



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**CALIBRACIÓN CON VIBRACIÓN AMBIENTAL DE
UN MODELO DE LA COLUMNA ANCHA PARA
EDIFICIOS MULTIFAMILIARES DE MAMPOSTERÍA
DE ALTURA MEDIA.**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

ELISEO TRUJILLO MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. JORGE IGNACIO CRUZ DÍAZ

MORELIA, MICHOACÁN. NOVIEMBRE, 2012.

AGRADECIMIENTOS

Si caes es para levantarte, si te levantas es para seguir, si sigues es para llegar a donde quieres ir y si llegas es para saber que lo mejor esta por venir.

A mis padres, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, por su motivación constante, por su valor mostrado para salir adelante.

A mis hermanos, por estar conmigo y por el apoyo brindado en todo momento.

A mi director de tesis el Dr. Jorge Ignacio Cruz Díaz, por sus sugerencias, comentarios y el apoyo brindado para ser posible esta tesis.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.	5
1.1. Introducción.	5
1.2. Modelación estructural de la mampostería.	6
1.3. Edificios instrumentados.	7
1.4. Metodología y obeitivos.	8
1.5. Alcances de este trabajo.	9
1.6. Organización del documento.	9
2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA.	10
2.1. Historia de la mampostería.	10
2.2. Propiedades de los materiales.	13
2.3. Comportamiento mecánico de la mampostería a compresión axial.	16
2.4. Comportamiento mecánico de la mampostería a tensión diagonal.	18
2.5. Tipos de mampostería.	21
2.5.1. Mampostería reforzada interiormente.	21
2.5.2. Mampostería confinada.	22
3. PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL.	24
3.1. Edificios instrumentados.	24
3.2. Técnicas de análisis espectral.	34
3.2.1. Técnica de Nakamura.	34
3.2.2. Técnica de Refracción de Micro-tremores (ReMi).	36
3.3. Edificios estudiados.	37
3.4. Descripción arquitectonica.	37

3.5.	Descripción estructural.	39
3.6.	Pruebas de vibración ambiental en los edificios seleccionados.....	40
3.7.	Ubicación de los sensores en la estructura.....	41
3.8.	Análisis de resultados.	42
4.	MODELO NUMÉRICO.	45
4.1.	Modelo de la columna ancha (MCA).....	45
4.2.	Método de la diagonal de compresión.	48
4.3.	Módulo numérico de los edificios estudiados.....	50
4.4.	Calibración del modelo numérico.....	54
5.	COMENTARIOS FINALES Y PERSPECTIVA.	56

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Introducción.

El aumento de la población en México sobre todo en las grandes ciudades ha aumentado la demanda de viviendas, este hecho aunado con la falta de espacios en las ciudades ha conducido al desarrollo de la vivienda multifamiliar. Desde ya hace varios años el Gobierno Federal a impulsado la construcción de edificios multifamiliares de varios niveles, es práctica común construir dichos edificios con sistemas tradicionales a base de muros de mampostería confinada, es por ello que es de gran interés investigar en relación a su comportamiento experimental, así como investigar en relación a los métodos comúnmente usados en la práctica profesional.

Instrumentar un edificio con acelerómetros provee una oportunidad de observar y de entender mejor su comportamiento; permite determinar sus propiedades dinámicas, frecuencias naturales y formas modales. El estudio con vibración de las estructuras ha permitido observar que sus periodos de vibración pueden variar significativamente de un terremoto a otro e inclusive con el tiempo. Una de las metas de la instrumentación de un edificio es entender estos cambios, los cuales en muchos de los casos corresponden a daño en las estructuras, de tal forma que el estudio de estos cambios es usado como una herramienta de evaluación de daños ante una solicitud sísmica.

Por fortuna, no es necesario esperar a que ocurra un evento sísmico o terremoto para estudiar la respuesta de un edificio ya que es suficiente con observar pequeños niveles de excitación que pueden ser originados tanto por vibración ambiental como forzada, es decir, experimentalmente.

Las técnicas de vibración forzada y vibración ambiental para pruebas en edificios son muy similares. Ambos métodos se basan en pequeños niveles de excitación, por lo que pueden

ser usados para determinar varias formas modales y frecuencias características de vibración y sus correspondientes valores de amortiguamiento.

Los estudios de vibración ambiental se han usado con éxito desde hace más de 25 años en nuestro país, para la identificación de las características dinámicas de edificaciones.

Estos estudios también pueden ser usados para validar modelos analíticos que predicen la respuesta esperada de la estructura ante las cargas laterales. Una aplicación importante de la técnica de vibración ambiental en edificaciones consiste en observar el efecto del reforzamiento sismo-resistente antes y después de la intervención. También se han hecho análisis en tiempo real las formas modales de una edificación empujando modelos analíticos que se van calibrando con los registros de vibraciones ambientales, con la finalidad de estimar la existencia, ubicación y magnitud del daño en una estructura (Tischer et al., 2006).

1.2. Modelación estructural de la mampostería.

En el análisis estructural se debe considerar la disposición y la distribución de los elementos estructurales que conforman una estructura. Actualmente existe una gran variedad de modelos para el análisis estructural de muros de mampostería, pero estos no todos son aplicables a los muros confinados. Por lo tanto en un modelo analítico de una edificación de mampostería se debe considerar la distribución en planta, elevación y las propiedades mecánicas de la mampostería. En el análisis de los resultados pueden resultar complicados dependiendo del modelo elegido, por ejemplo un modelo con elementos finitos, lo anterior requiere de un entrenamiento especial para el entendimiento de los resultados del análisis.

En apartados posteriores se describen algunos modelos utilizados para modelar las estructuras de mampostería. Por ejemplo el método de la columna ancha que goza de gran popularidad en los despachos de cálculo, conforme a este modelo las estructuras de

mampostería se modelan a través de marcos, ya sean planos o tridimensionales. Otro modelo estructural es el método de la diagonal de compresión, que se basa en la sustitución de muros por una serie de diagonales equivalentes cuyas propiedades dependen de la rigidez del marco de concreto que confina el muro y de la rigidez al corte del panel de mampostería.

1.3. Edificios instrumentados.

La instrumentación sísmica en la ciudad de México comienza a partir de 1987 con la participación de Centro de Instrumentación y Registros Sísmicos de la Fundación Javier Barros Sierra y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, la cual se inicio con dos redes aceleró-métricas (Murià Vila et al., 1962). La primera experiencia en México fue con la torre Latinoamérica que en ella se registraron los movimientos sísmicos de julio de 1957 y mayo de 1962, cuyos movimientos y aceleraciones fueron la base para establecer los coeficientes sísmicos del Reglamento de Construcción del Distrito Federal.

Desafortunadamente esta experiencia no motivó a la instrumentación de más edificios, ni tampoco se le dio continuidad a la operación de los instrumentos de dicho edificio, por lo que no se obtuvieron registros de la respuesta estructural del edificio, en el sismo del mes de septiembre de 1985. Lo que limitó la comprensión del comportamiento estructural de varios edificios que sufrieron daños severos, lo que evidenció la importancia de contar con datos experimentales para poder hacer estimaciones cuantitativas de la respuesta de las diferentes estructuras y así adecuar los parámetros que se emplean en el diseño estructural de edificios.

En el mundo, Japón y Estados Unidos cuentan con cientos de acelerómetros instalados en suelos y estructuras. Los registros obtenidos han sido de gran importancia para la mejor comprensión del comportamiento estructural, como evaluar y modificar los criterios de diseño sísmico de las edificaciones.

El objetivo de estas investigaciones es contribuir a la comprensión de sus respuestas dinámicas ante sismos de gran intensidad, teniendo como prioridad la determinación de las fuerzas y los amortiguamientos que se presentan durante sismos intensos, a fin de comprar sus valores con los que se diseñan y analizar la evolución de las propiedades del sistema suelo estructura.

1.4. Metodología y obeitivos.

En este trabajo se presenta la estimación teórica y experimental de los periodos de vibración de cuatro edificios multifamiliares de cuatro niveles construidos con mampostería de piezas huecas. Para determinar la respuesta analítica de la estructura, se utilizó el programa Sap2000 V15 en el cual se modelaron los edificios con el Método de la Columna Ancha (MCA) y para la estimación experimental de los periodos se utilizaron mediciones de vibración ambiental de los edificios.

El objetivo central de este trabajo consiste en la determinación de las propiedades dinámicas de los edificios multifamiliares localizados en el Fraccionamiento las Espigas, edificios construidos a base de muros de mampostería tipo tabimax, con el apoyo de estudios de vibración ambiental. Así mismo se tiene como objetivo calibrar los modelos matemáticos de los edificios elaborados con el MCA en tres dimensiones.

Para lograr esto se plantearon las siguientes actividades.

- a).- Una breve investigación de edificios instrumentados en la república mexicana.
- b).- Medición de vibración ambiental a los edificios en estudio.
- c).- Procesamiento y análisis de las señales para la determinación de espectros de amplitudes de Fourier para la obtención de frecuencias naturales de vibración.
- d).- Elaboración de un modelo numérico de la estructura en 3D, utilizando el MCA.
- e).- Análisis de los resultados obtenidos del modelo y recomendaciones.

1.5. Alcances de este trabajo.

En este trabajo comprende la determinación de los periodos de vibrar de cuatro edificios de mampostería confinada mediante pruebas de vibración ambiental y la generación de los modelos numéricos mediante el MCA siguiendo las recomendaciones de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-M, 2004) así como la calibración de dichos modelos.

1.6. Organización del documento.

Capítulo I. En este capítulo se describe una breve investigación sobre la importancia de la instrumentación de edificios, así como descripción del objetivo y alcances del presente trabajo.

Capítulo II. Se describe una breve historia del uso de la mampostería en las primeras civilizaciones así como su evolución con el paso del tiempo. También se describen las propiedades de los materiales, las características mecánicas de la mampostería y tipos de mampostería.

Capítulo III. En este capítulo se describen algunos edificios instrumentados en nuestro país, algunas de las técnicas utilizadas en el análisis espectral; asimismo se presentan las mediciones de los edificios estudiados así como su análisis.

Capítulo IV. En este capítulo se presentan dos modelos estructurales, el MCA y el Método de la Diagonal de Compresión (MDC), asimismo se describe el modelo adoptado para los edificios objeto de este estudio así como su calibración.

Capítulo V. En este capítulo se describe los comentarios, perspectivas y conclusiones del trabajo realizado en esta tesis.

2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA.

2.1. Historia de la mampostería.

Desde los inicios de la evolución humana, el hombre ha tenido la necesidad de espacio para protegerse de la intemperie, los primeros refugios fueron, cuevas, cavernas, protuberancias rocosas, etc. Posteriormente el hombre aprendió a construir viviendas artificiales, por lo que el hombre empezó a apilar piedras para protegerse de las inclemencias del medio ambiente y de sus enemigos.

Un ejemplo de ello se muestra en la figura 1 en la cual se observa una estructura formada con piedras apiladas, uno de los primeros sistemas constructivos de mampostería usado por el hombre.



Fig. 1 Apilamiento de piedras naturales.

Con el paso del tiempo, el desarrollo de la mampostería dio lugar a la utilización del barro como mortero, que facilitó el acomodo de las piedras de formas irregulares.

Muchos años después la humanidad avanzó enormemente con la utilización de las piezas artificiales las cuales se fabricaban mediante el uso moldes, las piezas fabricadas se dejaban secar al sol. Los moldes dieron un gran avance como herramienta de construcción que permitió la fabricación rápida de piezas regulares, además permitió la uniformidad y facilidad de la construcción de edificaciones.

El adobe fue llevado al horno durante el principio del tercer milenio a. C. lo que dio como origen la fabricación de ladrillos cerámicos. En esta etapa las piezas de mampostería se asentaban con mortero de betún o alquitrán, lo que les permitió que las estructuras fueran mucho más grandes y duraderas.



Fig. 2 Estructuras construidas con piezas artificiales.

La cultura romana a través de la invención del mortero hidráulico contribuyó al desarrollo de la construcción de monumentos de mampostería. Esto hizo posible que se construyeran estructuras mucho más grandes y con resistencia superior a las construidas en ese entonces.

El mortero hidráulico se utilizó por primera vez en el siglo II a. C., los griegos y los romanos empleaban caliza calcinada y posteriormente aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo o tejas quebradas. En un principio el mortero era débil y solo se usaba una capa delgada para unir los bloques que se tallaban cuidadosamente.

Una vez que los romanos encontraron la manera de fabricar un mortero más resistente las piedras dejaron de tallarse con tanto cuidado ya que las piedras de menor tamaño podrían resultar tan resistentes como un bloque de mayor tamaño.



Fig. 3 Coliseo Romano (Roma, Italia).

Así mismo los egipcios edificaron pirámide apilando piedras que ensamblaban perfectamente unas a las otras, estas piedras fueron talladas con herramientas de bronce y sílex.



Fig. 4 Las grandes pirámides de Guiza (Egipto).

Las culturas mexicanas construyeron grandes estructuras utilizando piedras naturales y artificiales, los templos y edificios se hacían con miles de piedras y adobe para recubrir las paredes, en raras ocasiones se utilizó el ladrillo. El uso del ladrillo lo aportaron los olmecas al construir con bloque de barro rojo y amarillo unidos con barro los muros de La Venta.

Los templos tenían una base cuadrangular, sobre la que se construían las torres escalonadas como pirámides, las paredes internas de los templos solían adornarse con mosaicos pintados en colores vivos.

Así como otras culturas hicieron aportaciones importantes en las edificaciones de mampostería, los mayas utilizaron las piedras como techado de tumbas, para la construcción de edificios de culto de los Dioses y de personajes de más alto linaje. Además de utilizar la mampostería para la construcción de templos y viviendas, las culturas antiguas de México la utilizaban para la construcción de obras civiles tales como muros de contención y escalinatas.



Fig. 5 Chichén Itzá (Yucatán México).

2.2. Propiedades de los materiales.

La mampostería es uno de los materiales cuyas propiedades son difíciles de predecir y de caracterizar, debido a la gran dispersión que exhiben sus características mecánicas que son muy variables a comparación de otros materiales. Esto es, entre otros factores, debido al poco control que se tiene sobre las propiedades de los materiales, componentes y sobre los procedimientos de construcción empleados, que en general resultan ser un procedimiento artesanal.

El componente básico para la construcción de mampostería es la unidad o pieza, que por su origen puede ser natural o artificial. Las unidades de piedras que se utilizan pueden ser labradas o no labradas, en cuanto a las piezas artificiales hay una gran variedad en el mercado. Estas se diferencian entre sí tanto por la materia prima utilizada como en las características geométricas de las unidades, así como en el procedimiento de su fabricación. Para auxiliar al ingeniero la NMX-C-404-ONNCCE-2005 define cada tipo de pieza según su forma geométrica y el tipo de material con el que está constituido.

Tabla 1 Clasificación de las piezas de mampostería (NMX-C404-ONNCCE-2005).

TIPO DE PIEZA	MATERIALES	FORMA
Bloque	Grava-Cemento	Rectangular
	Arena-Cemento	Rectangular
	Barro extruido	Rectangular
	Barro recocido	Rectangular
	Sílico calcáreo	Rectangular
	Otros	Otros
Tabique (Ladrillo)	Barro recocido	Rectangular
Macizo	Barro extruido	Rectangular
Hueco	Otros (concreto)	Rectangular
Multiperforado		Otros
Tabicón	Grava-Cemento	Rectangular
	Arena-Cemento	Rectangular
	Tepojal-Cemento	Rectangular
	Otros	Otros

Las propiedades físicas de la mampostería son aspectos importantes de los que depende el buen comportamiento. En estas propiedades se tiene la absorción, la estabilidad dimensional y la resistencia a la compresión.

Por otro lado, los morteros son mezclas plásticas de aglomerados que resultan de la combinación de arena, agua y cementante que puede ser cemento, cal, o una mezcla de estos materiales. Se utiliza para unir piezas, sus características mecánicas son un factor importante en las propiedades estructurales de la mampostería.

Las principales propiedades de los morteros son: su resistencia a la compresión, tensión, adherencia con la mampostería y el módulo de elasticidad. Otra característica importante es su capacidad para evitar que la pieza absorba el agua necesaria para el fraguado del mortero. El comportamiento del mortero influye en el de la estructura de mampostería, el módulo de elasticidad del mortero participa en la rigidez de la mampostería, la resistencia a

compresión en la habilidad para distribuir la carga vertical y la resistencia a tensión en su habilidad para acomodar cargas laterales.

Proporcionamiento en volumen recomendado para mortero en elementos estructurales según NTC-M, 2004.

Tabla 2 Proporción en volúmenes NTC-M, 2004.

Tipo de mortero	Partes de cemento hidráulico	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal hidratada	Partes de arena (medida en estado seco)	Resistencia nominal en compresión f_j^* , (kg/cm ²)
I	1		0 a 1/4	No menos de 2.25 ni mas de 3 veces la suma de cementantes en volumen.	125
	1	0 a 1/2			
	1		1/4 a 1/2		
II	1	1/2 a 1			75
III	1		1/2 a 1 1/4		40

Las propiedades mecánicas del mortero son muy variables y dependen principalmente del tipo de cementante utilizado y de la relación arena/cementante. La resistencia a compresión del mortero se determina mediante ensayos de cubos de 5x5 cm de lado que son sometidos a pruebas en el laboratorio, según las normas establecida por la NMX-C-061-ONCCE-2010.

Diversas investigaciones han demostrado que la adherencia del mortero a las piezas de mampostería es de naturaleza mecánica. Cuando el mortero se pone en contacto con la pieza de mampostería, esta succiona lechada que penetra por los poros capilares de la pieza, que al cristalizar forma la trabazón mecánica, que es la base de la adhesión entre ambos elementos. Este fenómeno será incrementado tanto por el aumento de la rugosidad superficial, como por la presencia de cavidades en la misma cara.

Por otra parte, los proporcionamientos elevados de cal y arena reduce la adherencia al reducirse la concentración del cementante, material que provee los cristales necesarios para la trabazón de los elementos.

2.3. Comportamiento mecánico de la mampostería a compresión axial.

La resistencia en compresión de pilas de mampostería es uno de los parámetros índice más importantes de la mampostería ya que de éste dependen las propiedades mecánicas de los muros. Para mampostería de piezas artificiales la resistencia a compresión suele obtenerse a través del ensaye de pilas formadas por piezas sobrepuestas unidas con mortero, la relación altura espesor de la pila estará comprendida entre dos o cinco, de aproximadamente cuatro piezas.

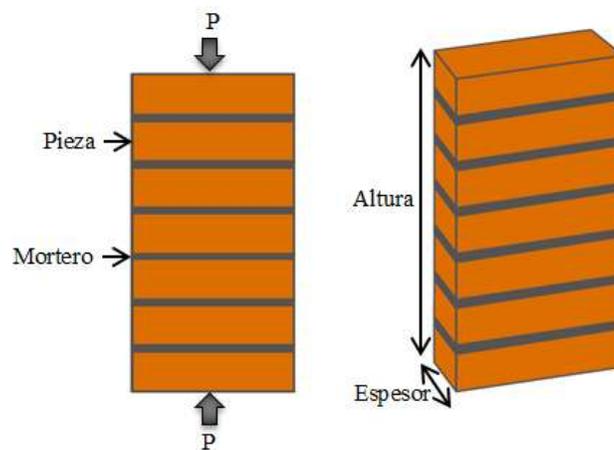


Fig. 6 Pila para prueba en compresión.

El modo de falla de la mampostería ante cargas axiales depende de la interacción de piezas y mortero, las piezas y el mortero tienen comportamiento esfuerzo-deformación diferente. El modo de falla de pilas de mampostería más común es conocido como falla de tracción lateral, es decir se forman grietas verticales producidas por deformaciones transversales y cuando el agrietamiento es excesivo se produce una inestabilidad en la pila.

Las pruebas hechas en pilas de mampostería sometidas a compresión axial mostraron un comportamiento prácticamente lineal como se muestra en la figura 7 Meli, 1997.

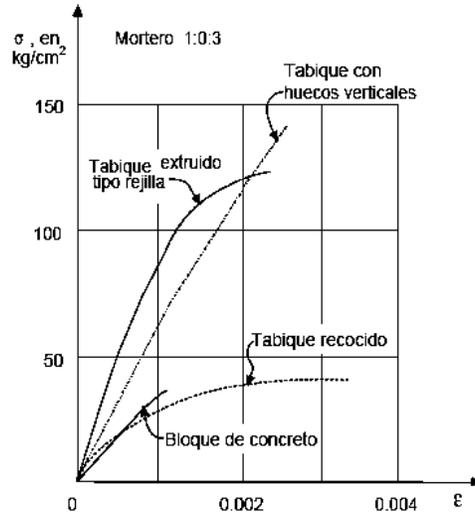


Fig. 7 Curva esfuerzo deformación a compresión de pilas de mampostería, Meli, 1997.

A partir de pruebas de pilas se puede obtener el módulo de elasticidad de la mampostería, el cual es más sensible que la resistencia de la mampostería; en las NTC-M, 2004 se establecen ecuaciones que permite estimar el módulo de elasticidad de la mampostería hechas con piezas de barro y otras piezas excepto las de concreto.

$$E_m = 350f_m^*(kg/cm^2) \text{ Para cargas de larga duración.}$$

$$E_m = 600f_m^*(kg/cm^2) \text{ Para cargas de corta duración.}$$

En las ecuaciones anteriores f_m^* es la resistencia de diseño a compresión de la mampostería en kg/cm^2 .

Los ensayos realizados y los valores del módulo de elasticidad presentados se refieren al efecto de compresión axial en dirección normal a las juntas para mampostería de tabique de barro y otras piezas excepto las de concreto.

2.4. Comportamiento mecánico de la mampostería a tensión diagonal.

Dada la importancia del uso de muros de mampostería confinada en la construcción de viviendas en México, Colombia, Chile, etc. Este material se emplea con fines estructurales, especialmente en muros que deben soportar cargas verticales y horizontales. En la actualidad se han llevado a cabo investigaciones de la mampostería sujeta a compresión axial y compresión diagonal con el propósito de conocer las propiedades índice de la mampostería, tales como la resistencia a compresión axial, la resistencia a compresión diagonal, el módulo de elasticidad, el módulo de cortante y la resistencia a tensión de la mampostería.

Un muro de mampostería es sometido a tensión diagonal cuando una edificación de mampostería se ve sometida a efectos sísmicos. Sin embargo existen otras razones a la que pueden producir este tipo de efecto en la mampostería, como por ejemplo, hundimientos diferenciales de la edificación y bajo cargas gravitacionales por efecto de una distribución poco uniforme de las cargas verticales en un determinado muro.

La presencia de tensiones diagonales es una de las causas más comunes de fallas en muros de mampostería, una metodología bien definida para la obtención de la resistencia a tensión diagonal, es aplicar en forma diagonal una carga de compresión a especímenes de forma cuadrado como se muestra en la figura 8

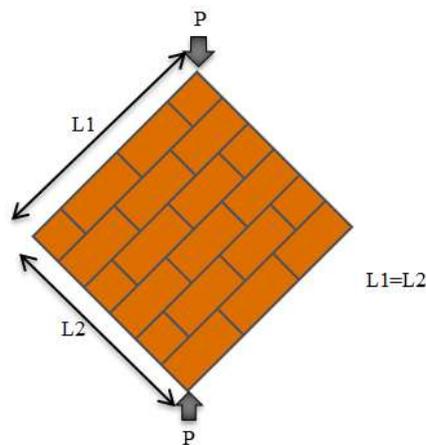


Fig. 8 Murete en compresión diagonal.

Las fallas comunes de los muretes de mampostería sujetas a compresión diagonal puede ser principalmente de tres tipos: a) falla por tensión diagonal en bloques; se produce una grieta diagonal que atraviesa las piezas su trayectoria es aproximadamente a una recta, b) falla por tensión diagonal en juntas; se produce por la falla por adherencia bloque-mortero, su trayectoria es de forma escalonada aproximadamente en el centro del murete y c) falla por deslizamiento; la falla se manifiesta entre las piezas y el mortero, produciéndose el deslizamiento de una junta horizontal.

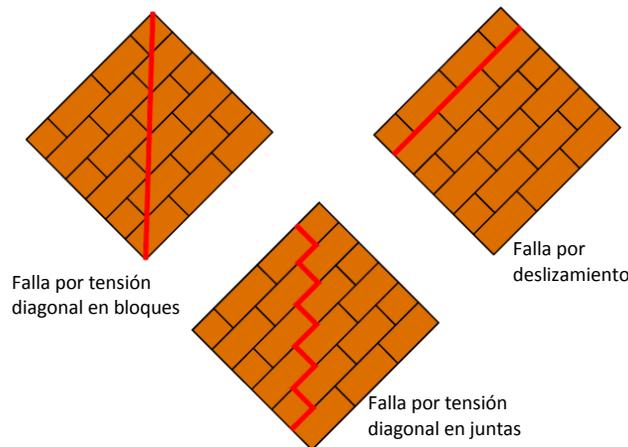


Fig. 9 Tipos de falla en muretes de mampostería sujetas a compresión diagonal.

Las componentes que afectan a la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería son: el tipo de bloque, el tipo de mortero y la adherencia del mortero. Las componentes que afectan a la adherencia bloque-mortero son: la cantidad de cemento y agua del mortero, el porcentaje de absorción y la rugosidad de los bloques así como la mano de obra entre otros.

Meli, 1979 propuso un modelo trilineal para determinar la resistencia de la mampostería, el primer tramo se considera que la rigidez de la mampostería es lineal hasta el agrietamiento, el segundo tramo corresponde del agrietamiento hasta la carga máxima y el último tramo se caracteriza por un comportamiento horizontal hasta la falla.

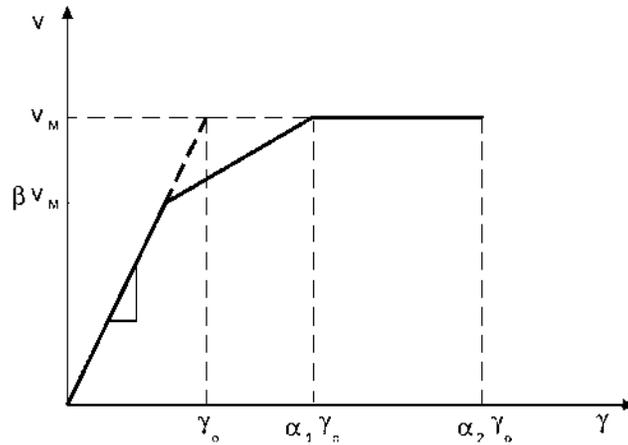


Fig. 10 Relación de carga-deformación Meli, 1979.

Meli señala que mientras no ocurran agrietamientos importantes por flexión o por tensión diagonal, el comportamiento de los muros, independientemente del tipo de refuerzo, es aproximadamente elástico lineal. Después del agrietamiento inclinado, el comportamiento se caracteriza por una disminución paulatina de la rigidez y la resistencia, tanto mayor cuanto más grande es la deformación máxima alcanzada en el ciclo.

En la figura anterior γ es la distorsión de entrepiso, βV_M es el cortante basal cuando se presenta el agrietamiento horizontal de la mampostería debido a efectos de flexión y (α_1 y α_2) son los valores que permiten estimar la distorsión para el cortante máximo y la distorsión última de la mampostería respectivamente.

Según las NTC-M, 2004 el módulo de cortante se puede obtener a partir del módulo de elasticidad de la mampostería como $G_m = 0.4E_m$.

En la tabla 2 se muestra la resistencia de diseño a compresión diagonal para algunos tipos de mampostería obtenida de las NTC-M, 2004.

Tabla. 2 Resistencia a cortante de la mampostería, NTC-M, 2004.

Tipo	Tipo de mortero	v_m^* (kg/cm ²)
	I	3.5
Tabique de barro recocido ($f_p^* \geq 60$ kg/cm ²)	II y III	3
Tabique de barro con huecos verticales ($f_p^* \geq 120$ kg/cm ²)	I	3
	II y III	2
Bloque de concreto ($f_p^* \geq 100$ kg/cm ²), en estado seco	I	3.5
	II y III	2.5
	I	3
Tabique de concreto ($f_p^* \geq 100$ kg/cm ²)	II y III	2

En la tabla anterior f_p^* es la resistencia de diseño a compresión de las piezas y v_m^* es la resistencia de diseño a tensión diagonal de la mampostería.

2.5. Tipos de mampostería.

2.5.1. Mampostería reforzada interiormente.

Según las NTC-M, 2004 la mampostería reforzada interiormente es el sistema de muros de mampostería reforzada en la construcción con refuerzo horizontal y vertical, unidas por medio de mortero, reforzadas interiormente con barras y alambres de acero colocados en los ductos o en las juntas y que cumpla con los requisitos de la 6.1.1 a 6.19 de las NTC-M, 2004.

El acero de esta modalidad estructural pretende cumplir objetivos semejantes a las que tiene la mampostería confinada. La mampostería reforzada aprovecha el comportamiento del concreto reforzado situado en las celdas de las unidades y las juntas y la resistencia a esfuerzo cortante de la mampostería dispuesta en el muro. La mampostería reforzada interiormente en la cual el ensamble de las unidades con las demás componentes, permite la conformación de una estructura monolítica que responde estructuralmente ante requerimientos sísmicos. Este sistema constructivo cumple funciones estructurales y arquitectónicas.

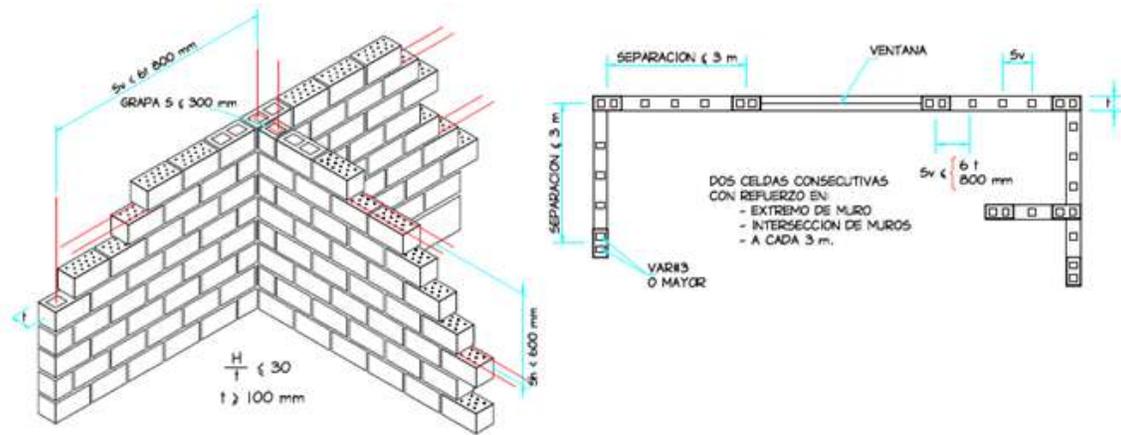


Fig. 11 Mampostería reforzada interiormente, NTC-M, 2004.

2.5.2. Mampostería confinada.

El sistema de muros de mampostería confinada son aquellos que tienen una sección transversal pequeña en el perímetro del muro. En México el elemento de confinamiento horizontal se les conoce como dalas y los elementos de confinamientos verticales como castillos. En esta modalidad las secciones de confinamiento o parte de ellos se cuelan una vez construido el muro.

El comportamiento de los muros de mampostería confinada ante cargas laterales es muy semejante a que se tiene en el ensaye de compresión diagonal. Debido a la presencia de flexiones que disminuyen los esfuerzos verticales de un extremo del muro y los incrementa en el otro, la fuerza cortante que produce el agrietamiento es menor cuando se realiza ensayes en voladizo que cuando se efectúa en compresión diagonal, el esfuerzo cortante se produce en muros sujetos a cargas laterales sin esfuerzo de compresión.

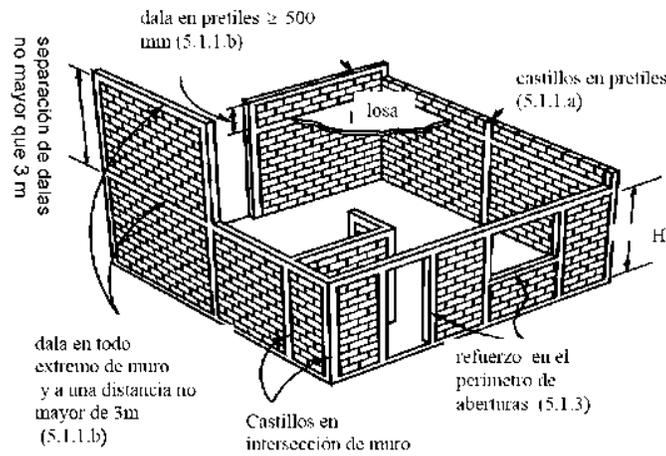


Fig. 12 Muros de mampostería confinada en tres dimensiones, NTC-M, 2004.

Es importante estar consciente que la función principal de los castillos no es incrementar la capacidad máxima del muro ante cargas laterales, sino la de aumentar su capacidad de deformación y la de postergar y disminuir la degradación de resistencia.

3. PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL.

La vibración ambiental se debe principalmente a la actividad humana y al funcionamiento de maquinarias industrial y el tráfico de vehículos. Además contienen vibraciones producidas por el viento que son introducidas en el subsuelo por los árboles, edificaciones o un impacto con el relieve.

El diseño, construcción y mantenimiento de las estructuras como los edificios han generado la necesidad de desarrollar pruebas experimentales apropiadas que permitan identificar con exactitud sus propiedades estructurales más importantes (estática y dinámica). La dificultad de utilizar pruebas con vibración forzada o excitación en una forma controlada generó la necesidad de usar otros métodos de identificación de mayor aplicabilidad como la técnica de vibración ambiental.

Las pruebas de vibración ambiental han demostrado buenos resultados para medir experimentalmente el periodo fundamental de los edificios tanto en el contexto nacional como en el internacional.

3.1. Edificios instrumentados.

Existen algunos trabajos de edificios instrumentados, por ejemplo Murià, 2007 reporta un edificio instrumentado denominado edificio PC ubicado en la ciudad de México, el edificio tiene una estructura de concreto reforzado de 17 niveles, cimentado sobre un cajón de cimentación a una profundidad a 3.28 m apoyado sobre 266 pilotes de fricción de sección triangular de 27 metros de longitud. Consta de un sótano con muros perimetrales de concreto reforzado, la planta baja mide de 38 por 54 m, 8 niveles escalonados de estacionamiento unidos con rampa y una torre de 12 niveles cuya dimensión en planta disminuye a 23.9 por 39 m y con alturas de entrepiso de 3.15 m. La altura total del edificio

es de 55.4 m, el edificio fue diseñado conforme al Reglamento de Construcción para el Distrito Federal (1977) y construido en el año de 1980 y 1984.

Durante los sismos de septiembre de 1985 el edificio sufrió daños moderados, los cuales fueron reparados, además de realizarse un refuerzo mediante la colocación de muros de concreto en toda su altura y la sustitución de muros de mampostería por muros de concreto. Dada la irregularidad del edificio, buena parte de estos daños se concentraron en las columnas de la zona de transición entre los niveles de estacionamiento y de oficinas donde hay un cambio brusco de rigidez en altura, así como en los muros del cubo de las escaleras y de los elevadores.

Estos daños fueron reparados mediante la colocación de muros de concreto en toda su altura sustituyendo a los muros de mampostería por muros de concreto para mejorar su desempeño antes sismos futuros.

A razón de los daños en la estructura, en 1990 se instalaron 11 acelerógrafos triaxiales. Durante varios años, la información recabada limitó el estudio de la respuesta del sistema, ya que no se contaba con un acelerógrafo en campo libre que registrara el movimiento del terreno natural y la instrumentación del sótano no fue suficiente para analizar el movimiento de cabeceo. En 1999 se dispuso de los recursos para la instalación de dos acelerógrafos triaxiales, uno de los aparatos se instaló en terreno (JR) a la misma profundidad del cajón de cimentación y uno en la esquina del sótano (SS). La instrumentación actual del edificio, como se muestra en la figura 13

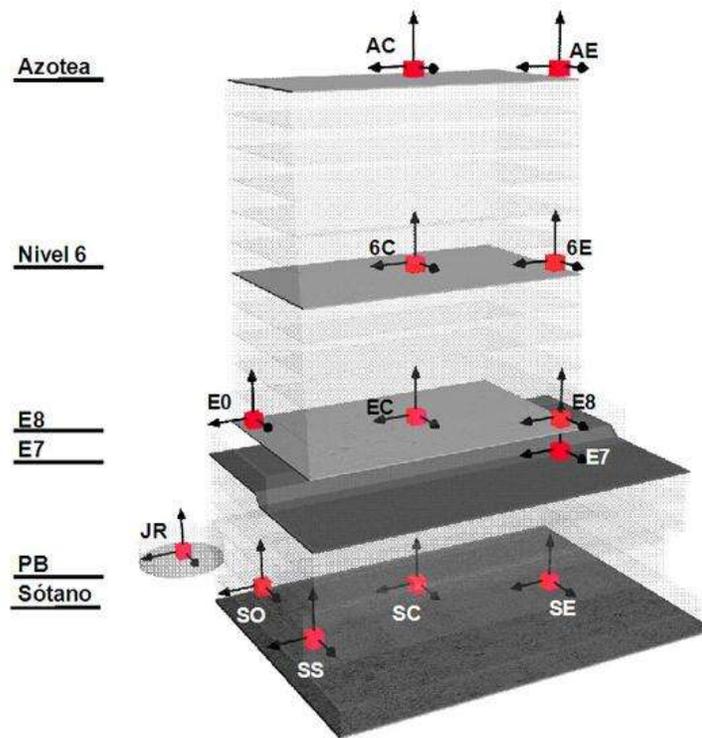


Fig. 13 Localización de los acelerógrafos del edificio.

Desde la puesta en marcha de la red acelerográfica en 1990, el edificio fue sometido a varios eventos por lo que se dispone de una amplia información de los eventos sísmicos más significativos.

La instrumentación del edificio ha permitido valorar ante la ocurrencia de un sismo y contar con elementos cuantitativos de la respuesta dinámica para tomar decisiones relativas a la posible reparación y/o evacuación de la estructura.

Otro edificio instrumentado es el denominado edificio MJ, este es un edificio de concreto reforzado de 8 niveles, incluyendo dos sótanos, el cual está localizado en un suelo blando de la ciudad de México. La estructura del edificio está formada con cinco marcos en el sentido transversal (T) y cuatro en el sentido longitudinal (L), unido por una losa monolítica de 8 cm de espesor. En los dos marcos laterales existen muros de mampostería confinada, desligados de la estructura, solo en el cubo de elevadores y de escaleras están unidos a los marcos que los confinan. Las plantas del tercero y del último nivel son idénticas, mientras que las plantas de cimentación y de acceso presentan una mayor área debido al ensanchamiento en su parte posterior.

En 1992 el edificio fue reestructurado con la finalidad de obtener una mayor rigidez y resistencia. Los trabajos realizados consistieron en el encamisado de algunas de columnas en la planta de acceso y la planta baja con placas de acero y contra-venteos de acero a partir de primer nivel. En la parte lateral del edificio se construyeron muros de concreto reforzado de 15 cm de espesor y se anclaron al cajón de cimentación.

Las dimensiones de la estructura en planta en los niveles de sótano son de 28.60 por 22.40 m con una altura de 3.55 m, de las plantas superiores y la azotea es de 28.60 por 18.00 m. Las alturas de entrepiso en los niveles de sótano es de 3.55 m, en la planta de acceso tiene una altura de entrepiso de 3.95 m, mientras que las alturas de entrepiso en los niveles superiores es de 3.45 m y en la correspondiente al andén de la estación metro es de 3.60 m, sobresaliendo así la estructura a una altura de 21.20 m sobre el nivel de terreno.

El edificio se encuentra apoyado sobre un cajón de cimentación desplantado a 9 m de profundidad. El perímetro del cajón cuenta con un muro “Milán” de 60 cm y 80 cm excepto la cara que comparte con la estación del metro.

A partir de 1990 se puso en marcha la instalación de cinco acelerógrafos en el edificio. Uno se localiza en el sótano de la estructura a nivel de la estación del metro, dos en la planta baja nivel del acceso y dos en la azotea.

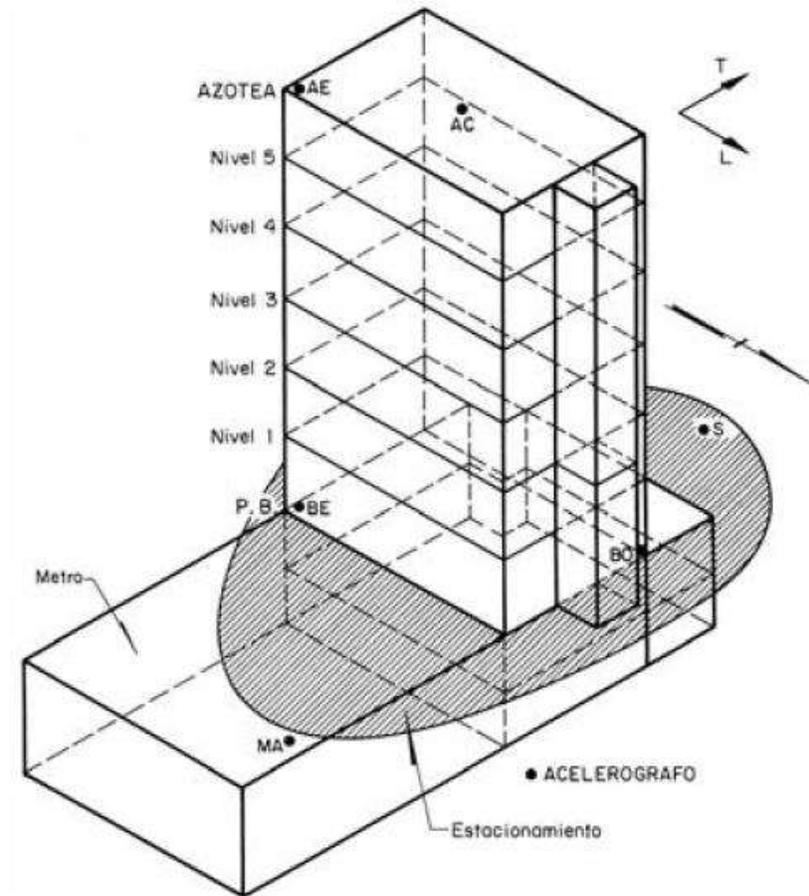


Fig. 14 Edificio MJ y su instrumentación.

En el edificio MJ presentó un comportamiento no lineal debido al acoplamiento que se da a través de la junta de construcción el cajón de cimentación y la estación del metro después de la rehabilitación realizada en el edificio.

El edificio denominado JAL se localiza en suelo blando en la ciudad de México, está compuesto de una estructura de 14 niveles, su estructura original fue de concreto reforzado a base de columnas, muros de mampostería en las laterales y en el cubo de escaleras, un muro de concreto reforzado en el cubo de elevadores y losas reticulares de concreto reforzado de 45 cm de peralte.

Las plantas del cuatro al decimocuarto tiene una forma rectangular de 19.4 m de ancho por 32.45 m de largo. La cimentación está compuesta por un cajón de concreto reforzado,

desplantado a una profundidad de 3.30 m con una losa reticular de 80 cm de peralte apoyada sobre 54 pilotes de fricción.

Durante los sismos de septiembre de 1985 el edificio sufrió algunos daños en sus elementos estructurales y no estructurales, que consistieron en agrietamientos de cortante de columnas y en muros de mampostería. Hubo fisuras mayores de 1 mm en algunas columnas del estacionamiento, así como menores de 1 mm en varias columnas en casi todos los niveles. En el muro de concreto del cubo de elevadores se presentaron agrietamiento menores de 1 mm en varios niveles. En las losas reticulares se produjeron grietas de hasta 2 mm de ancho en nervaduras, que evidenciaron la formación de líneas de fluencias negativas y positivas.

Debido al daño que sufrió el edificio, en 1986 se llevó a cabo su primera rehabilitación. Cuatro columnas interiores de nivel del estacionamiento y toda las columnas interiores de los niveles de oficina se encamisaron con concreto reforzado de 20 cm de espesor.

Durante el sismo del 10 de diciembre de 1994, se produjeron daños moderados en los elementos no estructurales como agrietamientos en muros de mampostería, así como agrietamientos y desprendimientos de aplanados de yeso y plafones y reapertura de las grietas en los muros de concreto. Además aparecieron unas pequeñas fisuras en algunas columnas del estacionamiento debido a los asentamientos.

Con el sismo del 14 de septiembre de 1995, aumentaron los daños no estructurales, se hizo evidente el deficiente comportamiento que el edificio tuvo ante las sollicitaciones de pequeña y moderada intensidad, se procedió a la segunda rehabilitación.

Esta segunda rehabilitación consistió en la construcción de trabes de concreto de 20 cm de base y 108 cm de peralte, así como la ampliación de las columnas existentes, formando un marco con material compuesto de concreto reforzado y acero estructural.

En octubre y noviembre de 1992, se instaló la instrumentación sísmica del edificio. Se seleccionaron un total de 14 puntos de observación con acelerógrafos triaxiales: dos en pozos profundos a 20 y 45 m, uno en el terreno, cuatro en el sótano, dos en el nivel 5, dos en el nivel 10 y tres en la azotea.

Las máximas amplitudes de movimiento registrados en el edificio JAL, antes de la segunda rehabilitación ocurrieron en el evento sísmico del 14 de septiembre de 1995 con aceleraciones y desplazamientos de 38 cm/s^2 y 3.7 cm en la superficie del terreno y 130 cm/s^2 y 17 cm en la azotea, respectivamente. De los eventos registrados después de la segunda rehabilitación, el 30 de septiembre de 1999 se produjo las aceleraciones y desplazamientos mayores; en la superficie del terreno fueron de 37 cm/s^2 y 3.7 cm y en azotea de 304 cm/s^2 y 28 cm , respectivamente. Es interesante comparar las distorsiones debido a sismos de igual intensidad ocurridos antes y después de la segunda rehabilitación. Lo descrito anteriormente produjo cambio en las propiedades dinámicas, en particular las frecuencias o periodos naturales de vibración del edificio.

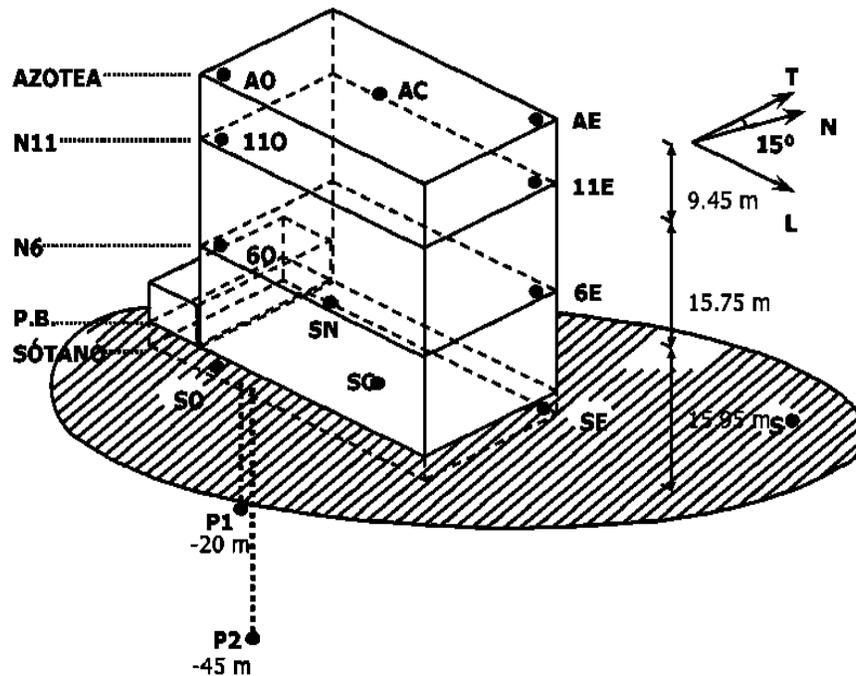


Fig. 15 Instrumentación del edificio JAL.

Finalmente el edificio SIS ubicado en la ciudad de Acapulco, fue construido para uso residencial y está formado por 16 niveles de apartamentos, la azotea, una planta baja y un semisótano como estacionamiento, la planta baja del semisótano mide 32.4 m en la dirección longitudinal y 36.4 m en dirección transversal, mientras que la planta típica es de 23.4 por 24.6 m . El semisótano tiene una altura de 2.9 m y esta desplantado a una profundidad de 0.8 m . La altura total del edificio es de 71.5 m .

La estructura de concreto se compone de marcos y muros unidos a las losas macizas con espesores de 10 y 12 cm, que están construidas monolíticamente con las vigas perimetrales de 90 cm de peralte, las columnas tienen una forma rectangular, los muros de concreto se ubican en la dirección longitudinal del edificio, mientras que en las dos direcciones existen muros estructurales de mampostería. La cimentación está compuesta con muros de concreto reforzado de 2 m de peralte y 30 pilas de fricción con secciones circulares de 1, 1.2, 1.4 y 1.6 metros de diámetro y una longitud de 12.5 m.

La instrumentación se instaló a finales del 2001. Está compuesta con una red de 18 servo-acelerómetros uniaxiales y dos triaxiales. Los sensores están interconectados en una configuración maestro-esclavo, en la que al pasar un cierto umbral, el sensor maestro activa la operación simultánea de la red. La resolución de la instrumentación es tal que permite registrar desde la vibración ambiental hasta sismo de gran intensidad. En la figura 16 se muestra la ubicación y orientación de los sensores.

En el edificio se instrumentó recién construido, es decir no se trata de una estructura dañada, se observaron reducciones en rigidez son menores del 14%, después de un sismo de moderada intensidad, la estimación de la pérdida de rigidez se hizo con respecto a tramos de pequeña y aproximadamente igual amplitud (Taborda, 2003).

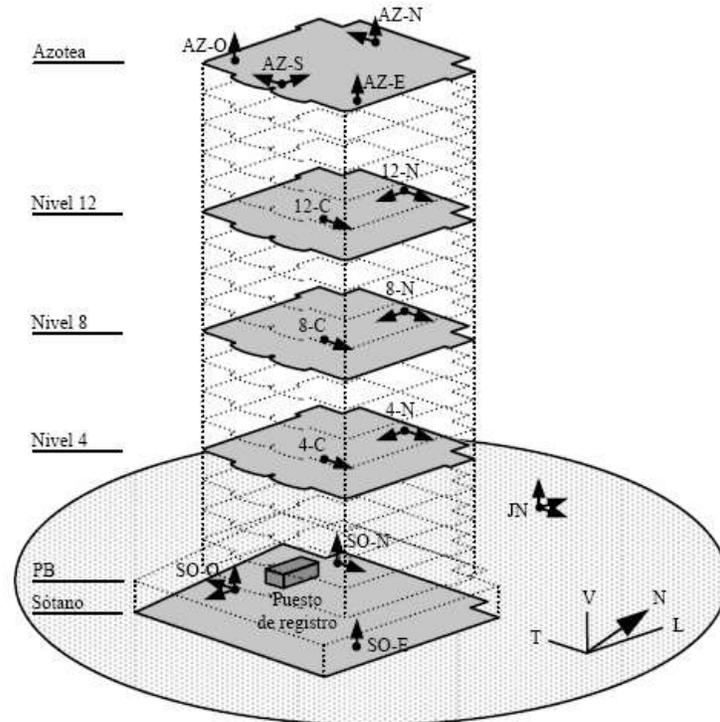


Fig. 16 Instrumentación del edificio SIS.

En lo que respecta a mampostería confinada o reforzada interiormente solo existen algunos ejemplos, tales el caso de la instrumentación de diez edificios de mampostería de cinco niveles de vivienda popular, ubicados en 5 frentes habitacionales de la ciudad de México: Gutiérrez Nájera, Zapote III, El Ranchito, 5 de Mayo I y Brahams. Los dos primeros frentes se encuentran en la zona de suelo firme y los restantes en la zona de suelo blando. Las estructuras fueron diseñadas y construidas con base en las normas de emergencia propuesta inmediatamente después de los sismos del 1985.

La estructura de los edificios, similar en todos ellos, se caracterizan por su regularidad en la elevación y su simetría en planta en el eje transversal, mientras que en el eje longitudinal presenta una forma asimétrica. Los edificios Gutiérrez Nájera, Zapote III, desplantados en suelo firme presentan una estructuración en muros de carga de bloque de concreto, se encuentran cimentados sobre una losa y zapatas respectivamente.

Los edificios de 5 de Mayo I, El Ranchito y Brahams, localizados en suelo blando, tienen una estructuración a base de muros de carga de tabique de concreto apoyados sobre un cajón de cimentación de concreto reforzado.

Para determinar las propiedades dinámicas de los edificios se realizaron mediciones de vibración del ruido ambiental a diferentes horas del día y la noche y en medir las vibraciones forzadas generadas manualmente al jalar con cierta frecuencia una cuerda atada a la azotea del edificio. Para registrar los movimientos se emplearon servo-acelerómetros, los cuales se fijaron sobre bases metálicas colocados en puntos de observación seleccionados.

Para identificar las frecuencias y formas modales de vibrar de la estructura se realizaron mediciones en un punto en el terreno y en siete puntos de la estructura. Durante las pruebas experimentales se emplearon ventanas de observación de 5, 10 y 25 Hz, con una duración por evento de 25, 12.5 y 5 s respectivamente; se calculan promedios de 32,64 ó 128 eventos para las pruebas de vibración ambiental y de 4 a 8 eventos para las pruebas de impulso.

Las mediciones de vibración ambiental efectuadas en los edificios de los frentes Gutiérrez Nájera y Zapote III, se obtuvieron espectros de potencia con promedios de 32 eventos, que fueron suficientes para lograr configuraciones espectrales representativas de las estructuras e identificar claramente los modos fundamentales de vibrar.

Los resultados experimentales obtenidos en las pruebas de vibración ambiental en los edificios de la zona de suelo blando de la ciudad de México muestran en el análisis espectral, una característica común; la presencia de varias ordenadas espectrales significativas en un intervalo de frecuencias entre 2 y 5.5 Hz, siendo estas las frecuencias predominantes del suelo en vibración ambiental.

Para determinar analíticamente las características dinámicas de las estructuras, se desarrollaron los modelos matemáticos siguiendo el modelo propuesto por el programa SUPER-ETABS. La estructura se idealizó como un sistema de marcos planos con paneles, cinco de diferentes características en la dirección transversal y seis en la dirección transversal.

3.2. Técnicas de análisis espectral.

En este apartado se describe dos técnicas usadas para el análisis de señales, la técnica de Nakamura y la técnica de Refracción de Micro-tremores (ReMi).

3.2.1. Técnica de Nakamura.

Este método fue desarrollado por Nakamura en 1989, donde propone estimar; el periodo fundamental y en algunas circunstancias, una buena aproximación del factor de amplificación de un depósito de suelos, a partir de mediciones de vibración ambiental verticales y horizontales en superficie.

Teniendo en consideración que al realizar mediciones de vibración ambiental en suelos muy rígidos y afloramientos rocosos se presenta una similitud en la componente horizontal y vertical, se puede mencionar que no existe una dirección predominante en estos casos.

Como hipótesis se acepta que la componente horizontal de los microtemblores es amplificada por la multireflexión de las ondas S (de corte), mientras que la componente vertical es amplificada por la multireflexión de las ondas P (de compresión).

La técnica Nakamura ha ganado popularidad en los últimos años por ser un procedimiento fácil y económico en su aplicación, obteniéndose valores de frecuencia y periodo fundamental de un sitio. Este procedimiento emplea mediciones de ruido ambiental (como ondas superficiales tipo Rayleigh), producido por la interacción viento-estructura, tráfico y varias formas de actividad humana (Lermo y Chávez-García, 1994).

Ésta técnica ha demostrado que es posible estimar la frecuencia fundamental de depósitos sedimentarios y de cierta forma, el factor de la amplificación mediante los coeficientes espectrales entre las componentes horizontales y verticales. El uso extensivo de este método permite el mapeo rápido y detallado de las frecuencias de zonas urbanas. Combinado con información sobre la respuesta del suelo y vulnerabilidad se pueden anticipar los efectos de un sismo a edificios y estructuras civiles.

La teoría y las hipótesis de este método no han sido aceptadas por completo por la comunidad científica, pero las comparaciones con otras técnicas han comprobado en diversos estudios recientes la validez y la eficiencia del método (Lermo y Chávez-García, 1994). Nakamura desarrolló la técnica basado en tres hipótesis principales.

1.- El ruido ambiental es generado por la reflexión y refracción de ondas de corte al interior de capas de suelo superficiales y por ondas de superficie.

2.- Fuentes superficiales locales de ruido no afectan el ruido ambiental en la base de la estructura no consolidada.

3.- Capas de suelo blando no amplifican la componente vertical del ruido ambiental.

Las funciones Se y As representan la respuesta sísmica del sitio y el efecto singular de la onda Rayleigh y pueden ser definidos como.

$$Se = \frac{Hs}{Hb} \quad As = \frac{Vs}{Vb}$$

Donde H y V representan, respectivamente, los espectros de las componentes horizontales y verticales del ruido ambiental en superficie (s) o en el basamento (b). La respuesta sísmica del sitio que no incluye la contribución de la fuente son definidas por Sm como:

$$Sm = \frac{Se}{As} \quad \text{por lo tanto} \quad Sm = \frac{Hs*Vb}{Hb*Vs}$$

Nakamura (1989) y Theodulidis et al. (1996), demostraron que el espectro de las componentes vertical (Vb) y horizontal (Hb) son equivalentes en la base de la estructura.

$$\text{Si } \frac{Hb}{Vb} \approx 1 \text{ entonces } Sm = \frac{Hs}{Vs}$$

Por lo tanto la respuesta sísmica de sitio Sm puede ser expresada como el cociente espectral de la componente horizontal y vertical del ruido ambiental en superficie.

Esta descripción teórica implica que la respuesta del sitio puede ser obtenido de manera práctica registrando el ruido ambiental con un sismógrafo sencillo de tres componentes (X, Y, y Z).

3.2.2. Técnica de Refracción de Micro-tremores (ReMi).

Al implementar este método, utilizando un arreglo multicanal de geófonos, se logran registrar los datos suficientes que permite determinar el cálculo de la velocidad de propagación de la energía de propagación de micro-tremores producidos por fuentes naturales y humanas. A partir de la cual es posible estimar el perfil de velocidades de ondas de corte, espesor de los sedimentos no consolidados y la profundidad de la roca.

Las ventajas de la aplicación de la técnica ReMi, desde el punto de vista de la adquisición sísmica, son muchas; la principal es que esta técnica solo requiere equipo de refracción estándar, que generalmente posee la mayoría de las consultoras y además no requiere de una fuente de energía activada y trabaja mejor cuando se realiza mediciones en ciudades muy ruidosas, sísmicamente hablando.

El equipo requerido incluye: un dispositivo de refracción digital de 12 ó 24 canales, con geófonos verticales individuales y cables de grabación. El grabador debe tener suficiente memoria para almacenar registros de 12 ó 24 canales con una longitud de 4 segundos o más. Generalmente se recomienda registros de entre 15 a 30 segundos de duración. La longitud del arreglo puede variar entre 90 y 180 metros.

Como una regla experimental, la máxima profundidad de resolución es de casi un tercio a un medio de la longitud de arreglo. Un arreglo de longitud cercano a los 90 metros, asegura una precisión de 15% en las velocidades hasta una profundidad de 30 a 45 metros. Este método no requiere de calibración de la respuesta de amplitud o frecuencia de los geófonos (como sucede en la refracción), ReMi solo emplea información de fase en el campo de onda registrado.

Los cables de los geófonos, generalmente contienen 12, 24 o 48 geófonos verticales separados cada 2, 4 u 8 metros. Estos cables se colocan en un sitio del suelo que sea plano y centrando en el objetivo deseado.

Los geófonos pueden ser colocados en pavimentos finos y ubicados de tal forma, que exista un buen acoplamiento con el suelo. Para los registros del ruido, una desviación en la línea

de 5% de la longitud total no afectará la precisión de 15% en los valores de la velocidad obtenidos a partir del método.

3.3. Edificios estudiados.

Se seleccionaron cuatro edificios de mampostería confinada de cuatro niveles, ubicados en el fraccionamiento Las Espigas en el municipio de Tarímbaro Michoacán, con las coordenadas $19^{\circ} 47' 41.92''$ N y $-101^{\circ} 08' 32.24''$ obtenidos con GPS. En la figura 17 se presenta la vista del mapa de localización del fraccionamiento así como los edificios estudiados.



Fig. 17 Localización del fraccionamiento. (www.google.maps)

3.4. Descripción arquitectónica.

El edificio de cuatro niveles cuenta con una altura de entrepiso de 2.4 m y altura total de 10.2 m y una superficie de construcción de 148.56 m^2 en planta baja y de 146.4 m^2 en los entrepisos de los niveles superiores. La planta sensiblemente simétrica cuenta con el cubo de escaleras al centro de la edificación según se muestra en la figura 18 y 19

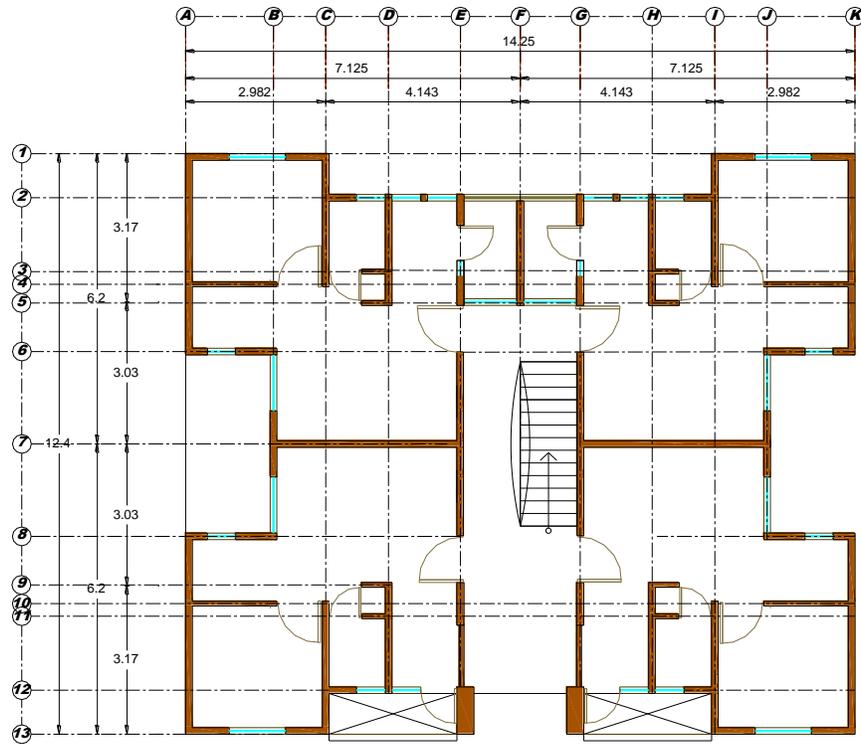


Fig. 18 Planta baja de los edificios estudiados.

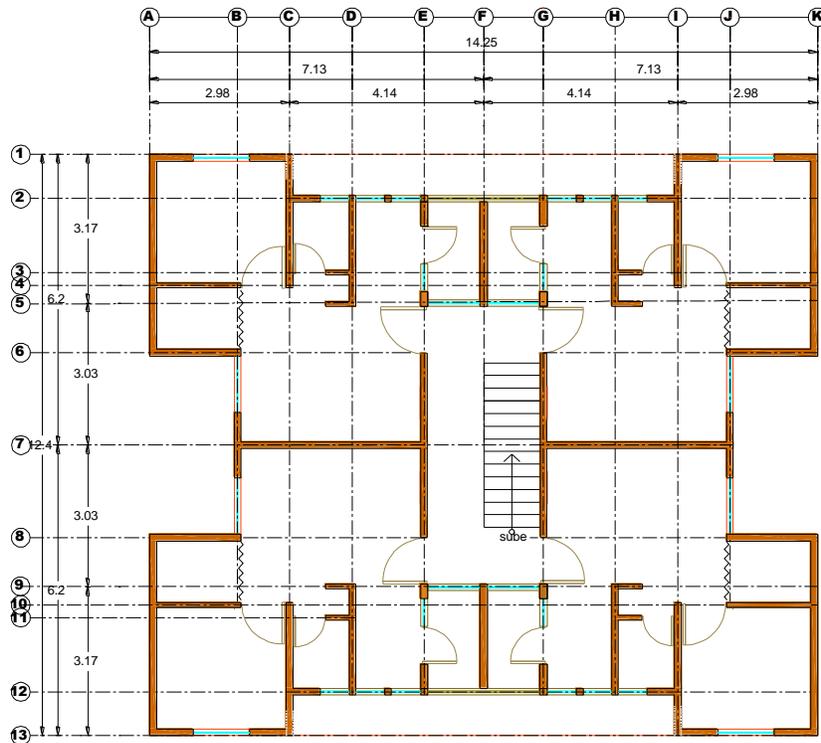


Fig. 19 Planta arquitectónica tipo de los edificios estudiados.

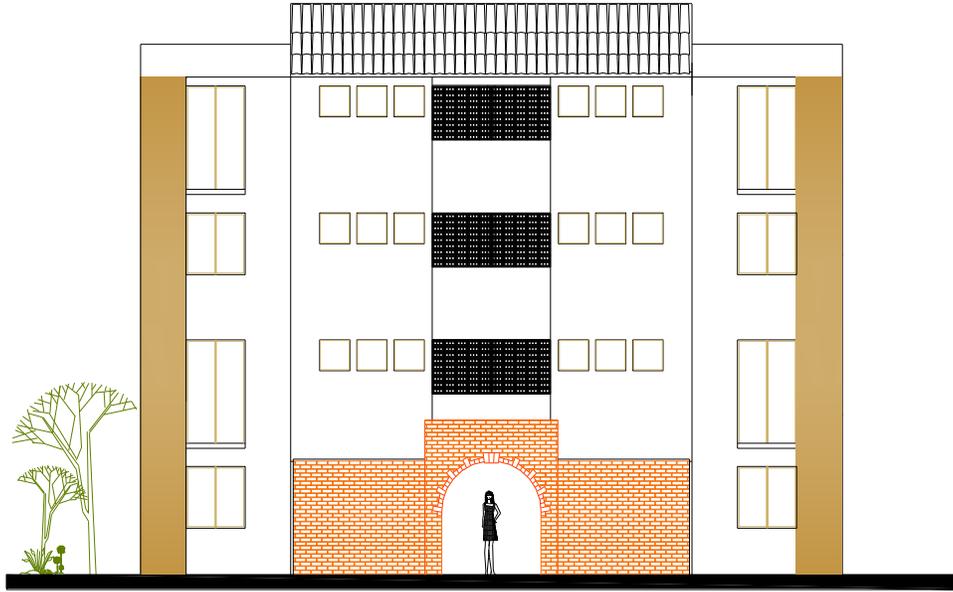


Fig. 20 Fachada principal de los edificios estudiados.

La fachada de los edificios se caracteriza por la continuidad de algunos muros y regularidad en las aberturas. En la azotea se ubican los tinacos de agua la cual se encuentra en todo los edificios.

3.5. Descripción estructural.

El concreto utilizado en todos los elementos estructurales, excepto en castillos en donde se utilizó concreto de resistencia de 150 kg/cm^2 , es de clase 2 con una resistencia de 200 kg/cm^2 con un peso volumétrico de 2400 kg/m^3 y con un revenimiento de 8 a 10 cm, tamaño del agregado máximo de $\frac{3}{4}$ " (1.9cm).

Para el acero de refuerzo se especifica un esfuerzo de fluencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ en varillas de $\frac{3}{8}$ " de diámetro y mayor; $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ para el alambraón, diámetro $\frac{1}{4}$ ". En el acero prefabricados tales como mallas electro-soldadas y castillos con un $f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$.

Los muros de mampostería se montaron con tabique industrializado tipo tabimax de $12 \times 12 \times 23$ juntado con mortero y confinado con dalas y castillos.

El mortero utilizado es del tipo I con proporción Cemento - Cal - Arena 1: 0.25: 3, con revenimiento de 17 a 20 cm.

Las escaleras contempladas en la estructura se construyeron a base de rampas de concreto reforzado y escalones forjado de tabiques formando escalones.

3.6. Pruebas de vibración ambiental en los edificios seleccionados.

Para la medición de las señales se utilizó una grabadora K2 de Kinometrics de doce canales, se utilizaron nueve sensores uniaxiales colocados en una placa de aluminio de 2.5x35x 35 cm y un sensor triaxial colocado en campo libre. Los sensores fueron conectados a una consola mediante cables especiales para la pruebas de vibración ambiental. Para establecer los parámetros de grabación se utilizó una computadora portátil que se conectó a la grabadora K2.

La velocidad de muestreo para el caso fue de 200 muestras por segundo, se realizaron 3 mediciones durante 3.5 minutos.



Fig. 21 Equipo de medición empleado durante las pruebas de vibración.

3.7. Ubicación de los sensores en la estructura.

El sensor triaxial se ubicó en campo libre y corresponde a los canales (1, 2 y 3), se colocó aproximadamente a 50 metros de la estructura. El resto de los sensores se colocaron en el edificio, los canales 4, 5 y 6 en el primer entrespacio, los canales 7, 8 y 9 en el tercer entrespacio y finalmente se ubicaron en la azotea del edificio los canales 10, 11 y 12. En todos los casos se colocaron los sensores en el centro del edificio junto al cubo de escaleras.

Se hace notar que los canales 1, 4, 7 y 10 corresponden al eje X dirección longitudinal del edificio, los canales 2, 5, 8 y 11 corresponden a eje Y dirección transversal y los canales 3, 6, 9 y 12 corresponden al eje Z, dirección vertical. En la figura 22 se muestra esquemáticamente la ubicación de los sensores.

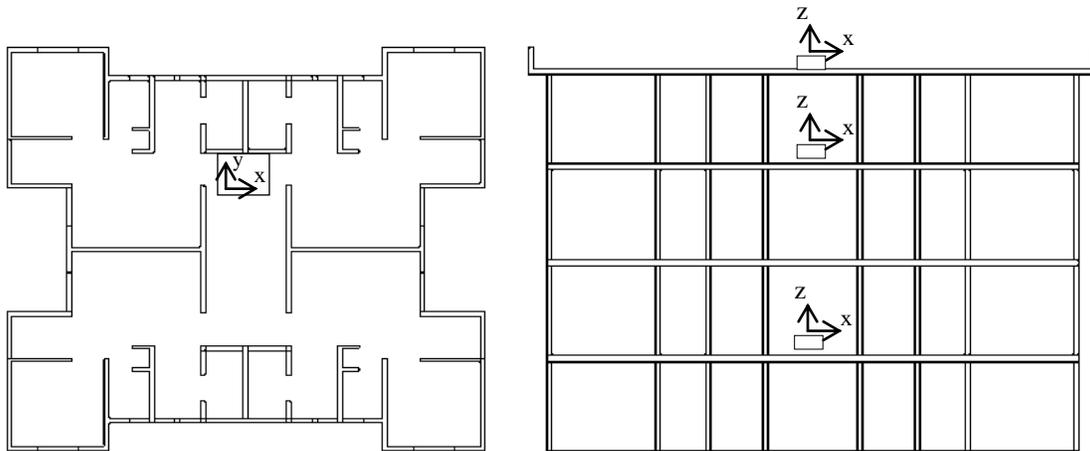


Fig. 22 Ubicación de los sensores en la estructura.

Las señales registradas se procesaron para determinar desplazamiento, velocidades, aceleraciones, espectros de amplitudes de Fourier con las cuales se determinan los periodos naturales de vibración.

El procesamiento de las señales se realizó en MatLab, se creó un programa el cual permitió leer las señales y dividirlos en ventanas de 8192 puntos, aproximadamente 41 s a cada ventana se consideró como un registro independiente. Para cada señal se calculó la transformada rápida de Fourier, el espectro de amplitudes de Fourier y se calculó el promedio de las 5 ventanas de las 3 mediciones.

En la gráfica 23 se presenta los registros obtenidos de las pruebas de vibración ambiental del edificio 4 medición uno placa 3, fraccionadas en ventanas de igual dimensión de 40.96 segundos que se obtuvo al multiplicar el número de muestras 8192 por el intervalo de tiempo de 0.005 s y para el número de ventanas se obtuvo a dividir 205 segundos que es la duración de las mediciones entre tiempo de cada ventana que es de 41 s.

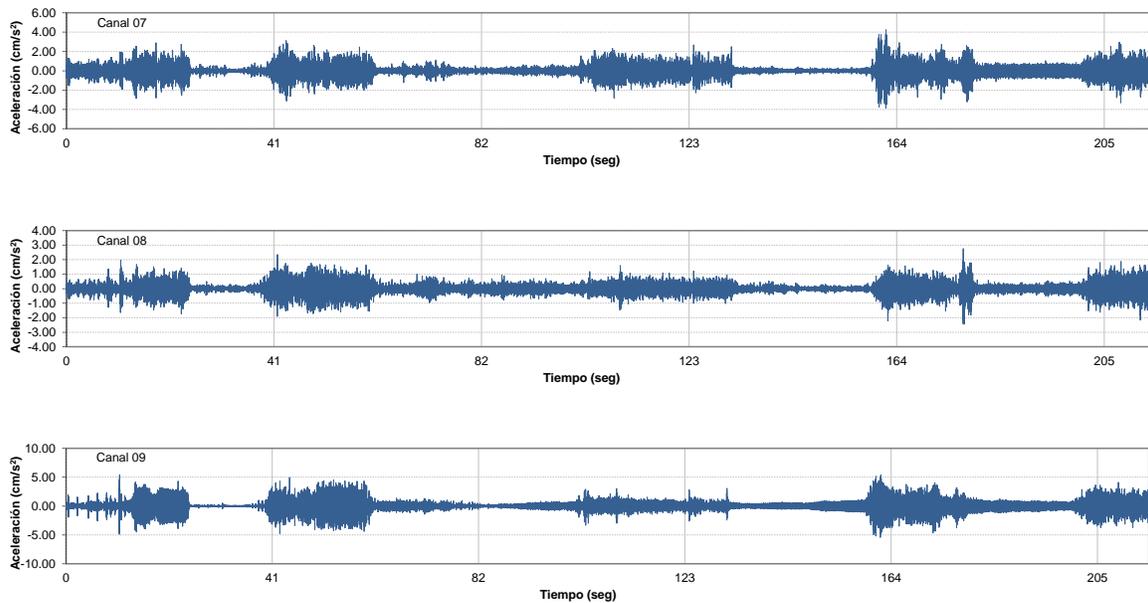


Fig. 23 Señales obtenidas en las pruebas experimentales.

3.8. Análisis de resultados.

En las siguientes figuras se presentan los espectros de amplitudes promedio para la identificación de las frecuencias naturales de vibración en sus diferentes direcciones para obtener el modo de vibrar y sus periodos correspondientes.

En la figura 24 se grafica en el eje horizontal la frecuencia en Hz y en el eje vertical las amplitudes en las figuras se presentan picos con mayores concentraciones de energía que corresponden al segundo y primer modo de vibrar del edificio 1 alrededor de las frecuencias 4.81 Hz y 4.25 Hz que se asocia los periodos $T_2= 0.208$ s y $T_1= 0.235$ s correspondiente a la dirección longitudinal y transversal de la estructura.

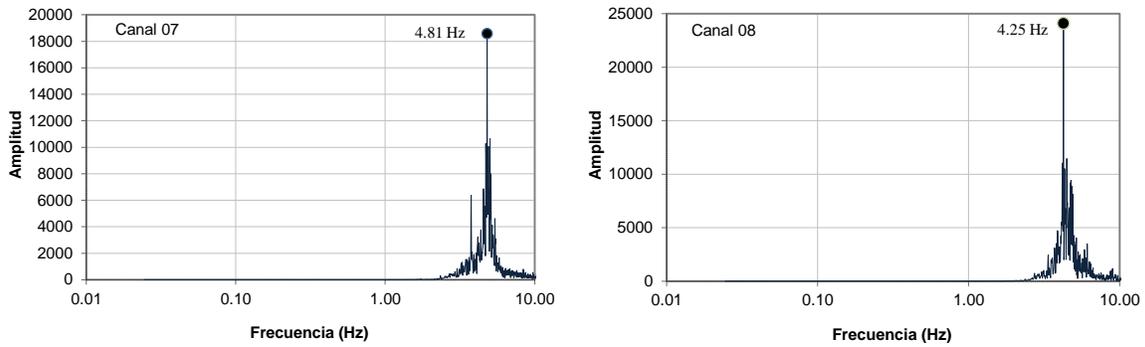


Fig. 24 Espectros de amplitudes.

En la figura 25 se muestran los espectros de amplitudes obtenidos para el edificio 2 en ellas se observan concentraciones de energía alrededor de las frecuencias 4.49 Hz y 4.47 Hz que corresponde al segundo y primer modo de vibrar las cuales se asocian a los periodos de $T_2=0.223$ s y $T_1=0.224$ s correspondientes a la dirección longitudinal y transversal de la estructura.

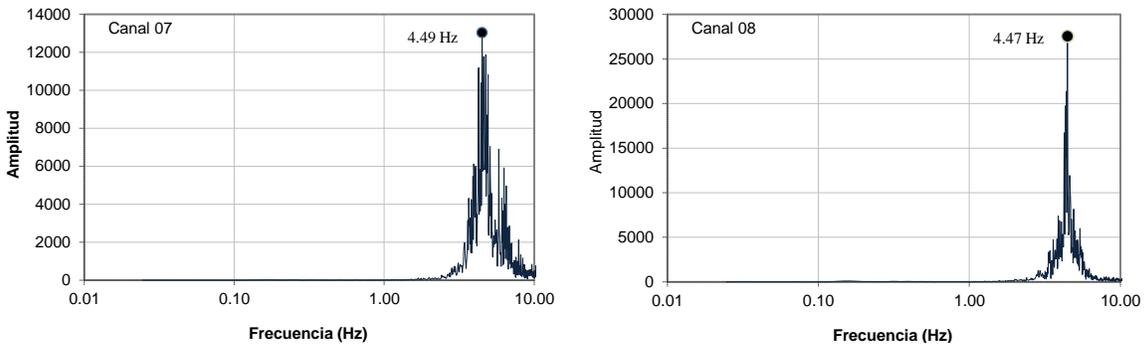


Fig. 25 Espectros de amplitudes.

En la figura 26 se presentan los espectros de amplitudes obtenidos para el edificio 3 en ellas se observa concentraciones de energía alrededor de las frecuencias 4.57 Hz y 4.32 Hz que corresponde al segundo y primer modo de vibrar las cuales se asocian a los periodos $T_2=0.219$ s y $T_1=0.231$ s correspondientes a la dirección longitudinal y transversal de la estructura.

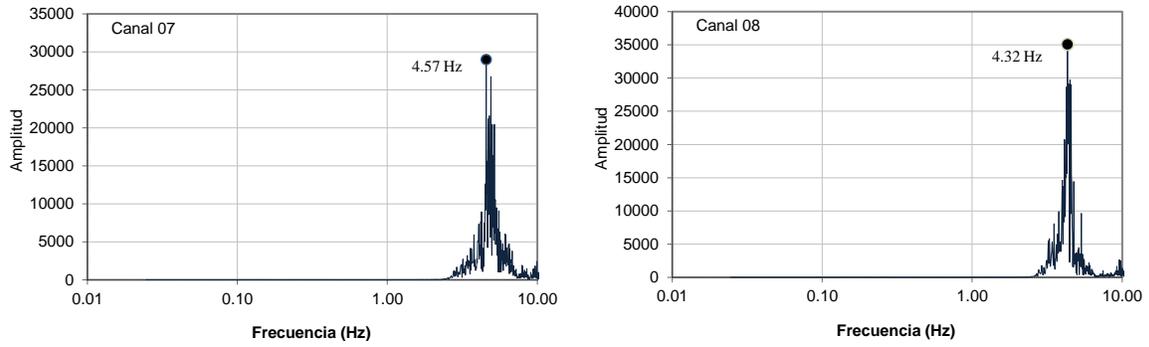


Fig. 26 Espectros de amplitudes.

Finalmente en la figura 27 se presentan las gráficas con mayor concentración de energía alrededor de las frecuencias 4.66 Hz y 4.54 Hz que corresponde al segundo y primer modo de vibrar del edificio 4 que se asocian a los periodos $T_2= 0.215$ s y $T_1=0.220$ s correspondientes a la dirección longitudinal y transversal de la estructura.

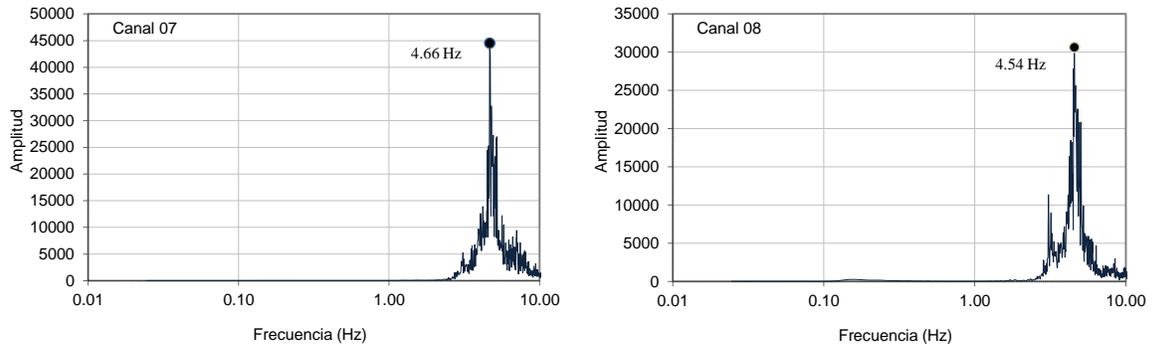


Fig. 27 Espectros de amplitudes.

4. MODELO NUMÉRICO.

4.1. Modelo de la columna ancha (MCA).

A pesar de que la mampostería es un material no homogéneo con un comportamiento no lineal desde niveles pequeños de carga y deformación, para su análisis y modelado en la práctica, se considera como un material isótropo que cumple con las leyes de elasticidad con un comportamiento lineal hasta alcanzar su resistencia de diseño. Se han obtenido, a través de numerosos ensayos experimentales, valores representativos de las propiedades elásticas que pueden ser utilizados en análisis de tipo lineal.

El método de la columna ancha fue desarrollado para el análisis de estructuras planas o tridimensionales de mampostería y de concreto para muros con aberturas o muros acoplados a la losa o viga, con el paso del tiempo el método ha sido modificado para analizar el comportamiento no lineal de estructuras de mampostería.

El MCA consiste en modelar las estructuras de mampostería en estructuras a base de barras, los muros de mampostería se sustituyen por una columna equivalente ubicados en el centro geométrico del muro y asignándole la sección transversal del muro, que toma en consideración las propiedades a flexión y a corte de dicho muro.

En el caso de aberturas, debe considerarse el acoplamiento de la viga en los muros de mampostería que puede tener las mismas dimensiones de una dala, como por ejemplo la losa de entrepiso para estimar su rigidez con o sin pretiles, se debe considerar un ancho igual a cuatro veces su espesor a cada lado de la trabe o dala y para el caso en que no se tiene trabe o dala se debe considerar un ancho de tres veces el espesor de la losa a cada lado de muro, o cuando la dala se encuentra incluida en el espesor de la losa, según la sección 3.2.3.2 de las NTC-M, 2004 como se muestra en la figura 28 .

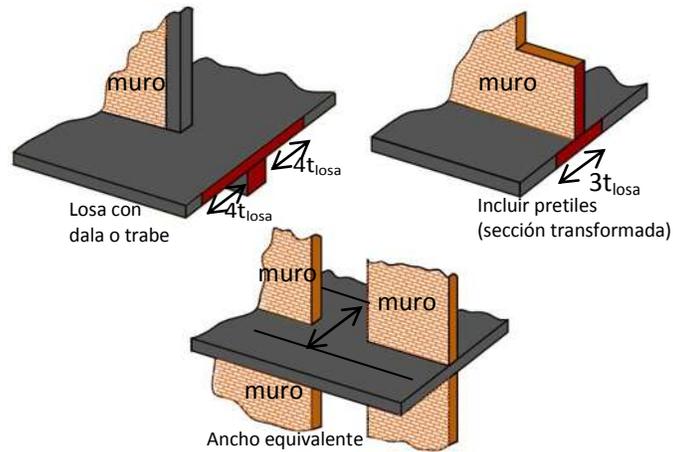


Fig. 28 Ancho equivalente en losas.

En el caso de los pretilas de las ventanas se deben modelar como cualquier otro muro, tomado en cuenta como columna ancha, es decir, manteniendo las mismas consideraciones de material y geometría. La porción de dalas que se encuentran en los muros, se consideran como elementos infinitamente rígidos a flexión como a cortante. En muros largos como aquellos con castillos intermedios, el método recomienda dividir en barrías barras para el modelado de muros.

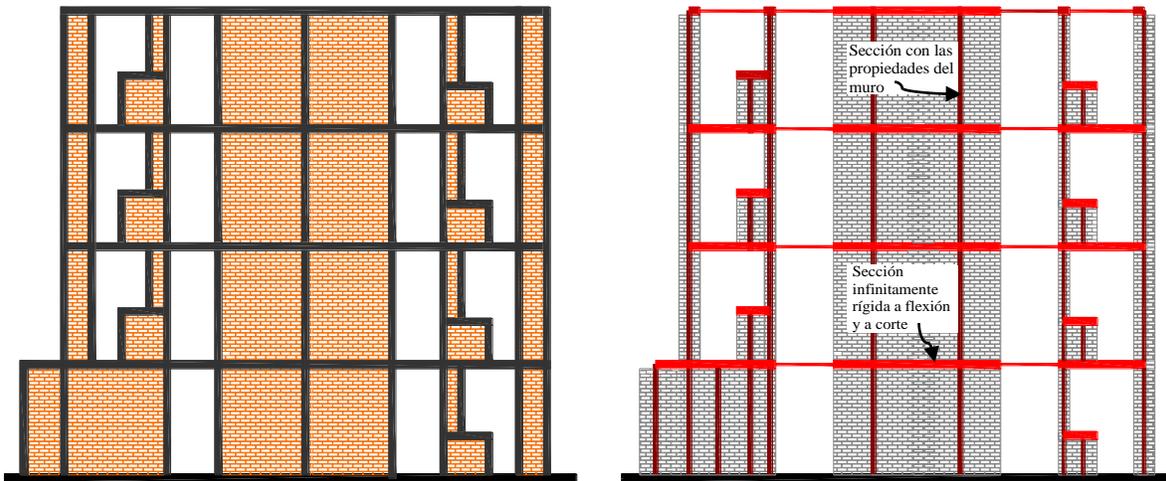


Fig. 29 Modelo de la columna ancha.

Una de las ventajas de utilizar el modelo de la columna ancha consiste en que las propiedades a flexión y a corte de los muros dependen principalmente de las propiedades geométricas de las secciones y las propiedades mecánicas de la mampostería; la rigidez elástica de los muros se puede estimar como:

$$K_0 = \left(\frac{h'}{\beta EI} - \frac{h}{GA} \right)^{-1}$$

Donde K_0 es la rigidez elástica, h corresponde a la altura del muro, A es el área de corte del muro, I es el momento de inercia de su sección transversal, E es el módulo de elasticidad de la mampostería, G el módulo de cortante; finalmente, β es un factor que depende de las condiciones de apoyo de los extremos del muro como se muestra en la figura 30

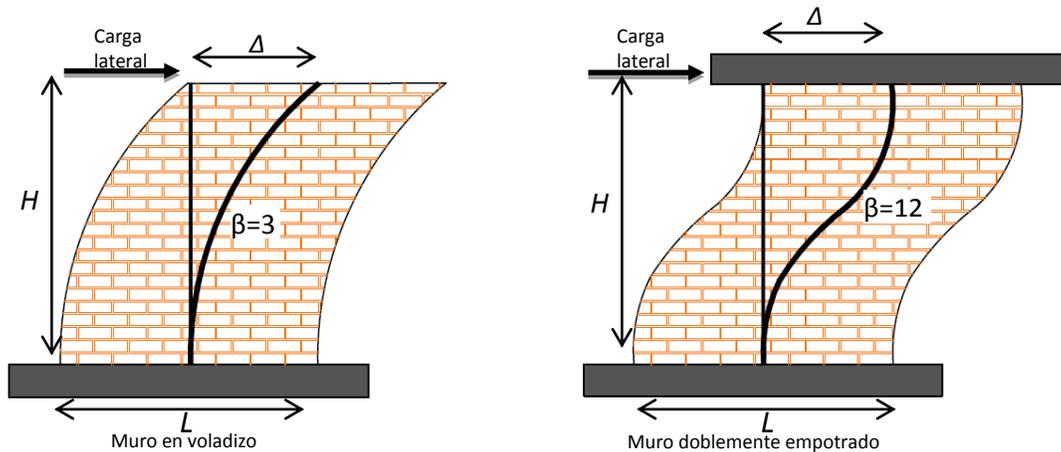


Fig. 30 Factor de condiciones de apoyo.

A continuación se dan algunas de las recomendaciones con relación al método.

Para las zonas de rigidez infinita bastará con asignarle una sección del mismo ancho del muro y una altura equivalente a la del entrepiso.

Los sistemas de piso pueden ser representados con buena precisión por medio de diagonales equivalentes. Se ha observado que el modelo espoco sensible a la rigidez que se le asigne a las diagonales, sin embargo, es necesario calibrar el método. Para sistema de pisos prefabricados, como vigueta y bovedilla, con capa de compresión pequeñas, de 3 a 4 cm, es necesario hacer un estudio detallado de la rigidez que proporciona el sistema de piso, (R. Jean y J. A Pérez., 2003)

Es importante señalar que los análisis elásticos, cualquiera que sea el método de modelación, solamente van a proporcionar información en el rango lineal y como se ha mencionado, la mampostería deja de ser lineal a valores muy pequeños de desplazamientos laterales.

4.2. Método de la diagonal de compresión.

Debido a que los muros de mampostería pueden modelarse a través del Modelo de la Diagonal Equivalente MDE a compresión, Holmes, 1961 propone dicho modelo. El muro se sustituye por una serie de diagonales cuyas propiedades dependen de la rigidez del marco de concreto que confina el muro y de la rigidez a corte del panel de la mampostería. A partir de estudios analíticos, Bazán, 1980 calibró una ecuación para estimar el ancho de la diagonal equivalente de compresión en muros de mampostería. En las ecuaciones se muestra que el ancho de la diagonal equivalente con respecto a la altura del muro, es función de la relación de rigideces relativas entre columnas y panel de mampostería. Las ecuaciones siguientes estiman los valores utilizados para la obtención de la diagonal equivalente.

$$\frac{W}{H} = (0.35 + 0.022\lambda)$$

$$\lambda = \frac{E_c A_c}{G_m A_m}$$

Donde W corresponde al ancho de la diagonal a compresión, λ es un parámetro adimensional que toma en cuenta la rigidez relativa entre el muro y el marco ($0.9 \leq \lambda \leq 11.0$), H es la altura del muro, E_c es módulo de elasticidad del concreto, A_c es el área transversal de los elementos verticales que confinan la mampostería, G_m es el módulo del cortante del material de mampostería, finalmente A_m es el área transversal del panel de mampostería como se muestra en la figura 31 .

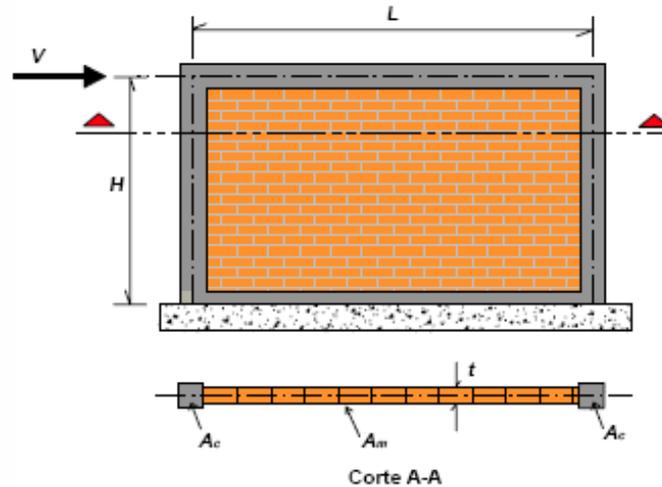


Fig. 31 Definición de valores de la ecuación de MDE Bazán, 1980.

En cuanto a la aplicación práctica del método hay que puntualizar varias cosas. Los modelos analíticos derivados del MDE son más complejos que aquellos derivados de la columna ancha, el MDE no captura adecuadamente la rigidez inicial de los muros de mampostería, ya que la ecuación propuesta por Bazán implica daño debido al agrietamiento horizontal y diagonal de la mampostería y las ecuaciones disponibles para la determinación de las propiedades de la diagonal equivalente están limitadas a ciertas relaciones que no siempre abarcan las propiedades geométricas de los muros reales de mampostería confinada (Zúñiga, 2005). Como consecuencia el uso de la diagonal equivalente en el modelado de estructuras de mampostería no aporta buenas aproximaciones a la rigidez inicial elástica.

Zarnic y Tomazevic, 1988, basados en resultados experimentales propusieron MDE el cual se muestra en la figura 32 en esas pruebas observaron que el daño en la zona superior del panel de mampostería ocurre fuera de la diagonal, probablemente debido a la concentración de esfuerzos introducida al aplicar las cargas laterales y verticales en las esquinas.

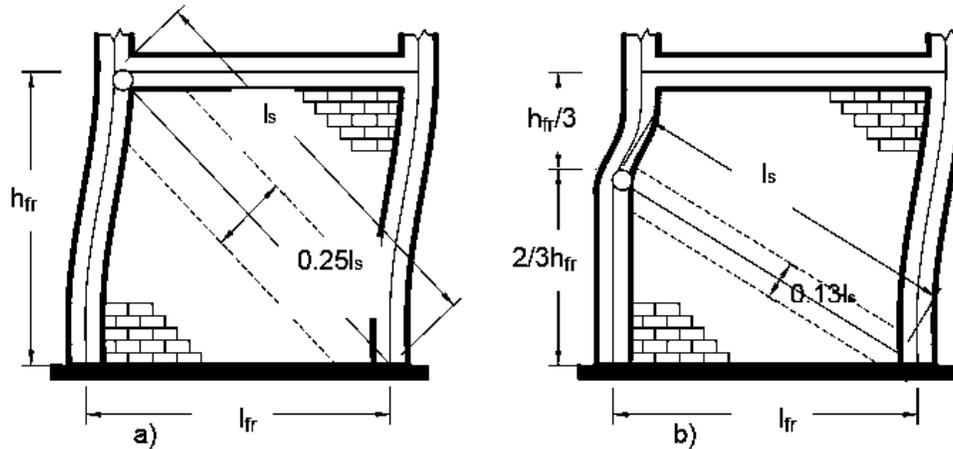


Fig. 32 Ancho de la diagonal sugeridos por Zarnic y Tomazevic (1988).

La principal ventaja MDE es que permite modelar fácilmente muros diafragma y muros confinados, así como también permiten realizar modelos tridimensionales. Además, existen ecuaciones simples para determinar los elementos mecánicos actuantes sobre las columnas en caso de muros diafragma.

Algunas de las desventajas del método que es únicamente un artificio para modelar muros, no es un método de análisis estructural.

Debido a la formulación del método está implícito que los muros están confinados de elementos de concreto, este método no es aplicable a muros con refuerzo interior.

4.3. Modelo numérico de los edificios estudiados.

El modelo numérico se construyó en el programa de análisis estructural sap2000 V15 basado en el criterio del MCA, este método considera que cada muro puede ser representado por un elemento barra con las propiedades geométricas y estructurales de las secciones transversales de cada muro como columna ancha con sus propiedades concentradas en su eje centroidal y la zona de las vigas que se encuentran dentro de los muros son infinitamente rígidas a flexión y a corte. Las vigas que se encuentran en la zona de acoplamiento entre muros se idealizó como elemento de sección transformada en (L ó T)

como así lo requiera en base a las recomendaciones descritas en la sección 3.2.3.3 de las NTC-M, 2004.

En la figura 33 se muestra la numeración de los muros con sus respectivas propiedades geométricas.

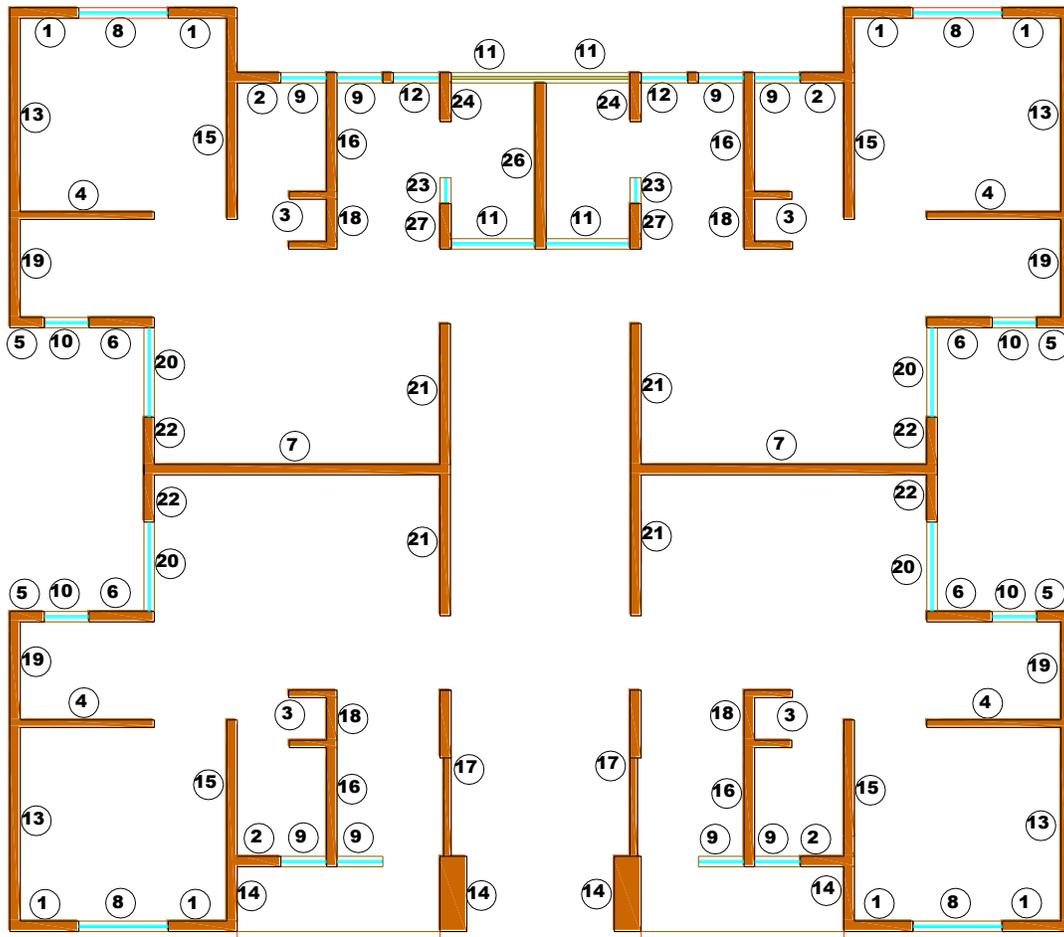


Fig. 33 Numeración de los muros modelado con columnas anchas.

En la tabla 4 se tiene la numeración de cada elemento barra tomando así las propiedades geométricas del proyecto para obtener el área y los momentos de inercia de cada elemento.

Tabla. 4 Propiedades de los elementos de las columnas anchas.

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS					
Columna	t (m)	L (m)	h	A (m ²)	I x(m ⁴)
1	0.12	0.930	2.57	0.1116	0.00804
2	0.12	0.655	2.57	0.0786	0.00281
3	0.12	0.570	2.57	0.0684	0.00185
4	0.12	1.870	2.57	0.2244	0.06539
5	0.12	0.463	2.57	0.0556	0.00099
6	0.12	0.807	2.57	0.0968	0.00526
7	0.12	3.980	2.57	0.4776	0.63045
8	0.12	1.200	1.13	0.1440	0.01728
9	0.12	0.680	1.75	0.0816	0.00314
10	0.12	0.600	1.21	0.0720	0.00216
11	0.12	1.275	1.00	0.1530	0.02073
12	0.12	0.766	1.75	0.0919	0.00449
13	0.12	2.790	2.57	0.3348	0.21718
14	0.12	0.940	2.57	0.1128	0.00831
15	0.12	1.850	2.57	0.2220	0.06332
16	0.12	1.580	2.57	0.1896	0.03944
17	0.12	2.300	2.57	0.2760	0.12167
18	0.12	0.650	2.57	0.0780	0.00275
19	0.12	1.440	2.57	0.1728	0.02986
20	0.12	1.270	1.13	0.1524	0.02048
21	0.12	1.970	2.57	0.2364	0.07645
22	0.12	0.704	2.57	0.0845	0.00349
23	0.12	0.350	1.00	0.0420	0.00043
24	0.12	0.600	2.57	0.0720	0.00216
26	0.12	2.180	2.57	0.2616	0.10357
27	0.12	0.560	2.57	0.0672	0.00176

En la tabla 5 se muestra en área y el momento de inercia de las secciones como pretilas ó huecos de ventana considerado como sección transformada.

Tabla. 5 Propiedades de los elementos de la sección transformada.

Seccion Transformada		
Losa	A (m ²)	Ix (m ⁴)
1	9.280	10279.3197
2	2.783	752.0553
3	3.400	1610.5416
4	13.545	32684.9356
5	2.300	336.9060
6	2.091	57.5849
7	1.359	9.0348
8	2.300	336.9060
9	2.300	336.9060
10	2.432	109.4600
11	1.274	8.4100
12	2.585	553.0160

En la figura 34 se presenta el modelo tridimensional de la estructura elaborado a base de los criterios descritos en la sección 4.1 de esta tesis.

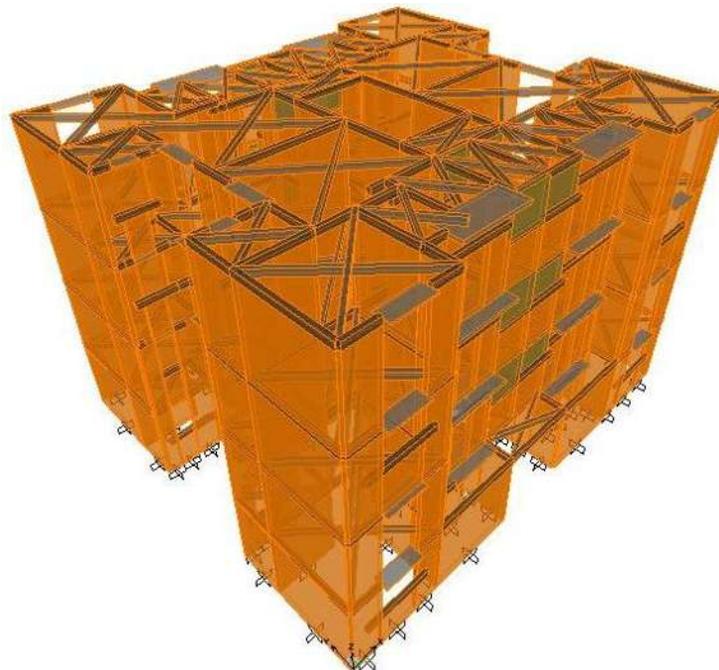


Fig. 34 Modelo tridimensional del edificio.

4.4. Calibración del modelo numérico.

Una vez generado el modelo numérico se procedió a su calibración, para la cual se decidió asignar al concreto la resistencia y el modulo de elasticidad del proyecto; para el módulo de elasticidad de la mampostería con el apoyo de las tablas facilitadas por novaceramic, se obtuvo la resistencia a compresión de la mampostería $f_m^* = 60 \text{ kg/cm}^2$, asimismo las NTC-M, 2004 recomiendan usar un módulo de elasticidad para cargas de larga y corta duración de $E_m = 350f_m^*$ y $E_m = 600f_m^*$, respectivamente. Para el caso que nos ocupa el módulo de elasticidad de la mampostería resultó $E_m = 21000 \text{ kg/cm}^2$ y $E_m = 36000 \text{ kg/cm}^2$ para cargas de larga y corta duración, respectivamente.

Con el valor del modulo de elasticidad para carga de larga duración se inicio el proceso de calibración hasta obtener el periodo fundamental de la estructura obtenidos experimentalmente mediante las pruebas de vibración ambiental. Cabe mencionar que los módulos de los calibrados esta entre los valores para carga de larga duración y corta duración.

El análisis dinámico modal permite determinar analíticamente las formas modales de la estructura, de esta manera en la figura 35 se presenta el segundo y el primer modo de vibrar de los edificios correspondientes en la dirección longitudinal (dirección x) y transversal (dirección y).

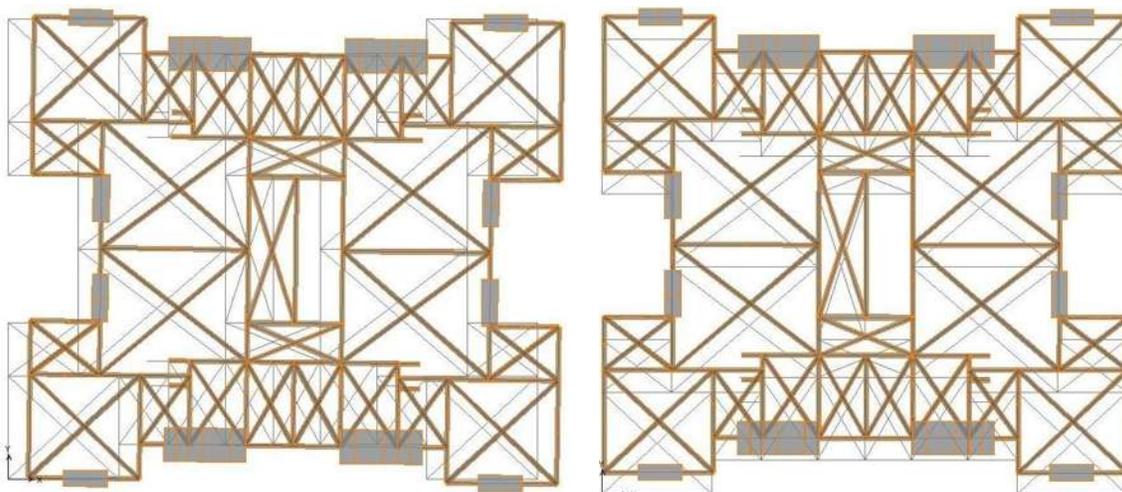


Fig. 35 Modos de vibrar de la estructura en sus respectivas direcciones.

En la tabla 6 se presentan los periodos fundamentales de vibración de los edificios estudiados obtenidos analíticamente.

Tabla. 6 Periodos de vibrar de los edificios.

Edificio	Periodos	
	x	y
1	0.234	0.235
2	0.222	0.224
3	0.230	0.231
4	0.218	0.220

Asimismo en la tabla 7 se presentan los módulos de elasticidad correspondientes a la calibración de cada uno de los edificios.

Tabla. 7 Módulos de elasticidad de los modelos calibrados.

Edificio	Modulo de elasticidad (kg/cm ²)
1	24150
2	27500
3	25200
4	29150

Se observa que los módulos de elasticidad varían de 24 150 a 29 150 kg/cm² dependiendo del edificio estudiado, dicha variación es aproximadamente del 20%, variación que puede atribuirse a la variabilidad en la mano de obra, variabilidad en las características mecánicas de los materiales etc.

5. COMENTARIOS FINALES Y PERSPECTIVA.

En este trabajo se realizó la medición con vibración ambiental de cuatro edificios de mampostería confinada de cuatro niveles y el análisis de las señales registradas permitió identificar adecuadamente los primeros modos de vibrar de cada una de las estructuras instrumentadas.

Por otro lado se generaron en SAP 2000 V15 los modelos numéricos de los cuatro edificios instrumentados mediante el MCA siguiendo las recomendaciones que marcan las NTC-M, 2004.

Los resultados mostraron módulos de elasticidad que varían de 24150 a 29150 kg/cm², diferencia que representa una variación de aproximadamente el 20%.

Los resultados de este trabajo contribuyen a un mayor conocimiento del comportamiento de las estructuras de mampostería de mediana altura, ya que en nuestro país existen pocos estudios relacionados con vibración ambiental en estructuras de mampostería.

Con el objeto de establecer recomendaciones del MCA es aconsejable que se exploren otras opciones en los criterios para generar los modelos con dicho método, por ejemplo considerar un muro largo como tal o en varios muros cortos etc.

También es aconsejable que se realicen más pruebas de vibración ambiental en un número mayor de edificios con la misma estructuración así como en edificios con otra estructuración.

REFERENCIAS.

A. de De Barcia, J. C. Barboza., “Determinación de períodos predominantes en edificaciones de mediana altura en la ciudad de Mérida.” Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería, ULA, Mérida 5101, Venezuela.

Aguilar Falconí A., (2008). “Análisis sísmico de edificios altos.” Escuela politécnica del ejercito Quito Ecuador.

Alcocer M. S., (1997). “Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería.” XI congreso nacional de ingeniería sísmica Veracruz, ver.

Ambrosini D, Rodolfo Danesi., (2004). “Frecuencias naturales de vigas de pared delgada doblemente asimétricas.” Mecánica computacional vol. XXIII Bariloche Argentina, Noviembre.

Bazán E, R. Meli., “Diseño sísmico de edificios.” Editorial limusa S.A de C.V. México D.F.

Bazán, E., (1980). “Muros de Mampostería ante Cargas Laterales Estudios Analíticos.” Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Cantú Díaz M., (1998). “Los efectos de una altura próxima a los 60 metros, en el análisis sísmico de edificios simétricos.” Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León. Diciembre

Carrillo León J., (2009). “Estimación de los periodos naturales de vibración de viviendas de baja altura con muros de concreto.” Ciencia e ingeniería neogranadina vol. 19-1 Bogotá Junio.

Carrillo León J., S. M. Alcocer., (2008). “Ensayes dinámicos de muros de concretos con relación aspecto igual a uno.” Revista, SMIS. XVI congreso nacional de ingeniería estructural Veracruz, Ver.

Cervantes Ruiz J., y Raúl Jean Perrilliat, (2009). “Diseño de edificios de mampostería altos en zona sísmica.” XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica Puebla, Puebla.

Cruz Díaz Jorge I., Rojas Rojas R., y Anguñiga Gaona F., (2007). “Estudio analítico y con vibración ambiental de las gradas de un estadio” Facultad de Ingeniería Civil UMSNH.

CSI (2012)., “SAP2000 V15 Advanced.” Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.

Cuadra Monreal Pilar E., (2007). “Aplicaciones de técnicas de vibraciones ambientales.” Tesis para el título de ingeniero geofísico. Universidad simón bolívar Sartenejas Abril.

Dirección disponible en la web: [http/ www.googlemaps](http://www.googlemaps). 26 Octubre 2012.

Escobar José A., (2007). “Detección de daño en edificios mediante sus características dinámicas.” Dr. En ingeniería (estructuras) 20 Noviembre.

Espinoza Barreras F., (1999). “Determinación de las características dinámicas de estructuras.” Tesis doctoral Barcelona, Octubre.

Fernández Baqueiro, L. Marín Gómez, F. Valera Rivera, J. y Vargas Marín. G., (2009). “Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el modulo de cortante de la mampostería de bloques huecos de concreto.” Universidad Autónoma de Yucatán. Ingeniería 13-2, 41-50.

Ficha técnica (NMX-C-061-ONCCE-2001). (2010). “Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos.” 29 de Noviembre.

Ficha técnica (NMX-C404-ONNCCE-2005). (2009). “Organismo Nacional de la Normalización y Certificación dela Construcción y Edificación, S.C.” Edición de Junio.

Gaceta oficial, Gobierno del Distrito Federal. (2004). “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería.” Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

Huerta López Carlos I., Daniel Salvador Lomelí Limón, Manuel Esparza Fuentes, Fortunato Espinoza Barreras, Rosalba Sofía Contreras Porras, Yuriam Baltazar Cifuentes., (2009). “Frecuencias de vibración teóricas y experimentales de un edificio de nueve niveles.” Facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Junio.

Jean R, J. Álvaro Pérez., (2003) “Análisis, revisión y detallado de las estructuras de mampostería.” Capítulo 7, 3ra edición Edificaciones de mampostería, fundación ICA, México.

Lermo, J., Francisco, S. and Chavez-Garcia, J. (1994) “Site Effect Evaluation using microtremors: a review (abstract)”, EOS 73, 352

Meli, R, A. Reyes, (1971). “Propiedades Mecánicas de la Mampostería.” Serie del Instituto de Ingeniería, No. 288, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Meli, R, G. Salgado, (1969). “Comportamiento de Muros de Mampostería Sujetos a Carga Lateral.” Serie del Instituto de Ingeniería, No. 237, Segundo Informe, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Meli, R., (1979). “Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería.” Serie del Instituto de Ingeniería, No. 352, 2ª Ed., Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Miranda, E., (1999). “Comportamiento Mecánico de la Mampostería Confinada.” Edificaciones de Mampostería, Fundación ICA, México.

Murià vila D., “Efectos de interacción suelo-estructura en edificios de mampostería.” México.

Murià Vila D., Baruo Daniel Aldama Sánchez, Santiago Loera Pizarro., (2009). “Alerta estructural para edificios estructurado”. Artículo presentado en el XVII congreso nacional de ingeniería sísmica, Puebla 12-14 Noviembre.

Murià Vila D., Ricardo Taborda, Marco Antonio Macías, José Alberto Escobar. “Instrumentación de un edificio alto en la ciudad de Acapulco.” Instituto de ingeniería, Universidad Nacional autónoma de México.

Murià Vila, D., (2007). “Experiencia Mexicana Sobre la Respuesta Sísmica de Edificios Instrumentados”, 20 de Septiembre.

NAKAMURA Yutaka (1989) “A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface” Quarterly Report of Railway Technical Institute (RTRI), Vol. 30, No. 1

Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2005., (2005). “Industria de la Construcción Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones Para Uso Estructural Especificaciones y Métodos de Prueba.” Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.

NOVACERAMIC; “Catálogo de productos.” México.

Núñez Quiroz L., (2008). “Diseño sísmico de estructuras de mampostería,” Universidad Nacional Autónoma de México, Febrero.

Orozco Gómez Nelly S., (2010). “Análisis de cimentación de una edificación estructurada mediante mampostería desde el punto de vista estructural.” Tesis Universidad autónoma metropolitana, Septiembre.

Ortiz Huerta. L. G., (2010). “Identificación de cambios de comportamiento estructural de un edificio experimental, mediante el análisis de vibración ambiental y vibración forzada, empleando técnicas de identificación de sistemas.” Tesis de maestría Ensenada Baja California, México. Diciembre.

Pérez Godínez J. F., (2004). “Diseño experimental y análisis para comparar la tenacidad de diferentes tipos de concreto.” Tesis de maestría, Universidad Iberoamericana México D.F.

Pérez Leal E. G., (2011). “Alternativas para el diseño sísmico de edificios altos de mampostería. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Marzo.

Pérez Martínez R., (2010). “Confiabilidad y optimización para el diseño sísmico de edificios considerando la contribución de muros de mampostería.” Tesis de doctorado. Instituto de ingeniería UNAM.

Ramírez Centeno M, José Juan Guerrero Corea., “Cambio en los periodos naturales de vibración de una estructura de mampostería reforzada de 5 niveles.” Departamento de materiales, Universidad Autónoma Metropolitana.

Ramo Silva C., (2009) “Determinación de las propiedades dinámicas de la iglesia de san Mateo Ahuirán.” Tesis para obtener el título de ingeniero, Morelia Michoacán, Noviembre.

Ruiz García J., (2009) “Evaluación de fragilidad basada en distorsión lateral para muros de mampostería confinada.” Revista de ingeniería sísmica No. 80 63-83

Taborda Ríos R., (2003). “Repuesta dinámica y efectos de interacción suelo-estructura de un edificio instrumentado en Acapulco.” Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F Septiembre.

Tena Colunga A., Jesús Cano L., Arturo López B, y Miguel Ángel Pérez O., (2010). “Revisión y actualización del método simplificado de análisis de estructuras de mampostería de los reglamentos de diseño sísmico de México.” Revista de ingeniería sísmica No. 82 1-34

Terán G. A., D. Arrollo Espinoza, Ruiz García J., (2009) “Diseño por desempeño, el futuro para el diseño de las estructuras de mampostería.” VI simposio nacional sobre ingeniería estructural en la vivienda. Guanajuato Gto.

Tischer Helene, Peter Thomson, Johannio Marulanda. “Comparación de tres transformadas para la distribución tiempo-frecuencia por medio de su aplicación a registros de vibraciones ambientales.” Escuela de ingeniería civil y Geomatica, universidad del valle, Cali, Colombia.

Tischer, H., Marulanda, J., and Thomson, P (2006). “Efecto del reforzamiento sismo-resistente sobre el comportamiento dinámico de una edificación afectada por el sismo de pizarro” Ingeniería.

Torres Montes de Oca C. A., (2009) “Pruebas de vibración ambiental para determinar las propiedades dinámicas de un edificio de 23 niveles y los efectos de interacción suelo-estructura.” México D.F Octubre.

Torres Morales, G. F., (2008) “Microzonificación Sísmica de la Zona Conurbada Veracruz y Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica Estructural del Centro Histórico.” (TESIS DOCTORAL), Veracruz, Junio.

Zambrana Rojas C, Raúl Jean Perrilliat, Javier CesìnFarah. “Diseño de estructuras de mampostería utilizando los espectros de diseño de las NTCDS-2000 del RCDF.” XII congreso nacional de ingeniería sísmica. Guadalajara J. México.

Zúñiga Cuevas O., (2005) “Evaluación analítica de la respuesta sísmica de las edificaciones de mampostería.” (TESIS DE MAESTRÍA), Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México D.F Diciembre.

Zúñiga Cuevas O., A. Terán G. (2008) “Evaluación basada en desplazamientos de edificaciones de mampostería confinada.” Revista ingeniería sísmica No. 79 25-48