 y ME4

Fecha de ensaye :

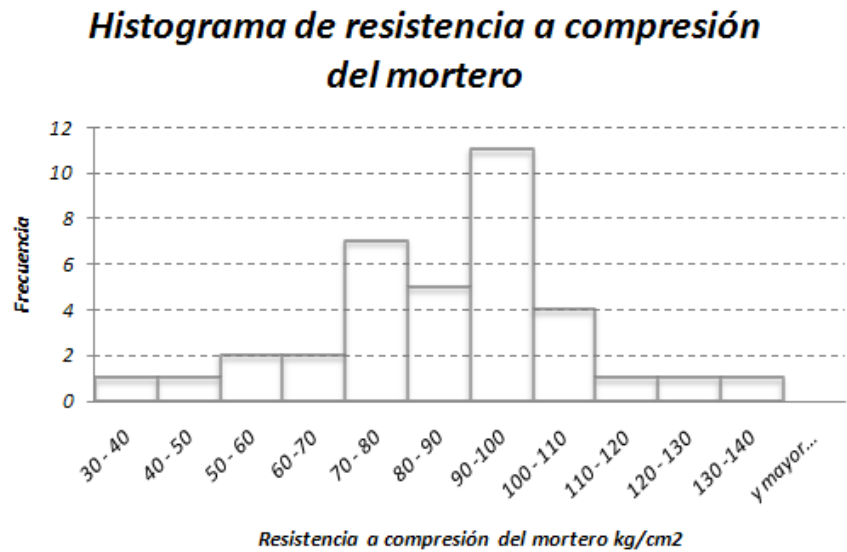
$f_b^* = 84.6 \text{ kg/cm}^2$

$f_j^* = f_b^* / (1 + 2.5c_j); f_j^* = 52.3 \text{ kg/cm}^2 (c_j \geq 0.2)$

Cem:cal:arena 1:¼:3

Muestra		fecha muestra	fecha ensaye	Edad, días	Dim., cm			Peso, g	Peso Vol. t/m³	Carga kg	Área cm²	Esfuerzo kg/cm²
Nº	Probeta				a	b	c					
M-1 (ME3)	1	05-Mar	02-Jul	119	5.10	5.07	5.07	221	1.69	2470	25.9	95.5
	2				5.16	5.07	5.07	224	1.69	3100	26.2	118.5
	3				5.10	5.07	5.07	223	1.70	2510	25.9	97.1
M-2 (ME3)	1	05-Mar	02-Jul	119	5.06	5.07	5.07	215	1.65	2330	25.7	90.8
	2				5.10	5.07	5.07	221	1.69	3210	25.9	124.1
	3				5.02	5.07	5.07	216	1.67	2420	25.5	95.1
M-3 (ME3)	1	05-Mar	02-Jul	119	4.99	5.07	5.07	205	1.60	1370	25.3	54.2
	2				4.98	5.07	5.07	206	1.61	1880	25.2	74.5
	3				4.97	5.07	5.07	203	1.59	1450	25.2	57.5
M-4 (ME3)	1	06-Mar	02-Jul	118	5.07	5.07	5.07	223	1.71	2500	25.7	97.3
	2				5.04	5.07	5.07	223	1.72	3440	25.6	134.6
	3				5.09	5.07	5.07	224	1.71	2710	25.8	105.0
M-5 (ME4)	1	06-Mar	02-Jul	118	5.02	5.07	5.07	215	1.67	2050	25.5	80.5
	2				5.07	5.07	5.07	216	1.66	2140	25.7	83.3
	3				5.05	5.07	5.07	215	1.66	1880	25.6	73.4
M-6 (ME4)	1	07-Mar	03-Jul	118	4.99	5.07	5.07	216	1.68	2230	25.3	88.1
	2				4.92	5.07	5.07	212	1.68	2280	24.9	91.4
	3				4.93	5.07	5.07	213	1.68	2320	25.0	92.8
M-7 (ME4)	1	10-Mar	04-Jul	116	4.97	5.07	5.07	210	1.64	2060	25.2	81.8
	2				5.03	5.07	5.07	214	1.66	2180	25.5	85.5
	3				4.98	5.07	5.07	213	1.66	1990	25.2	78.8
M-8i (ME2)	1	11-Mar	04-Jul	115	5.02	5.07	5.07	216	1.67	2750	25.5	108.0
	2				5.05	5.07	5.07	216	1.66	2760	25.6	107.8
	3				4.98	5.07	5.07	211	1.65	1870	25.2	74.1
M-8f (ME2, 1)	1	11-Mar	04-Jul	115	5.06	5.07	5.07	214	1.65	2450	25.7	95.5
	2				5.07	5.07	5.07	213	1.63	1730	25.7	67.3
	3				5.05	5.07	5.07	214	1.65	2330	25.6	91.0
M-9i (ME2)	1	11-Mar	04-Jul	115	5.09	5.07	5.07	218	1.67	1820	25.8	70.5
	2				5.07	5.07	5.07	218	1.67	2750	25.7	107.0
	3				5.09	5.07	5.07	217	1.66	2340	25.8	90.7
M-9f (ME1)	1	12-Mar	04-Jul	114	5.02	5.07	5.07	211	1.64	820	25.5	32.2
	2				5.08	5.07	5.07	213	1.63	2320	25.8	90.1
	3				5.09	5.07	5.07	214	1.64	2060	25.8	79.8
M-10 (ME1)	1	12-Mar	04-Jul	114	5.03	5.07	5.07	219	1.69	1590	25.5	62.3
	2				5.03	5.07	5.07	222	1.72	1950	25.5	76.5
	3				5.02	5.07	5.07	219	1.70	1240	25.5	48.7
Promedio								1.66			84.6	
. de variación								0.02			0.25	

Clase kg/cm ²	Frecuencia
30 - 40	1
40 - 50	1
50 - 60	2
60 - 70	2
70 - 80	7
80 - 90	5
90 - 100	11
100 - 110	4
110 - 120	1
120 - 130	1
130 - 140	1
y mayor...	0



B.5. CILINDROS DE CONCRETO

B.5.1. Castillos

Castillo	Cilindro	Dimensiones cm		Peso g	Area cm ²	Volumen cm ³	Peso Vol g/cm ³	Carga TDS kg	σ kg/cm ²	σ_{prom} kg/cm ²	$E_{c_{prom}}$ kg/cm ²
		ϕ	h								
ME1	C1	15.13	30.4	10560	179.791	5465.644	1.932	61400.000	341.508	334.634	117210.8
	C2	15.15	30.4	10576	180.267	5480.103	1.930	60500.000	335.614		
	C3	15.1	30.3	10508	179.079	5426.083	1.937	58500.000	326.672		
	C4	15.1	30.4	10576	179.079	5443.991	1.943	59945.000	334.741		
ME2	C1	15.226	30.25	10229	182.080	5507.911	1.857	36700.000	201.560	216.425	108251.6
	C2	15.125	30.45	10259	179.672	5471.015	1.875	40500.000	225.411		
	C3	15.224	30.375	10179	182.032	5529.218	1.841	39000.000	214.248		
	C4	15.175	30.35	10256	180.862	5489.161	1.868	40600.000	224.481		
ME3	C1	15.15	30.45	10240	180.267	5489.116	1.866	33300.000	184.726	184.679	101914.1
	C2	15.18	30.5	10266	180.981	5519.926	1.860	33200.000	183.444		
	C3	15.1	30.49	10289	179.079	5460.108	1.884	33600.000	187.627		
	C4	15.11	30.45	10278	179.316	5460.169	1.882	32800.000	182.917		
ME4	C1	15.171	30.375	10237	180.767	5490.787	1.864	45300.000	250.599	233.517	110928.9
	C2	15.085	30.4	10243	178.723	5433.180	1.885	42100.000	235.560		
	C3	15.188	30.4	10235	181.172	5507.629	1.858	40500.000	223.544		
	C4	15.179	30.375	10237	180.957	5496.579	1.862	40600.000	224.362		

B.5.2. Losa

Losa	Cilindro	Dimensiones cm		Peso g	Area cm ²	Volumen cm ³	Peso Vol g/cm ³	Carga TDS kg	f'c kg/cm ²	Ec kg/cm ²
		φ	h							
ME1	LZC1	15.0	29.9	10129	176	5266	1.9	49100	279	243587.9
	LZC2	15.4	30.9	10888	185	5709	1.9	50900	275	
	LZC3	15.2	29.9	10203	180	5381	1.9	52200	290	190357.3
ME2	LZC1	15.5	30.2	10817	189	5717	1.9	60100	317	278460.0
	LZC2	15.1	30.5	10704	180	5471	2.0	61400	342	
	LZC3	15.2	30.5	10652	180	5489	1.9	39000	216	244417.7
ME3	LZC1	15.3	30.3	10871	184	5569	2.0	60500	329	259968.6
	LZC2	15.1	30.4	10880	180	5450	2.0	57500	320	
	LZC3	15.8	31.6	12213	195	6176	2.0	65100	333	302185.1
ME4	LZC1	15.2	30.6	10724	181	5514	1.9	45300	251	285132.8
	LZC2	15.1	30.4	10741	180	5462	2.0	63000	351	
	LZC3	15.1	30.4	10720	180	5462	2.0	40500	225	263832.7
Promedio									294	258493
Coef. de variacion									0.15	0.13

Apéndice 

Rigidez lateral ante distintos niveles de carga vertical

C. RIGIDEZ LATERAL ANTE DISTINTOS NIVELES DE CARGA VERTICAL

Como se explicó en el capítulo 1.8 antes de la etapa de ensaye destructivo dentro del rango elástico se variaba la carga axial en el muro, para observar si la rigidez lateral se veía afectada al aplicar diferentes niveles de carga axial. Las curvas histereticas de estos ciclos se muestran a continuación:

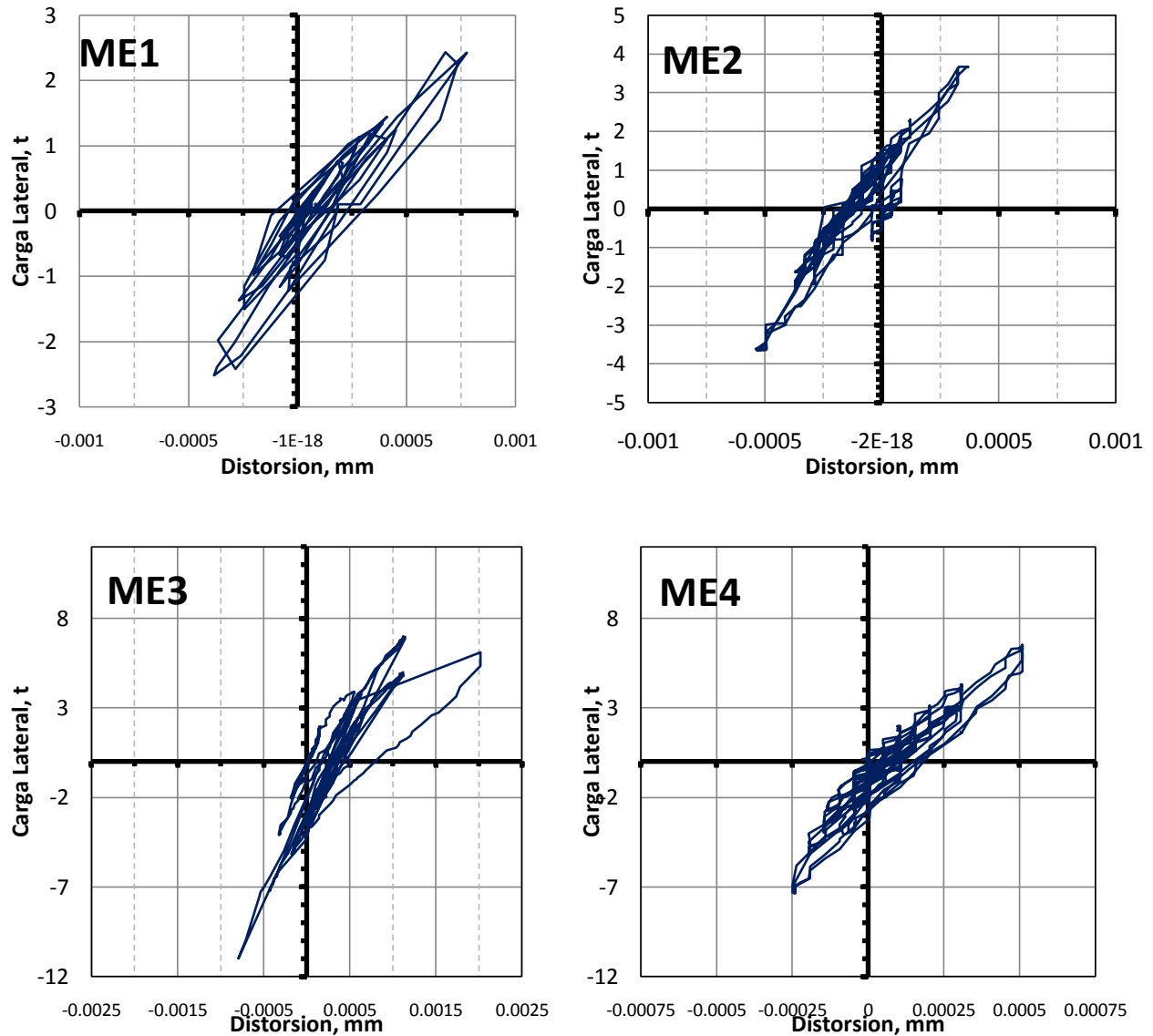


Fig. AP.C1. Curvas histereticas de los especímenes en la zona elástica con diferente carga axial.

C.1. OBTENCIÓN DE LA RIGIDEZ LATERAL CON DIFERENTE NIVEL DE CARGA VERTICAL POR CICLOS

En las tablas y figuras siguientes se presenta el resultado del cálculo de rigideces de ciclo de las etapas de carga elástica.

Para ME1

CICLO	σ (kg/cm ²)	K (t/cm)
1	0	18.36
2	0	17.51
3	0	16.86
4	0	17.22
5	2.5	20.34
6	2.5	21.94
7	2.5	16.94
8	2.5	18.38
9	5	18.75
10	5	20.48
11	10	17.47
PROMEDIO		18.57
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		0.09

Tabla AC.1. Rigideces laterales en ciclos iniciare con diferente carga axial para el modelo ME1

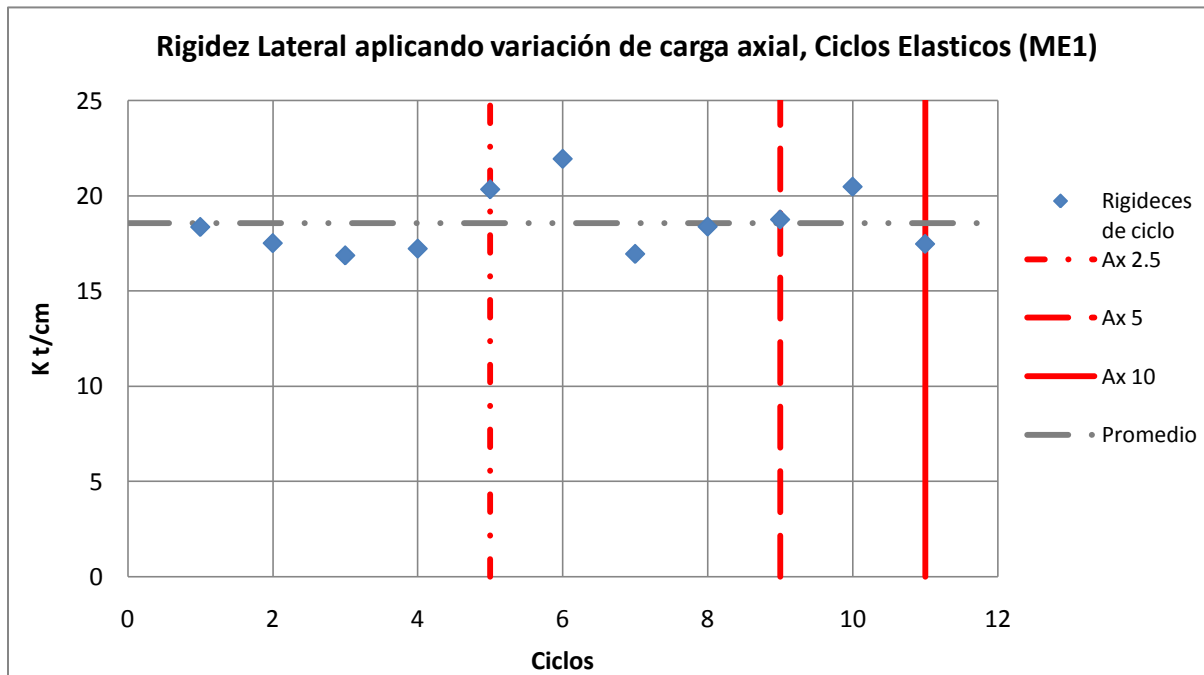


Fig. AC.1. Comportamiento de las rigideces laterales de acuerdo al nivel de carga vertical para ME1.

Para ME2

CICLO	σ (kg/cm ²)	K (t/cm)
1	0	62.29
2	0	44.13
3	0	45.30
4	0	50.52
5	0	50.27
6	2.5	38.11
7	2.5	39.97
8	2.5	32.15
9	2.5	32.95
10	5	43.35
11	5	42.60
12	5	40.20
13	5	36.04
14	5	34.48
15	10	40.07
16	10	40.66
17	10	32.95
18	10	34.66
PROMEDIO		41.15
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		0.18

Tabla AC.2. Rigideces laterales en ciclos iniciare con diferente carga axial para el modelo ME2

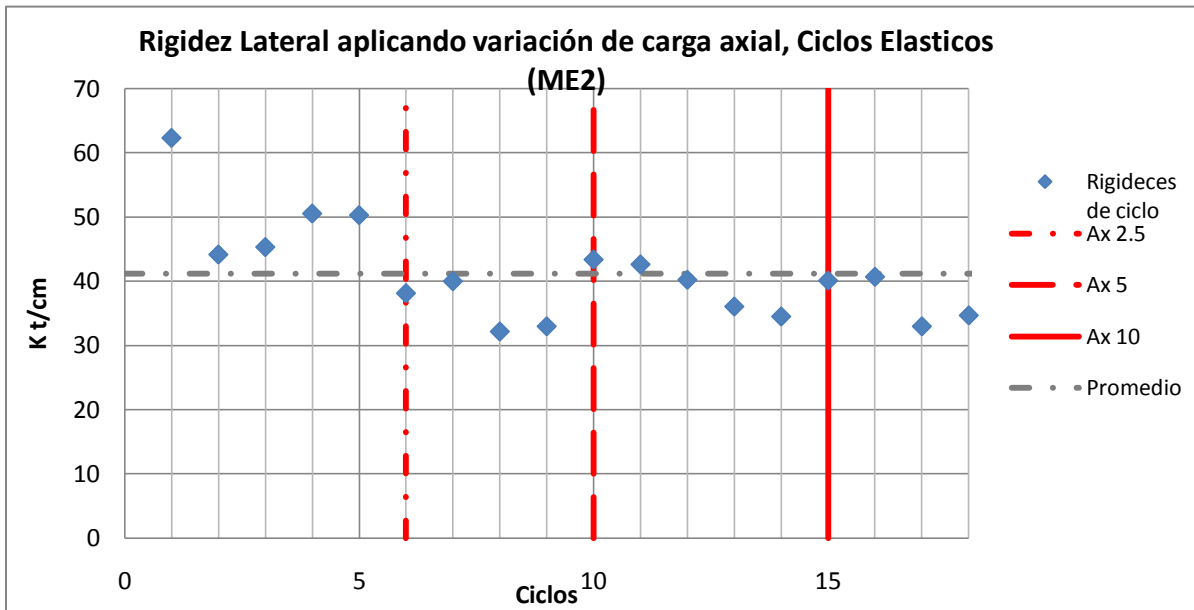


Fig. AC.2. Comportamiento de las rigideces laterales de acuerdo al nivel de carga vertical para ME2.

Para ME3

CICLO	σ (kg/cm ²)	K (t/cm)
1	2.5	49.3875926
2	2.5	47.4819992
3	2.5	36.8558148
4	2.5	20.4480834
5	5	38.2790416
6	5	40.4876485
7	5	31.4172135
8	5	31.7805598
9	10	47.4154659
10	10	47.2012365
11	10	37.5979046
12	10	37.4079046
PROMEDIO		38.8133721
COEFICIENTE DE VARIACION		0.21739016

Tabla AC.3. Rigideces laterales en ciclos iniciare con diferente carga axial para el modelo ME3

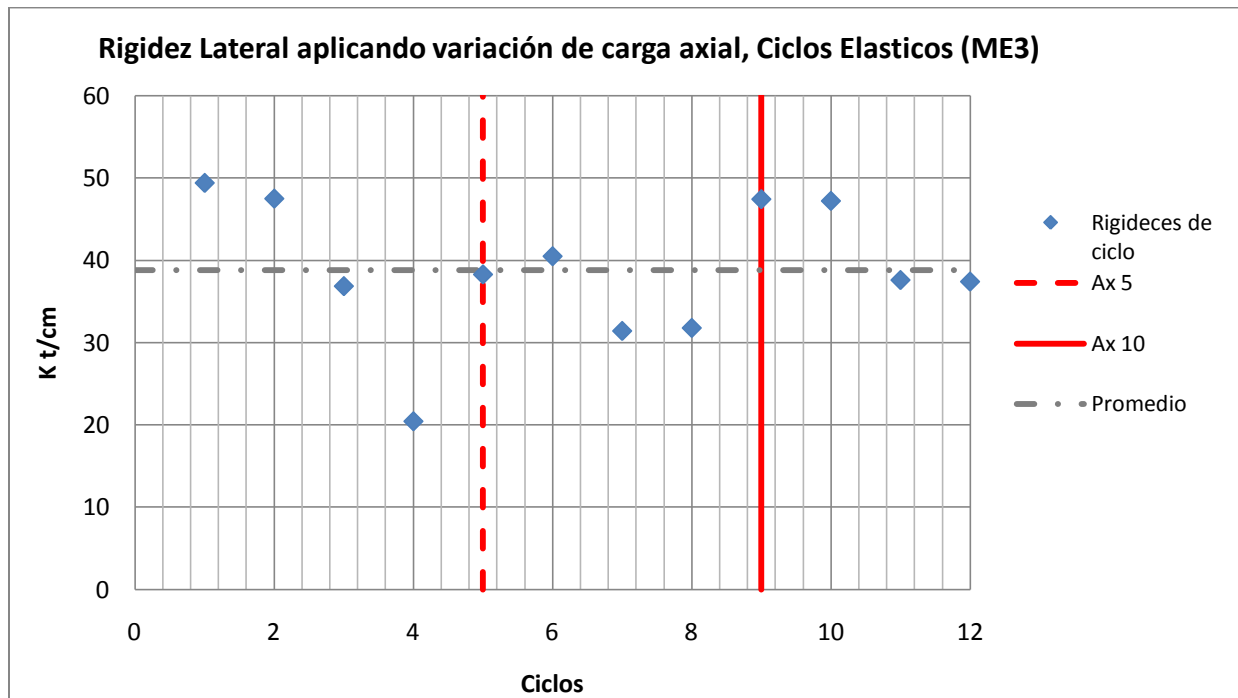


Fig. AC.3. Comportamiento de las rigideces laterales de acuerdo al nivel de carga vertical para ME3.

Para ME4

CICLO	σ (kg/cm ²)	K (t/cm)
1	0	99.62
2	0	85.95
3	0	76.98
4	0	71.30
5	0	91.38
6	2.5	90.86
7	2.5	79.10
8	2.5	81.87
9	5	85.26
10	5	90.22
11	5	76.56
12	5	74.22
13	10	80.72
14	10	80.60
15	10	74.36
16	10	75.19
PROMEDIO		82.14
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		0.09

Tabla AC.4. Rigideces laterales en ciclos iniciare con diferente carga axial para el modelo ME4

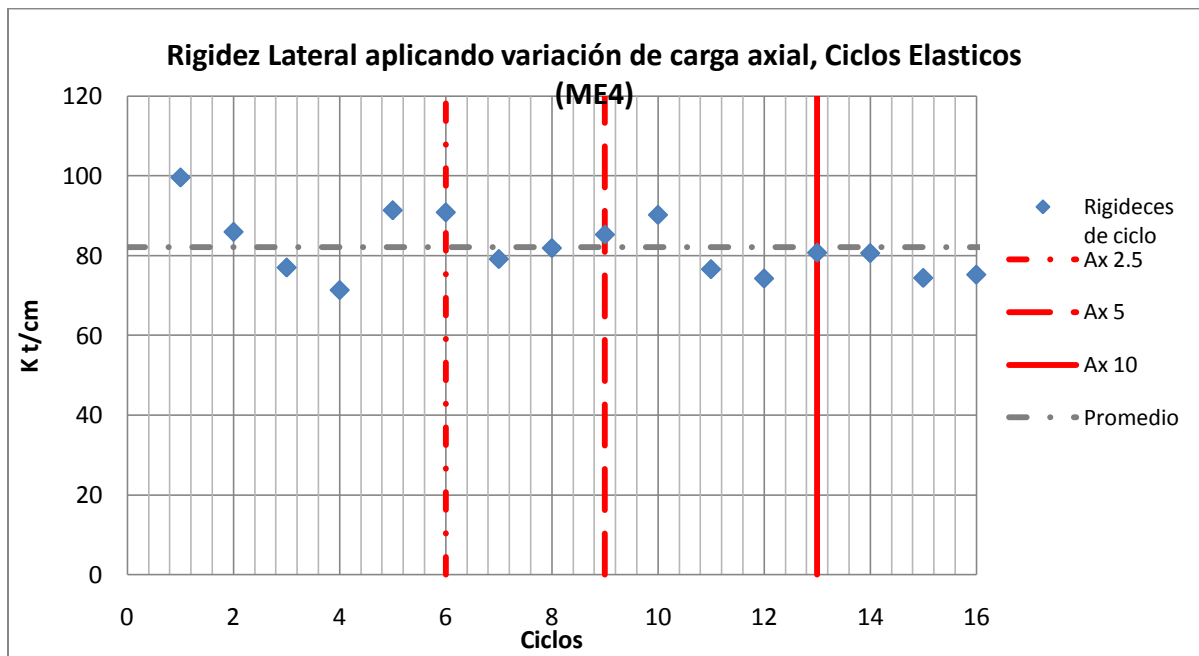


Fig. AC.4. Comportamiento de las rigideces laterales de acuerdo al nivel de carga vertical para ME4.

Para cada espécimen y para cada nivel de carga vertical se encontró que los primeros ciclos (al 25% de la carga de diseño estimada) registraron los mayores valores de rigidez que iban reduciéndose para los siguientes incrementos de deformación lateral (ciclos al 50% de la carga de diseño estimada).

Sin embargo, al incrementar la carga vertical, el patrón de reducción de la rigidez de ciclo se repitió para los mismos niveles de fuerzas laterales aplicadas, mostrando una tendencia a presentar las mismas rigideces de ciclo para todos los niveles de carga vertical impuestos.

C.2. CONCLUSIONES

Se observa una ligera reducción de la rigidez conforme se aplican ciclos a mayores caras y deformaciones, pero el comportamiento general no se ve afectado por el aumento del nivel de carga vertical para rangos entre 2.5 y 10 kg/cm² que cubren un amplio rango de construcciones de mampostería (edificios típicos entre 2 y 10 pisos). Por lo tanto no es necesario alterar el cálculo teórico de la rigidez lateral en función del nivel de carga vertical impuesto. Cabe hacer notar que en todos los ensaye se buscó aplicar niveles de carga tal que no se presentaran agrietamientos por flexión en la sección del muro.

Bibliografía

A. Ghali y A.M. Neville (1997), Análisis Estructural: Un enfoque unificado convencional y matricial. En: *Método del Elemento Finito*. Instituto Mexicano de Cemento y Concreto. México.

Agustín Demeneghi Colina (2000), Método del Elemento Finito. Análisis Lineal. Facultad de Ingeniería UNAM. México.

Edward J. Tarbuck (2005), Ciencias de la Tierra, 8va Edición, Pearson Hall. España.

Ernesto L. Treviño Treviño (2006), Caracterización experimental del comportamiento de muros de mampostería confinada de bloques de concreto sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles. En: *Estado del Conocimiento Sobre el Comportamiento y Criterios de Diseño de la Mampostería Confinada*. Tesis Doctoral, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba.

GDF (2004), Normas Técnicas Complementarias, Diseño y construcción de estructuras de Mampostería, Gaceta Oficial del Distrito Federal, 6 de Octubre de 2004.

GDF (2004), Normas Técnicas Complementarias, Diseño y construcción de estructuras de Concreto, Gaceta Oficial del Distrito Federal, 6 de Octubre de 2004.

Gobierno del Distrito Federal (2004), Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería, Gaceta Oficial del Distrito Federal, Tomo I, No. 103-Ter, 6 de octubre.

Héctor Gallegos, Horacio Ramírez de Alba (2002), Las Estructuras de Mampostería. Ingenieros Civiles Asociados, Fondo Nacional de Vivienda. México.

Hernández, O. (1998b). *Comportamiento de Muros Confinados Construidos con Tabique TABIMAX ante Cargas Laterales Alternadas*. Informe 01/98. Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Hernández, O., & Meli, R. (1977). *Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal con Comentarios y Ejemplos*. Informe No. 403. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

IMCA (2007), Manual de Construcción en Acero, 4ta edición, Limusa. México.

Juan José Pérez Gavilán E., Leonardo E. Flores C. y Osiel Cruz (2009), *Ensayo de muros de mampostería de distinta longitud: cinemática y rigidez lateral*. Memorias, Congreso de Ingeniería Sísmica Puebla, México.

Juan José Pérez Gavilán E., Leonardo E. Flores C. y Pablo Olalde G. (2008), *Ensaye de muros de mampostería confinada con diferente longitud y uso de piezas multiperforadas de arcilla*. Memorias. XVI Congreso de Ingeniería Estructural, Veracruz México.

Manuel A. Taveras M (2008), *Revisión de las recomendaciones para modelar y analizar estructuras de mampostería confinada ante carga lateral*. Tesis de maestría, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Meli Piralla (2007), *Diseño Estructural*, 2da edición. Limusa Editores. México

ONNCCE (1997), *Industria de la construcción – Concreto sometido a compresión – Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, Norma Mexicana NMX-C-128-ONNCCE.

ONNCCE b (2007), *Determinación de la resistencia a compresión diagonal y rigidez a cortante de muretes y la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de barro o de concreto- Método de ensayo*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, Proyecto de Norma Mexicana (en elaboración).

Oscar Hernández (1975), *Recomendaciones para el diseño y construcción de estructuras de mampostería*, Libro 351. Instituto de Ingeniería UNAM. México.

Paul E. Tippens (2001), *Física: Concepto y Aplicaciones*, en: *Elasticidad*. 6ta edición, Mc Graw Hill México.

San Bartolomé, A. (1994). *Construcciones de Albañilería. Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural*. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Sheldon M. Ross (2001), *Probabilidad y Estadística para ingenieros*. 2da edición. Mc Graw Hill. México.