

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA EN VIVIENDAS DE
MAMPOSTERIA EN ESTRATOS UNO Y DOS SEGÚN TIPIFICACIÓN
DE LA ESTRUCTURA



JAIRO ANDRES GIRALDO GALVIS
DAVID MAURICIO MENDEZ NIVIA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTA D.C
2006

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA EN VIVIENDAS DE
MAMPOSTERIA EN ESTRATOS UNO Y DOS SEGÚN TIPIFICACIÓN DE LA
ESTRUCTURA



JAIRO ANDRES GIRALDO GALVIS
DAVID MAURICIO MENDEZ NIVIA

Tesis para optar por el título de
Ingeniero Civil

Asesor:
Ing. Luis Eduardo Yamín L.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTA D.C
2006



TABLA DE CONTENIDO

OBJETIVOS	7
ALCANCE	8
INTRODUCCIÓN	9
CAPITULO 01: RIESGO SISMICO	11
1.1 VULNERABILIDAD SÍSMICA.....	11
1.2 DAÑOS EN EDIFICACIONES.....	12
1.3 EMPLAZAMIENTO TECTÓNICO EN COLOMBIA.....	12
CAPITULO 02: MAMPOSTERIA	14
2.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LA MAMPOSTERIA.....	14
2.1.1 Materiales.....	14
2.1.2 Elementos Primitivos de Construcción.....	16
2.1.3 Capacidad portante en edificios de un piso.....	17
2.1.4 Capacidad portante en edificios de varios pisos.....	17
2.2 MAMPOSTERIA CONTEMPORÁNEA.....	18
2.3 TIPOS DE CONSTRUCCIÓN EN MAMPOSTERIA.....	18
2.3.1 Mampostería no reforzada.....	19
2.3.2 Mampostería Reforzada.....	19
2.3.3 Sistemas Híbridos.....	20
CAPITULO 03: COMPORTAMIENTO SISMICO DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERIA NO REFORZADA	21
3.1 COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA NO REFORZADA ENTE CARGAS LATERALES.....	21
3.2 MECANISMOS DE FALLA ANTE CARGAS CÍCLICAS Y DINÁMICAS.....	21
3.2.1 Fallas fuera del plano.....	22
3.2.2 Fallas en el plano.....	22
CAPITULO 04: MALAS PRACTICAS EN LA MAMPOSTERIA	26
CAPITULO 05: TEORÍA DE LA MODELACIÓN A ESCALA	30
5.1 MODELACION FÍSICA EN OTRAS INGENIERÍAS.....	30
5.2 MODELOS ESTRUCTURALES.....	31
5.2.1 Definición.....	31
5.2.2 Clasificación de Modelos.....	31
5.3 VENTAJAS DE LA MODELACIÓN FÍSICA.....	32
5.4 DESVENTAJAS DE LA MODELACIÓN FÍSICA.....	33
5.5 PRECISIÓN DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES.....	33
5.6 TEORÍA DE MODELACION ESTRUCTURAL.....	34
5.6.1 Estructuras Sujetas a Cargas Dinámicas.....	34
5.6.2 Modelación de sismo.....	34
5.6.3 Simulación de Carga Gravitacional.....	36
CAPITULO 06: EQUIPOS UTILIZADOS PARA SIMULACION SISMICA	37
6.1 MESA VIBRATORIA.....	37
6.2 ACTUADOR HIDRÁULICO.....	37
6.3 EQUIPOS PARA ADQUISICIÓN DE DATOS.....	38
6.3.1 Montaje de equipos.....	39



CAPITULO 7: PROPIEDADES MECANICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LOS MODELOS.....	40
7.1 UNIDADES DE MAMPOSTERÍA	40
7.1.1 Resistencia a Compresión	40
7.1.2 Resistencia a Flexión	41
7.2 MURETES DE MAMPOSTERÍA.....	41
7.2.1 Compresión.....	41
7.2.2 Tracción Diagonal.....	42
7.2.3 Flexión (Tensión paralela a juntas verticales).....	43
7.2.4 Flexión (Tensión perpendicular a juntas verticales).....	43
7.3 ALAMBRE DE REFUERZO	44
7.4 MORTEROS Y CONCRETO	44
7.4.1 Resistencia a la Compresión del Mortero de Pega	44
7.4.2 Concreto	45
CAPITULO 8: MODELACIÓN EXPERIMENTAL A ESCALA REDUCIDA	46
8.1 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	48
8.2 MODELO 1: MODELO ESCALA 1:5 BLOQUE #5, MUROS SIN CONFINAMIENTO	49
8.2.1 Descripción.....	49
8.2.2 Resultados del ensayo	54
8.3 MODELO 2: MODELO A ESCALA 1:5 BLOQUE #5, MUROS CONFINADOS UNICAMENTE CON COLUMNAS	59
8.3.1 Descripción.....	59
8.3.2 Resultados de Ensayo	61
CAPITULO 9: FALLAS EN LOS MODELOS A ESCALA REDUCIDA.....	67
9.1 MODELO 1: MAMPOSTERÍA NO REFORZADA.....	67
9.2 MODELO 2: MUROS PARCIALMENTE CONFINADOS (SOLO COLUMNAS).....	71
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES.....	75
BIBLIOGRAFIA.....	76



INDICE DE FOTOS

IMAGEN 1.1 PRINCIPALES SISTEMAS DE CALLAMIENTO EN COLOMBIA	13
IMAGEN 2.2 MUROS HECHOS EN PIEDRA.....	15
IMAGEN 2.2 EDIFICACIÓN ANTIGUA DE VARIOS PISOS.....	18
IMAGEN 2.3 EJEMPLOS DE MAMPOSTERÍA REFORZADA	19
IMAGEN 2.4 EJEMPLO DE UN MURO CONFINADO Y SU COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL	20
IMAGEN 3.1 IZQUIERDA: FALLO FUERA DEL PLANO DE DOS MUROS EN EL SISMO DE LOMA PRIETA (HTTP://NISEE.BERKELEY.EDU)	22
IMAGEN 3.2 DERECHA: FALLO DE UN MURO EN LA PARTE SUPERIOR DEL EDIFICIO POR MALA CONEXIÓN. SISMO DE CHILE (HTTP://NISEE.BERKELEY.EDU).....	22
IMAGEN 3.3 GRIETAS FORMADAS POR TENSIÓN DIAGONAL (HTTP://NISEE.BERKELEY.EDU)	23
IMAGEN 3.4 EJEMPLO DE FALLAS POR FLEXIÓN (HTTP://NISEE.BERKELEY.EDU).....	23
IMAGEN 3.5 FALLAS CUANDO EL MORTERO ES MÁS RESISTENTE QUE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA	24
IMAGEN 3.6 FALLAS CUANDO LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA SON MÁS FUERTES QUE EL MORTERO)	24
IMAGEN 3.7 OTROS TIPOS DE FALLA EN LA MAMPOSTERÍA (FALLAS DIAGONALES).....	25
IMAGEN 3.8 OTROS TIPOS DE FALLA EN LA MAMPOSTERÍA (FALLA EN LAS ESQUINAS).....	25
IMAGEN 4.1 ESTRATIFICACIÓN SOCIOECONÓMICA Y MICRO ZONIFICACIÓN DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ.....	26
IMAGEN 4.2 EJEMPLO DE VIVIENDAS CONSTRUIDAS EN MAMPOSTERÍA NO REFORZADA	27
IMAGEN 4.3 EJEMPLOS DE DEFICIENCIAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA	27
IMAGEN 4.4 EJEMPLO DE COMBINACIÓN ERRÓNEA DE SISTEMAS EN LA CONSTRUCCIÓN CON MAMPOSTERÍA	28
IMAGEN 4.5 OTROS EJEMPLOS DE MALAS PRÁCTICAS EN LA CONSTRUCCIÓN CON MAMPOSTERÍA	29
IMAGEN 6.1 MESA VIBRATORIA	37
IMAGEN 6.2 ACTUADOR HIDRÁULICO	38
IMAGEN 6.3 LVDT (IZQUIERDA) Y ACELERÓMETRO (DERECHA).....	38
IMAGEN 6.4 UBICACIÓN DE EQUIPOS EN EL MODELO.....	39
IMAGEN 7.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA	40
IMAGEN 7.2 RESISTENCIA A FLEXIÓN DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA	41
IMAGEN 7.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MURETES	41
IMAGEN 7.4 ENSAYO DE TRACCIÓN DIAGONAL A MURETES	42



IMAGEN 7.5 ENSAYO DE FLEXIÓN CON TENSIÓN PERPENDICULAR A JUNTAS VERTICALES	43
IMAGEN 7.6 ENSAYO DE COMPRESIÓN A MORTERO DE PEGA	44
IMAGEN 7.7 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CONCRETO	45
IMAGEN 8.1 BLOQUE DE ARCILLA Y MOLINO	50
IMAGEN 8.2 ARCILLA MOLIDA	50
IMAGEN 8.3 MEZCLA DE ARCILLA Y ACEITE	50
IMAGEN 8.4 EXTRUSORA	51
IMAGEN 8.5 CORTE DE LADRILLOS	51
IMAGEN 8.6 SECA DO DE LA DRILLOS	51
IMAGEN 8.7 HORNO ELECTRIC O (IZQUIERDA) Y HORNO DE LEÑA (DERECHA)	51
IMAGEN 8.8 VIGA EXISTENTE	52
IMAGEN 8.9 CONSTRUCCIÓN DE MUROS DE MAMPOSTERÍA	52
IMAGEN 8.10 CONSTRUCCIÓN PLACA DE ENTREPISO	53
IMAGEN 8.11 MONTAJE DE PLACA	53
IMAGEN 8.12 MODELO1 CON PESO ADICIONAL SOBRE LA PLACA	54
IMAGEN 8.13 ^a REFUERZO DE LA CIMENTACIÓN	59
IMAGEN 8.13B CONSTRUCCIÓN DE LA CIMENTACIÓN	60
IMAGEN 8.14 CONSTRUCCIÓN DE MUROS	60
IMAGEN 8.15 VACIADO DE LAS COLUMNAS	60
IMAGEN 8.16 MODELO 2	61
IMAGEN 8.17 CUBIERTA DE MADERA	61
IMAGEN 9.1 NOMENCLATURA PARA MUROS DE MODELO 1	67
IMAGEN 9.2 PRIMERAS FALLAS EN EL MODELO	67
IMAGEN 9.3 FALLAS MUROS C Y D	69
IMAGEN 9.4 FALLAS MURO A	69
IMAGEN 9.5 FALLA MURO B	70
IMAGEN 9.6 SECUENCIA DEL COLAPSO DE LA ESTRUCTURA	70
IMAGEN 9.7 NOMENCLATURA PARA MUROS DE MODELO 2	71
IMAGEN 9.8 FALLA INICIAL EN LA DRILLO QUE SOSTIENE LA CUBIERTA	71
IMAGEN 9.9 FALLAS FUERA DEL PLANO DE MURO B (SUPERIOR) Y MURO C (INFERIOR)	72
IMAGEN 9.10 FALLAS POR CORTANTE DEL MURO A	72
IMAGEN 9.11 SEMEJANZA EN EL MECANISMO DE FALIA DE TODOS LOS MUROS	73



INDICE TABLAS

TABLA 5.1 FACTORES DE ESCALA SEGÚN LEY DE ESCALAMIENTO.....	35
TABLA 6.1 ESPECIFICACIONES DEL ACTUADOR DINAMICO.....	38
TABLA 7.1 COMPRESIÓN UNIDADES DE MAMPOSTERÍA.....	40
TABLA 7.2 RESISTENCIA A FLEXIÓN DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA.....	41
TABLA 7.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MURETES.....	42
TABLA 7.4 ENSAYO DE TRACCIÓN DIAGONAL A MURETES.....	42
TABLA 7.5 ENSAYO FLEXIÓN EN MURETES (TENSIÓN PARALELA A JUNTAS VERTICALES).....	43
TABLA 7.6 ENSAYO DE FLEXIÓN CON TENSIÓN PERPENDICULAR A JUNTAS VERTICALES.....	43
TABLA 7.7 ALAMBRE DE REFUERZO.....	44
TABLA 7.8 COMPRESIÓN DE MORTERO.....	44
TABLA 7.9 COMPRESIÓN DE CONCRETO.....	45
TABLA 8.1 SECUENCIA DEL ENSAYO MODELO 1.....	58
TABLA 8.2 SECUENCIA DEL ENSAYO MODELO 2.....	66



INDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 8.1 REGISTRO ORIGINAL DEL ACCELERACIÓN	47
GRÁFICA 8.2 REGISTRO ORIGINAL DE DESPLAZAMIENTO.....	47
GRÁFICA 8.3 REGISTRO ESCALADO DE ACCELERACIÓN.....	47
GRÁFICA 8.4 REGISTRO ESCALADO DE DESPLAZAMIENTO.....	48
GRÁFICA 8.5 HISTORIA DE CORTANTE EN LA BASE DEL MODELO1	54
GRÁFICA 8.6 HISTORIA DE ACCELERACIÓN EN LA BASE DE LA MESA DEL MODELO1 ..55	
GRÁFICA 8.7 HISTORIA DE ACCELERACIÓN EN LA PARTE SUPERIOR DEL MODELO (EN LA DIRECCIÓN DEL MOVIMIENTO) DEL MODELO1	55
GRÁFICA 8.8 HISTORIA DE ACCELERACIÓN EN LA PARTE SUPERIOR DEL MODELO1 (EN LA DIRECCIÓN PERPENDICULAR AL MOVIMIENTO)	55
GRÁFICA 8.9 HISTORIA DE DESPLAZAMIENTO EN LA BASE DE LA MESA DEL MODELO1.....	56
GRÁFICA 8.10 HISTORIA DE DESPLAZAMIENTO EN LA PARTE SUPERIOR DEL MODELO1.....	56
GRÁFICA 8.11 HISTORIA DE DESPLAZAMIENTO RELATIVO EN LA PARTE SUPERIOR DEL MODELO1	56
GRÁFICA 8.12 CURVA HISTERÉTICA DEL MODELO1.....	57
GRÁFICA 8.12 ESTIMATIVO DE LA CAPACIDAD INTRÍNSECA DE AMORTIGUAMIENTO CON RESPECTO AL CRÍTICO DEL MODELO1	57
GRÁFICA 8.13 HISTORIA DE CORTANTE EN LA BASE DEL MODELO DEL MODELO2	62
GRÁFICA 8.14 HISTORIA DE ACCELERACIÓN EN LA BASE DE LA MESA DEL MODELO2	62
GRÁFICA 8.15 HISTORIA DE ACCELERACIÓN EN LA PARTE SUPERIOR DEL MODELO2 (DIRECCIÓN DEL MOVIMIENTO).....	63
GRÁFICA 8.16 HISTORIA DE ACCELERACIÓN EN LA PARTE SUPERIOR DEL MODELO2 (DIRECCIÓN PERPENDICULAR AL MOVIMIENTO).....	63
GRÁFICA 8.17 HISTORIA DE DESPLAZAMIENTO EN LA BASE DE LA MESA DEL MODELO2.....	63
GRÁFICA 8.18 HISTORIA DE DESPLAZAMIENTO EN LA PARTE SUPERIOR DEL MODELO2.....	64
GRÁFICA 8.19 HISTORIA DE DESPLAZAMIENTO RELATIVO DE LA PARTE SUPERIOR DEL MODELO2	64
GRÁFICA 8.20 CURVA HISTERÉTICA DEL MODELO2.....	64
GRÁFICA 8.21 ESTIMATIVO DE LA CAPACIDAD INTRÍNSECA DE AMORTIGUAMIENTO CON RESPECTO AL CRÍTICO DEL MODELO2	65



OBJETIVOS

Objetivo General

El objetivo general de este proyecto de grado es el de observar la vulnerabilidad de sistemas de mampostería no reforzada que no cumplen con las Normas Colombianas de diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-98) en estratos 1 y 2 localizados en zonas de riesgo sísmico medio-alto en la ciudad de Bogotá, mediante modelos a escala reducida sometidos a carga sísmica en la base.

Objetivos Específicos

- Recopilar información sobre aspectos generales de la mampostería
- Recopilar y analizar información existente sobre el comportamiento dinámico de edificaciones en mampostería no reforzada.
- Resaltar la importancia y el porqué del estudio del comportamiento sísmico de estructuras en Colombia.
- Recopilar información sobre la teoría de la modelación física a escala reducida.
- Identificar casos típicos de falta de normatividad en construcciones de mampostería no reforzada en estratos uno y dos.
- Definir, construir y ensayar, sobre la mesa vibratoria, dos modelos de edificación típica con faltas en normatividad (NSR-98), a escala, en mampostería no reforzada, bajo los lineamientos establecidos en la modelación a escala
- Realizar una caracterización general de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales empleados en la construcción de los modelos a escala reducida.
- Analizar la mecánica de falla de los modelos.



ALCANCE

Identificar la vulnerabilidad de edificaciones de mampostería no reforzada con falta a las Normas Colombianas de diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-98), y dar recomendaciones según sus mecanismos de falla para la posible rehabilitación de este tipo de construcciones con el fin de disminuir la vulnerabilidad sísmica de estas para poder evitar o por lo menos evitar un gran número de pérdidas humanas y económicas que se puedan presentar tras la ocurrencia de un sismo.



INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá al estar ubicada en una zona de riesgos sísmico medio-alto, es muy vulnerable ante una eventualidad de sismo. Aunque la totalidad de su extensión geográfica no presenta riesgo medio alto, las zonas de estrato socio económico 1 y 2 si se encuentran localizadas en su gran mayoría en áreas con ese riesgo.

En estas zonas es muy común el uso de mampostería como material de construcción. Además es muy frecuente observar errores de construcción que se cometen en la aplicación de sistemas estructurales de mampostería no reforzada. Por esta razón se decidió investigar el daño que pueden sufrir estas estructuras ante una eventualidad de sismo.

Es muy común observar en estas edificaciones que los muros divisorios y de fachada son utilizados como elementos estructurales, como se ve en el caso de muros de carga y mampostería confinada. En su mayoría estas construcciones tienen un sistema estructural basado en muros de carga, los cuales están contruidos sin ningún tipo de refuerzo, y en el caso de construcciones de mampostería confinada, los elementos de confinamiento son incompletos, es decir solo se hacen columnas sin vigas de amarre, o están dispuestos de tal forma que el muro confinado es de gran área. Estas características constructivas son de un alto riesgo para los habitantes de estas edificaciones.

El propósito de este proyecto es comprender el comportamiento sísmico de la mampostería no reforzada en especial el de los sistemas que se alejan del cumplimiento de la normatividad de la NSR-98, para lo cual se realizaron ensayos dinámicos en la mesa vibratoria, sobre modelos a escala reducida, tratando de representar las estructuras lo más similar posible a la realidad en cuanto a comportamiento estructural se refiere.

A partir de las leyes de modelación física a escala, en este caso la ley de modelación con masa adicional, se diseñaron y se construyeron dos modelos en escala 1:5. El primero representa una casa cuyo sistema estructural corresponde a muros de carga, y el segundo un sistema de muros confinados solo con columnas.

Este documento inicia con una descripción básica de los aspectos generales de riesgo sísmico. Luego presenta un recuento sobre mampostería, en el cual se encuentra historia, actualidad y sistemas de construcción en mampostería. A continuación se describe el comportamiento dinámico de construcciones en mampostería no reforzada mencionando los tipos de falla que esta presenta. Después se hace una presentación de las malas prácticas en mampostería no reforzada con el fin de plantear lo que se quiere mostrar con este proyecto. Enseguida se hará un breve resumen sobre la teoría de modelación a escala, enfocado principalmente a las leyes de similitud que se deben aplicar a este estudio. Se hará una descripción de los equipos utilizados para la aplicación de cargas de sismo y los dispositivos utilizados para la toma de datos de los ensayos en la mesa vibratoria. Se presentaran las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la construcción de los modelos a escala reducida. Se muestra la descripción de los dos modelos a escala 1:5 y el procedimiento de ensayo de estos. Por



ultimo se describen las formas de falla que se presentaron en los modelos y se presentan las conclusiones y recomendaciones sobre los sistemas de mampostería fallados.



CAPITULO 1: RIESGO SISMICO

Cuando hablamos de riesgo sísmico hay que tener en cuenta tres términos que van de la mano con este término: Vulnerabilidad sísmica, peligrosidad sísmica y riesgo sísmico como tal. Debido a la relación directa de estos términos se debe encontrar una definición estándar que permita distinguirlos para su correcto uso. Para este fin se utilizarán las definiciones que algunos comités como el Instituto de Investigaciones en Ingeniería Sísmica (EERI), la Asociación Europea de Ingeniería Sísmica (EAEE), la Comisión de Seguridad Sísmica de California (CSSC), el Servicio Geológico de los U.S (USGS), ya que estos han implementado una nomenclatura dentro de el área de la sismología e ingeniería sísmica, que permiten aclarar las diferencias existentes. En base a esto el riesgo, la vulnerabilidad y la peligrosidad sísmica se pueden definir como:

- *Riesgo Sísmico*: “Son las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado de la falla de estructuras cuya capacidad resistente fue excedida por un terremoto”.
- *Vulnerabilidad sísmica*: “Es un valor único que permite clasificar a las estructuras de acuerdo a la calidad estructural intrínseca de las mismas, entre un rango de nada vulnerable a muy vulnerable ante la acción de un terremoto”.
- *Peligrosidad sísmica*: “Es la probabilidad de que ocurra un fenómeno físico como consecuencia de un terremoto, provocando efectos adversos a la actividad humana. Estos fenómenos además del movimiento de terreno pueden ser, la falla del terreno, la deformación tectónica, la licuefacción, inundaciones, tsunamis, etc.”.

1.1 Vulnerabilidad sísmica

Existen estructuras de una misma tipología que pueden sufrir un mayor grado de daño debido a un terremoto a pesar de ubicarse en el mismo sitio. Esto se debe a que existen estructuras con una calidad estructural mejor que otras, por lo tanto su vulnerabilidad es menor. Por ende se puede decir que la vulnerabilidad sísmica de una estructura es la capacidad de sus elementos estructurales para resistir un terremoto.

El que una estructura sea más o menos vulnerable ante un terremoto es una propiedad intrínseca de cada estructura, es decir, es independiente de la peligrosidad sísmica del sitio en que estén ubicadas, por lo tanto, una estructura puede ser vulnerable pero no estar en riesgo, amén que se encuentre en un sitio con una cierta peligrosidad sísmica.

La vulnerabilidad sísmica se puede evaluar de una manera específica realizando un estudio exhaustivo de las estructuras a evaluar o de manera muy general, como puede ser mediante un estudio de vulnerabilidad a nivel urbano. El conocimiento del



comportamiento de una estructura es generalmente complejo, e incluye algunos parámetros como son: características del movimiento sísmico donde está la estructura, la resistencia de materiales con que está construida la estructura, la calidad de la construcción, entre otros.

A diferencia de lo anterior la realización de estudios a nivel urbano, se puede reducir el conocimiento de algunos parámetros básicos para clasificar la estructura, o en otras palabras, la calidad de la estructura.

Debido a las características de este proyecto, nos acercaremos un poco más al estudio de vulnerabilidad detallado de estructuras que se mencionarán posteriormente.

1.2 Daños en edificaciones

El daño en las edificaciones es un fenómeno que es muy difícil de modelar analíticamente o reproducir en laboratorios, que afecta cualquier tipo de estructura. En cuanto a las edificaciones se refiere, existen tres tipos principales de daños:

- Daño estructural: Es el daño de mayor importancia que se puede presentar en una estructura. La ocurrencia de estos daños puede generar desde grandes costos de reparación, hasta la pérdida de vidas humanas por el colapso de la estructura. El daño estructural depende del comportamiento de los elementos resistentes de la estructura como son vigas, columnas, muros de carga, y sistemas de entrepiso. El comportamiento de estos depende con la calidad de los materiales con los que se construyen estos elementos, su configuración, y tipo de sistema resistente, y obviamente las cargas que actúan en ellos.
- Daño no estructural: Este tipo de daño, como su nombre lo indica afecta los elementos que no forman parte del sistema resistente, entre estos están, muros divisorios, ventanales, marcos, etc. A pesar de que este tipo de daño no arriesga la estabilidad de la estructura, si causa pérdidas económicas y en algunos casos pérdidas humanas como puede suceder con el colapso de un muro divisorio.
- Daño económico: Es una forma de relacionar el índice de daño estructural con las pérdidas económicas de un edificio debido a un sismo.

Según las características de este proyecto, el enfoque será llevado hacia el análisis de los daños estructurales.

1.3 Emplazamiento tectónico en Colombia

Es importante entender por qué es necesario evaluar factores como el riesgo sísmico y la vulnerabilidad de estructuras ante un evento de sismo en Colombia. Esto se hace evidente cuando vemos la ubicación geográfica de Colombia y su emplazamiento sísmico



tectónico. Para entender de una mejor manera la situación de nuestro país ante un evento de sismo la NSR 98 en su Prefacio nos brinda un enfoque resumido de las principales características de la ubicación sísmo tectónica de Colombia:

“Colombia está localizada dentro de una de las zonas sísmicas más activas de la Tierra, la cual se denomina Anillo Circum-pacífico y corresponde a los bordes de Océano Pacífico. El emplazamiento tectónico de Colombia es complejo pues en su territorio convergen la Placa de Nazca, la Placa Suramericana, y la Placa Caribe. El límite entre las placas Suramericana y Caribe está aún indefinido.

El movimiento predominante en el país tiene dirección norte-sur, coincidiendo con la dirección de las tres cordilleras. El principal accidente sísmo tectónico es la subducción en el océano Pacífico. Es causada por el doblamiento de la Placa de Nazca cuando subduce bajo la Placa Suramericana. Además de la zona de subducción existen en el territorio nacional un gran número de fallas geológicas sísmicamente activas. “

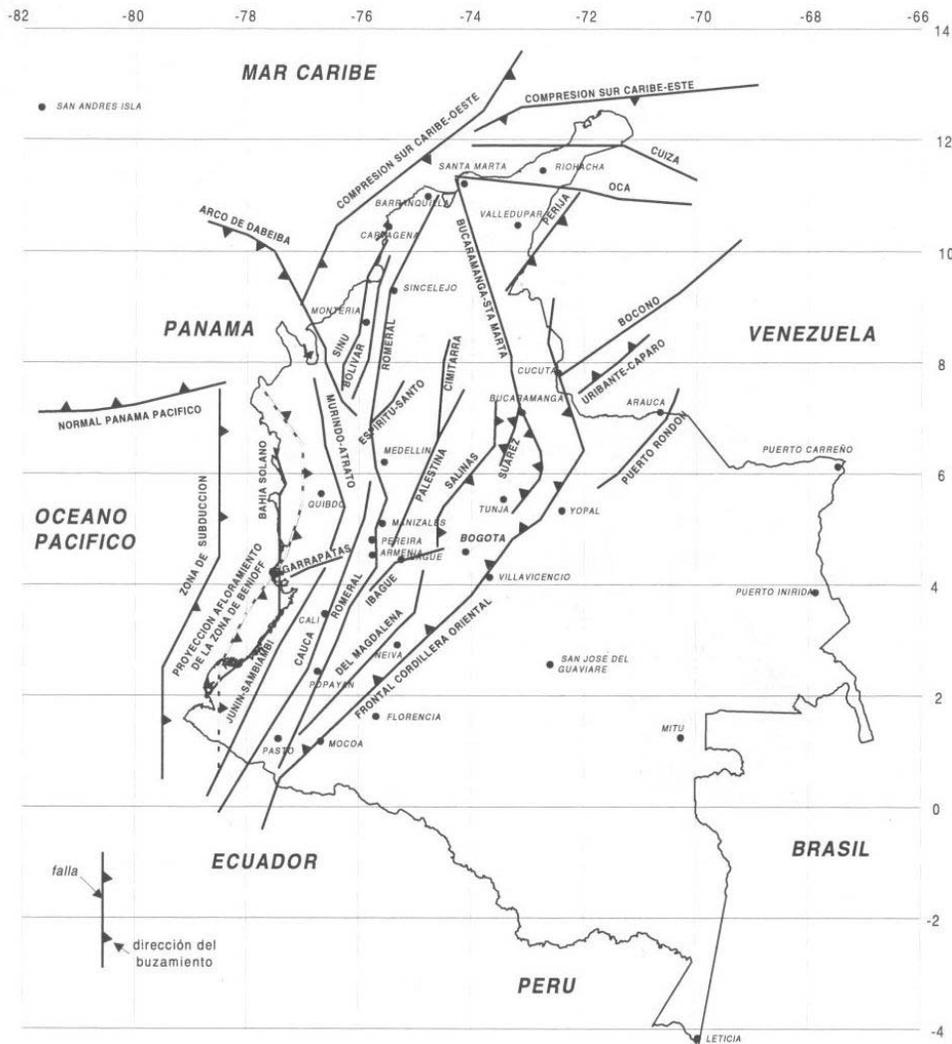


Imagen 1.1 Principales sistemas de fallamiento en Colombia



CAPÍTULO 2: MAMPOSTERÍA

La mampostería es la unión de bloques o ladrillos de arcilla o de concreto con un mortero para conformar sistemas monolíticos tipo muro, que pueden resistir acciones producidas por las cargas de gravedad o las acciones de sismo o viento.

Existen ejemplos de construcciones en mampostería de formas estructurales sofisticadas, desde un punto de vista analítico, que se remontan a unos 10.000 años atrás. Estas estructuras, hoy en día, incluso con todos los avances tecnológicos, maquinaria, habilidades de diseño, y materiales serían muy complicadas de duplicar. Por lo anterior es necesario hacer un breve recuento de la mampostería antigua para poder darle un contexto a la construcción actual.

2.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LA MAMPOSTERÍA

El desarrollo de estructuras en mampostería a través del tiempo se ha restringido debido a la disponibilidad de materiales, a las habilidades de construcción, habilidades de diseño ya sean analíticas o intuitivas, y al costo. La importancia de cada uno de estos aspectos ha variado con el paso de los años.

Muchos materiales han sido utilizados en la construcción de la mampostería, siendo los de mayor disponibilidad en zonas aledañas los más comunes para cada civilización. Por ejemplo cuando existían civilizaciones establecidas cerca a montañas rocosas, se usaba la piedra, en las regiones árticas, se usaban bloques de hielo para la construcción de iglesias.

2.1.1 Materiales

Los materiales comúnmente utilizados hoy en día en la mampostería, vienen de la piedra, arcilla, silicato de calcio y concreto. A continuación una breve descripción de los antecedentes de dichos materiales:

Piedra: Vestigios de muros hechos en piedra muestran que estos se construían apilando piedras naturales y en algunos casos utilizando tierra que se introducía entre las cavidades de estas actuando como un tipo de mortero. A medida que se desarrollaron herramientas se fueron labrando piedras de menor tamaño y diferentes formas que se colocaron en los espacios que dejaban las piedras de mayor tamaño y esto se pegaba con arcilla. Conforme las habilidades de construcción avanzaron, se empezaron elaborar piedras de formas poligonales generando ángulos. Al unirse estas piezas estos ángulos generaban uniones muy precisas que le daban rigidez a la estructura. En estos casos se usaba un mortero de limo de poco espesor o simplemente se colocaban las piedras secas.



El uso de herramientas más poderosas y explosivos ha simplificado la elaboración de las piezas en piedra para mampostería, pero sin embargo el uso de este tipo de material, se restringe a un uso más que todo decorativo más no estructural.

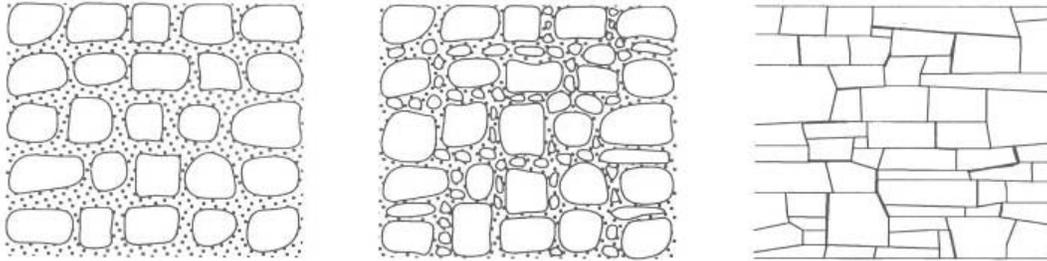


Imagen 2.2 Muros hechos en piedra

Arcilla: Los ladrillos de arcilla se han utilizado desde por lo menos hace 10.000 años atrás, y posiblemente desde hace 12.000 años. Los ladrillos secados al sol fueron ampliamente utilizados por babilonios, egipcios, españoles e indígenas sur americanos. Este amplio uso se ilustra a través del uso de la palabra “Adobe” que es una palabra que viene del árabe “Atob” que significa ladrillo secado al sol.

Los primeros ladrillos se hacían presionando arcilla en pequeños terrones que se dejaban secando al sol. Estos se unían con barro. Para el año 3000 A.C. las unidades de ladrillo eran hechas a mano en moldes con paja incorporada para darle una mayor resistencia. Durante ese tiempo fue descubierto que cocinar el ladrillo aumentaba la resistencia y la durabilidad de este.

La elaboración de ladrillos en Europa, desde tiempos de los Romanos hasta hace unos siglos atrás, era un proceso lento, ya que se requería que el ladrillo tuviera cinco años antes de que fuera utilizado para la construcción. Actualmente los materiales arcillosos utilizados para la elaboración de ladrillo, se mezclan con agua para tener una masa homogénea que se pasa por un molde mediante una extrusora para darle la forma deseada. Aunque la primera máquina para construir ladrillos se patentó en 1619, el punto de giro para la producción mecánica de ladrillos vino en 1858 con la introducción del horno de Hoffman, el cual permitió que los ladrillos se produjeran de una manera continua. Actualmente todo el proceso de elaboración de ladrillos dura aproximadamente una semana.

Unidades de Silicato de calcio: Estas unidades se construían en la antigüedad moldeando limos en forma de ladrillo y dejándolos secar al sol y al aire. Sin embargo este proceso era muy lento y en 1866 en Estados Unidos, a través de la aplicación de vapor este se logró acelerar, aunque no era tan rápido como se esperaba. En 1894 en Alemania se hicieron nuevos avances al curar los ladrillos con vapor a presión. Como resultado de esto se dio una rápida y práctica producción de ladrillos de silicato de calcio. Este tipo de unidades se introdujo en casi todos los países del mundo y aun siguen siendo producidos.



Unidades de Concreto: Las primeras unidades de mampostería en concreto se hicieron a mediados del siglo XIX a medida que se desarrollaban cementos de mejor calidad. Sin embargo las primeras unidades no fueron muy populares ya que eran muy pesados y difíciles de manejar ya que eran macizos. En 1866 se desarrolló una técnica de elaborar bloques huecos con moldes hechos en madera. A partir de estos primeros modelos se han desarrollado técnicas en cuanto al desmolde, a la compactación (que después sería reemplazada por la vibración), al curado, diferentes formas de los bloques, hasta llegar a los procesos totalmente automatizados que se tienen hoy en día.

Morteros: Los primeros morteros se utilizaron principalmente para rellenar grietas y para proveer de una superficie uniforme a las unidades de mampostería que se iban a apilar. Alguno de estos materiales pudieron haber sido arcilla, bitumen, mezclas de arcilla y paja, etc. Sus características de meteorización dependían mucho de las condiciones de exposición locales.

Los predecesores de los morteros modernos datan del uso de yeso calcinado, limo y pozolona natural. Griegos y romanos añadieron limo y agua al yeso calcinado, junto con arena y piedra molida, produciendo así los primeros tipos de concreto. Los morteros de limos no endurecían al combinarlos con agua, pero al unir limos con cenizas volcánicas, se producía lo que se dio a conocer como cemento pozolono. Un claro ejemplo del uso de este tipo de cemento es el Coliseo Romano.

Solo hasta el siglo XVIII se hicieron avances significativos en cuanto a materia de cementos y morteros, cuando John Smeaton mezcló pozolona con piedra caliza para producir un mortero durable que se endurece al mezclarse con agua. El siguiente paso importante se dio cuando Joseph Aspdin a principios del siglo XIX logró manufacturar y patentar el cemento Portland. Actualmente al mezclar cemento Portland con arena, limos y agua se logra obtener morteros de diferentes características según la proporciones usadas en la mezcla.

2.1.2 Elementos Primitivos de Construcción

Existen dos problemas estructurales principales al construir, lograr dar altura y generar espacios horizontalmente al interior de la estructura. En mampostería la primera se logra utilizando columnas, muros y torres. Antiguamente desde tiempos del hombre Cromagnon se acostumbraba simplemente apilar piedras una encima de otra para lograr altura. Entre más plana sea la pieza mayor estabilidad esta tendrá. Está demostrado que se podrían apilar unidades de mampostería hasta de una milla de altura, sin que las unidades de la primera línea sean aplastadas sin embargo esto es prácticamente imposible debido a factores de alineación y de fuerzas de viento o de sismo que comprometerían seriamente la estabilidad de la estructura.

Entre las primeras estructuras que intentaron alcanzar alturas considerables se encuentran las Pirámides. Las primeras pirámides se construyeron alrededor de 3000 años A.C. sin embargo el auge de la construcción de pirámides llegó hasta 2580 años A.C. utilizando piedra sobre mortero llegando a construir la Gran pirámide de Keops



que tiene 147 metros de altura, la cual fue la estructura más alta hasta el siglo XX. En Centro y Sur América también se construyeron estructuras semejantes.

Por otro lado como se mencionaba anteriormente, también se construyeron muros de un tamaño considerable utilizando distintos tipos de mampostería, que se utilizaban como muros de contención, para proteger comunidades, etc., por lo cual eran muy comunes. Otro ejemplo de intentar conseguir altura en las estructuras son las torres. En la antigüedad estas tenían muchas aplicaciones, sobre todo en cuanto a términos de defensa se refiere. Estas estructuras eran relativamente económicas en el uso de materiales, sin embargo siguen siendo consideradas estructuras masivas para los estándares de diseño modernos, ya que se han llegado a encontrar ejemplos de torres que llegan a tener muros de hasta 2 metros de espesor en la base, lo cual en la mayoría de los casos genera asentamientos.

En cuanto a los elementos horizontales encontramos la aplicación del uso de dinteles o vigas hechos con troncos de madera o con piedras de gran tamaño para evitar la fractura. También el uso de arcos que van desde arcos primitivos hechos simplemente de rocas una apoyada sobre la otra, hasta arcos más complejos utilizando elementos de mampostería más detallada.

2.1.3 Capacidad portante en edificios de un piso

Las construcciones contemporáneas de mampostería de un solo piso se han desarrollado a partir de antiguos edificios como lo de los Romanos en los primeros cuatro siglos D.C. Las viviendas más pequeñas de la época consistían de un cuarto con una abertura en el frente formada por muros de mampostería que soportaban un tronco de madera y un techo enchapado en azulejos de arcilla quemada. Dichos muros eran hechos para soportar la carga del techo pero los esfuerzos generados por esta carga eran casi despreciables. La función principal de estos muros era la de soportar cargas laterales como las de viento y de sismo. Esto era logrado gracias al uso de muros muy gruesos que eran reforzados en los bordes para mejorar su estabilidad bajo cargas laterales.

2.1.4 Capacidad portante en edificios de varios pisos

Los Romanos también construyeron su propia versión de edificios de vivienda de varios pisos durante el primer siglo D.C. Estos bloques de apartamentos eran generalmente de 5 o 6 pisos de altura. Un bloque era generalmente un plano rectangular subdividido, en habitaciones, corredores y escaleras, por paredes de un metro de grosor enchapadas en ladrillo. La naturaleza de estas estructuras aseguraba la estabilidad estructural contra cargas laterales como sismo o viento. Gracias a que la construcción de estos es similar a la usada hoy en día, estos antiguos edificios tienen una apariencia asombrosamente moderna. Para edificios de pocos pisos de altura los principios estructurales han cambiado muy poco desde esas épocas.

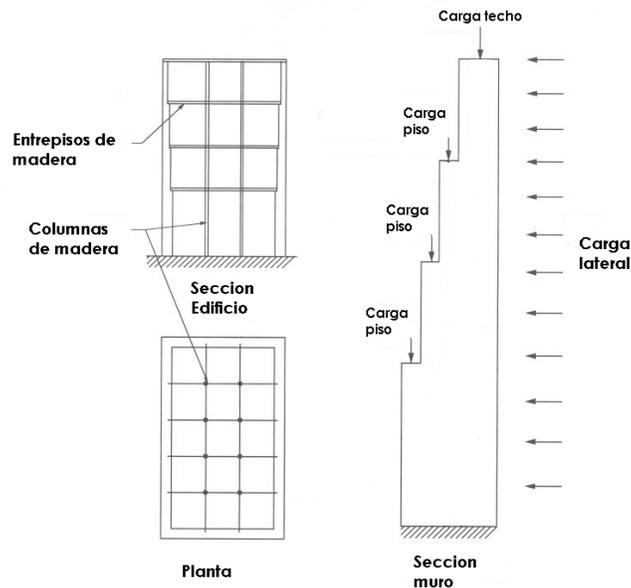


Imagen 2.2 Edificación antigua de varios pisos

2.2 MAMPOSTERÍA CONTEMPORÁNEA

Como se mencionó anteriormente en la mampostería tradicional, se diseñaba utilizando el peso de los entrepisos y las paredes masivas para prevenir esfuerzos tensores causados por la excentricidad de cargas verticales y cargas laterales. Al asegurar la estabilidad lateral mediante el uso de la gravedad únicamente, se genera un límite económico en el tamaño de las estructuras de mampostería. Este hecho ha llevado a diseñadores y constructores a buscar maneras de disminuir el grosor de los muros manteniendo a la vez la estabilidad estructural.

Las mejoras significativas en materiales de mampostería y los avances en manufactura, métodos de diseño, y técnicas de construcción han contribuido al crecimiento de la mampostería como un sistema de edificación contemporáneo de costo-eficiencia. Hoy en día unidades de alta resistencia con una amplia variedad de formas, colores y texturas se encuentran disponibles. Las características térmicas, de humedad y sonido han sido mejoradas y morteros listos para mezclar se han desarrollado para un mejor control de calidad y una construcción más rápida y eficiente.

El desarrollo de la mampostería reforzada y la mampostería confinada ha contribuido significativamente al uso de este sistema en áreas de alta actividad sísmica y para el uso eficiente en muchas aplicaciones generales.

2.3 TIPOS DE CONSTRUCCIÓN EN MAMPOSTERÍA

Cada sistema descrito en la sección 1.1.3 y 1.1.4 es de mampostería no reforzada. Desde que se han reducido los espesores de los muros y se han incrementado las distancias



entre soportes, se empezaron a introducir sistemas como la mampostería reforzada, preesforzada y confinada.

2.3.1 Mampostería no reforzada

Este tipo de mampostería ha sido comúnmente utilizado en construcciones de mediana y baja altura y en áreas de baja actividad sísmica. Los elementos de mampostería no reforzada son los más simples de construir ya no tienen ningún tipo de refuerzo aunque es posible incluir en algunas ocasiones juntas de refuerzo livianas para controlar el agrietamiento por encogimiento, por lo tanto estos elementos se basan en la resistencia de la mampostería misma para resistir cargas. Ya que la mampostería es fuerte a compresión pero débil a tensión, la mampostería no reforzada tiene gran resistencia bajo cargas compresivas pero tiene una limitada resistencia a cargas que causan esfuerzos tensores. Por lo tanto los esfuerzos tensores en mampostería no reforzada deben ser diseñados para ser menores que la fuerza tensora, de lo contrario se asume que la sección fallará.

2.3.2 Mampostería Reforzada

Aunque la mampostería antigua era esencialmente no reforzada el metal se usaba algunas veces para anclar una unidad de mampostería a otra. A partir del terremoto de Long Beach, California en 1933 donde muchas edificaciones de mampostería no reforzada colapsaron, se hizo evidente el uso de refuerzo en edificaciones para mejorar el comportamiento estructural de estas ante un sismo. La función principal del refuerzo que se le incorpora a la mampostería es la de resistir esfuerzos tensores y cortantes y proveer una ductilidad adecuada.

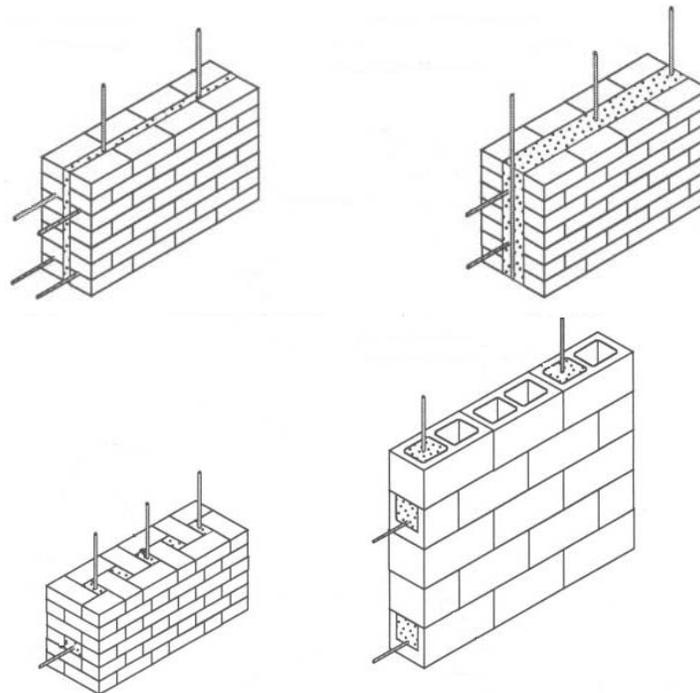


Imagen 2.3 Ejemplos de Mampostería reforzada



2.3.3 Sistemas Híbridos

La mampostería puede ser usada con otros materiales para construir edificaciones que funcionan con un sistema híbrido. Muros en mampostería para cortante se han utilizado en sistemas de pórticos de acero para absorber cargas de cortante lateral, otro uso y de gran importancia en nuestro medio es el de la mampostería confinada con concreto reforzado donde los muros de mampostería le dan rigidez a la estructura para controlar la deriva. En estos casos es necesario tener un diseño y una construcción detallada y apropiada para permitir movimientos diferenciales a largo plazo de los muros y pórticos evitando que se generen sobreesfuerzos y fallas. La mampostería confinada debe ser diseñada apropiadamente para resistir cargas ya que de lo contrario estas fallaría, y por lo tanto reducirían la rigidez de la estructura considerablemente y como resultado de esto, el incremento de deformaciones y esfuerzos en el sistema aporticado.

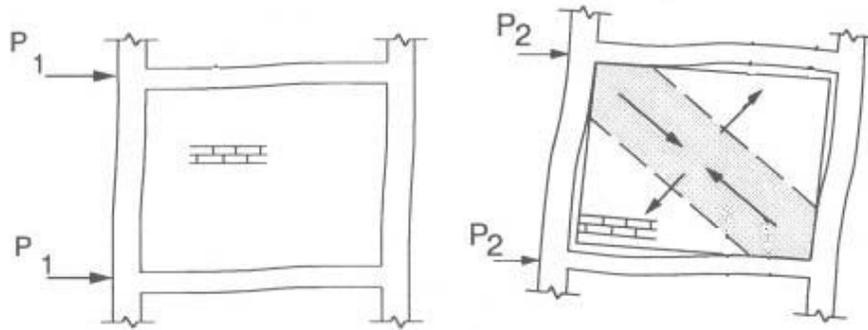


Imagen 2.4 Ejemplo de un Muro confinado y su comportamiento estructural



CAPITULO 3: COMPORTAMIENTO SISMICO DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA

Como se menciona en el capítulo anterior la mampostería que se utilizaba antiguamente se basaba en lo masivo de los elementos que hacían parte de las estructuras y de su gran tamaño, que por su propio peso, lograban una estabilidad estructural bajo la acción de cargas laterales como viento o sismo. Sin embargo en la actualidad dados los avances en materiales y las necesidades de reducir costos, este tipo de estructuras no son viables. Por esta razón se ha visto un gran desarrollo en cuanto a técnicas de construcción y en características de los materiales tales como la resistencia, por lo cual las estructuras hoy en día son más esbeltas, de menor peso y por ende menos masivas pero a la vez más resistentes.

El problema de la mampostería no reforzada radica en que se basa en los principios de la mampostería antigua, pero con los materiales del presente, lo cual afecta de manera importante su desempeño ante la acción de cargas laterales.

3.1 COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA NO REFORZADA ENTE CARGAS LATERALES

La mampostería no reforzada bajo la acción de cargas laterales de una baja magnitud, presenta un esfuerzo de flexión menor al esfuerzo axial de compresión, por lo tanto en estos casos no se presenta ningún riesgo para la estructura. Sin embargo con el aumento de las cargas laterales se generan esfuerzos de tensión en la mampostería que pueden llevar a la aparición de grietas en la estructura lo que puede generar una falla si las cargas laterales son lo suficientemente altas para vencer la capacidad de tensión de las unidades de mampostería y del mortero de pega, que en realidad no es muy alta, ya que la característica principal de la mampostería es su resistencia a la compresión y su baja resistencia a la tensión. Por ende debido a las características de estos materiales las fallas en estructuras de mampostería no reforzada son frágiles y explosivas. Dadas las características anteriormente mencionadas no hay y no se realizan muchos estudios que analicen la mampostería no reforzada como un sistema estructural que resista cargas sísmicas.

3.2 MECANISMOS DE FALLA ANTE CARGAS CÍCLICAS Y DINÁMICAS

Los principales mecanismos de fallo observados durante las últimas catástrofes sísmicas, no están relacionados con la resistencia propia del muro, sino con el comportamiento global de la estructura. A continuación se describen algunos de los principales mecanismos de falla que han sido detectados e investigados durante los movimientos sísmicos.



3.2.1 Fallas fuera del plano

Este tipo de fallas se produce por la falta de anclaje de los muros a los diafragmas de piso y techo, o por una flexibilidad excesiva de los diafragmas. Además son explosivas y comprometen el comportamiento de la estructura ante las cargas gravitatorias, es muy común en estructuras de mampostería no reforzada incluso ante sismos de magnitud moderada.



*Imagen 3.1 Izquierda: Fallo fuera del plano de dos muros en el sismo de Loma Prieta
(<http://niisee.berkeley.edu>)*

Imagen 3.2 Derecha: Fallo de un muro en la parte superior del edificio por mala conexión. Sismo de Chile (<http://niisee.berkeley.edu>)

3.2.2 Fallas en el plano

Este tipo de fallas dependen en su mayoría de la relación longitud/altura de los elementos de mampostería no reforzada, ya que principalmente se producen por esfuerzos considerables de flexión y cortante. Cuando la relación longitud/altura tiene un valor alto la falla se produce por flexión, y para valores medios la falla se produce por cortante.

Fallas por cortante: Se presenta en forma de doble diagonal formando una cruz. Este tipo de falla se caracteriza por ser uno de los principales causantes de colapso en estructuras de mampostería no reforzada, cuando estas grietas se presentan en los muros



resistentes de sistema de cargas laterales. Este tipo de agrietamiento también es común en los edificios de mampostería no reforzada que tienen un gran número de ventanas y puertas.



Imagen 3.3 Grietas formadas por tensión diagonal (<http://nisee.berkeley.edu>)

Fallas por flexión: Las grietas producidas por esfuerzos excesivos de flexión, son generalmente horizontales y se forman en la parte superior e inferior de las columnas o pilares de mampostería.

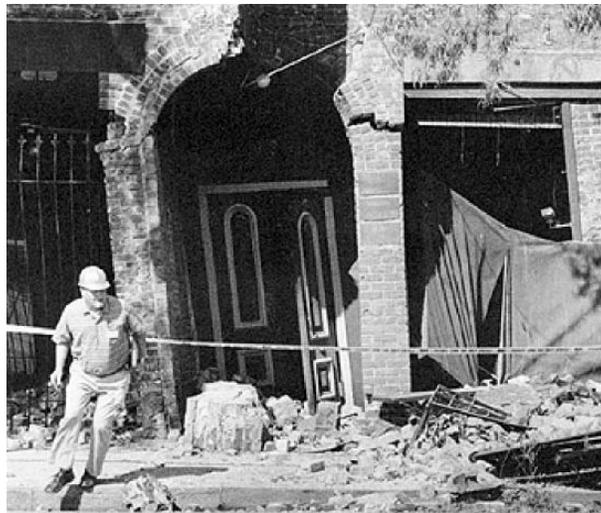


Imagen 3.4 Ejemplo de fallas por flexión (<http://nisee.berkeley.edu>)



Fallas por tracción: En este caso los tipos de falla varían de acuerdo a la dirección de la carga de tracción y de la magnitud de la resistencia del mortero y de las unidades de mampostería. Cuando los esfuerzos de tracción son paralelos a las juntas horizontales de mortero se dan fallas de verticales. Cuando los esfuerzos de tracción son perpendiculares a las juntas horizontales se presentan fallas horizontales

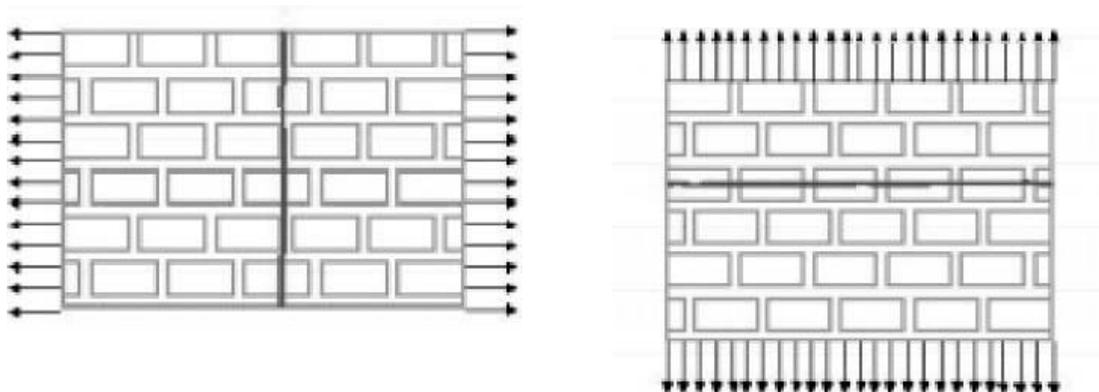


Imagen 3.5 Fallas cuando el mortero es más resistente que las unidades de mampostería

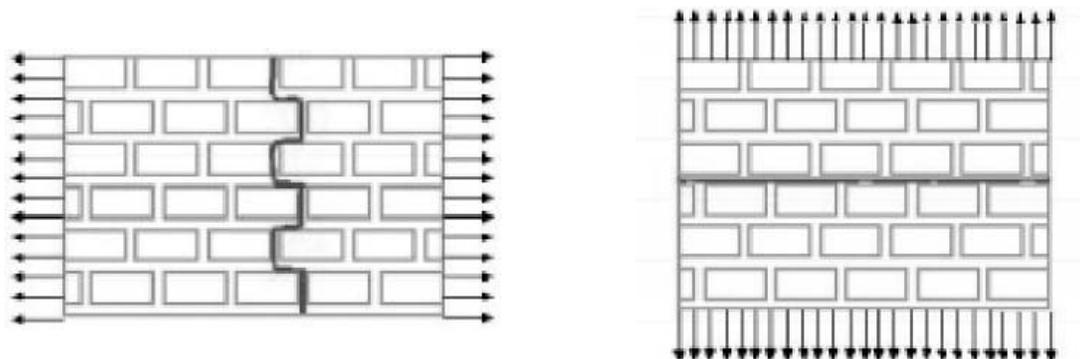


Imagen 3.6 Fallas cuando las unidades de mampostería son más fuertes que el mortero)

Otros tipos de falla: Otras fallas que se pueden ver en estructuras de mampostería no reforzada son:

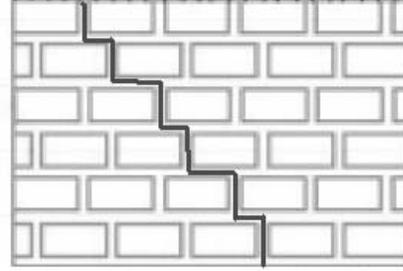
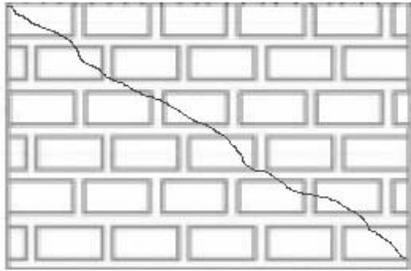


Imagen 3.7 Otros tipos de falla en la mampostería (fallas diagonales)

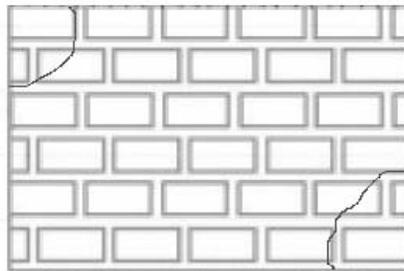


Imagen 3.8 Otros tipos de falla en la mampostería (falla en las esquinas)



CAPITULO 4: MALAS PRACTICAS EN LA MAMPOSTERÍA

En los capítulos anteriores se ha realizado un recuento de aspectos generales de sismología y mampostería, con lo cual ahora se puede adentrar al principal problema de estudio de este proyecto.

En la actualidad la mampostería no reforzada, bajo la normatividad de la NSR-98 solo puede utilizarse como sistema de resistencia sísmica en aquellas regiones donde la amenaza sísmica es baja y el valor de A_a (coeficiente que representa la aceleración pico efectiva, para diseño sismorresistente) sea menor o igual a 0.05. Este sistema estructural se clasifica para efectos de diseño sismorresistente como uno de los sistemas con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico.

Sin embargo en Colombia existen muchas construcciones de mampostería no reforzada en zonas de mediano y alto riesgo sísmico, que además no siguen ningún tipo de normatividad y no tuvieron ninguna supervisión técnica en el momento de su construcción, debido a que la gran mayoría forman parte de barrios de estratos 1 y 2, como ocurre en el caso de la ciudad de Bogotá, donde se puede observar que gran parte de las construcciones de estratos 1 y 2 se encuentran en zonas de mediano o alto riesgo sísmico según lo considerando en el mapa de micro zonificación sísmica y el mapa de estratificación de la ciudad de Bogotá que se pueden apreciar a continuación.

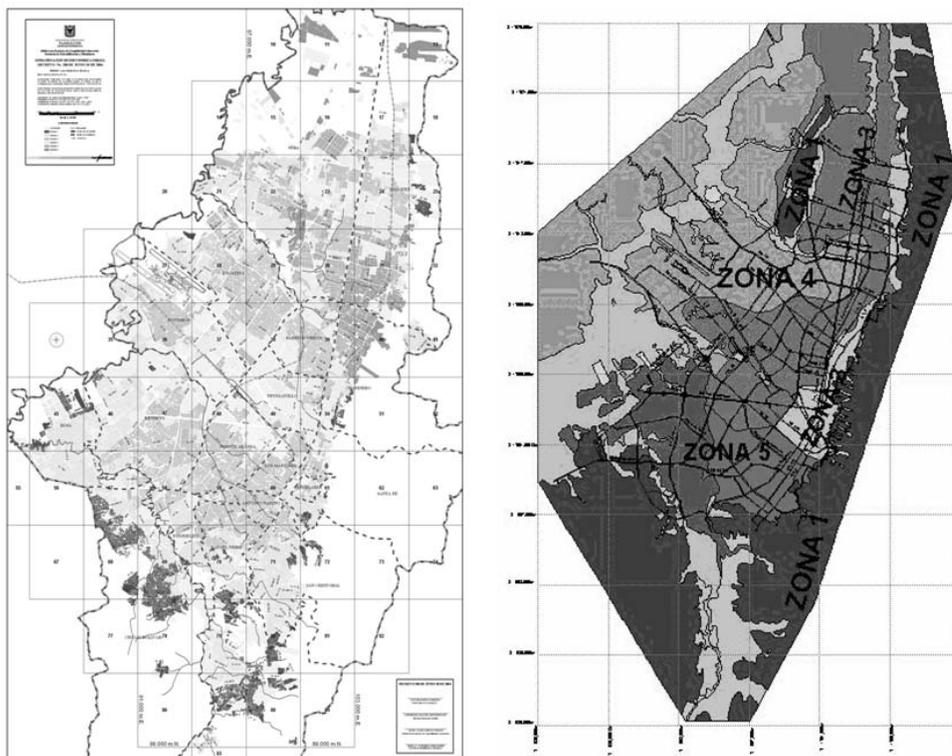


Imagen 4.1 Estratificación socioeconómica y Micro zonificación de la ciudad de Bogotá



Este tipo de viviendas y construcciones generalmente son construidas por los mismos propietarios, los cuales no poseen o poseen muy poco conocimiento de este sistema de construcción.

Esta situación se puede percibir, cuando se observan casos como los que se presentan a continuación:

- En este caso se tiene una vivienda de un piso en mampostería no reforzada que no tiene ningún tipo de confinamiento.



Imagen 4.2 Ejemplo de viviendas construidas en mampostería no reforzada

- En las fotografías siguientes se observan viviendas de dos pisos con un confinamiento deficiente ya que solo hay presencia de columnas.



Imagen 4.3 Ejemplos de deficiencias en la construcción de mampostería no reforzada



En los casos anteriores se ve que los constructores de estas viviendas pueden tener algo de idea en cuanto a este sistema se refiere, sin embargo queda claro que no existe una comprensión total de los conceptos de construcción en mampostería, ya que aunque parece que fuera un sistema confinado no hay presencia de vigas en la parte superior de las edificaciones.

- A continuación se puede observar el grado de confusión sobre el uso de la mampostería:



Imagen 4.4 Ejemplo de Combinación errónea de sistemas en la construcción con mampostería

En las dos últimas imágenes se puede observar que hay mezclas de varios sistemas de construcción y en general un mal empleo de la mampostería, lo cual claramente genera un alto riesgo de colapso ante la eventualidad de un sismo.



- Otros ejemplos de malas prácticas en la mampostería:



Imagen 45 Otros ejemplos de malas prácticas en la construcción con mampostería



CAPITULO 5: TEORIA DE LA MODELACIÓN A ESCALA

El uso de modelos a escala por parte de ingenieros y constructores se remonta a cientos o miles de años atrás, sin embargo estos modelos primitivos eran básicamente utilizados para visualizar de forma preliminar la estructura a construir mas no eran útiles para predecir o calcular deformaciones o esfuerzos de los prototipos. Estos modelos se podrían asociar inicialmente con modelos arquitectónicos mas no como modelos estructurales.

La mayoría de modelos utilizados para predecir el comportamiento estructural, requiere de la medición de tensiones, desplazamientos y fuerzas. Por lo tanto el desarrollo de la modelación como una herramienta practica, ha sido fuertemente influenciada por la capacidad de análisis de esfuerzos experimentales. La mayoría de las técnicas utilizadas en el análisis de esfuerzos experimentales se establecieron en el transcurso del siglo pasado.

5.1 MODELACION FISICA EN OTRAS INGENIERIAS

A través de la historia, la modelación física se ha utilizado en las distintas ramas de la ingeniería para lograr un mejor entendimiento de los diversos problemas encontrados en esta disciplina. Este sistema ha sido empleado con buenos resultados principalmente en las siguientes ramas:

Ingeniería Hidráulica: En esta rama de la Ingeniería se han venido utilizando modelos a escala desde finales del siglo XIX con un éxito considerable en el estudio de canales abiertos, bombas, tuberías, erosión de playas, etc. Hoy en día las estructuras hidráulicas de gran importancia, no se construyen sin antes realizar un estudio en un modelo preliminar.

Ingeniería Naval: Durante mucho tiempo los Ingenieros navales se han basado en modelos para el diseño de naves, estudiando en estos modelos aspectos como la maniobrabilidad, vibraciones, fricción, etc.

Industria Aeroespacial y Automotriz: Estas industria han utilizado modelos físicos principalmente para estudios de fenómenos que van desde el flujo de viento sobre cuerpos aerodinámicos hasta esfuerzos causados por efectos de temperatura. Es importante mencionar que de no haber sido la aplicación de modelos físicos en estas áreas, muchos de los avances que se tienen actualmente, incluso la exploración espacial no serian posibles.



5.2 MODELOS ESTRUCTURALES

5.2.1 Definición

Un modelo estructural es definido según la ACI (American Concrete Institute) como “cualquier representación física de una estructura o una porción de una estructura”, esta definición se aplica para modelos construidos en cualquier tipo de material.

Una segunda definición dada por J.R Janney (1970) es: “Un modelo estructural es cualquier elemento estructural o ensamblaje de elementos estructurales construido a una escala reducida el cual será probado y para el cual las leyes de similitud deben ser empleadas para interpretar los resultados de la prueba”

Ambas definiciones abarcan una amplia clase de estudios de modelación de estructuras tales como edificios, puentes, represas, torres, cubiertas, estructuras de ingeniería mecánica y aeroespacial, estructuras submarinas, etc. Debido a la gran diversidad de estructuras a modelar y a que no en todos las diferentes variables tienen la misma importancia, es importante clasificar el tipo de modelos.

5.2.2 Clasificación de Modelos

Los modelos estructurales pueden ser definidos y clasificados de diferentes maneras según la información que se pretenda obtener de las pruebas a estos. Por lo anterior se obtiene la siguiente clasificación:

Modelo Elástico: Este tipo de modelos se asemejan geoméricamente al prototipo pero son construidos con un material elástico homogéneo, que no necesariamente representa el material del prototipo, este modelo está restringido al rango elástico y no puede predecir comportamiento post falla del concreto o de la mampostería, o post fluencia del acero ni todos los otros comportamientos inelásticos de las estructuras.

Modelo Indirecto: El modelo indirecto hace parte de los modelos elásticos y se utiliza para obtener diagramas de influencia de reacciones y para resultantes de esfuerzos internos tales como, fuerzas cortantes, momentos flectores y fuerzas axiales. La carga aplicada a modelos indirectos, no corresponde a la carga esperada en el prototipo ya que los efectos son obtenidos por medio de la superposición de valores de influencia. Generalmente un modelo indirecto no tiene un parecido físico directo con el prototipo.

Modelo Directo: Este modelo es similar geoméricamente al prototipo en todos los aspectos y las cargas son aplicadas de la misma manera que al prototipo. Tensiones, deformaciones y esfuerzos en el modelo para cada condición de carga son representativas de cantidades similares para la correspondiente condición de carga en el prototipo.



Modelo de Resistencia: Estos modelos son construidos con materiales similares a los del prototipo, para que el modelo pueda predecir el comportamiento para todas las cargas del prototipo hasta la falla. El uso de este tipo de modelos no es económico y solo se puede utilizar dentro del rango elástico.

Modelo para efectos de viento: Para esta modelación existen diferentes tipos de clasificación dependiendo de las variables que se pretendan estudiar. Existen modelos rígidos o de forma donde el total de las fuerzas o las presiones causadas por el viento pueden ser medidas, a su vez también existen los modelos aero-elásticos donde tanto propiedades de forma y de rigidez del prototipo son modelados con el objetivo de medir los esfuerzos inducidos por el viento y sus respectivas deformaciones como también la interacción dinámica de la estructura con el viento.

Modelo Dinámico: Estos modelos se utilizan para estudiar los efectos de vibración o cargas dinámicas sobre una estructura, estos modelos pueden probarse en mesas vibratorias para el estudio de cargas de sismo o en túneles de viento para estudiar efectos aero-elásticos. Los modelos dinámicos también se pueden utilizar para estudiar efectos internos y externos de explosiones o impactos sobre estructuras.

Modelo Conceptual, de Investigación y Diseño: Aunque es claro el uso de cada uno de estos modelos, se debe tener en cuenta que el grado de complejidad de cada uno varía notablemente. En el caso del modelo conceptual, este debe ser lo más simple posible para dar a entender de una manera clara el concepto que se está estudiando. Los modelos de investigación deben ser lo más preciso posible en todos sus aspectos ya que a partir de estos se pueden sustentar teorías y se pueden hacer generalizaciones para cierto tipo de estructuras. Los modelos de diseño tienen un rango de predicción que varía desde los modelos conceptuales hasta los de investigación según los datos que se requieran del estudio de estos.

5.3 VENTAJAS DE LA MODELACIÓN FÍSICA

Las ventajas de la modelación física a escala se pueden clasificar de dos maneras, existen ventajas frente a la experimentación con un modelo a escala real y ventajas frente a la modelación analítica.

En el primer caso, al modelar a escala, se pueden tener amplios beneficios económicos en cuanto a materiales, equipos y aplicación de cargas se refiere, ya que en el caso de estructuras que tengan un tamaño considerable sería muy complicado y costoso realizar ensayos como por ejemplo de cargas sísmicas. Además al tener modelos a escala de bajo costo, se pueden realizar varias pruebas y cambios, dados sus bajos costos en comparación con el prototipo. Adicionalmente en los modelos a escala reducida se pueden observar en un corto periodo de tiempo eventos que en un prototipo durarían bastante en manifestarse.



En el segundo caso, la principal ventaja del modelo físico sobre el modelo analítico es que el físico puede modelar el comportamiento de la estructura cuando se carga hasta la etapa de colapso. A pesar de los grandes avances que se tienen en la modelación con el uso de computadores cada vez más eficientes, la modelación física aventaja a la modelación analítica cuando se tienen estructuras que puedan llegar a desafiar modelos matemáticos debido a la aparición de cargas complejas o cuando es difícil modelar analíticamente el entorno real del prototipo.

5.4 DESVENTAJAS DE LA MODELACIÓN FÍSICA

Las desventajas de la modelación física se dan generalmente durante las etapas de diseño de un prototipo, por dos factores muy importantes durante esta etapa: Tiempo y costo, ya que al comparar modelos analíticos con modelos físicos el primero normalmente es mucho más económico y rápido. Además no se puede esperar que los modelos físicos reemplacen a los modelos analíticos cuando estos dan una guía aceptable del comportamiento del prototipo.

Durante la etapa de diseño de un prototipo generalmente se realizan bastantes cambios, los cuales no pueden hacerse en el modelo, por lo cual se tienen que hacer varios modelos con los distintos cambios efectuados, por lo tanto los modelos físicos generalmente se aplican solo en las etapas finales de diseño, de lo contrario resultaría un medio de evaluación bastante costoso.

A pesar de que modelar a escala es más económico que modelar con un modelo de tamaño real, tener un buen modelo a escala es relativamente costoso, y no siempre se cuenta con los recursos económicos necesarios para dicho estudio.

5.5 PRECISIÓN DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES

La confiabilidad de los resultados de la modelación física, es tal vez, es el factor más importante para quien estudia estos modelos. Definir la confiabilidad y la precisión de un modelo a escala es complicado debido a que en el caso de estructuras se ha visto que dos elementos estructurales de las mismas características pueden mostrar diferencias de 20% o más al ser ensayadas, en el caso de prototipos. Por lo tanto cuando se debe comparar un modelo a un solo prototipo se presenta cierta dificultad al hacer afirmaciones de precisión, ya que esta es aparente. En teoría para llegar a calcular la precisión de un modelo se deberían llevar a cabo estudios de varios prototipos y varios modelos para llegar a una conclusión basada en la aplicación de una estadística. Esto debido a los costos que implica, no es factible de llevar a cabo. Y debido a que en general en la ingeniería civil cada proyecto es único, es muy complicado recolectar la suficiente información para este análisis estadístico.



Los principales factores que afectan la precisión de un modelo incluyen las propiedades de los materiales con que este se construya, la precisión en la fabricación, las técnicas de carga, métodos de medición, y la interpretación de resultados. En el caso de modelos elásticos de concreto reforzado, los cuales solo pueden predecir respuestas elásticas, tienen una precisión muy alta, errores de menos del 5 al 10%, para estructuras con fisuración mínima. En los modelos de resistencia la precisión puede llegar a tener errores menores al 15%, para la predicción de deformaciones post falla y capacidad de carga última de la estructura. Sin embargo es importante tener en cuenta que mientras más precisión se quiera obtener mayor será el costo del modelo.

5.6 TEORÍA DE MODELACIÓN ESTRUCTURAL

Cualquier modelo estructural debe ser diseñado, cargado e interpretado de acuerdo a una serie de similitudes requeridas que relacionen el modelo con el prototipo, estas similitudes están basadas en la teoría de modelación las cuales son derivadas del análisis dimensional de los fenómenos físicos envueltos en el comportamiento de la estructura.

La teoría dimensional se basa principalmente en que cualquier descripción matemática que describa cualquier aspecto de la naturaleza debe estar hecha de una manera dimensionalmente homogénea, lo cual significa que la ecuación gobernante debe ser válida desde el punto de vista de la escogencia de las unidades dimensionales en las cuales las variables físicas son medidas.

5.6.1 Estructuras Sujetas a Cargas Dinámicas

Los modelos físicos de estructuras con cargas dinámicas se han desarrollado firmemente desde el final de la segunda guerra mundial. Las cargas dependientes del tiempo, por su naturaleza compleja y sus efectos en las estructuras ha ubicado las técnicas de la modelación estructural a escala a la par de las técnicas analíticas, las cargas dinámicas de mayor interés para el ingeniero estructural van desde vibraciones elásticas inducidas por el viento hasta cargas por impacto o explosión que pueden causar daños considerables a las estructuras. Se tiene un interés especial por la carga de sismo ya que por su amplia naturaleza y sus efectos potencialmente devastadores ha asumido una gran importancia en nuestra sociedad.

5.6.2 Modelación de sismo

Como se mencionó anteriormente la carga de sismo es una consideración muy importante a la hora del diseño en la mayoría de las estructuras de ingeniería civil por su potencial catastrófico. En muchas estructuras es importante hacer diseños teniendo en cuenta el comportamiento inelástico de la estructura para que el diseño sea económicamente



viable. Esta consideración impone restricciones severas a la hora de escoger los materiales para realizar los diferentes modelos de prueba. A continuación se muestra un resumen de los factores de escala obtenidos por consideraciones de similitud para cargas de sismo en la tabla 3.1

		Factores de escala			
		Dimensión	Verdadera replica	Simulación artificial de masa	Fuerzas de gravedad despreciadas
1	2	3	4	5	6
Carga	Fuerza, Q	F	$S_E S_1^2$	$S_E S_1^2$	S_1^2
	Presión, q	FL^{-2}	S_E	S_E	1
	aceleración, a	LT^{-2}	1	1	S_1^{-1}
	Aceleración gravitacional, g	LT^{-2}	1	1	despreciada
	Velocidad, v	LT^{-1}	$S_1^{1/2}$	$S_1^{1/2}$	1
Geometría	tiempo, t	T	$S_1^{1/2}$	$S_1^{1/2}$	S_1
	Dimensión lineal, l	L	S_1	S_1	S_1
	Desplazamiento, δ	L	S_1	S_1	S_1
	Frecuencia, ω	FL^{-2}	$S_1^{-1/2}$	$S_1^{-1/2}$	S_1^{-1}
Propiedades de los materiales	Modulo, E	FL^{-2}	S_E	S_E	1
	Esfuerzo, σ	FL^{-2}	S_E	S_E	1
	Tensión, ϵ	---	1	1	1
	Relación de Poisson, ν	---	1	1	1
	Densidad de masa, ρ	$FL^4 T^{-2}$	S_E / S_1	*	1
	energía, EN	FL	$S_E S_1^3$	$S_E S_1^3$	S_1^3

$$* \left(\frac{\gamma L}{E} \right)_{\text{modelo}} = \left(\frac{\gamma L}{E} \right)_{\text{prototipo}}$$

Tabla 5.1 Factores de escala según ley de escalamiento

Los modelos de Replica Verdadera implican una representación simultanea de fuerzas inerciales, gravitacionales y de restauración, sin embargo estos son prácticamente imposibles de construir debido a las restricciones que se generan sobre los materiales, específicamente sobre la densidad de masa. Por la tanto se hace necesario el uso de leyes altermas de escalamiento con lo cual se obtienen para este caso la simulación artificial de masa y simulaciones en las cuales se desprecian las fuerzas gravitacionales, siendo la simulación artificial de masa la mas importante para nuestro caso ya que es la mas utilizada en estudios relacionados con la mesa vibratoria. Para este caso es necesario agregar peso extra de carácter no estructural para lograr una buena simulación de masa de acuerdo a la escala utilizada



5.6.3 Simulación de Carga Gravitacional

En Modelos dinámicos solo tres cantidades del modelo pueden escogerse arbitrariamente, generalmente debido al equipo y a los materiales que se disponen, se deben escoger escalas geométricas y ciertas propiedades de materiales del modelo, para que sean compatibles con lo que se cuenta.

El problema que se estudia involucra cargas gravitacionales o de tipo inercial entonces uno de los productos adimensionales será $\gamma l/E$, donde γ es el peso específico del material, l es la longitud representativa y E es el módulo de elasticidad del material. Por lo tanto solo dos magnitudes del modelo pueden seleccionarse arbitrariamente teniendo en cuenta que el producto adimensional debe tener la misma magnitud tanto en el modelo como en el prototipo, se tiene que:

$$\left(\frac{\gamma l}{E}\right)_{\text{modelo}} = \left(\frac{\gamma l}{E}\right)_{\text{prototipo}}$$

$$\gamma_{\text{modelo}} = \gamma_{\text{prototipo}} \frac{L_{\text{prototipo}} E_{\text{modelo}}}{L_{\text{modelo}} E_{\text{prototipo}}}$$

Debido a que para este proyecto se utilizaron los mismos en el modelo como en el prototipo, tendríamos:

$$\gamma_{\text{modelo}} = \gamma_{\text{prototipo}} \frac{L_{\text{prototipo}}}{L_{\text{modelo}}}$$

Lo que nos muestra que la densidad del material del modelo debe ser 5 veces mayor que la densidad del prototipo, y debido a que la escala utilizada es 1:5 se tiene que la densidad del modelo debe ser 5 veces mayor a la densidad del prototipo. Por esta razón hay que añadirle peso extra a cada elemento de mampostería de forma tal que no influya con el comportamiento estructural del modelo. Este peso adicional se generará con el uso de placas de acero y peso extra en la cubierta de los modelos.



CAPITULO 6: EQUIPOS UTILIZADOS PARA SIMULACION SISMICA

6.1 MESA VIBRATORIA

Este equipo se encuentra localizado en el laboratorio de estructuras del Centro de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico (CITEC) de la Universidad de los Andes y permite realizar ensayos de simulación sísmica de modelos a escala reducida de materiales como concreto, adobe, tapia pisada, mampostería, y acero.



Imagen 6.1 Mesa Vibratoria

En ella se pueden probar modelos con un peso de hasta 1 tonelada, utilizando frecuencias que van de 0 a 100 Hertz. La mesa solo tiene un grado de libertad y tiene una configuración geométrica de 1m x 1m., hecha de acero A36, con un peso de 0.5 ton, y cuenta con una plataforma de anclajes roscados conformados en una cuadrícula de 0.2m x 0.2m.

La mesa esta soportada en una cimentación de concreto de 27.5 toneladas, con dimensiones de 4.4m de largo, 2.9m de ancho y 0.9m de espesor.

6.2 ACTUADOR HIDRAULICO

La mesa es impulsada por un actuador hidráulico con capacidad de 5 toneladas, el cual pertenece al sistema electrónico e hidráulico del laboratorio (MTS). Este dispositivo se puede operar controlando la fuerza o el desplazamiento para generar las fuerzas dinámicas necesarias para el movimiento de la mesa.

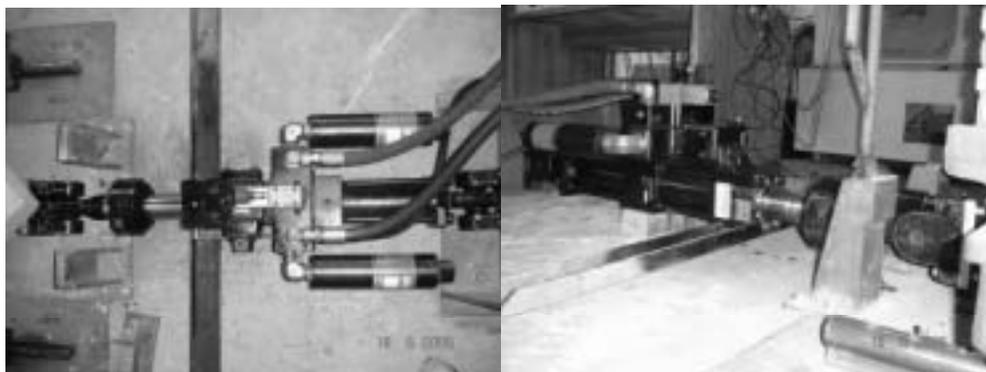


Imagen 6.2 Actuador hidráulico

Capacidad de carga	50 kN
Desplazamiento máximo	150 mm
Frecuencias de operación	0 a 100 Hertz
Longitud máxima con el embolo extendido	1400 mm

Tabla 6.1 Especificaciones del Actuador Dinámico

6.3 EQUIPOS PARA ADQUISICION DE DATOS

Para la adquisición de datos se utilizaron acelerómetros (ACM) con una capacidad máxima de 0.5g y captadores de desplazamiento (LVDT por sus sigla en ingles) con una capacidad máxima de 7.5cm. Dispuestos de la siguiente manera:

- LVDT 1: ubicado en la base de la mesa en dirección del movimiento.
- LVDT 2: ubicado en la parte superior del modelo en la dirección del movimiento.
- ACM 1: ubicado en la base de la mesa en la dirección del movimiento.
- ACM 2: ubicado en la parte superior del modelo en dirección del movimiento.
- ACM 3: ubicado en la parte superior del modelo en dirección perpendicular al movimiento.

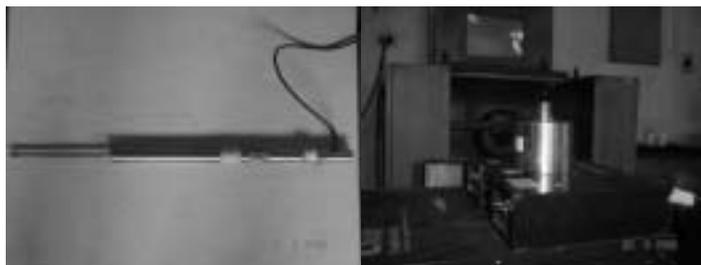


Imagen 6.3 LVDT (Izquierda) y Acelerómetro (Derecha)



6.3.1 Montaje de equipos

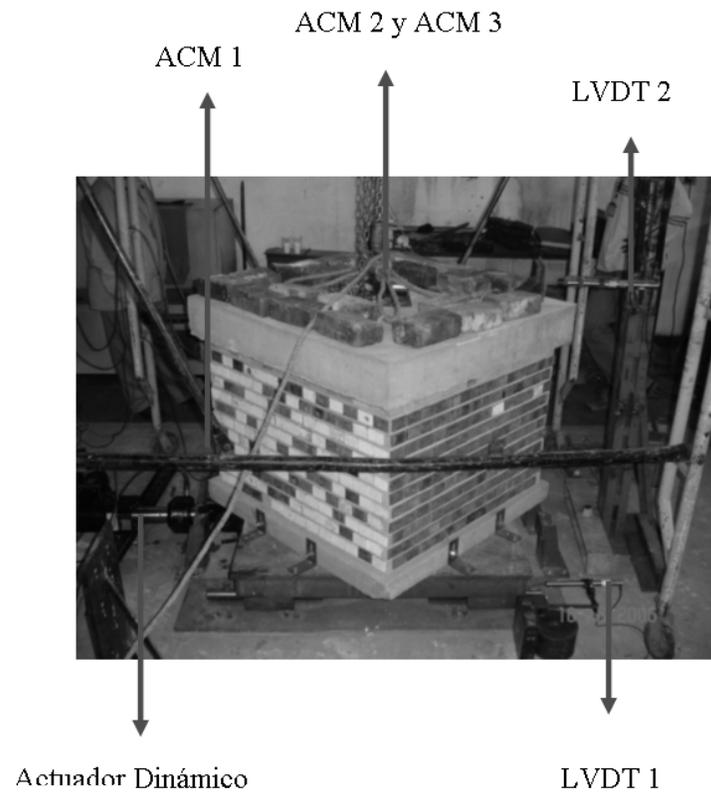


Imagen 6.4 Ubicación de equipos en el modelo



CAPITULO 7: PROPIEDADES MECANICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LOS MODELOS

Con el fin de describir las características de los materiales que se utilizaron para la construcción de los modelos a escala para entender de mejor manera el comportamiento de las estructuras, se realizaron ensayos a los distintos elementos necesarios para los modelos.

Se realizaron ensayos de diferente tipo a las unidades de mampostería, muretes de mampostería, al alambre utilizado en refuerzo de vigas de cimentación y columnas, mortero de pega y al concreto.

A continuación se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos.

7.1 UNIDADES DE MAMPOSTERÍA

7.1.1 Resistencia a Compresión



Imagen 7.1 Resistencia a Compresión de Unidades de Mampostería

Se obtuvieron los siguientes resultados al realizar pruebas de resistencia a compresión en las piezas de mampostería a escala lo cual da un indicativo directo de la calidad de estas:

No. DE BLOQUE	Esfuerzo Max(Mpa)
1	2,31
2	1,76
3	2,12
PROMEDIO	2,06

Tabla 7.1 Compresion Unidades de Mampostería



7.1.2 Resistencia a Flexión



Imagen 7.2 Resistencia a Flexión de Unidades de Mampostería

Al realizar pruebas de resistencia a flexión de las unidades de mampostería se obtuvieron los siguientes resultados:

No. DE BLOQUE	RESISTENCIA A FLEXION (Kg/cm ²)
1	35,09
2	27,52
3	45,18
PROMEDIO	35,93

Tabla 7.2 Resistencia a Flexión de Unidades de Mampostería

7.2 MURETES DE MAMPOSTERÍA

7.2.1 Compresión

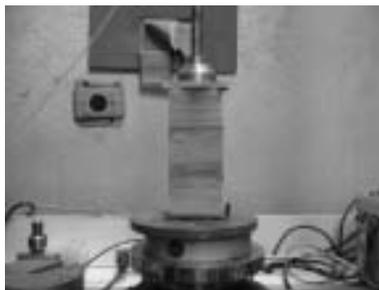


Imagen 7.3 Resistencia a Compresión de Muretes



Este ensayo se realiza con el objetivo de observar el comportamiento y las características de la mampostería como conjunto cuando son sometidos a cargas axiales. A partir de estos se obtienen factores como la resistencia a la compresión de la mampostería (f'_m) y el módulo de elasticidad del conjunto como se puede ver a continuación:

MURETE No.	RESISTENCIA(MPa)
1	2,01
2	2,77
3	2,03
PROMEDIO	2,27

Tabla 7.3 Resistencia a Compresión de Muretes

7.2.2 Tracción Diagonal



Imagen 7.4 Ensayo de Tracción Diagonal a Muretes

La falla de un muro por efectos de fuerzas cortantes ocurren a través de grietas inclinadas debidas a tensiones diagonales. Mediante este ensayo se determina el comportamiento de la mampostería ante esfuerzos de corte como los producidos por cargas sísmicas en el plano del muro, obteniendo el módulo de corte (G) de la mampostería y el esfuerzo último resistente al corte (τ_u), mostrados a continuación:

MURETE No.	RESISTENCIA(MPa)	MODULO DE ELASTICIDAD A CORTE (MPa)
1	0,195	264
2	0,232	378
PROMEDIO	0,2135	321

Tabla 7.4 Ensayo de Tracción Diagonal a Muretes



7.2.3 Flexión (Tensión paralela a juntas verticales)

Este ensayo se realiza con el fin de determinar la resistencia de los muros de mampostería ante las solicitaciones generadas por momentos flectores en el sentido de las juntas verticales. Esta falla se genera generalmente en las pegas de mortero.

MURETE No.	CARGA MÁXIMA (N)	MODULO DE ROTURA (MPa)
1	31,115	0,125

Tabla 7.5 Ensayo Flexión en muretes (Tensión paralela a juntas verticales)

7.2.4 Flexión (Tensión perpendicular a juntas verticales)

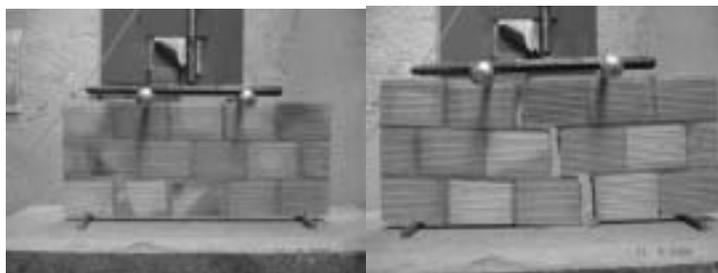


Imagen 7.5 Ensayo de Flexión con tensión perpendicular a juntas verticales

Este ensayo se realiza con el fin de determinar la resistencia de los muros de mampostería ante las solicitaciones generadas por momentos flectores en el sentido de las juntas horizontales. Esta falla se genera generalmente en las pegas de mortero.

MURETE No.	CARGA MÁXIMA (N)	MODULO DE ROTURA (MPa)
1	965,88	3,25
2	870,534	2,93
PROMEDIO	918,207	3,09

Tabla 7.6 Ensayo de Flexión con tensión perpendicular a juntas verticales



7.3 ALAMBRE DE REFUERZO

Este ensayo no se realizó ya que se tenían los valores de resistencia para este tipo de alambres.

TIPO ACERO	LIMITE DE FLUENCIA f_y (MPa)	RESISTENCIA A TENSION f_u (MPa)	MODULO DE ELASTICIDAD E (MPa)
Aceros Galvanizados	225	341,5	85944

Tabla 7.7 Alambre de refuerzo

7.4 MORTEROS Y CONCRETO

Tanto el concreto como el mortero de pega se hicieron en obra. Para el mortero se utilizó arena de pozo y para el concreto arena de río, debido a las dimensiones del refuerzo, las cuales no permitían el uso de agregados gruesos.

7.4.1 Resistencia a la Compresión del Mortero de Pega

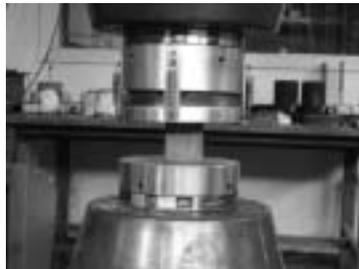


Imagen 7.6 Ensayo de Compresión a Mortero de Pega

Los siguientes son los resultados de ensayos a compresión realizados a cubos de 5cm de lado:

MUESTRA No.	RESISTENCIA (MPa)
1	26,38
2	17,53
3	22,5
PROMEDIO	22,14

Tabla 7.8 Compresión de Mortero



7.4.2 Concreto



Imagen 7.7 Resistencia a Compresión de Concreto

Los siguientes son los resultados de ensayos a compresión realizados a cilindros de 5cm de diámetro y 10cm de altura:

MUESTRA No.	RESISTENCIA(MPA)
1	6,79
2	5,97
3	4,69
PROMEDIO	5,82

Tabla 7.9 Compresión de concreto



CAPITULO 8: MODELACIÓN EXPERIMENTAL A ESCALA REDUCIDA

Al analizar las malas prácticas de la mampostería (Capítulo 4), y al hacer varias visitas a zonas de Bogotá de Estratos 1 y 2, se decidió escoger dos de los ejemplos más repetidos en cuanto a errores en construcción de mampostería.

El primero trata de una construcción hecha en mampostería no reforzada con una placa de entrepiso. Se decidió modelar esta estructura ya que este tipo de estructuras tiene un alto riesgo de colapso ante la eventualidad de un sismo por lo tanto es el tipo de edificación más peligroso que se ve, y además posee un alto índice de ocurrencia.

Para el segundo caso se decidió modelar una estructura con un confinamiento deficiente (solo columnas). Este se escogió debido a que es el sistema más común en estratos 1 y 2 ya que se puede observar que existe la creencia de que no hay necesidad de confinar las estructuras si no existe un piso superior, por esta razón se pueden ver muchas estructuras de un solo piso sin confinamiento superior, o edificaciones de dos o más pisos donde el último piso siempre carece de un confinamiento adecuado.

Se estudiara el comportamiento de estas dos estructuras a través de modelos construidos a escala 1:5, utilizando bloque # 5 a los cuales se les aplicara cargas dinámicas que actúan en las dos direcciones principales simultáneamente (en la dirección paralela al plano del muro y en la dirección perpendicular al plano del muro). Como se menciono anteriormente la mesa vibratoria en la cual se realizaran los ensayos a los modelos, solo tiene un grado de libertad, por lo tanto con el fin de generar cargas en las dos direcciones principales, los modelos se ubicaran a 45° respecto a la dirección de movimiento de la mesa, es decir a 45° respecto a la dirección de la fuerza que se aplicara a los modelos.

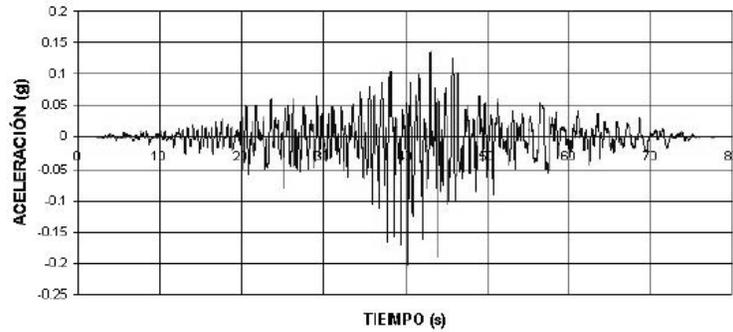
Como se ha mencionado con anterioridad este proyecto hace parte de una línea de varios proyectos con las mismas características, por lo tanto la idea es seguir ciertos parámetros en cuanto a tipos de ensayo y tipo de resultados que se buscan, por consiguiente se usara la misma señal de entrada. Esta es una señal hipotética correspondiente a la fuente Frontal de la Cordillera Oriental generada mediante funciones Green empíricas a partir de la estación el Rosal, obtenida en el sismo de Tauramena ocurrido el 19 de enero de 1995.

Para lograr reproducir esta señal de manera adecuada se utilizara la opción de control de desplazamiento en los equipos (actuador hidráulico) es decir la señal de entrada será la señal de desplazamiento equivalente al registro de aceleración descrito anteriormente. Sin embargo no se puede utilizar esta señal directamente, ya que según las leyes de escalamiento descritas en el capítulo 5 al trabajar con las leyes de escala de masa adicional, se debe tener en cuenta que el factor de escala para tiempo es $S_L^{1/2}$, por lo tanto al tener una escala geometría de 1:5, la escala de tiempo debe ser $1:\sqrt{5}$ lo cual cambia la señal de entrada.



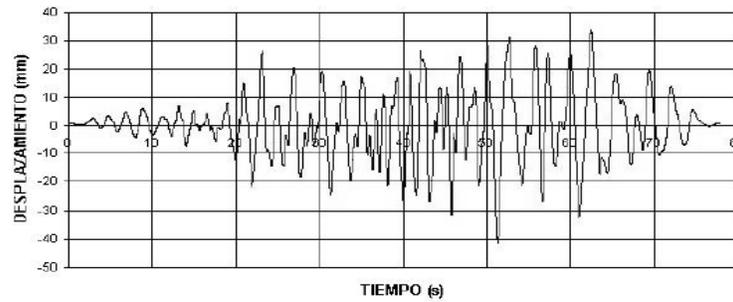
A continuación se muestran las graficas de aceleración y desplazamiento del registro original y del registro escalado:

ACELERACIÓN



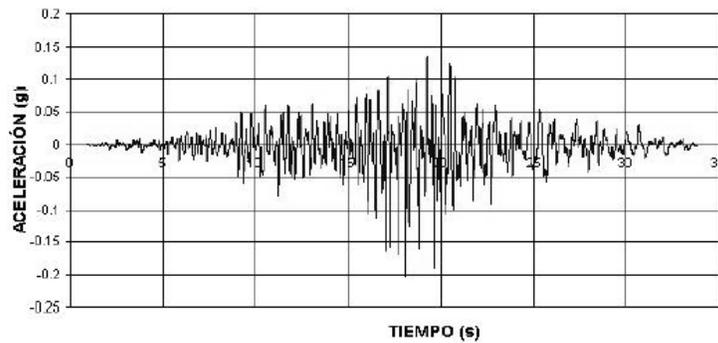
Gráfica 8.1 Registro Original de Aceleración

DESPLAZAMIENTO



Gráfica 8.2 Registro Original de Desplazamiento

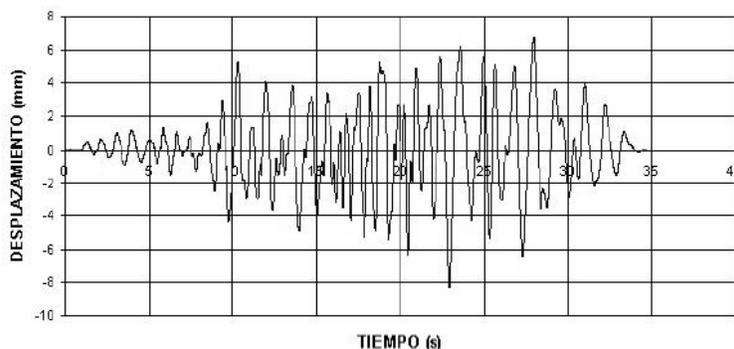
ACELERACIÓN



Gráfica 8.3 Registro Escalado de Aceleración



DESPLAZAMIENTO



Gráfica 8.4 Registro Escalado de Desplazamiento

8.1 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Con el fin de generar continuidad respecto a otros proyectos, el procedimiento de ensayo que se llevara a cabo, se realizara de acuerdo al utilizado por el Ingeniero Augusto Tique en su tesis COMPORTAMIENTO SISMICO DE MUROS DE MAMPOSTERIA CON REFUERZO EXTERIOR ESTUDIADOS EN MODELOS A ESCALA EN LA MESA VIBRATORIA, con el fin de comparar los datos que se obtengan de estos modelos con los obtenidos por el en su proyecto.

Al tener el registro de desplazamiento escalado, el ensayo consiste en una serie de aplicaciones de este registro sobre cada uno de los modelos. Primero se aplica un porcentaje pequeño del registro donde los modelos se comportan de forma elástica, se va incrementando la señal hasta valores que produzcan la falla de los modelos. También se realizaran mediciones de vibración libre sobre cada uno de los modelos.

Utilizando la instrumentación descrita en el capítulo 6 se presentara para ambos modelos los siguientes resultados:

- Historia del cortante máximo en la base del modelo, la cual se obtiene a partir del registro de la celda de carga en la punta del actuador, restando la fuerza inercial correspondiente a la mesa misma, es decir, igual a la masa de la mesa por la aceleración registrada al nivel de la mesa.
- Historia de desplazamiento en la base de la mesa obtenido directamente a partir del sensor correspondiente. El objetivo de este registro es el de poder compararlo con el desplazamiento registrado en la punta del actuador y con el registro de desplazamiento teórico utilizado como parámetro de entrada el sistema.



- Historia de aceleraciones en la base de la mesa dado directamente por el sensor. Estos datos son comparados con el registro de aceleraciones originales tomado como base para el análisis.
- Historia de aceleración absoluta en la parte superior del modelo. Se tomaron medidas de aceleración en la dirección paralela y en la dirección perpendicular de la aplicación del desplazamiento.
- Historia de desplazamiento relativo en la parte superior del modelo, el cual se obtiene de la resta del desplazamiento registrado en la parte superior y el desplazamiento registrado en la base de la mesa.
- Curva histerética del cortante en la base contra desplazamiento relativo en la parte superior del modelo.
- Intensidad de la señal para la cual se presenta la primera fisura.
- Intensidad de la señal para la cual se presenta situación de falla inminente.
- Mecanismo de colapso ante cargas dinámicas de cada uno de los elementos en estudio.
- Cálculo de la capacidad intrínseca de amortiguamiento con respecto al crítico medido a partir del decremento logarítmico del ensayo de vibración libre.

8.2 MODELO 1: MODELO ESCALA 1:5 BLOQUE # 5, MUROS SIN CONFINAMIENTO

8.2.1 Descripción

En un gran número de ocasiones se pudo observar muchas edificaciones en las cuales no existía ningún tipo de confinamiento, ni refuerzo, con placas de entrepiso para las que tenían más de un piso. Por lo tanto para este modelo se construyó una estructura de cuatro muros de bloque # 5 a escala 1:5 con una placa de entrepiso. Este modelo se someterá a ensayos de excitación en la base mediante la mesa vibratoria.

Las características geométricas del modelo son las siguientes: Una planta cuadrada de 98cm de lado conformada por cuatro vigas de cimentación de 8cm x 8cm de sección transversal. Los muros conforman un prisma de 94cm x 94cm de base y 60cm de altura para un total de 68cm de altura para el modelo. La placa que simula una placa de 15cm de espesor de acuerdo a la escala geométrica utilizada debería ser de 3cm de altura, sin embargo por la ley de escala de simulación artificial de masa, esta tiene necesidad de más peso, por lo tanto como se explicará más adelante se obtuvo una placa de 15cm de altura y 1m x 1m de base.



El primer paso en la construcción de los modelos fue la obtención de los ladrillos a escala. Estos se fabricaron de una manera artesanal en una pequeña fábrica en Soacha.

El proceso de fabricación es el siguiente:

- En un molino se muelen los bloques de arcilla seca, hasta lograr arcilla en polvo.

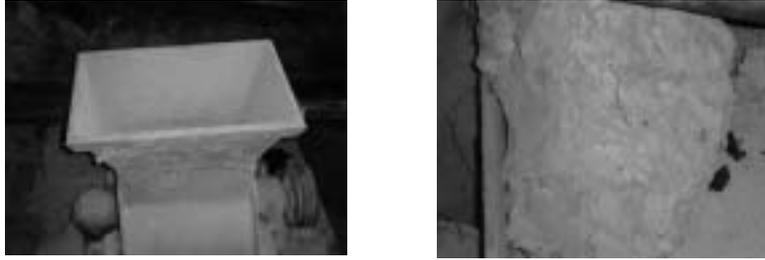


Imagen 8.1 Bloque de Arcilla y Molino



Imagen 8.2 Arcilla Molida

- Se humedece la arcilla molida hasta lograr una masa homogénea y luego se mezcla con aceite.

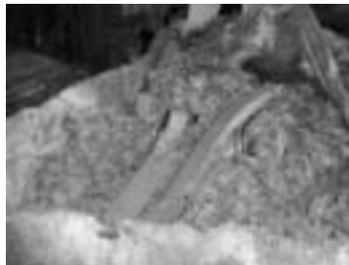


Imagen 8.3 Mezcla de Arcilla y Aceite

- Esta masa se introduce en la extrusora con la cual se obtiene la forma del ladrillo deseado.



Imagen 8.4 Extrusora

- Las tiras de ladrillo se cortan del tamaño requerido



Imagen 8.5 Corte de Ladrillos

- Los ladrillo ya cortados se dejan secar por dos o tres días al aire libre

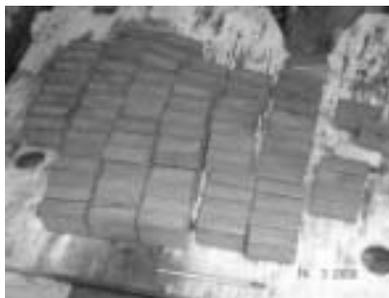


Imagen 8.6 Secado de ladrillos

- Una vez secos estos ladrillos se pasan al horno, el cual puede ser eléctrico o de leña.

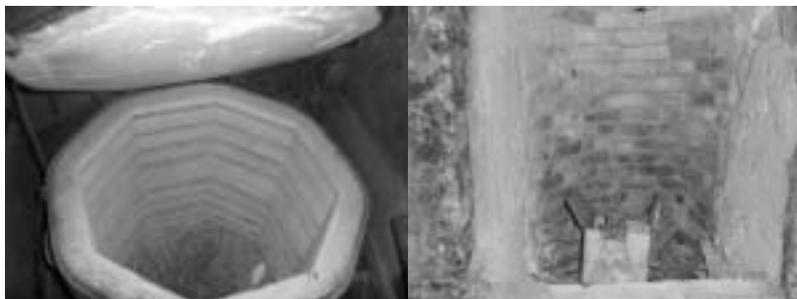


Imagen 8.7 Horno Eléctrico (Izquierda) y Horno de Leña (Derecha)



Después de obtener los ladrillos se comenzó la construcción del modelo como tal utilizando unas vigas de cimentación ya existentes las cuales estaban construidas en concreto y un refuerzo transversal y longitudinal en alambre galvanizado.



Imagen 8.8 Viga Existente

Sobre estas vigas se construyeron los muros utilizando las unidades de mampostería a escala.



Imagen 8.9 Construcción de Muros de Mampostería



Por último se construyó la placa de entrepiso la cual se fundió a parte debido a lo difícil que era quitar la formaleta después de fundida la placa. Esta se hizo con refuerzo de varillas de 3/8 y concreto. Además se le colocaron cuatro ganchos para facilitar su transporte y colocación sobre el modelo.



Imagen 8.10 Construcción Placa de Entrepiso

Esta placa que debía ser de 3cm de altura según la escala geométrica del modelo, quedó de 15cm debido a que según la ley de similitud utilizada:

$$\gamma_{\text{modelo}} = \gamma_{\text{prototipo}} \frac{L_{\text{prototipo}}}{L_{\text{modelo}}}$$

Lo cual quiere decir que el peso específico del modelo debe ser igual a cinco veces el peso específico del prototipo. Según esto se tiene que una placa de 1m x 1m x 0.03 m debería pesar 0.36 toneladas. Para obtener ese peso, la placa debido a la densidad del concreto que es de 2.4 ton/m³, debe tener 15cm de altura.

Debido a que la placa se fundió por separado, se requirió de un montaje con un andamio y una diferencia para colocarla sobre el modelo. Esta placa se fija al modelo con un epóxico.

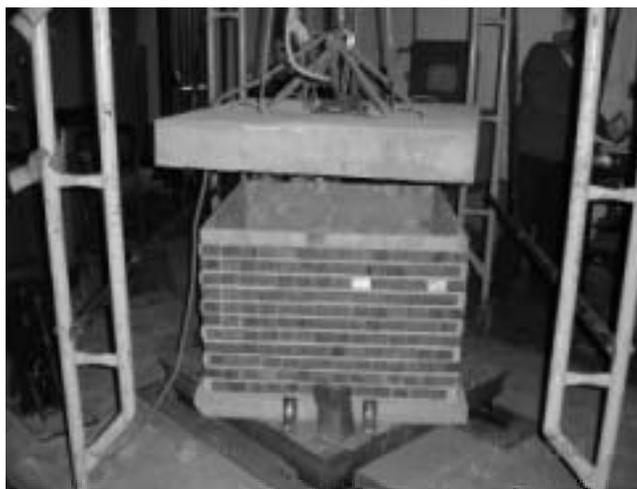


Imagen 8.11 Montaje de Placa



La misma relación de peso específico aplica para las piezas de mampostería utilizadas en este proyecto, por lo cual se utilizaron platinas de acero que se pegaron a cada ladrillo para incrementar el peso de cada unidad. Estas platinas se pegaron de tal manera que no afectaran el comportamiento estructural del modelo. Cada platina tiene un peso de 122gr y sus dimensiones son 1.5 “de ancho, 2.4 “de largo y 0.25 “ de espesor. Adicional a esto se puso un peso extra con ladrillos sobre la placa, ya que con las platinas no se alcanzó a tener el peso deseado.

Por último se ubicó la instrumentación ya mencionada en el capítulo 6 y el montaje del andamio se dejó por cuestiones de seguridad de los equipos ya que este modelo al no tener columnas, al fallar el modelo la placa caería encima de los equipos..

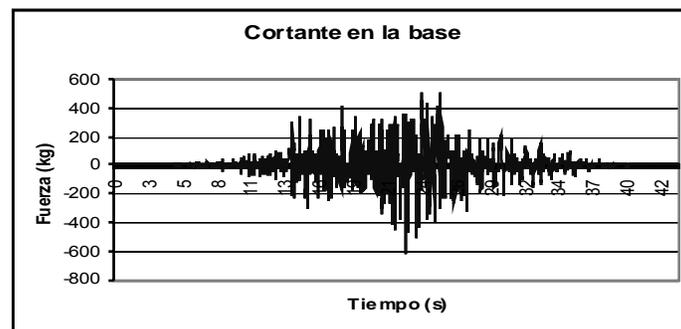


Imagen 8.12 Modelo 1 con peso adicional sobre la placa

8.2.2 Resultados del ensayo

Con el fin de observar el comportamiento de la estructura, se realizaron varias corridas del sismo utilizando diferentes porcentajes del sismo real comenzando con un 10% de este e incrementándolo hasta que se produjeran las fallas. Los datos obtenidos de los diferentes instrumentos para una aceleración de 0.6g (300% del sismo real) se presentan a continuación

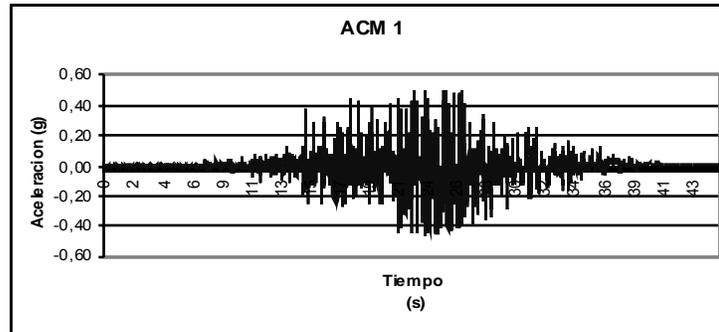
- Cortante en la base del Modelo:



Gráfica 8.5 Historia de Cortante en la base del Modelo 1

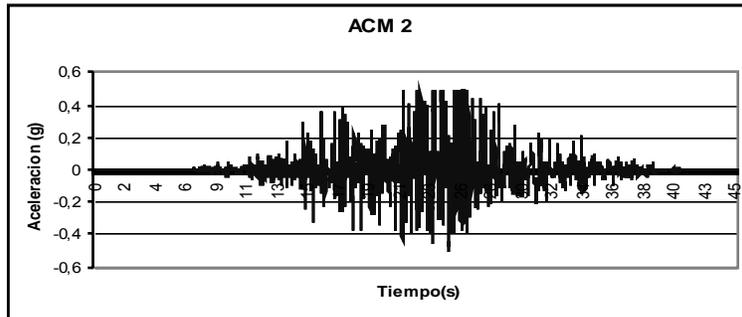


- Aceleración en la base de la mesa:

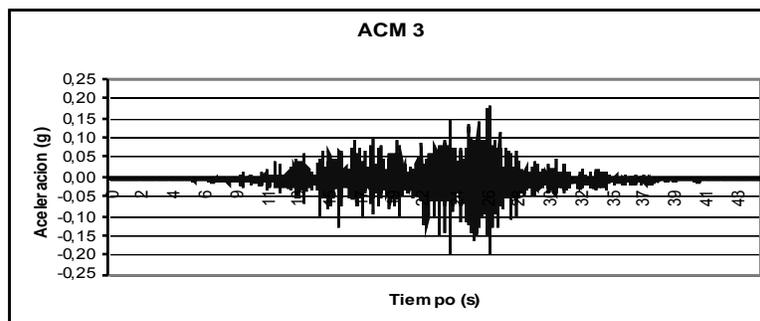


Gráfica 8.6 Historia de Aceleración en la base de la mesa del Modelo 1

- Aceleración en la parte superior del modelo:



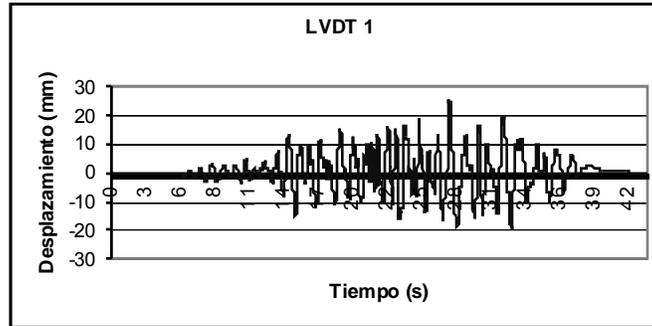
Gráfica 8.7 Historia de Aceleración en la parte superior del modelo (En la dirección del Movimiento) del Modelo 1



Gráfica 8.8 Historia de Aceleración en la parte superior del Modelo 1 (En la dirección perpendicular al Movimiento)

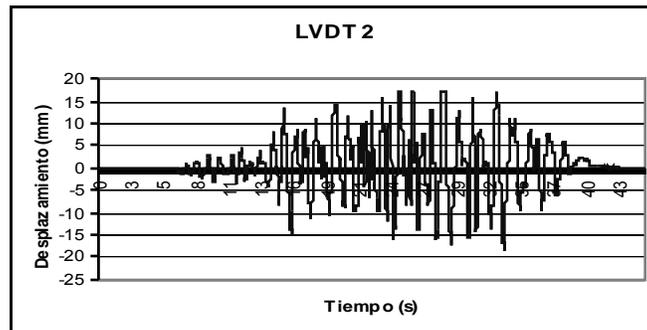


- Desplazamiento en la base de la mesa:



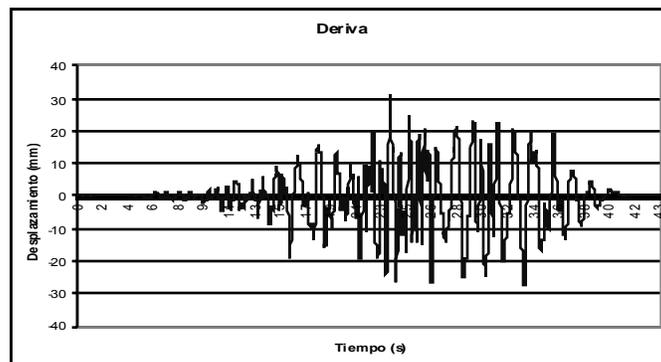
Gráfica 8.9 Historia de desplazamiento en la base de la mesa del Modelo 1

- Desplazamiento en la parte superior del modelo:



Gráfica 8.10 Historia de desplazamiento en la parte superior del Modelo 1

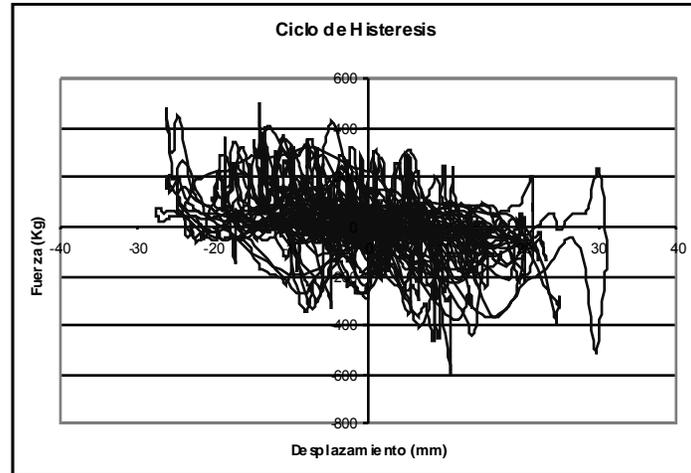
- Desplazamiento relativo de la parte superior del modelo



Gráfica 8.11 Historia de desplazamiento relativo en la parte superior del Modelo 1

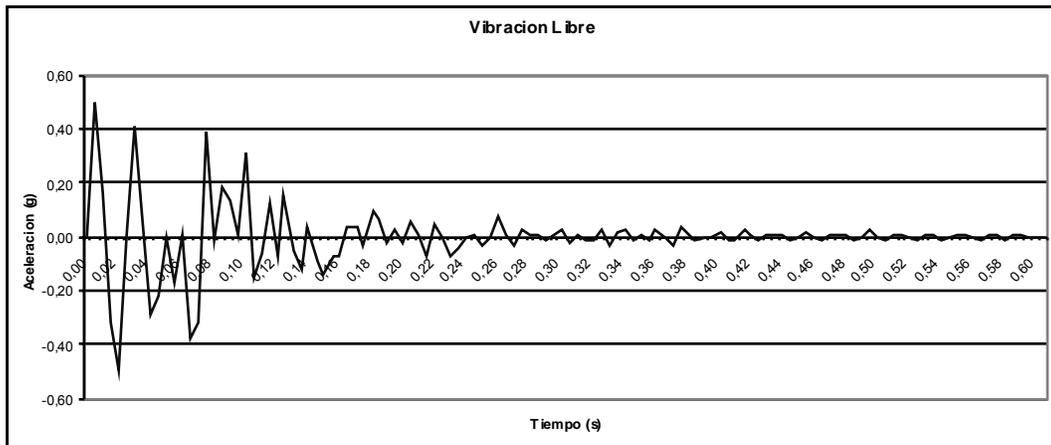


- Curva histerética del modelo



Gráfica 8.12 Curva Histerética del Modelo 1

- Estimativo de la capacidad intrínseca de amortiguamiento con respecto al crítico medido a partir del decremento logarítmico de las vibraciones libre:



Gráfica 8.12 Estimativo de la capacidad intrínseca de amortiguamiento con respecto al crítico del Modelo 1

A partir de esta gráfica de vibración libre podemos encontrar un amortiguamiento respecto al crítico $\xi = 5.17\%$



- Resumen de datos obtenidos:

INCREMENTO DE AMPLITUD (%)	ACEL MAXIMA BASE (g)	ACEL MAXIMA PLACA (g)	CORTANTE EN LA BASE (kgf)	DERIVA MAX (mm)	OBSERVACIONES
10	.02	0.041	30.807	1.350	-
20	.04	0.050	46.678	2.421	-
40	.08	0.079	88.087	3.812	-
60	.12	0.099	91.496	8.304	-
80	.16	0.126	123.415	9.590	-
100	.2	0.210	172.112	9.710	-
125	.25	0.324	192.878	9.906	-
150	.3	0.437	273.686	13.422	-
175	.35	0.483	312.304	15.059	-
200	.4	-	-	-	-
250	.5	-	-	-	-
300	.6	-	-	-	Falla Esquina Muro
300	.6	-	-	-	Hundimiento de Muro
300	.6	-	-	-	Separación Muros
300	.6	-	-	-	Colapso parcial muros
300	.6	-	-	-	Colapso total muros

Tabla 8.1 Secuencia del ensayo Modelol

Se calcula el esfuerzo a tensión presente en el muro para una aceleración de 0.6 g :

Peso del muro: 0.126 Kg. /cm²

Carga inercial debido a una aceleración de 0.6 g $\frac{0.126 * 0.6}{\sqrt{2}} = 0.0535 \frac{kg}{cm^2}$

Se utiliza la metodología para encontrar los momentos para losas apoyadas en sus extremos y que trabajan en dos direcciones.

$$l_a = 60 \text{ cm}$$

$$l_b = 94 \text{ cm}$$

$$m = \frac{60}{94} = 0.64$$

Para este valor de m = 0.64 se tiene: Ca = 0.075 y Cb = 0.011



Se calculan los momentos en las dos direcciones:

$$M_a = 0.075 * 0.0535 * 60^2 = 14.45 \text{ Kg.-cm.}$$

$$M_b = 0.011 * 0.0535 * 94^2 = 5.19 \text{ Kg.-cm.}$$

Para encontrar el esfuerzo utilizamos el mayor momento y un centímetro de ladrillo

$$\sigma = \frac{M * 6}{b * h^2} = \frac{14.45 * 6}{1 * 2.3^2} = 16.39 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

8.3 MODELO 2: MODELO A ESCALA 1:5 BLOQUE # 5, MUROS CONFINADOS ÚNICAMENTE CON COLUMNAS

8.3.1 Descripción

Este modelo consiste en una estructura confinada únicamente por columnas y con un techo en madera. Al igual que el anterior modelo los muros se construyeron con bloque # 5 a escala 1:5. Las dimensiones geométricas de este modelo son: altura de 68cm donde 8cm corresponden a la cimentación que tiene 98cm de lado, columnas de 6cm x 6cm con una altura de 60cm. Los muros son de 88cm entre columnas.

En este caso fue necesaria la construcción de las vigas de cimentación las cuales se construyeron utilizando las mismas dimensiones del modelo 1, utilizando como refuerzo longitudinal alambre de acero galvanizado calibre 10 y para el refuerzo transversal (flejes) calibre 16. Para el diseño de este refuerzo se utilizaron los valores mínimos especificados en la NSR-98 teniendo en cuenta la escala utilizada. A este refuerzo se ancló el refuerzo de las columnas también teniendo en cuenta longitudes de desarrollo especificadas en la NSR-98.



Imagen 8.13ª Refuerzo de la Cimentación



Imagen 8.13b Construcción de la Cimentación

Para la construcción de este modelo se utilizó el sistema de construcción de muros confinados donde primero se construyen los muros y luego los elementos de confinamiento, en este caso solo columnas.



Imagen 8.14 Construcción de Muros



Imagen 8.15 Vaciado de las Columnas



Imagen 8.16 Modelo 2

En este tipo de edificaciones es muy común encontrar que tienen una cubierta hecha en madera cuyo peso es de alrededor de 50 Kg /m². Para lograr este peso se colocaron ladrillos sobre la cubierta para cumplir con las leyes de escala.



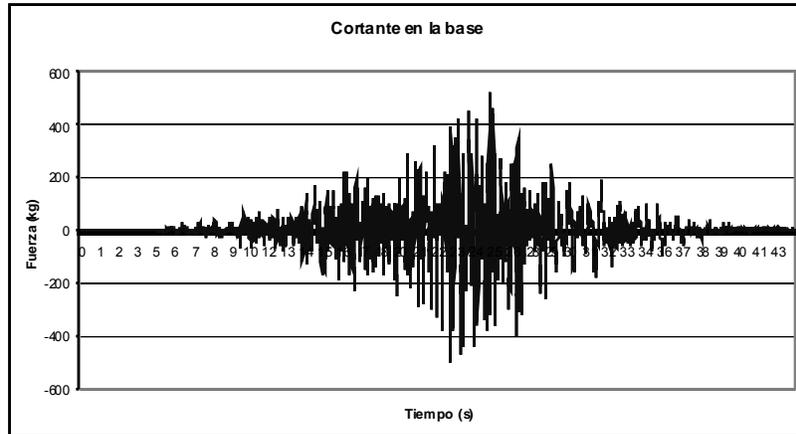
Imagen 8.17 Cubierta de Madera

8.3.2 Resultados de Ensayo

De la misma manera que en el anterior modelo, se realizaron varias corridas del sismo utilizando diferentes porcentajes del sismo real comenzando con un 10% de este e incrementándolo hasta que se produjeran las fallas. Los datos obtenidos de los diferentes instrumentos para una aceleración de 0.6g (300% del sismo real) se presentan a continuación

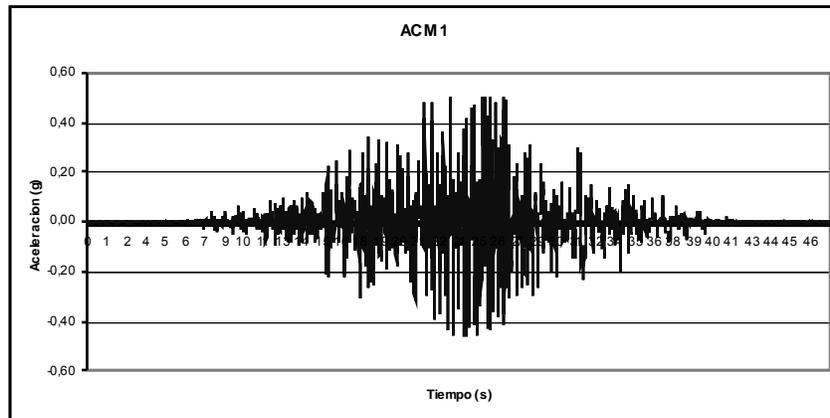


- Cortante en la base del Modelo:



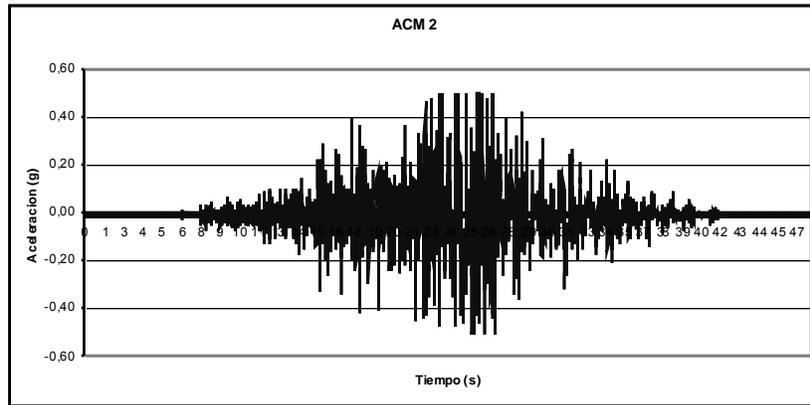
Gráfica 8.13 Historia de Cortante en la base del modelo del Modelo 2

- Aceleración en la base de la mesa:

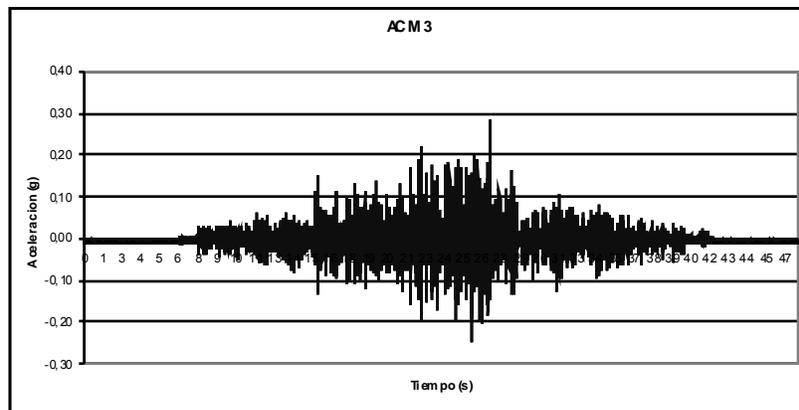


Gráfica 8.14 Historia de aceleración en la base de la mesa del Modelo 2

- Aceleración en la parte superior del modelo:

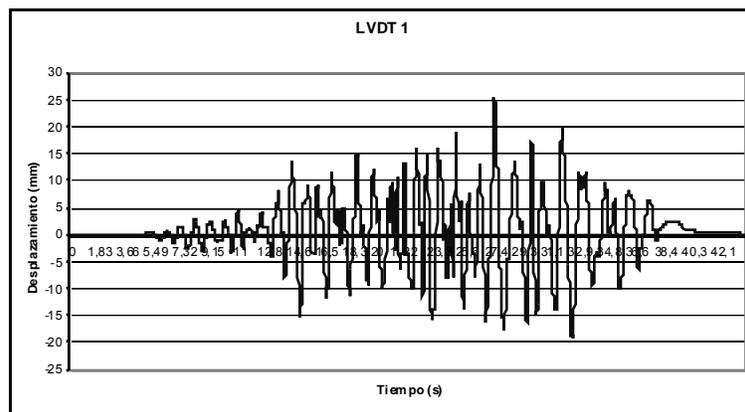


Gráfica 8.15 Historia de Aceleración en la parte superior del Modelo 2 (Dirección del Movimiento)



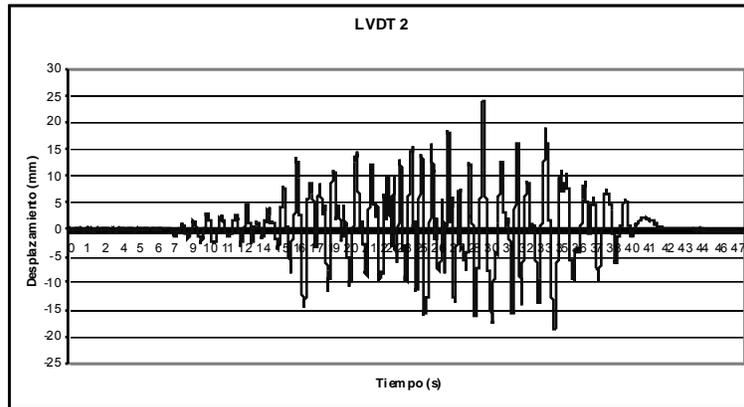
Gráfica 8.16 Historia de Aceleración en la parte superior del Modelo 2 (Dirección perpendicular al movimiento)

- Desplazamiento en la base de la mesa:



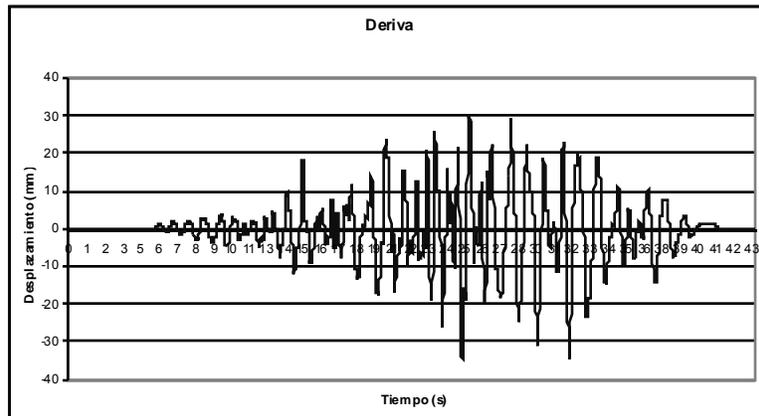
Gráfica 8.17 Historia de desplazamiento en la base de la mesa del Modelo 2

- Desplazamiento en la parte superior del modelo:



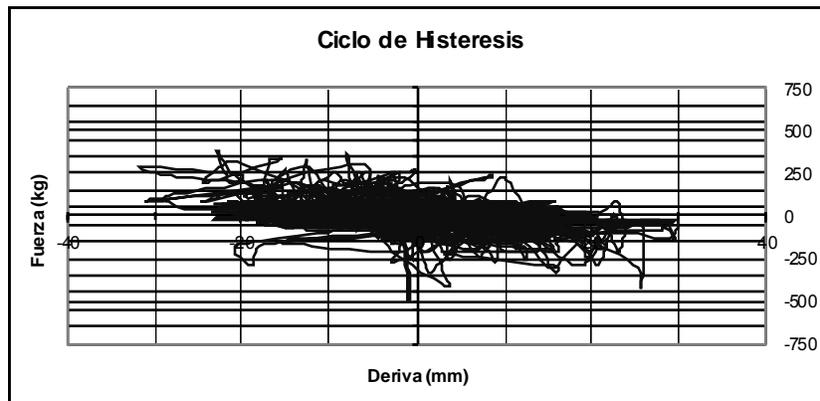
Gráfica 8.18 Historia de desplazamiento en la parte superior del Modelo 2

- Desplazamiento relativo de La parte superior del modelo



Gráfica 8.19 Historia de desplazamiento relativo de la parte superior del Modelo 2

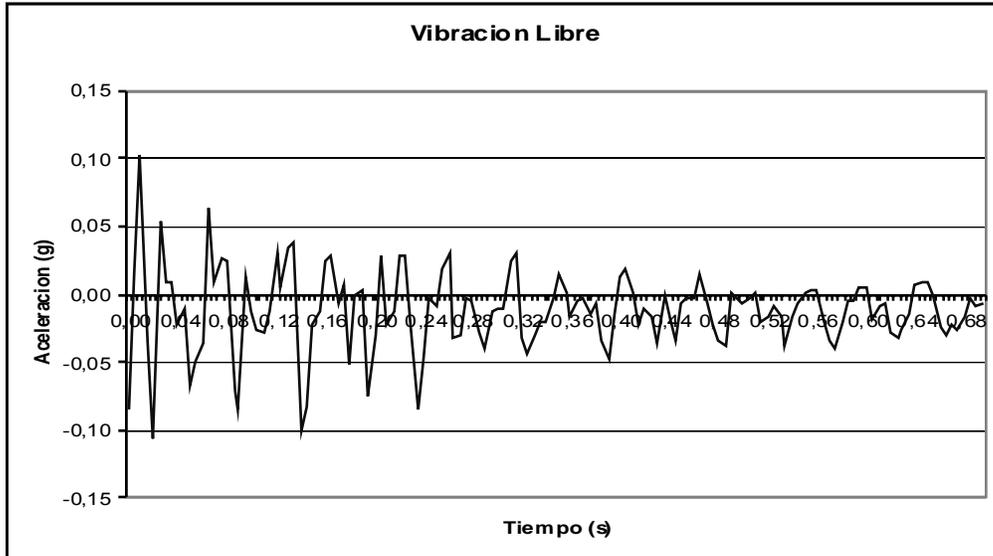
- Curva histerética del modelo



Gráfica 8.20 Curva histerética del Modelo 2



- Estimativo de la capacidad intrínseca de amortiguamiento con respecto al crítico medido a partir del decremento logarítmico de las vibraciones libre:



Gráfica 8.21 Estimativo de la capacidad intrínseca de amortiguamiento con respecto al crítico del Modelo 2

A partir de esta gráfica de vibración libre podemos encontrar un amortiguamiento respecto al crítico $\xi = 10.26\%$

Resumen de datos obtenidos

INCREMENTO DE AMPLITUD (%)	ACEL MAXIMA BASE (g)	ACEL MAXIMA PLACA (g)	CORTANTE EN LA BASE (kgf)	DERIVA MAX (mm)	OBSERVACIONES
10	.02	0.05	23.89	1.04	-
20	.04	0.077	45.15	2.09	-
40	.08	0.112	66.85	5.25	-
60	.12	0.14825	70.70	6.6	-
80	.16	0.14976	82.14	8.32	-
100	.2	0.22589	119.9	12.25	-
125	.25	0.30388	205.73	17.59	-
150	.3	0.41101	216.62	14.55	-
175	.35	0.43645	238.75	22.2	Falla ladrillo de apoyo del techo
200	.4	-	-	-	-
250	.5	-	-	-	-
300	.6	-	-	-	-
350	.7	-	-	-	-



400	.8	-	-	-	Falla ladrillo de apoyo del techo
450	.9	-	-	-	-
500	1.0	-	-	-	-
600	1.2	-	-	-	Falla ladrillo de apoyo del techo y falla en la pega
700	1.4	-	-	-	Aumento de falla en la pega
800	1.6	-	-	-	Falla ladrillo de apoyo del techo y falla en la pega y Aumento de falla en la pega
900	1.8	-	-	-	Fallamuros

Tabla 8.2 Secuencia del ensayo modelo 2

Se calcula el esfuerzo a tensión presente en el muro para una aceleración de 1.8 g :

Peso del muro: 0.126 Kg. /cm²

$$\text{Carga inercial debido a una aceleración de } 0.6 \text{ g } \frac{0.126 * 1.8}{\sqrt{2}} = 0.160 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Se utiliza la metodología para encontrar los momentos para las losas apoyadas en sus extremos y que trabajan en dos direcciones.

$$l_a = 60 \text{ cm}$$

$$l_b = 88 \text{ cm}$$

$$m = \frac{60}{88} = 0.68$$

Para este valor de m = 0.68 se tiene: Ca = 0.075 y Cb = 0.011

Se calculan los momentos en las dos direcciones:

$$M_a = 0.075 * 0.160 * 60^2 = 43.2 \text{ Kg.-cm.}$$

$$M_b = 0.011 * 0.160 * 88^2 = 13.63 \text{ Kg.-cm.}$$

Para encontrar el esfuerzo utilizamos el mayor momento y un centímetro de ladrillo

$$\sigma = \frac{M * 6}{b * h^2} = \frac{43.2 * 6}{1 * 2.3^2} = 49 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$



CAPITULO 9: FALLAS EN LOS MODELOS A ESCALA REDUCIDA

9.1 MODELO 1: MAMPOSTERÍA NO REFORZADA

Para facilitar el seguimiento del comportamiento de las fallas, es necesario nombrar cada uno de los muros, por lo tanto se tiene:

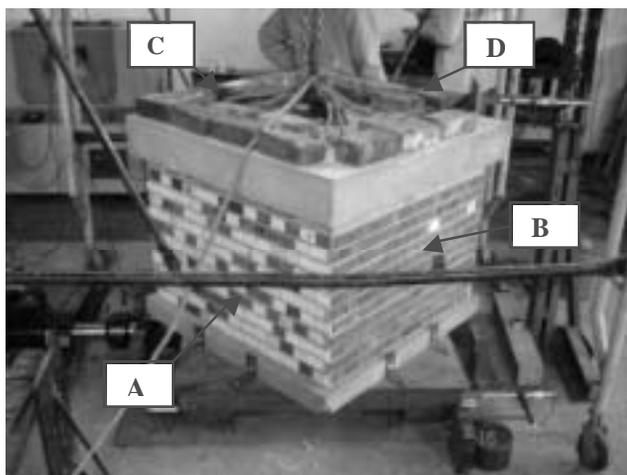


Imagen 9.1 Nomenclatura para muros de Modelo 1

En el ensayo realizado a este modelo se aumento la aceleración progresivamente hasta 0.6g donde se presentaron dos fallas iniciales a cortante en dos de las esquinas inferiores del modelo en los muros C y B como se muestran a continuación.

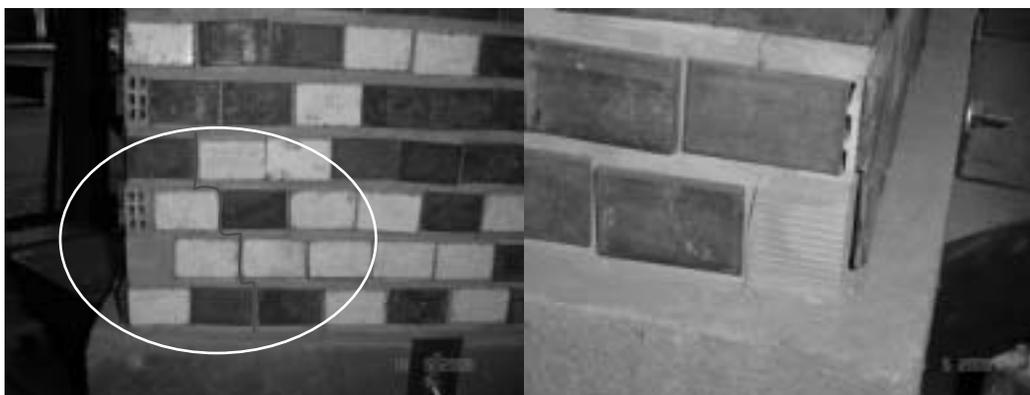
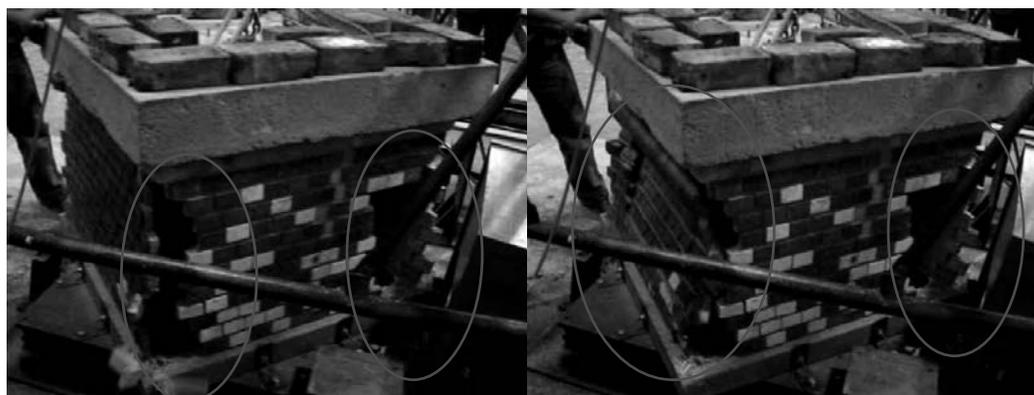
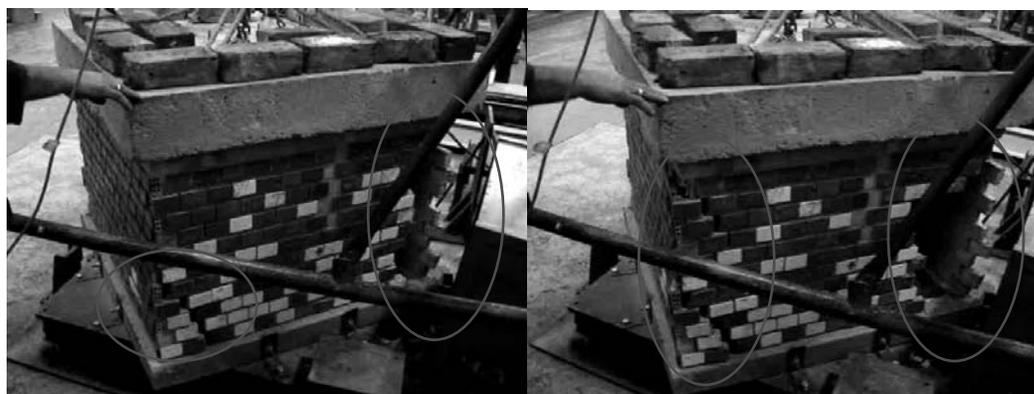
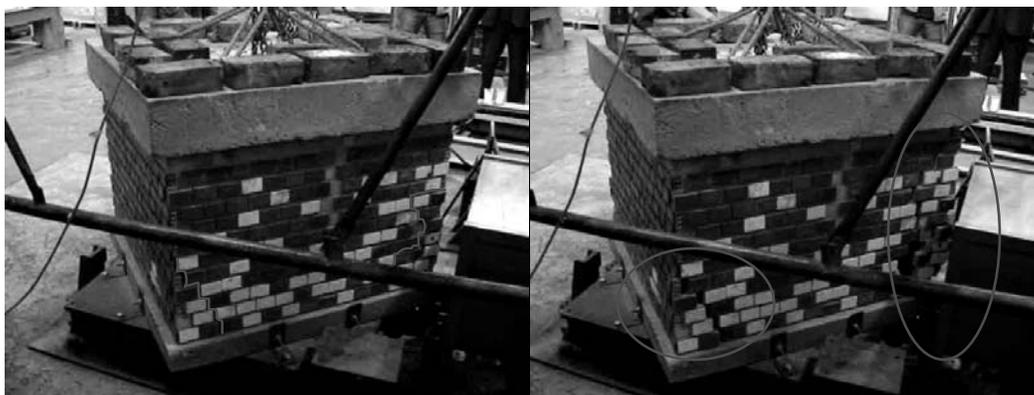


Imagen 9.2 Primeras fallas en el Modelo



Después de aparecer estas fallas iniciales se decidió aplicar sismos con la misma aceleración con el fin de observar la propagación de estas fallas y el comportamiento de el resto de la estructura.

A continuación se puede ver como por medio de la repetición de los sismos la falla inicial del muro C se va extendiendo hasta juntarse con otra falla a cortante del muro D, generando inicialmente el colapso de esta esquina (unión C y D) y posteriormente el colapso completo del muro D, además aparece otra falla en la otra esquina inferior del muro C la cual también se genera por cortante.



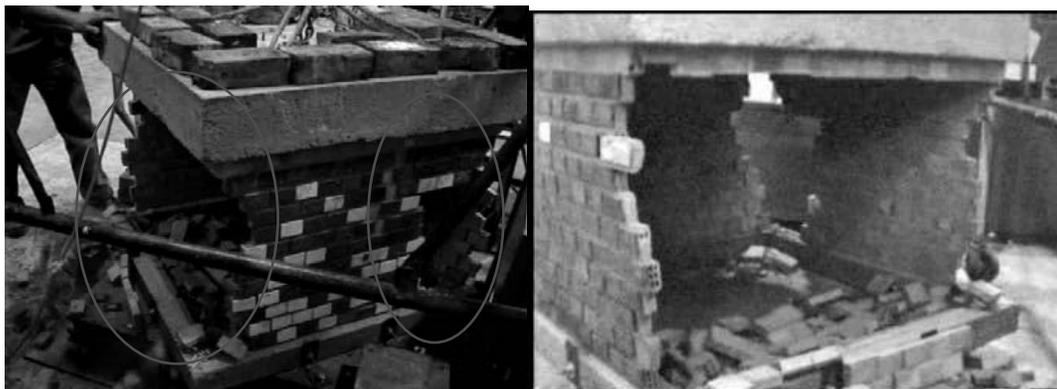


Imagen 9.3 Fallas Muros C y D

En cuanto al muro A, después de la primera repetición del sismo con 0.6g este muro se hundió, mas que todo en la esquina que va contra el muro C hasta que esta esquina fallo por completo. En el otro lado se fisuró la esquina inferior como en todos los otros muros por cortante, esta fisura se extendió diagonalmente hasta llegar a una junta horizontal a través de la cual recorrió el muro. A continuación se muestra el comportamiento de este muro.

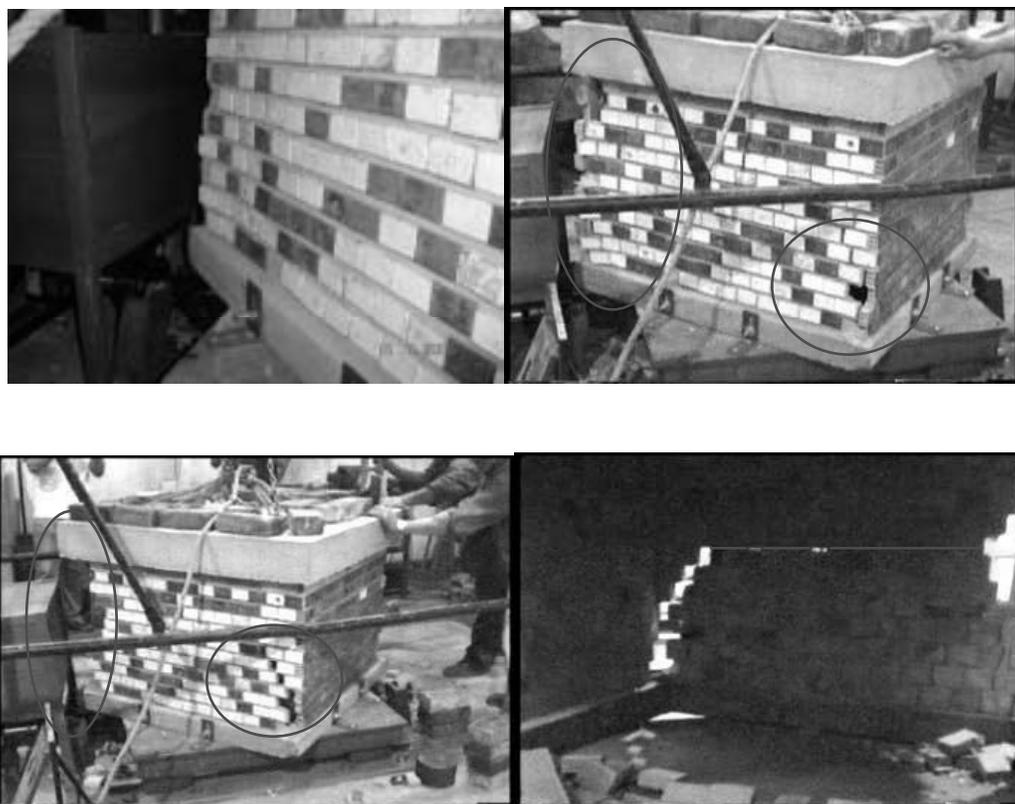


Imagen 9.4 Fallas Muro A



En el muro B, la falla inicial que se tuvo, se extendió y se vio afectado por el colapso del muro D como se puede apreciar y también se vio afectada por la falla de la esquina del muro A aparte de esto no presentó mayores daños



Imagen 9.5 Falla Muro B

Por último, después del colapso de todas las esquinas del modelo y del colapso del muro D, se llegó al colapso de toda la estructura como se puede observar en la siguiente secuencia

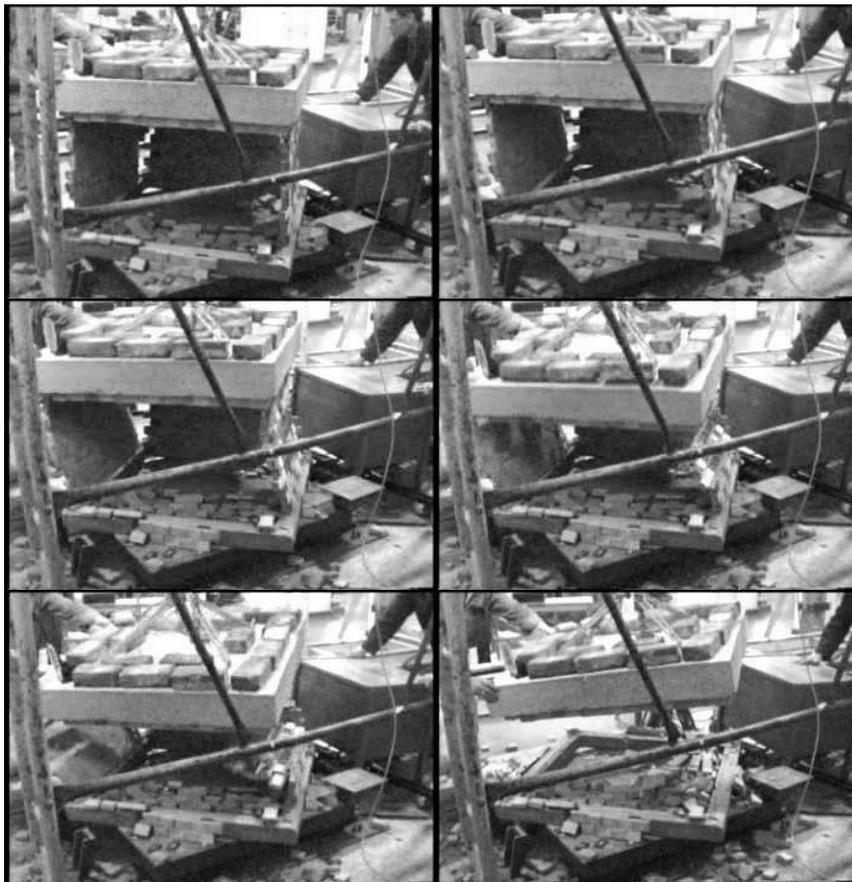


Imagen 9.6 Secuencia del Colapso de la estructura



9.2 MODELO 2: MUROS PARCIALMENTE CONFINADOS (SOLO COLUMNAS)

Para este modelo se mantiene la misma referencia con respecto a la orientación y el nombre de los muros que se asignaron para el modelo número 1.

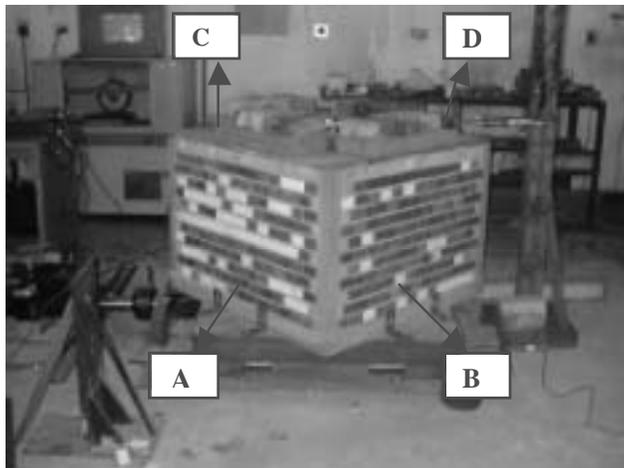


Imagen 9.7 Nomenclatura para muros de Modelo 2

En el ensayo realizado sobre este modelo construido con muros parcialmente confinados, se aumentó la aceleración gradualmente hasta 1.8g. Durante el aumento de la aceleración hasta este valor solo se observaron daños menores en los ladrillos que soportaban el techo y la pega alrededor de estos ya que estos se cortaron intencionalmente hasta 1/3 de su altura para acomodar el techo de madera, lo cual les quitó resistencia a estos.



Imagen 9.8 falla inicial en Ladrillo que sostiene la cubierta



Cuando se llegó a 1.8g fallaron los dos muros que estaban sosteniendo los durmientes del techo (Muros B y C). Estos tuvieron una falla fuera del plano debida a la carga transmitida por los párales como se puede apreciar en las siguientes imágenes donde las dos primeras muestran el muro B y la última muestra la falla en el muro C.

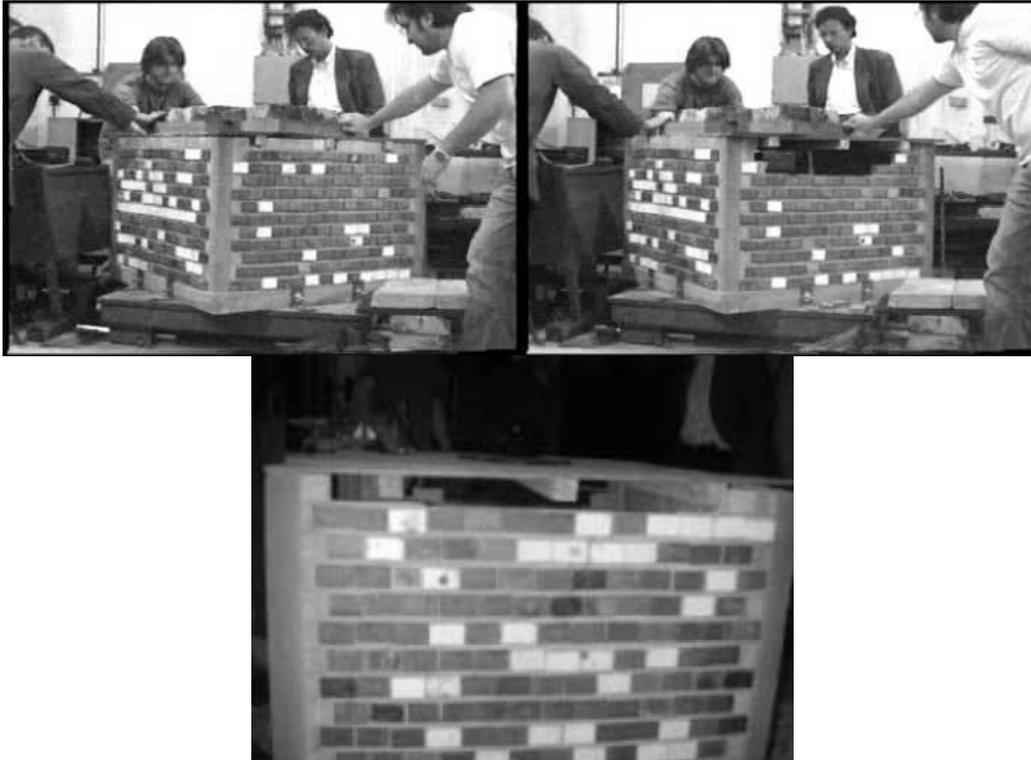


Imagen 9.9 Fallas fuera del plano de Muro B (Superior) y muro C (Inferior)

Además de estas fallas fuera del plano, se presentaron fisuras por cortante en el muro A (muro que no sostenía el techo) como se muestra en las siguientes imágenes

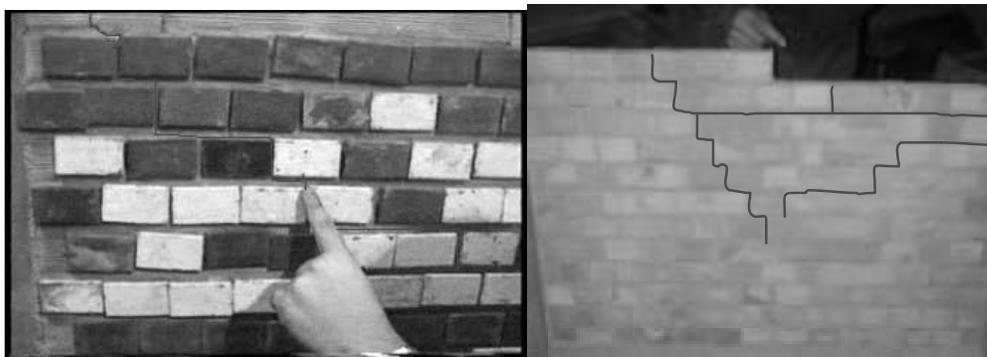


Imagen 9.10 Fallas por Cortante del muro A



Luego de que fallaran los muros que estaban sosteniendo el techo se decidió repetir el sismo con la misma aceleración de 1.8g retirando inicialmente el peso que se tenía en el techo de la estructura. Con las repeticiones que se realizaron, las fallas que se habían iniciado fueron aumentando y se pudo notar que todos los muros presentaban una relativa flexibilidad y una tendencia a formar el mismo tipo de falla que se puede apreciar en las siguientes imágenes aunque los dos muros que sostenían la cubierta se ven más afectados, esta “falla común” va desde la parte superior de cada muro y a lo largo de este, tendiendo a dirigirse hacia el centro del muro (alejándose en cierta manera de las columnas) conforme la altura disminuye como lo señalan las flechas en la última imagen mostrando así la falta de rigidez que proporcionaría una viga de confinamiento.



Imagen 9.11 Similitud en el mecanismo de falla de todos los Muros



CONCLUSIONES

En los dos modelos que se estudiaron en este proyecto, se logró llegar a definir mecanismos de falla concretos.

En el primer modelo que estaba conformado por muros sin ningún tipo de refuerzo y una placa de entrepiso se pudo observar con claridad que las fallas iniciaron en todos los casos en las esquinas inferiores de los muros, estas fallas se fueron propagando hasta generar inicialmente el colapso de todas las esquinas, posteriormente el colapso de uno de los muros y por último el colapso total de la estructura, por lo tanto según este análisis se ve con claridad el efecto que tiene la ausencia de columnas sobre este tipo de estructuras ya que los esfuerzos se concentran principalmente en esas zonas.

Además del mecanismo de falla que se pudo observar, quedó claro que tan vulnerable puede llegar a ser esta estructura ya que aunque los resultados de este tipo de ensayos son más cualitativos que cuantitativos al compararlos con la realidad, si los comparamos con otros modelos a escala podemos ver que esta estructura falló por completo cuando se le aplicó una aceleración de 0.6g lo cual al compararlo con otras estructuras a escala construidas de la misma manera es una aceleración relativamente baja, sobre todo si se tiene en cuenta que cuando esta estructura falla, el colapso de esta es inminente ya que carece de refuerzos lo que nos indica que definitivamente esta es una de las estructuras más vulnerables ante la aparición de un evento sísmico ya que después de la aparición de las primeras fallas el colapso de la estructura puede suceder en cualquier momento y por consiguiente genera gran peligro para los habitantes de este tipo de edificaciones.

En cuanto al segundo modelo constituido por muros parcialmente confinados (solo columnas) y una cubierta liviana se pudo observar como las primeras fallas se generaron en los muros en los cuales estaba soportada la cubierta, debido a esfuerzos fuera del plano inducidos por los durmientes de la cubierta, mientras se desarrollaron estas fallas, en los otros dos muros que no tenían carga se generaron fallas por cortante.

Después de varias repeticiones se observó que las fallas tomaban la misma forma en todos los muros iniciando en los extremos de la parte superior de cada muro y bajando hasta encontrarse en la mitad del muro, esto nos muestra que es lo que sucede cuando este pierde rigidez en esta parte al no tener una viga de amarre.

A pesar de que se observaron estas fallas la estructura mostró un muy buen comportamiento ya que solo se tuvieron fallas menores en los ladrillos que sostenían la cubierta a partir de la aplicación de una aceleración de 0.8g y la falla de los muros solo se presentó hasta la aplicación de 1.8g, lo cual nos muestra que esta configuración de solo columnas de refuerzo cuando se tiene una vivienda de un piso con una cubierta liviana no es tan vulnerable como se piensa sin embargo claramente no se puede afirmar que es correcto su uso. Es una configuración de cierta manera aceptable siempre y cuando se tenga en cuenta el tipo de solicitaciones que se tengan.



RECOMENDACIONES

En cuanto a la parte técnica es muy importante estudiar alternativas de rehabilitación para estructuras que no tengan ningún tipo de refuerzo como el modelo 1, con el fin de evitar las fallas que se generan en las esquinas de este tipo de estructuras por la ausencia de columnas y que generan el colapso de estas edificaciones.

También es muy importante analizar alternativas para rehabilitar las estructuras que solo tiene columnas como el modelo número dos ya que es primordial el evitar inicialmente la falla de los muros que sostienen la cubierta por efectos de esfuerzos fuera del plano que se generan por un apoyo deficiente de la cubierta sobre los muros; En segunda instancia se debe estudiar una forma de evitar que se generen esas fallas de corte que van de arriba hacia debajo de todos los muros.

Hay que tener en cuenta que en la realidad muchas construcciones se hacen de la manera que se hicieron para este proyecto, ya que en muchas ocasiones son los mismos propietarios quienes construyen sus casas, sin ningún conocimiento de ingeniería. Esta situación no va a cesar en el corto, ni mediano plazo, por lo cual es urgente llevar a cabo una estrategia para poder informar de cierta manera a las personas que están bajo este riesgo. Esta estrategia además de informar sobre los peligros que corren este tipo de estructuras, debe brindar conocimientos sobre los parámetros mínimos necesarios para llevar a cabo la construcción de edificaciones resistentes a sismos en mampostería no reforzada, para que de esta forma si una persona se ve obligada a construir su propia vivienda, no corra el peligro que están corriendo actualmente al usar de manera inadecuada este sistema constructivo.



BIBLIOGRAFIA

1. BARBAT, Alex H. CANET, Juan Miguel Estructuras Sometidas a Acciones Sísmicas. 2ª Edición. CIMNE. Barcelona-España, 1994.
2. BARRIOS JARAMILLO, Luis Hébert. Manual de Ensayos de Laboratorio Mampostería Estructural. 2ª Edición. Universidad de los Andes. Bogota, 1998.
3. DIAZ MANGONES, Kevin Arturo. RIOS CASTRO, Laura Juanita. Alternativas de Rehabilitación de Adobe y Tapia Pisada, Universidad de los Andes. Bogotá, 2005.
4. DOWRICK, David J. Earthquake Resistant Design for Engineers and Architects, 2nd Edition, Wiley, 1987.
5. DRYSDALE, Robert G. HAMID, Ahmad A. BAKER, Lawrie R. Masonry Structures Behavior and Design. 2nd Edition. The Mansory Society. Boulder Colorado. 1999.
6. HARRIS, Harry G SABNIS, Gajanan M. Structural Modeling and Experimental Techniques. 2nd Edition. CRC Press, 1999.
7. SARRIA, Alberto. Ingeniería Sísmica, Ediciones Universidad de los Andes. Bogota, Colombia, 1995
8. SCHNEIDER, Robert R. DICKEY, Walter L. Reinforced Masonry Design, 3rd Edition, Prentice Hall. Eglewood Cliffs, New Jersey, 1994.
9. TIQUE LUCENA, Jhadier Augusto. Comportamiento sísmico de Muros de Mampostería con Refuerzo Exterior Estudiados en Modelos a Escala en la Mesa Vibratoria. Universidad de los Andes. Bogota, 2004.
10. <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes%5Cmanizales/4080020/Lecciones/Capitulo%203/MAMPOSTERIA%20ESTRUCTURAL.htm>
11. www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1222103-092523//07CAPITULO6.pdf