



JUBILEO
Prof. Julio Ricaldoni

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN MODELO DE MAMPOSTERÍA ENCADENADA MEDIANTE UN ENSAYO EN MESA VIBRATORIA

Ing. José Luis Bustos (*)–Ing. Francisco Zabala (*)- Ing. Alberto R. Masanet (*)- Ing. Jorge R. Santalucía (*).

* Investigadores del Instituto de Investigaciones Antisísmicas de la Universidad Nacional de San Juan – San Juan - Argentina

SUMARIO

El presente trabajo muestra el estudio del comportamiento bajo cargas sísmicas de un modelo de muros de mampostería encadenada. Para esto se realizó un ensayo en mesa vibratoria de un modelo físico, a escala reducida (1:2), de una estructura compuesta de dos niveles y un vano, con dos muros paralelos de mampostería, confinados por columnas de hormigón armado, y conectados por una losa rígida de hormigón armado. El diseño del modelo y prototipo se realizaron a partir de la selección de un proyecto de edificio destinado a vivienda que corresponde a una construcción típica de nuestra zona, en función del espacio disponible para el ensayo y de las cargas máximas que admite la mesa vibratoria. La secciones de hormigón se diseñaron con una cantidad de armadura inferior a la indicada por las normas vigentes con el fin de inducir el modo de falla por flexión.

Se realizaron una serie de ensayos dinámicos preliminares de vibraciones libres y forzadas de baja amplitud con un barrido de frecuencias para la identificación de los parámetros dinámicos del modelo, y la adaptación del instrumental utilizado. Se ensayaron además muros y muretes construidos con el mampuesto usado en el modelo, para obtener la resistencia a compresión y resistencia al corte. Durante la construcción del modelo se obtuvieron probetas cilíndricas de hormigón y cúbicas del mortero usado para la mampostería, de los cuales se obtuvieron por ensayo los correspondientes valores de resistencia a compresión.

El modelo se ensayó hasta alcanzar su capacidad a flexión última. Se muestran los resultados del mismo en cuanto al modo de falla, registros de aceleraciones en los distintos niveles, de desplazamientos, deformaciones de las barras longitudinales de las columnas de encadenado, y de deformaciones diagonales de los paneles de mampostería.

A- INTRODUCCIÓN:

Uno de los tipos de estructuras más usados en la Argentina y en el resto de Latinoamérica son los muros de mampostería enmarcados con vigas y columnas de hormigón armado. Su comportamiento durante la ocurrencia de un sismo destructivo es complejo y sus propiedades de ductilidad y resistencia son altamente variables según el diseño adoptado y las características de los materiales.

Esta tipología estructural tiene ventajas de tipo económico en construcciones de vivienda y se aplica en edificios de hasta tres pisos. Desde el punto de vista estructural, su aplicación para edificios de mayor altura enfrenta incertidumbres en cuanto a rigidez, resistencia y capacidad de deformación plástica a considerar en el diseño sismorresistente. Además, las condiciones de ejecución de los mampuestos y de los muros son muy variables, por lo que existe un alto grado de dispersión en los valores de los parámetros de diseño.

El análisis más elemental y la experiencia demuestran que en la medida en que la estructura de muros portantes sea aplicable, como es el caso de edificaciones de viviendas, ella constituye la solución más económica posible. Existe evidencia, de economía del orden del 25 % en el costo total de la edificación cuando se usa estructuras de muros portantes en lugar de estructura principal de hormigón armado.

En términos generales, cuando se trata de edificios de viviendas, son factibles dos tipos de sistemas estructurales, cuya aplicación singular o su coexistencia es consecuencia, principalmente, de la flexibilidad que demande el uso a que será destinado el edificio. El primero de estos sistemas, eminentemente flexible en la disposición de las áreas, está basado en la estructura de pórticos (columnas y vigas); en ésta los cierres y divisiones son tabiques sin función estructural, fuera de la de resistirse ellos mismos. El otro, para el que la distribución de áreas es predeterminada e inamovible, es la estructura de muros portantes: en esta se integra en el muro todas las funciones: resistencia, cierre y división, aislamiento y, también, terminación.

En el caso de un terremoto destructivo tiene especial importancia el comportamiento de la estructura en el rango plástico y la conservación de las propiedades de resistencia y rigidez en los sucesivos ciclos del sismo para la supervivencia de la estructura. En el diseño deben evitarse decisiones que conduzcan a un comportamiento frágil de la estructura, es decir debe evitarse la rotura frágil sin deformación plástica.

DISEÑO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA:

En el diseño de muros de mampostería el primer objetivo es evitar la fisuración de los mismos para sismos frecuentes no destructivos. Hasta ese nivel de deformación, la capacidad resistente está controlada exclusivamente por la resistencia a tracción de la mampostería (sin influencia de la cantidad de armadura) y es necesario, en consecuencia, limitar los esfuerzos de corte, proveyendo la cantidad de área de muro necesarias compatibles con la resistencia (escasa) a la tracción de la mampostería.

El segundo objetivo es evitar el colapso de un muro y de la edificación para sismos destructivos. Para lograr esto es indispensable colocar armadura de modo tal que ella asuma el total de los esfuerzos de tracción, por flexión o por corte, que se puedan presentar en el muro. De no colocarse armadura, la falla del primer muro sería frágil, coincidente con la fisuración, y el colapso del sistema de muros de la edificación progresivo.

Por último es necesario también asegurar que una vez ocurrida la falla en alguno de los muros del sistema de la edificación, este sea capaz de mantener, bajo deformaciones crecientes importantes, una buena porción de la resistencia última; es decir que el muro de corte debe poseer plasticidad y ductilidad. En mampostería este comportamiento dúctil se encuentra ligado, tal como se ha dicho al modo de falla del muro de corte. Es recomendable entonces la elaboración de un diseño de muros de largos razonablemente uniformes, con relación alto/largo no menores de 1.5 que conduzcan conjuntamente con el dimensionamiento, la cuantía del refuerzo y el detalle del armado a que la tendencia del muro sea a fallar primero en tracción por flexión y no primero en compresión ó tracción diagonal.

B – DISEÑO DEL MODELO:

Los ensayos de simulación sísmica son técnicas experimentales de laboratorio que se utilizan para estudiar el comportamiento sísmico de elementos, ensamblajes, modelos ó sistemas estructurales ya sean de acero, hormigón armado, mampostería, etc.

En principio los ensayos se realizan en modelos con el objeto de evaluar el comportamiento total de una estructura, estos modelos pueden ser a escala natural o reducida, dependiendo no sólo de su costo, sino también de la técnica de ensayo que se esté utilizando. El ensayo en mesa vibratoria, que es la forma más directa para simular el comportamiento sísmico de estructuras, está limitado a modelos no muy pesados, no muy grandes y no muy rígidos; es decir, que debido a las dificultades que existen para ensayar modelos a escala natural, se ensayan normalmente modelos a escala reducida. Como consecuencia de esto es necesario extrapolar los resultados que se obtienen al comportamiento de sus prototipos reales. Para el estudio de estructuras completas puede recurrirse a las técnicas de análisis de semejanza, por intermedio de las cuales es posible extrapolar las características y el comportamiento de modelos a escala al ámbito del prototipo.

Se ha buscado diseñar una estructura simple con una escala cercana a la natural y a la que se le pueda aplicar un sismo fuertemente destructivo con el equipamiento disponible. Las acciones sísmicas a simular y la disponibilidad de equipo condicionan la escala, no sólo por la limitación geométrica de tamaño sino también por el peso total que implica el modelo y las características de velocidad, desplazamiento y aceleraciones máximas que es posible reproducir en la mesa vibratoria.

El diseño estructural del modelo físico a ensayar se ha realizado como si se tratara de un prototipo. Sólo se han tomado en consideración escalas geométricas, tratando que el modelo mantenga una relación de aspecto con algún prototipo a partir de la selección del proyecto de un edificio destinado a vivienda, que corresponda a una construcción típica en nuestra zona.

La estructura está compuesta de dos niveles y un vano, con dos muros paralelos de mampostería, confinados por columnas de hormigón armado, y conectados por una losa rígida también de hormigón armado. Las columnas y vigas de encadenado son de sección 0.10m x 0.10m. Esta geometría corresponde a una escala de aproximadamente 1:2. En dos niveles el peso total es de: 2.47 tn.

Con el fin de determinar las escalas de las variables de interés en el ensayo es necesario realizar un análisis de semejanza de los diversos parámetros que intervienen en el comportamiento del prototipo.

Con las consideraciones de dimensiones, peso y capacidad resistente del prototipo y la capacidad de la mesa vibratoria se seleccionaron las siguientes escalas:

Descripción	Factor de Escala
Longitud	$E_L = 1/2$
Aceleración	$E_A = 1/1$

Las escala derivadas de estas son las que se resumen en la siguiente tabla:

Descripción	Factor de Escala
Tiempo	$E_T = 1/\sqrt{2}$
Rigidez	$E_R = 1/2$
Masas y Pesos	$E_M = 1/4$
Fuerza de Inercia	$E_{FI} = 1/4$
Módulo de Elasticidad	$E_E = 1/1$
Momentos	$E_M = 1/8$
Esfuerzo Normal	$E_N = 1/4$
Secciones de Acero	$E_S = 1/4$

Se seleccionó la escala de masas y pesos del modelo proporcional al cuadrado de la escala de longitudes, es decir $E_M=1/4$ suponiendo que las cargas que actúan sobre las losas: su peso propio, pisos y sobrecargas, son proporcionales, en edificios, a la superficie cubierta, a diferencia de la escala de masas proporcional al volumen que se derivaría en el caso de una estructura de tipo volumétrica sometida solo a su peso propio.

Para inducir fuerzas de inercia se agregaron dos pesas de 900 Kg. cada una por nivel, de manera de obtener aproximadamente 2.1 tn por piso (8 tn por piso para el prototipo, es decir 500 kg/m^2).

MATERIALES DEL MODELO -PROTOTIPO:

La escala geométrica adoptada para el modelo-prototipo es de 1:2, mientras que la escala de resistencias se mantuvo en 1:1.

El acero utilizado corresponde al común tipo AL 220 con un esfuerzo de fluencia de 2200 kg/cm², las columnas y vigas se armaron con hierros de 4mm. de diámetro y estribos de alambre de 2mm.

Las dimensiones de los ladrillos cerámicos macizos usados en la práctica usual son de aproximadamente: 8x18x28cm (ladrillón), con algunas variaciones según el proveedor. Para el modelo se utilizó un mampuesto de 5x10x15cm que se obtuvo del cortado de dos caras del ladrillo macizo común.

El hormigón utilizado en columnas, vigas y losas se elaboró in situ con agregado grueso de tamaño nominal 12,7mm (1/2") y arena gruesa pasa tamiz N°40 (4,8mm) dosificado para obtener un H-17 ($\beta_r = 14\text{MPa}$).

El mortero es de tipo resistencia intermedia cuya dosificación es 1:1/2:4 (Cemento, Cal, Arena) y las juntas de la mampostería se realizaron con un tamaño máximo de 1cm.

En las figuras 1 y 2 se muestran las dimensiones del modelo, como así también los detalles de doblado y armado de sus secciones de hormigón y algunas características de los materiales utilizados. En la Foto N° 1 se muestra el modelo montado en la mesa vibratoria. En la foto N° 2 se puede observar las dimensiones del mampuesto utilizado y del armado de las secciones de hormigón.

C- ENSAYOS DINÁMICOS:ENSAYOS DE CARACTERIZACION DINÁMICA:

Para determinar el período fundamental del modelo y estimar el amortiguamiento, a pequeñas deformaciones, se hicieron ensayos de micro-vibraciones. Se colocaron captadores en los dos niveles para obtener los registros correspondientes. Del registro del modelo sin pesas, se obtuvo un período de aproximadamente 0.067 seg. (15 ciclos/seg.), que corresponde a 0.095 seg. para el prototipo. Mientras que, del registro correspondiente al modelo una vez montadas las pesas en cada nivel, el período es de 0.1 seg. (10 ciclos/seg.), y para el prototipo es de 0.141 seg. Se obtuvo además un amortiguamiento del 2%.

Se ensayó la estructura además, con una serie de movimientos de tres segundos de duración, de baja amplitud, de los cuales se determinó los parámetros dinámicos del modelo. El intervalo de frecuencias en la que se trabajó fue desde los 2 hasta los 20 ciclos por seg. De los registros obtenidos, se construyó la curva de resonancia correspondiente mostrada en la Figura 3. Se pudo construir además las formas modales a través de las razones de amplitud de aceleración en resonancia (Figura 4).

INSTRUMENTACIÓN:

El equipo para instrumentar el modelo comprendió:

- Un acelerómetro en la mesa vibratoria
- Cinco acelerómetros construidos y diseñados en el I.D.I.A. (2 en el primer nivel y 3 en el segundo)
- Un sensor de posición de gran carrera para el control de la Mesa.
- Tres sensores de posición colocados en los diagonales de los paños de mampostería.
- Cinco señales de bandas extensométricas ubicadas en las barras longitudinales de vigas y columnas.

ENSAYOS SÍMICOS:

Se ensayó la estructura con varios movimientos de diferente amplitud, derivados del acelerograma registrado durante el Terremoto de Cauce, San Juan del 23 de Noviembre de 1977 en el I.D.I.A.. Para el de máxima amplitud y con la escala de tiempo correspondiente, no se observó ningún daño en el modelo.

Además se excitó el modelo con una señal de entrada en la base, consistente en una serie de ondas sinusoidales, de 10 Hz con diferentes amplitudes como se muestran en los registros de la figura 5. Para inducirle daños a la estructura se incrementó la amplitud y la duración de la señal de excitación.

A continuación se describen algunos de los registros obtenidos de estos ensayos:

En la figura 5 se muestra un registro correspondiente al primer ensayo, consistente en una señal de cuatro trenes de ondas sinusoidales de amplitud creciente; en la misma se pueden ver los registros de aceleración en los distintos niveles de la estructura, con un máximo de 0.9 de g para el segundo nivel.

En la Figura 6 se contrasta el registro de deformación obtenido de la banda extensométrica colocada en la barra longitudinal de una columna de planta baja, con el de aceleración de la base de la mesa vibratoria. Esta, corresponde a un ensayo en el que se supera el 1.5 g de aceleración en la base. Se puede observar claramente el comportamiento no lineal de la misma para el nivel de excitación alcanzada, y que además, para este nivel de excitación se ha superado la deformación de fluencia del acero (1,02%).

Finalmente en la figura 7 se contrasta el registro de deformación de la barra longitudinal en la base de una columna del primer nivel con el de aceleración de la base de la mesa vibratoria, para el último ensayo. En el mismo se puede observar que para una aceleración máxima de casi 2g en la base, se obtiene una deformación superior a la de fluencia en las columnas de planta baja, con un evidente comportamiento no lineal. En las columnas del nivel superior las deformaciones medidas no alcanzan las de fluencia. En el mismo gráfico se puede ver un lazo asimétrico entre la aceleración registrada y la deformación en una banda extensométrica de una columna. Este gráfico con las escalas adecuadas puede asimilarse a un gráfico carga-deformación. La asimetría se debe a que en compresión la banda se deforma muy poco ya que resiste la sección de hormigón y ladrillo. También puede observarse el cierre de las grietas con una rigidez menor que la descarga. Tomando el sector del lazo que tiene deformaciones positivas (de tracción) pueden asimilarse las escalas del gráfico a momento en la base vs curvatura. Se observa un lazo estable y con una buena capacidad de disipación de energía. La estructura ensayada alcanzó aproximadamente una ductilidad de curvatura de 10.

D- COMPORTAMIENTO DEL MODELO:

Recordemos que las estructuras de mampostería sujetas a sollicitaciones sísmicas tienen dos formas de falla que son las de flexión y de corte. Es decir se toma como falla principal en la que se produce el mayor tamaño de las grietas, las que originan una fuerte degradación de resistencia y de rigidez

La estructura ensayada corresponde a un prototipo diseñado con una de sección de acero inferior a la que establece la norma. Esto llevo a que el modelo falle por flexión en los muros de planta baja. Durante el ensayo, se observaron en primer lugar, agrietamientos en la parte inferior del muro del primer nivel y hubo una degradación paulatina de resistencia en las cabezas flexocomprimidas del mismo, que se demostró con un agrietamiento de las columnas en la parte inferior, y finalmente se observaron grietas de deslizamiento en la parte inferior del muro del primer nivel. Es de hacer notar que no se observaron ningún tipo de daños en el segundo nivel. Las fotos N° 3 y 4 muestran los daños observados durante el ensayo.

Se han construido los espectros de los movimientos registrados en la base de la mesa vibratoria. En la Figura 8 se muestra el espectro correspondiente al movimiento registrado en la base del terremoto de Cauete de 1977 y el del movimiento de una señal de un tren de ondas sinusoidales, de 10 Hz. En los mismos es posible ubicar el valor de los periodos equivalentes correspondientes al modelo (0,1 seg) y prototipo (0,141 seg.), del modelo sin daños. Se han podido determinar los periodos equivalentes correspondientes a la fluencia de la armadura de columnas que corresponden a 0,13 seg. para el modelo y 0,18 seg para el prototipo. Este sensible aumento en el valor de los periodos produce una notable disminución en la pseudoaceleración y por lo tanto una disminución lógica del coeficiente sísmico a expensas de una disipación de energía en la estructura y una disminución de su rigidez.

E- COMENTARIOS FINALES:

Las estructuras de mampostería encadenada tienen un marcado comportamiento no lineal, que también se muestra en los registros obtenidos durante el ensayo. Por lo tanto los procedimientos de análisis y diseño sísmico deben considerar las propiedades del material concordantes con el nivel de deformaciones esperado.

Es posible diseñar estructuras de mampostería con armaduras verticales que permitan controlar el modo de falla de manera que este sea de flexión, esta estructura se comportaría como un bloque rígido vinculado por barras ancladas en la fundación. [6]

REFERENCIAS

- 1- R.PARK-T.PAULAY. "Estructuras de Concreto Reforzado"
- 2- Reglamento INPRES-CIRSOC-103
- 3-SEMINARIOS CISMID
- 4- Earthquake Engineering Reserch Center, Berkeley
- 5- Earthquake Engineering an Estructural Dynamics
- 6- Crisafulli, F., Carr, A., y Park, R.- 2000- "Capacity design of infilled frame structures", Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Nueva Zelanda. Paper 221.

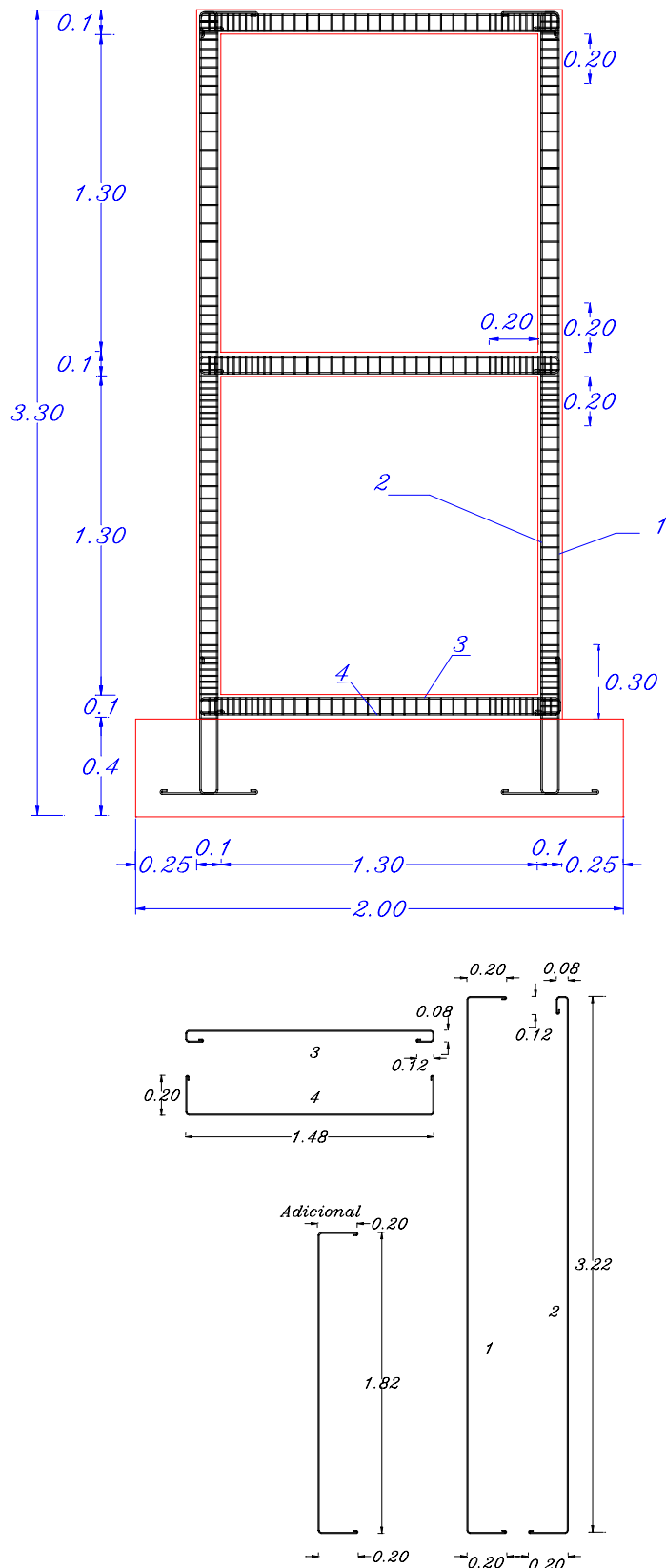


Figura 1: Detalle de armado y dimensiones del Modelo.

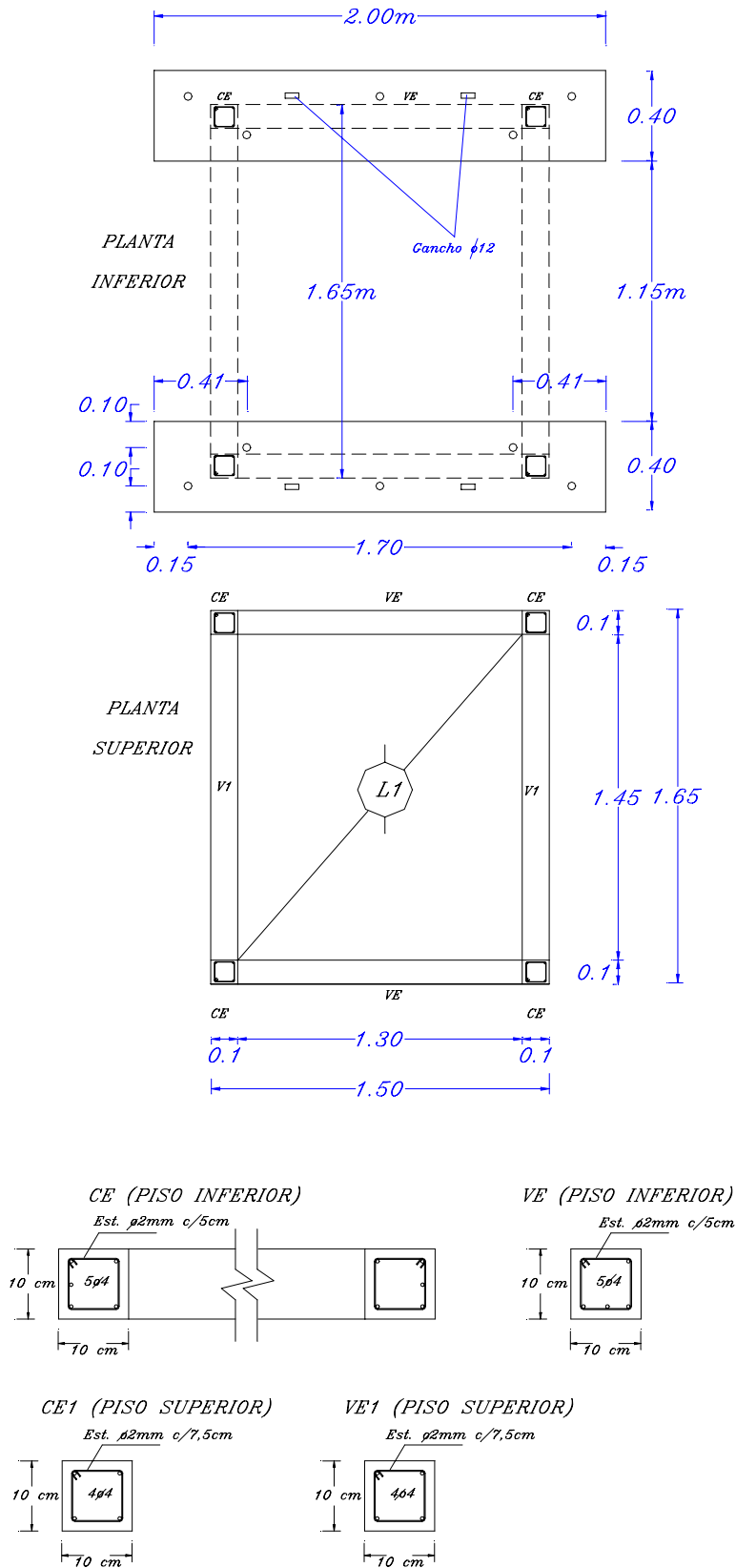


Figura 2: Detalle de armado y dimensiones del Modelo.

CURVA DE RESONANCIA
ENSAYO MODELO DE MAMPOSTERÍA ENCADENADA

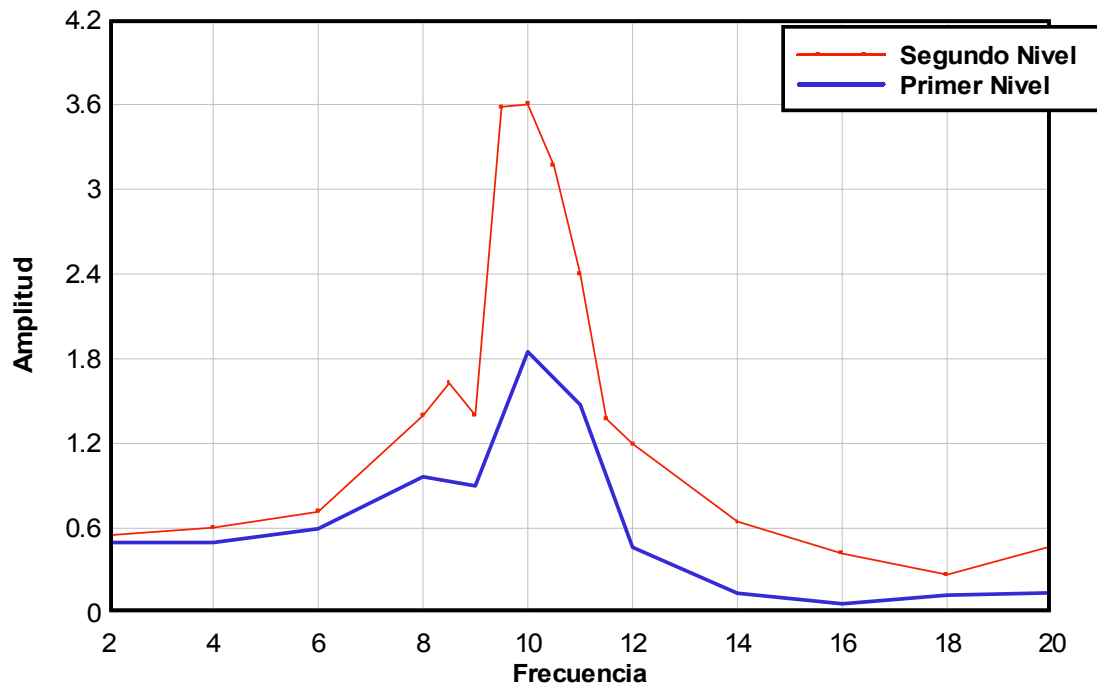


Figura 3: Curva de Resonancia.

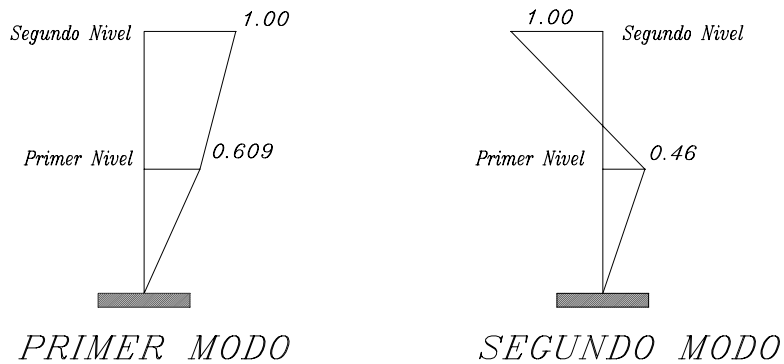


Figura 4: Formas Modales.

REGISTRO ENSAYO 1

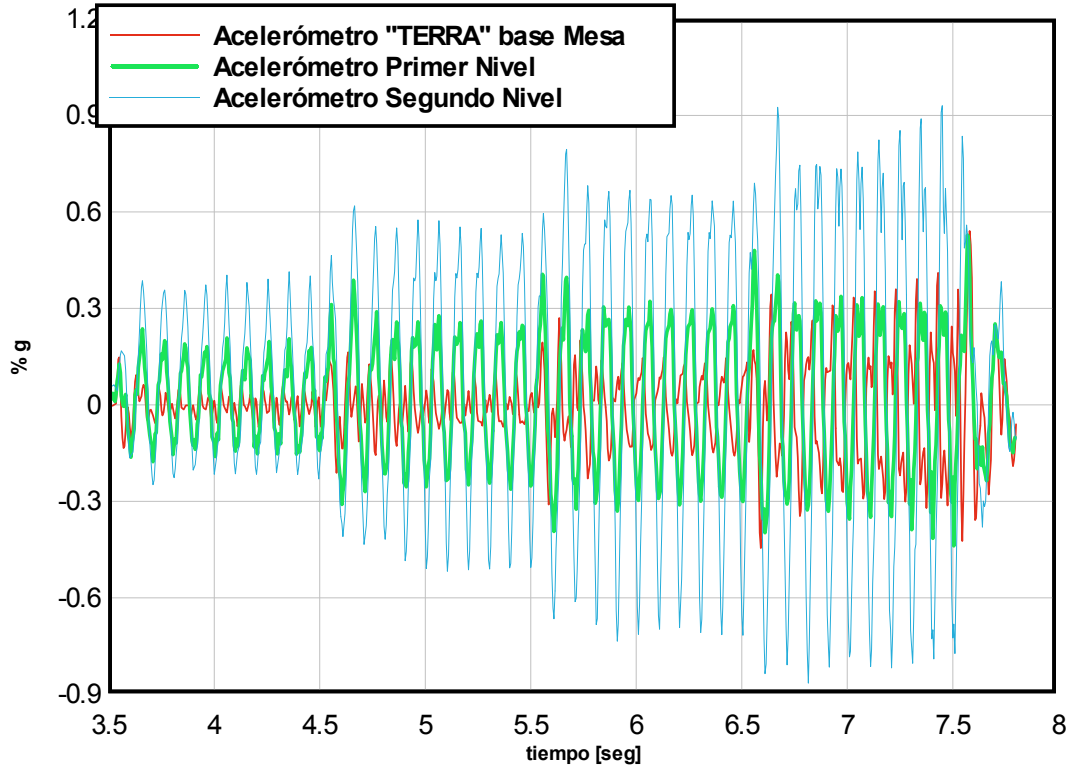


Figura 5 - Ensayo 1

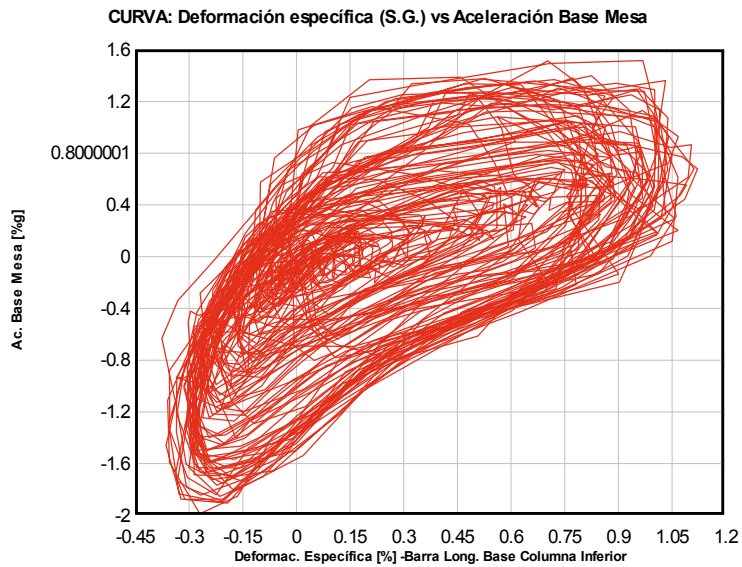


Figura 6 - Ensayo 9

CURVA: Deformación Banda Ext. vs Aceleración Base Mesa

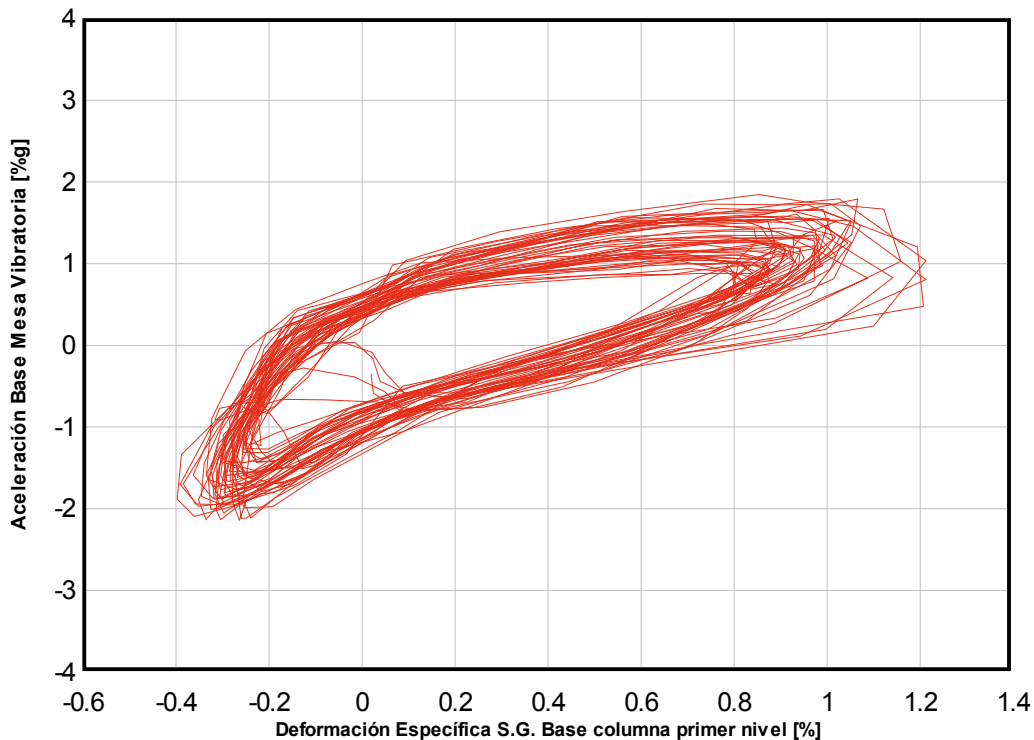


Figura 7 - Ensayo 10

**ESPECTROS DE RESPUESTA
ENSAYOS EN MESA VIBRATORIA**

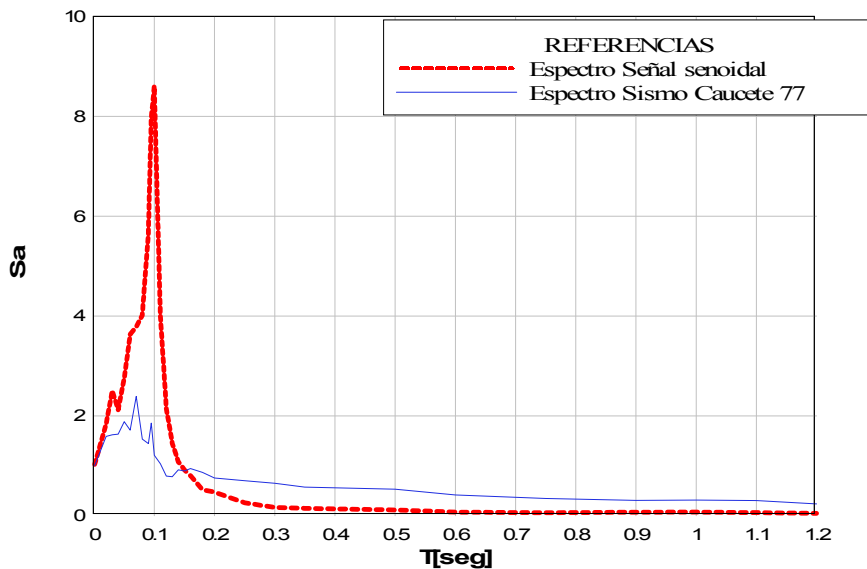


Figura 8 – Espectros de respuesta.



Foto N° 1



Foto N° 2



Foto N° 3



Foto N° 4