

Evaluación Analítica y Experimental de un Tecnodomo Sujeto a Cargas Sísmicas

Carlos Nungaray, Ing.

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, Nuevo León, México,
carlos.nungaray@itesm.mx

Francisco Yeomans, Dr.

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, Nuevo León, México,
fyeomans@itesm.mx

Paul Roschke, Dr.

Texas A&M University, College Station, Texas, United States, p-roschke@tamu.edu

César Dávalos, Ing.

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, Nuevo León, México,
cdavalos@email.com

David Shook, Mr.

Texas A&M University, College Station, Texas, United States, olrock05@yahoo.com

Abstract

En el Tecnológico de Monterrey se ha desarrollado un sistema constructivo "Tecnodomo", para uso de vivienda emergente, clínica de campo, escuela rural entre otros. El Tecnodomo es un domo fabricado con la técnica de ferrocemento, formado a base de paneles prefabricados curvos de acero tubular recubiertos con un mortero ligero. Este estudio presenta la respuesta estructural del Tecnodomo sujeto a cargas sísmicas. La evaluación analítica se realizó mediante la técnica de elemento finito para un modelo a escala 3/5 con un diámetro de 3.60 m. sujeto a los sismos de Kobe, Northridge, Loma Prieta y México 1985. Para la evaluación experimental, se construyó una mesa vibratoria de 4.0 m. por 4.0 m. de un grado de libertad en la Universidad de Texas A&M, y sobre ella se fabricó un Tecnodomo a escala 3/5, utilizando técnicas de similitud y semejanza para convertir los resultados del modelo a resultados del prototipo o estructura real. El Tecnodomo fue instrumentado usando galgas extensométricas, acelerómetros y LDVT's para monitorear la respuesta del sistema sujeto a los sismos mencionados. Los resultados experimentales del comportamiento dinámico del Tecnodomo fueron similares a los analíticos y dentro de los rangos aceptables, observándose un mínimo agrietamiento en el mortero. Por lo que se concluye que el Tecnodomo es una estructura que presenta un buen comportamiento bajo cargas sísmicas

Keywords

Tecnodomo, Vivienda Post-Desastre, Movimiento Sísmico, Ferrocemento, Similitud.

1. Introducción

México es un país de fuerte actividad sísmica, como lo demuestran los sismos de Oaxaca, en 1999, en el cual murieron 20 personas, y el de la ciudad de México de 1985, en el cual murieron más de 9,500 personas. Como resultado de esta actividad sísmica urgen medidas para proteger las vidas de los habitantes, así como su vivienda de daños mayores en el caso de que ocurra un sismo importante.

Un sistema potencialmente factible en México, especialmente en situaciones de vivienda emergente posterior al sismo o como vivienda normal para personas de bajos recursos, consiste en un domo a base de mortero de anhídrido reforzado por una estructura de perfiles tubulares de acero. La estructura resultante es adecuada tanto para vivienda como para instalaciones comunitarias como escuelas y clínicas. Además, la estructura es ecológica en virtud de que en la elaboración del mortero se emplea la anhídrido, un subproducto resultante de la elaboración de ácido fluorhídrico, que de no usarse representa un desecho. Este tipo de estructura, aunque cumple y/o excede los requerimientos de diseño sísmico aplicables en México, no ha sido probado experimentalmente ante acciones sísmicas para evaluar su comportamiento ante sismos reales. Thompson (1985) propuso una estructura similar para usarse como vivienda posterior a un desastre natural. Sin embargo, su propuesta no tomó ventaja de la eficiencia de la forma de la estructura, además de que no se realizó prueba experimental alguna. Otras propuestas para viviendas de bajo costo han surgido a nivel mundial, incluyendo el reporte de Mathews (1994), realizado en Sudáfrica. En dicho estudio se buscó obtener vivienda de bajo costo, por lo que se consideraron diferentes materiales y diseños, de los cuales se determinó que una estructura a base de ladrillo o tabique era la óptima para las condiciones estudiadas.

Con base en la necesidad de vivienda accesible en regiones castigadas por desastres naturales, y la falta de evidencia experimental de su comportamiento estructural, se propuso este estudio para investigar las ventajas que presenta una estructura en cuya construcción se utilizan materiales innovadores en una forma geométrica estructuralmente eficiente. El proyecto consta de tres fases principales. La primera fase consiste en la realización de análisis estructurales por medio del método de elementos finitos para predecir el comportamiento de un domo a excitaciones sísmicas así como para diseñar un simulador sísmico a emplearse en las pruebas experimentales. El objetivo de estos análisis fue predecir las distribuciones de esfuerzo y deformación a fin de determinar los conjuntos de pruebas de las que se pudiera extraer la información deseada de la manera más eficiente. La segunda fase del proyecto consiste en la construcción de una mesa vibratoria para realizar la prueba del domo. La tercera y última etapa del proyecto consiste en la prueba a gran escala del domo para determinar su nivel de resistencia, puntos de concentración de esfuerzos y posibles modos de falla.

2. Características De La Mesa Vibratoria

La mesa vibratoria construida en la Universidad Texas A&M (TAMU) es de un solo grado de libertad horizontal, tiene una alta capacidad de carga, gran tamaño (4000 mm x 4000 mm) y bajo costo. La mayoría de las mesas vibratorias que se tienen en laboratorios de investigación universitarios tienen un área mucho más pequeña para colocar la carga o son mucho más costosas, como lo reporta Nagarajaiah (1998).

Un factor fundamental en el diseño de una mesa vibratoria es el número de grados de libertad que la mesa impondrá a la estructura sujeta a prueba. Este número varía de uno a seis, de los cuales tres serían desplazamientos lineales y tres rotacionales. Muchas de las mesas vibratorias en el mundo pueden simular seis grados de libertad para grandes estructuras. Sin embargo, ya que la componente más fuerte de un sismo es usualmente en una dirección horizontal, es ampliamente aceptado que una simulación de un sismo con un grado de libertad es adecuada para probar la supervivencia de una estructura. Al incluir grados de libertad adicionales se obtiene una simulación más precisa a costa de un drástico incremento en su costo y sólo un moderado beneficio en la precisión de la simulación. Por lo tanto, se optó por el diseño de una mesa vibratoria de un grado de libertad.

Una característica importante de la mesa vibratoria es su capacidad de poder ser reconfigurada para un marco más rígido y ligero. Al remover una de las placas que forman su superficie y pasar la viga I ahora sin usar al espacio entre las dos vigas I restantes, se obtiene una mesa vibratoria rectangular. Así, se puede

reducir el peso en al menos una tercera parte y la rigidez se incrementa significativamente. El beneficio de esta configuración está más en la mayor rigidez que en la reducción de peso.

Para imponer el movimiento a la mesa vibratoria se empleó un actuador de la marca Material Testing Systems (MTS) de 450 kN de capacidad, disponible en el laboratorio de estructuras de la Universidad Texas A&M, el cual se muestra en la Figura 1. El actuador se montó externamente por varias razones, siendo la más importante el mantener a la mesa lo más cercana posible a la losa de reacción para eliminar la posibilidad de efectos de volteo.



Figura 1: Actuador de 450 kN de capacidad

La mesa vibratoria consta de dos placas de 12.7 mm de espesor apoyadas en tres vigas $W10 \times 33$ alineadas en la dirección del movimiento, y cuatro vigas $W6 \times 20$ que sirven como arriostramiento. La mesa está atornillada con el fin de proporcionarle versatilidad. El peso aproximado de las partes móviles de la mesa es de 2400 kg. La Tabla 1 presenta la lista de materiales. Los rodamientos empleados para soportar a la masa móvil de la mesa fueron Danaher Linear Bearings (Danaher Motion, 2003).

La frecuencia fundamental de la parte móvil de la mesa es otro factor clave para su diseño. Los sismos tienen generalmente un contenido de frecuencias entre 0 y 5 Hz, por lo que es deseable que la mesa vibratoria tenga una frecuencia fundamental muy por arriba de este rango para minimizar la resonancia. Después de numerosos análisis por elementos finitos se determinó el espesor de 12.7 mm para la superficie de la mesa.

Tabla 1: Materiales de la mesa vibratoria

| Concepto | Cantidad | Tamaño | Tipo de acero |
|---------------------------------|----------|-----------------------------|---------------|
| Placa | 2 | 4000 mm x 2000 mm x 12.7 mm | A36 |
| Viga principal: $W10 \times 33$ | 3 | 4000 mm | A992 |
| Arriostramiento: $W6 \times 20$ | 4 | 1800 mm | A992 |
| L3x3x3/8 | 16 | 114.3 mm | A36 |
| Placa base | 6 | 1200 mm x 300 mm x 12.7 mm | A36 |

La Figura 2 muestra los modos de vibrar de la mesa obtenidos por medio del software comercial de elementos finitos ABAQUS (2003). Las condiciones de frontera modeladas incluyen cuatro rodamientos unidireccionales localizados debajo de las vigas I. La Tabla 2 muestra los rangos dominantes de frecuencias de los sismos usados en este proyecto a fin de compararlos con los de la mesa vibratoria.

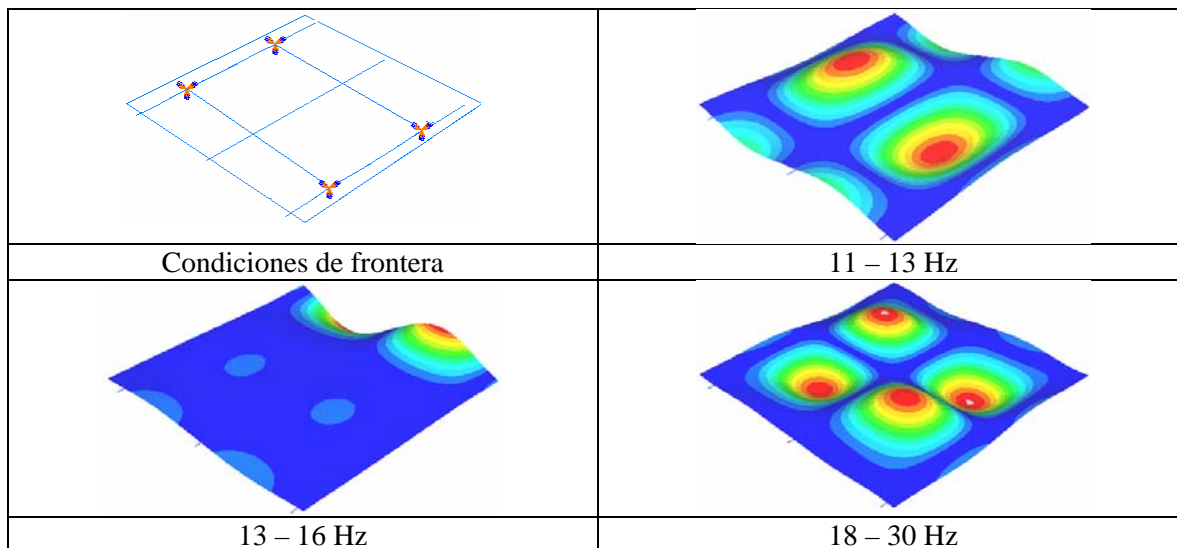


Figura 2: Formas de los modos de vibrar de la mesa

Tabla 2: Contenido de frecuencia fundamental de los sismos empleados

| Colima | México 1985 | Kobe | Loma Prieta | Northridge |
|---------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------------|
| 0-2.5 Hz | 0-2.5 Hz | 0-7 Hz | 0-7 Hz | 0-8 Hz |

3. Descripción Del Tecnodomo

En las siguientes secciones se describen las propiedades de los materiales, geometría y las consideraciones del proceso de modelado del domo por medio de elementos finitos.

3.1 Materiales

El tecnodomo construido para este estudio consta de dos componentes principales: una base de concreto reforzado que corresponde a la cimentación, y el domo propiamente dicho, construido a base de paneles prefabricados curvos de acero tubular, malla y mortero. En virtud del tamaño de la mesa vibratoria, se empleó un modelo a escala $3/5$ del prototipo o estructura real. Para obtener resultados en el modelo que sean aplicables a la estructura real es necesario tomar en cuenta conceptos de similitud y semejanza, los cuales se describen en la sección 3.2. En la Tabla 3 se presentan las propiedades de los materiales empleados en el tecnodomo construido a escala.

En general la geometría del tecnodomo resulta en una frecuencia fundamental alta, lo cual es una ventaja desde el punto de vista de su respuesta a excitaciones sísmicas, pues la frecuencia fundamental del tecnodomo es mayor que la frecuencia dominante de la mayoría de los sismos (0 – 5 Hz). Esta gran diferencia relativa entre las frecuencias del tecnodomo y de los sismos hace que este tipo de estructura sea deseable en una zona de riesgo sísmico.

3.2 Similitud

Cuando por diferentes razones se requiere construir y probar un modelo de una estructura en lugar de la estructura real, o prototipo, es necesario escalar dicho prototipo y cumplir con los requerimientos de similitud y semejanza para que los resultados obtenidos de la prueba del modelo sean aplicables a la estructura real.

Tabla 3: Propiedades de los materiales del tecnodomo a escala

| Material | Peso volumétrico (kg/m ³) | Resistencia (MPa) | Módulo de elasticidad (GPa) | Coefficiente de expansión térmica (°C ⁻¹) |
|----------|---------------------------------------|-------------------|-----------------------------|---|
| Mortero | 1,350 | 10 | 5.88 | 3x10 ⁻⁶ |
| Concreto | 2,400 | 21 | 21.46 | 9x10 ⁻⁶ |
| Acero | | 343 | 199.86 | |

3.2.1 Requerimientos de similitud

El modelo usado en este proyecto satisface los requerimientos de un modelo del tipo réplica verdadera tal como lo definen Harris y Sabnis (1999), lo que significa que mantiene una completa similitud en materiales, geometría y cargas entre el modelo y el prototipo. La geometría del prototipo y del modelo debe ser la misma, afectada sólo por el factor de escala. El prototipo es una media esfera con un diámetro de 6000 mm y espesor de pared de 50 mm que se construye sobre una base de concreto de 100 mm de espesor. Las propiedades de los materiales se muestran en la Tabla 3. El refuerzo estructural consiste en un tubo cuadrado de 25.4 mm de lado. Una malla electrosoldada se utiliza para mantener en su lugar al mortero fresco.

3.2.2 Tamaño del modelo y nivel de precisión

La mesa vibratoria de TAMU mide 4000 mm x 4000 mm, por lo que el modelo del tecnodomo debe escalarse con base en estas dimensiones. Como el prototipo mide 6000 mm de diámetro, para poder colocar el modelo y su cimentación sobre la mesa vibratoria se requiere reducir al diámetro a 3600 mm. Por lo tanto, tenemos las siguientes ecuaciones entre las dimensiones geométricas del modelo y el prototipo:

$$\frac{L_m}{L_p} = 0.60 \quad (1)$$

$$L_m = 0.60L_p \quad (2)$$

Los factores de escala, con base en los requerimientos de similitud (Harris y Sabnis, 1999) se muestran en la Tabla 4.

3.2.3 Análisis dimensional

Para describir la relación entre velocidad, tiempo, desplazamiento, frecuencia y masa del prototipo y del modelo se requiere de un análisis dimensional. Los parámetros dimensionales fundamentales que son de relevancia en este proyecto se muestran en la Tabla 5. En esta tabla no se incluyen la deformación, ε , ni la relación de Poisson, ν , pues son parámetros adimensionales.

El teorema Pi de Buckingham establece que una ecuación con n soluciones puede expresarse como

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (3)$$

o, en terminos de m parámetros adimensionales, π ,

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0 \quad (4)$$

$$m = n - r \quad (5)$$

Table 4: Factores de escala

| Tipo de carga | | Geometría | | Propiedades del material | |
|--------------------------------|-------------|-----------------------|--------------|----------------------------|-----------|
| Fuerza, Q | $S_E S_L^2$ | Dimensión lineal, L | S_L | Módulo elasticidad, E | S_E |
| Aceleración, a | 1 | Desplazamiento, | S_L | Esfuerzo, σ | S_E |
| Aceleración gravitacional, g | 1 | Frecuencia, | $S_L^{-1/2}$ | Deformación, ε | 1 |
| Velocidad, v | $S_L^{1/2}$ | | | Razón de Poisson, ν | 1 |
| Tiempo, t | $S_L^{1/2}$ | | | Densidad de masa, ρ | S_L/S_L |

Tabla 5: Dimensiones de parámetros relevantes

| Fuerza, Q | Módulo de Elasticidad, E | Dimensión Lineal, L | Esfuerzo, σ | Aceleración, a y g | Tiempo, T | Densidad de masa, ρ | Desplazamiento, δ |
|-------------|----------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|
| F | F/L^2 | L | F/L^2 | F/T^2 | T | FT^2/L^4 | L |

T = unidad de tiempo, F = unidad de fuerza, L = unidad de longitud

En las ecuaciones (3) a (5) n es el número de variables físicas, r es el número de unidades fundamentales involucradas y m es la diferencia entre ellas. En la Tabla 6 se muestran los exponentes de los parámetros relevantes involucrados en el problema.

En el análisis dimensional hay 13 variables físicas y 3 unidades fundamentales, por lo que el número de cantidades adimensionales, π , es 10. La respuesta del domo bajo carga sísmica puede representarse por medio de la ecuación (6).

Tabla 6: Exponentes de los parámetros involucrados

| | | Cantidades | | | | | | | | | | | | |
|-----------|---|------------|-----|-----|----------|---------------|-------|-----|-----|-----|--------|-------|----------|----------|
| | | Q | E | l | σ | ε | ν | a | g | t | ρ | ν | ω | δ |
| Dimensión | F | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | L | 0 | -2 | 1 | -2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | -4 | 1 | 0 | 1 |
| | T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | -2 | 1 | 2 | 1 | -1 | 0 |

$$F(Q, E, l, \sigma, \varepsilon, \nu, a, g, t, \rho, \nu, \omega, \delta) = 0 \quad (6)$$

la ecuación (6) puede reescribirse como el producto de potencias definido por la ecuación (7).

$$\delta = K Q^{\bar{a}} E^{\bar{b}} l^{\bar{c}} \sigma^{\bar{d}} \varepsilon^{\bar{e}} \nu^{\bar{f}} a^{\bar{g}} g^{\bar{h}} t^{\bar{i}} \rho^{\bar{j}} \nu^{\bar{k}} \omega^{\bar{l}} \quad (7)$$

En la que K es una constante de proporcionalidad. Al sustituir cada parámetro de la ecuación (7) por sus unidades fundamentales respectivas, obtenemos la ecuación (8).

$$L = F^{\bar{a}} (FL^{-2})^{\bar{b}} L^{\bar{c}} (FL^{-2})^{\bar{d}} (LT^{-2})^{\bar{g}} (LT^{-2})^{\bar{h}} T^{\bar{i}} (FTL^{-4})^{\bar{j}} (LT^{-1})^{\bar{k}} (T^{-1})^{\bar{l}} \quad (8)$$

A fin de mantener congruencia en las dimensiones, los exponentes de cada unidad fundamental deben ser los mismos en ambos lados de la ecuación (8). Por lo tanto,

$$F: \quad 0 = \bar{a} + \bar{b} + \bar{d} + \bar{j} \quad (9)$$

$$T: \quad 0 = -2\bar{g} - 2\bar{h} + \bar{i} + \bar{j} - \bar{k} - \bar{l} \quad (10)$$

$$L: \quad 1 = -2\bar{b} + \bar{c} - 2\bar{d} + \bar{g} + \bar{h} - 4\bar{j} + \bar{k} \quad (11)$$

Resolviendo las ecuaciones en términos de \bar{a} , \bar{i} y \bar{c} , los exponentes de las unidades fundamentales, obtenemos

$$\bar{a} = -\bar{b} - \bar{d} - \bar{j} \quad (12)$$

$$\bar{i} = 2\bar{g} + 2\bar{h} - \bar{j} + \bar{k} + \bar{l} \quad (13)$$

$$\bar{c} = 1 + 2\bar{b} + 2\bar{d} - \bar{g} - \bar{h} + 4\bar{j} - \bar{k} \quad (14)$$

Al sustituir estos términos en la ecuación (7), se obtiene la ecuación (15).

$$\delta = MQ^{-\bar{b}-\bar{d}-\bar{j}} E^{\bar{b}} l^{1+2\bar{b}+2\bar{d}-\bar{g}-\bar{h}+4\bar{j}-\bar{k}} \sigma^{\bar{d}} \varepsilon^{\bar{e}} \nu^{\bar{f}} a^{\bar{g}} g^{\bar{h}} t^{2\bar{g}+2\bar{h}-\bar{j}+\bar{k}+\bar{l}} \rho^{\bar{j}} \nu^{\bar{k}} \omega^{\bar{l}} \quad (15)$$

Al agrupar los términos con el mismo exponente se obtiene la ecuación explícita (16) o la ecuación implícita (17).

$$\frac{\delta}{l} = M \left[\left(\frac{El^2}{Q} \right)^{\bar{b}} \left(\frac{\sigma l^2}{Q} \right)^{\bar{d}} \varepsilon \nu \left(\frac{at^2}{l} \right)^{\bar{g}} \left(\frac{gt^2}{l} \right)^{\bar{h}} \left(\frac{l^4 \rho}{Qt} \right)^{\bar{j}} \left(\frac{t\nu}{l} \right)^{\bar{k}} (t\omega)^{\bar{l}} \right] \quad (16)$$

$$G \left(\left(\frac{El^2}{Q} \right)^{\bar{b}} \left(\frac{\sigma l^2}{Q} \right)^{\bar{d}} \varepsilon \nu \left(\frac{at^2}{l} \right)^{\bar{g}} \left(\frac{gt^2}{l} \right)^{\bar{h}} \left(\frac{l^4 \rho}{Qt} \right)^{\bar{j}} \left(\frac{t\nu}{l} \right)^{\bar{k}} (t\omega)^{\bar{l}} \left(\frac{\delta}{l} \right) \right) = 0 \quad (17)$$

De la ecuación (17) obtenemos los siguientes términos π :

$$\pi_1 = \frac{Q}{E \times L^2}, \quad \pi_2 = \frac{\sigma}{E}, \quad \pi_3 = \varepsilon, \quad \pi_4 = \nu, \quad \pi_5 = \frac{a}{g} \quad (18)$$

$$\pi_6 = \frac{t \times g^{1/2}}{l^{1/2}}, \quad \pi_7 = \frac{g \times \rho \times l}{E}, \quad \pi_8 = \frac{\delta}{l}, \quad \pi_9 = \frac{\nu \times l}{t}, \quad \pi_{10} = t \times \omega$$

Los factores de escala son los cocientes entre los términos π del prototipo y del modelo, como se indica en la ecuación (19). A partir de esta ecuación se construye la Tabla 7.

$$S_i = \frac{\pi_{ip}}{\pi_{im}} \quad (19)$$

Para el caso de la dimensión lineal,

$$S_L = \frac{L_p}{L_m} = \frac{L_p}{0.6L_p} = \frac{5}{3} \quad (20)$$

Con el factor de escala dado por la ecuación (20) se obtiene la Tabla 8. De esta tabla se observa que para satisfacer el requerimiento de similitud se deben modificar las cantidades de la tabla y otras derivadas de ellas. Las dimensiones geométricas del tecnodomo se redujeron a 60% de las originales, la escala de tiempo de los sismos usados se redujo por un factor t_p y los desplazamientos de los sismos se redujeron por un factor δ_p . La masa requerida se obtuvo al colocar una capa extra de mortero de 20 mm al domo, cuidando que dicha masa extra no contribuyera a la rigidez del sistema. Por esta razón, se colocó una vez que el mortero del domo ya había endurecido y además se hicieron cortes cercanos entre sí sobre la superficie exterior del domo, como se muestra en la Figura 3. De esa forma se mantuvo la rigidez original de la estructura.

3.3 Análisis De Elementos Finitos

Para evaluar el comportamiento estructural del sistema bajo carga sísmica se usó el método del elemento finito. Las consideraciones geométricas y de modelación hechas para este análisis se presentan en las secciones siguientes.

La geometría del tecnodomo a escala que fue analizado se muestra en la Tabla 9. El peso volumétrico usado en el modelo fue $\gamma = 2250 \text{ Kg/m}^3$ y el peso total fue de 2456 Kg . El software utilizado para los análisis fue SAP 2000 y el modelo incluyó elementos cascarón, tipo marco, restricciones y amortiguadores. Los elementos cascarón son isoparamétricos de cuatro nudos que combinan de manera separada las componentes de efectos de membrana y flexión. Los amortiguadores se emplearon para modelar los rodamientos que soportan a la parte móvil de la mesa vibratoria. La rigidez en la dirección del movimiento se despreció y se aplicó un coeficiente de amortiguamiento de 1000 kg-sec/cm. En la dirección perpendicular al movimiento se consideró una rigidez de 100,000 kg/cm y se despreció el amortiguamiento. El modelo se muestra en la Figura 4.

Tabla 7: Factores de escala

| Parámetro | Factor | Parámetro | Factor |
|------------------|---------------------|--------------------|---|
| Fuerza | $S_Q = S_E S_L^2$ | Tiempo | $S_t = S_L^{1/2} / S_g^{1/2} = S_L^{1/2}$ |
| Esfuerzo | $S_\sigma = S_E$ | Densidad de masa | $S_\rho = S_E / S_L S_g$ |
| Deformación | $S_\varepsilon = 1$ | Desplazamiento | $S_\delta = S_L$ |
| Razón de Poisson | $S_\nu = 1$ | Velocidad | $S_v = S_t / S_L = S_L^{-1/2}$ |
| Aceleración | $S_a = S_g = 1$ | Frecuencia angular | $S_\omega = S_t = S_L^{1/2}$ |

Tabla 8: Factores de escala afectados

| Variable | Velocidad | Tiempo | Dimensión | Desplazamiento | Frecuencia | Densidad |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|---------------------------|---|---------------------------------|
| Factor de escala | $v_p = (5/3)^{1/2} v_m$ | $t_p = (5/3)^{1/2} t_m$ | $L_p = 5/3 L_m$ | $\delta_p = 5/3 \delta_m$ | $\omega_p = \frac{1}{(5/3)^{1/2}} \omega_m$ | $\rho_p = \frac{1}{5/3} \rho_m$ |



Figura 3: Vista de la capa extra y de los cortes para reducir la rigidez

El marco semiesférico se modeló por medio de elementos tipo marco conectados a los elementos cascarón. Se usaron restricciones del tipo *master-slave* para modelar la unión entre la placa de la mesa vibratoria y la losa de cimentación del domo. Este mismo tipo de restricciones se emplearon para modelar la unión entre la placa de la mesa y los perfiles *W*. Una vez que se tenía el modelo completo se procedió a estudiar el contenido de frecuencia del sistema. La Figura 5 muestra los primeros cinco modos de vibrar del sistema.

3.3.3 Condiciones de carga

El modelo del domo se sometió a una serie de sismos y funciones de desplazamiento senoidales. Los sismos usados incluyen a los de Colima (México), México, D.F. (1985), Kobe, Loma Prieta, y Northridge. Estos sismos se seleccionaron porque representan un amplio rango de contenido de frecuencias, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 9: Dimensiones del modelo

| Elemento | Parámetro | Dimensión |
|------------------|-------------------|-----------------|
| Domo | Espesor | 30 mm |
| | Diámetro | 3600 mm |
| Refuerzo | Sección | ¾" x ¾" Cal. 14 |
| | Diámetro exterior | 3960 mm |
| Losa de concreto | Diámetro interior | 2760 mm |
| | Espesor | 60 mm |
| Discontinuidades | Puerta | 1260 x 540 mm |
| | Ventanas | 540 x 540 mm |

4. Pruebas Experimentales

Una de las etapas más importantes de este estudio es la construcción y prueba experimental del modelo del tecnodomo a escala bajo carga sísmica. En esta sección se presentan tanto el proceso constructivo como los detalles de las pruebas experimentales.

4.1 Proceso Constructivo Del Modelo

Los paneles de perfiles tubulares se fabricaron en Monterrey, México. Cada panel se construyó con un ángulo interno de 40° en proyección horizontal. La Figura 6 muestra las características principales de los paneles. Los paneles fueron montados en el laboratorio de estructuras de TAMU. Se colocaron varillas de refuerzo del #3 en forma de rejilla como refuerzo principal de la base de concreto y los paneles se fijaron a ellas para crear un propio anclaje entre el domo y su base. Para obtener continuidad entre la mesa

vibratoria y la cimentación del domo se emplearon 12 tornillos A325 de 12.7 mm de diámetro. Con base en los análisis estructurales preliminares se identificaron los puntos de mayores esfuerzos en los marcos de acero para colocar allí galgas extensométricas, como también se muestra en la Figura 6.

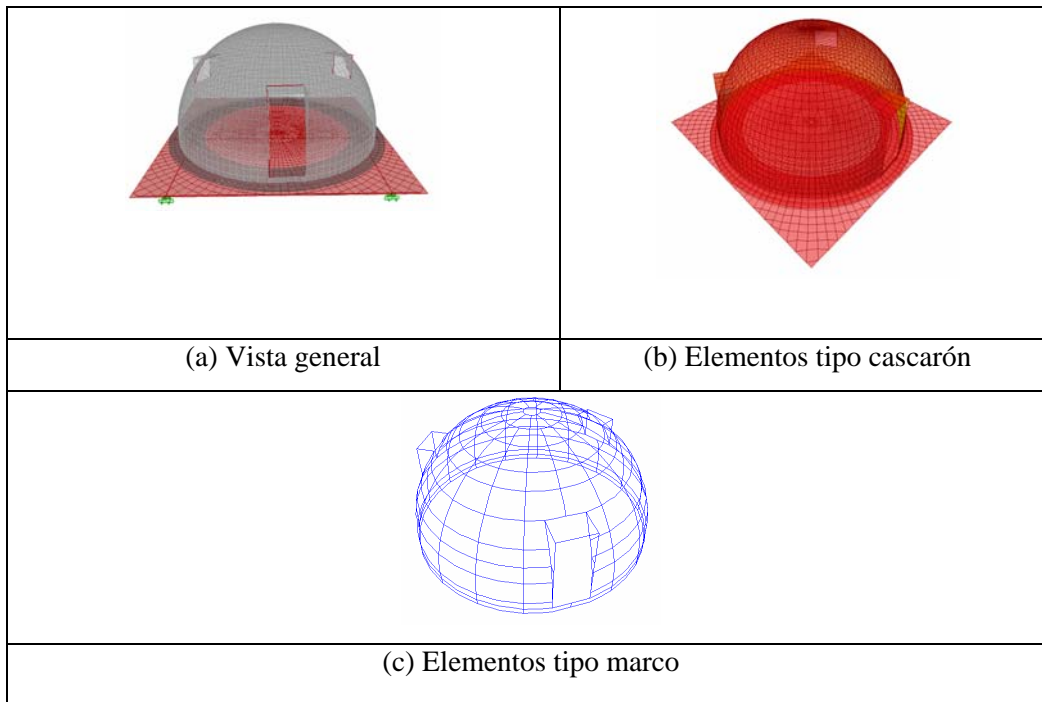


Figura 4: Modelo de elementos finitos

Una malla fina de acero se fijó a la malla electrosoldada para mantener al mortero fresco en posición mientras endurece. Para terminar el proceso de construcción se colocó manualmente una capa de mortero de 30 mm de espesor cubriendo la superficie del domo. Debido a los requerimientos de similitud fue necesario colocar una masa adicional de mortero de 20 mm de espesor sobre la superficie exterior del domo como se muestra en la Figura 3. Esta capa extra solo contribuyó en agregar masa al sistema pero no rigidez, como ya se mencionó en la sección anterior.

4.2 Instrumentación

La prueba se realizó en una mesa vibratoria de 4000 mm x 4000 mm impulsada por un actuador MTS de 450 kN, con un servocontrolador y una LVDT para controlar el desplazamiento. Para registrar el desplazamiento horizontal del domo durante la prueba se utilizaron 3 LVDT's. Con éstas, se registraron los desplazamientos de la parte superior del domo, a 500 mm arriba de la base y de la superficie de la mesa vibratoria, como se muestra en la Figura 7.

Una serie de galgas extensométricas CEA-06-250UW-120 se colocó en los puntos críticos de los marcos de acero obtenidos de los análisis preliminares. Las lecturas tanto de desplazamientos como de deformaciones se obtuvieron por medio de un sistema de adquisición de datos de 40 canales (NI PXI-1011).

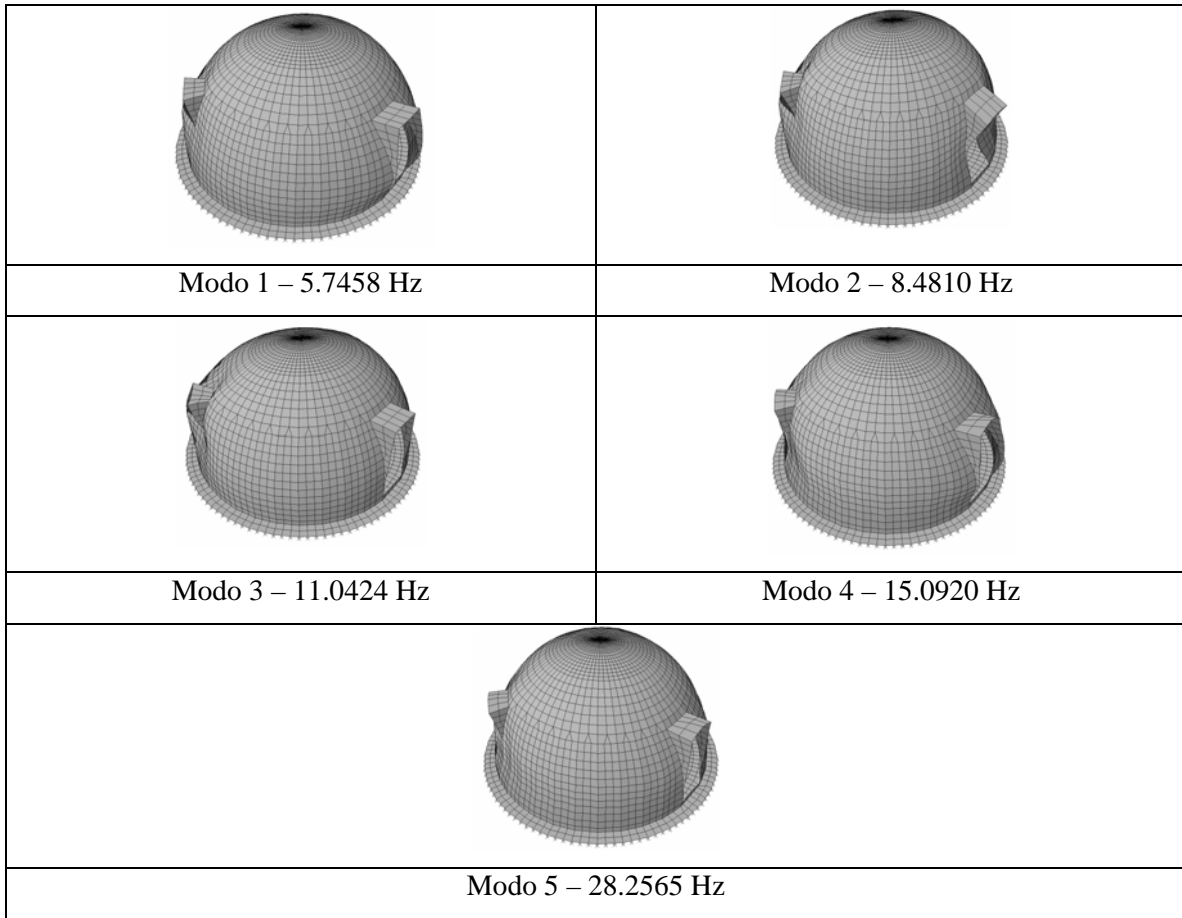


Figura 5: Modos de vibrar del sistema

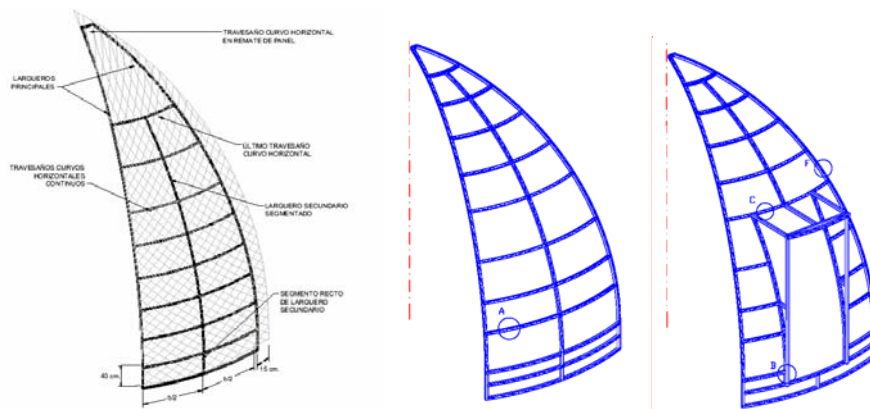


Figura 6: Componentes de paneles de acero y localización de las galgas

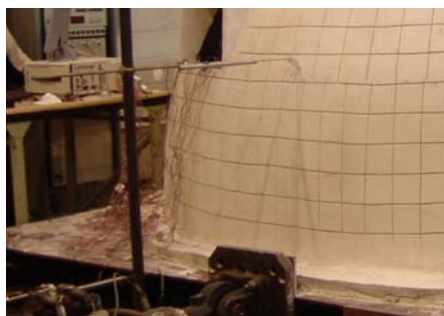


Figura 7: Arreglo de LVDT's en la parte inferior del domo

4.3 Condiciones de carga dinámica

La carga dinámica impuesta al tecnodomo consistió en una serie de funciones senoidales de desplazamiento así como sismos reales. Los sismos incluidos fueron los de Colima (México), Kobe, Northridge, Loma Prieta y México, D.F. de 1985 tal como se muestra en la Tabla 2. Para las ondas senoidales se usó una amplitud de 25.4 mm con frecuencias de 1, 1.5, 2, y 2.5 Hz. Primero se aplicaron los sismos y una vez terminada la aplicación de ellos se procedió a cargar al domo con las ondas senoidales de desplazamiento. Los sismos se aplicaron primero para que en caso de que ocurriera un agrietamiento importante en el domo, lo hiciera bajo una carga sísmica real y no durante la aplicación de una onda senoidal. Las pruebas con ondas senoidales se realizaron para determinar la presencia o ausencia de resonancia en la respuesta del domo a una excitación senoidal en su base.

5. Resultados Analíticos Y Experimentales

Se realizó una comparación entre los resultados analíticos y experimentales. En las siguientes secciones se presenta una discusión de la respuesta del domo en términos de esfuerzo, desplazamiento, resonancia y del comportamiento general del tecnodomo. Las comparaciones se hicieron sólo para los sismos de Kobe, Loma Prieta y Northridge en virtud de que estos impusieron las condiciones más desfavorables.

5.1 Comparación de esfuerzo

Se obtuvieron los valores de esfuerzo para los dos materiales principales del sistema: mortero y paneles de refuerzo, aunque para el caso del mortero sólo se obtuvo la predicción analítica de los esfuerzos.

5.1.1 Esfuerzos en los marcos de acero

Se obtuvo un registro completo de valores experimentales con lecturas a cada segundo para los 5 sismos seleccionados. Los valores experimentales máximos para cada sismo se compararon con los correspondientes valores analíticos. La Tabla 10 muestra dicha comparación en términos del esfuerzo de fluencia del acero.

5.1.2 Esfuerzos en el mortero

En este proyecto sólo se obtuvieron los valores analíticos de los esfuerzos en el mortero. Sin embargo, con base en resultados experimentales previos de pruebas uniaxiales y de flexión para morteros similares al usado en este proyecto, se tienen valores límite de 20 kg/cm² en tensión y 100 kg/cm² en compresión. Los resultados analíticos de esfuerzo normalizados con respecto al correspondiente valor límite se presentan en la Tabla 11.

Tabla 10: Comparación de los esfuerzos máximos normalizados en los marcos de acero

| Sismo | Galga | Número de canal | $\sigma_e/\sigma_y \times 100$ | $\sigma_a/\sigma_y \times 100$ |
|-------------|-------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | Experimental | Analítico |
| Kobe | B | 1 | 0.75 | 0.61 |
| | A | 2 | 0.29 | 0.4 |
| | C | 3 | 0.93 | 0.45 |
| | F | 4 | NA | 0.37 |
| Loma Prieta | B | 1 | 0.58 | 0.59 |
| | A | 2 | 0.17 | 0.32 |
| | C | 3 | 0.82 | 0.43 |
| | F | 4 | 0.23 | 0.37 |
| Northridge | B | 1 | 0.41 | 0.57 |
| | A | 2 | 0.12 | 0.29 |
| | C | 3 | 1.22 | 0.48 |
| | F | 4 | 0.29 | 0.4 |

5.2 Comparación de Desplazamiento

En virtud de que el modelo probado es del tipo *true replica model*, para obtener los desplazamientos en el prototipo (estructura real) se debe aplicar el factor de escala a los desplazamientos del modelo. A fin de verificar qué tan bien el actuador aplicó al modelo los sismos seleccionados, se presenta en las Figuras 8 a 10 una comparación entre el movimiento de terreno aplicado (experimental) y el movimiento de terreno esperado (analítico) así como la comparación entre los valores experimentales y analíticos del extremo superior del tecnodomo para los sismos de Kobe, Loma Prieta y Northridge.

Tabla 11: Comparación de los valores máximos normalizados de esfuerzo en el mortero

| Sismo | $\frac{\sigma}{\sigma_{lim}} \times 100$ | $\frac{\sigma}{\sigma_{lim}} \times 100$ |
|-------------|--|--|
| | Tensión | Compresión |
| Kobe | 73 | 69 |
| Loma Prieta | 59 | 58 |
| Northridge | 82 | 73 |

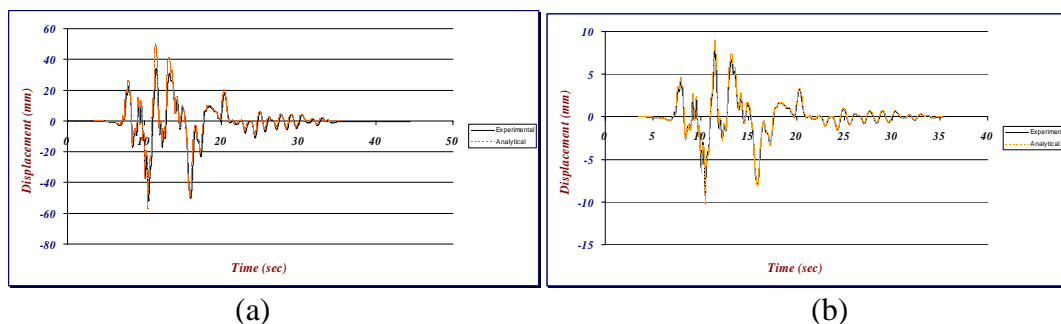


Figura 8: Comparación de (a) movimiento de terreno y (b) movimiento de la cresta para el sismo de Kobe

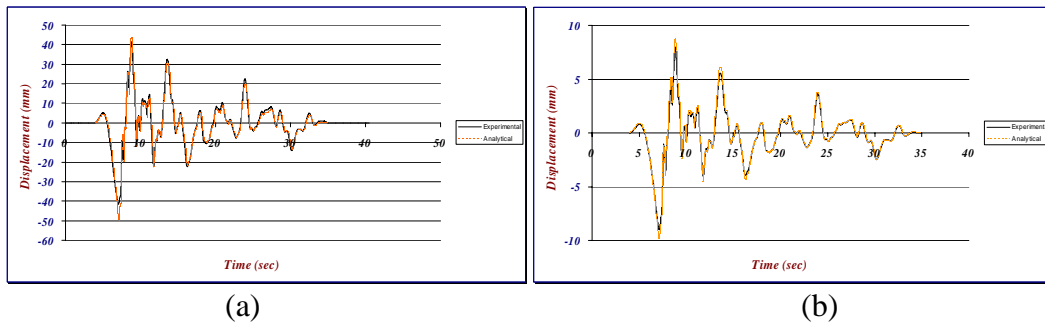


Figura 9: Comparación de (a) movimiento de terreno y (b) movimiento de la cresta para el sismo de Loma Prieta

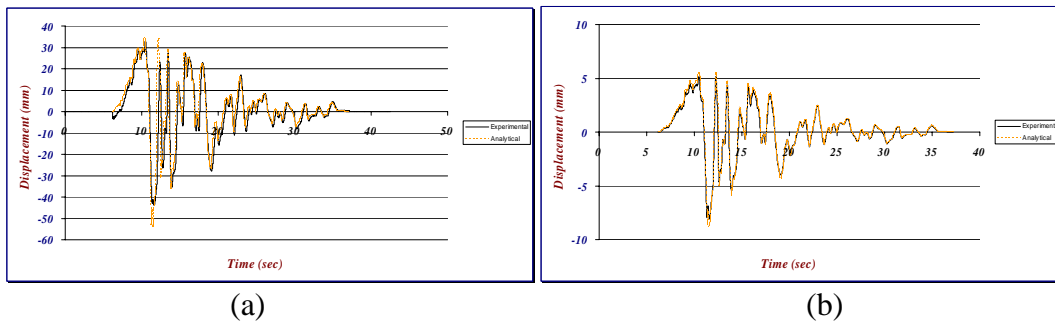


Figura 10: Comparación de (a) movimiento de terreno y (b) movimiento de la cresta para el sismo de Northridge

5.3 Respuesta a la Resonancia

Este estudio se llevó a cabo usando los siguientes sismos: Colima (México), México, D.F. (1985), Kobe, Loma Prieta y Northridge. El contenido de frecuencia dominante para los sismos de Colima y México, D.F. fue menor o igual que 2.5 Hz mientras que para los otros tres sismos dicho contenido de frecuencia dominante fue menor o igual que 8 Hz. El estudio analítico del tecnodomo arrojó una frecuencia fundamental de 5.75 Hz. La respuesta del tecnodomo a los sismos mexicanos fue limitada mientras que su respuesta a los otros sismos fue más considerable, lo que podría sugerir que ocurrió un posible efecto de resonancia para los sismos de Kobe, Loma Prieta y Northridge ya que la frecuencia fundamental del tecnodomo se encuentra dentro del contenido de frecuencias de estos sismos.

6. Conclusiones

A pesar del hecho de que la prueba se realizó sólo en un modelo del tecnodomo, los resultados experimentales obtenidos son consistentes con los valores esperados con base en los fundamentos de la ingeniería estructural. Sin embargo, las conclusiones presentadas en este estudio son aplicables sólo a domos con propiedades y geometría similares a la del modelo probado.

Los valores normalizados de esfuerzos experimentales y analíticos fueron consistentemente bajos pues fueron menores que el 1.3% del esfuerzo de fluencia. Tanto los esfuerzos experimentales como analíticos resultaron del mismo orden de magnitud, lo cual sugiere que la suposición de que existe acción compuesta entre el marco de acero tubular y el mortero es aceptable.

Los esfuerzos de tensión y compresión en el mortero fueron menores que el correspondiente valor

experimental uniaxial límite. Lo anterior se sustenta por el hecho de que en ningún punto del domo ocurrió aplastamiento del concreto ni agrietamiento importante para todos los movimientos de terreno aplicados al modelo, incluyendo las ondas senoidales de desplazamiento. Los factores de seguridad para los esfuerzos de tensión variaron de 1.22 a 1.69 y para los esfuerzos de compresión los valores del factor de seguridad variaron de 1.37 a 1.72

Al comparar los movimientos sísmicos aplicados con los requeridos, podemos mencionar lo siguientes. Para los tres eventos sísmicos dominantes el contenido de frecuencias es básicamente el mismo. Sin embargo, debido a limitaciones en el actuador no se logró alcanzar todos los desplazamientos pico. Se observó que los desplazamientos experimentales y analíticos de la cresta del domo concuerdan para los sismos de Kobe, Loma Prieta y Northridge. La respuesta experimental del modelo a los sismos de Colima y México, D.F. fue muy baja si se compara a su respuesta ante los otros tres sismos. Esto sugiere un posible efecto de resonancia ya que la frecuencia fundamental del modelo se encuentra dentro del contenido de frecuencias dominantes de los sismos de Kobe, Loma Prieta y Northridge.

Una inspección visual previa a la prueba detectó una serie de pequeñas grietas en la superficie interior del domo, las cuales fueron marcadas y monitoreadas durante todo el proceso de prueba. Se supone que dichas grietas fueron causadas por contracción por temperatura. No se presentó un notable crecimiento de esas grietas, lo cual es consistente con los resultados evaluados para el mortero. En general, se puede establecer que el comportamiento del domo probado es más que aceptable a pesar de la agresividad de los movimientos de terreno de los sismos aplicados.

7. Agradecimientos

La presente investigación fue desarrollada con el apoyo del Centro de Diseño y Construcción del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y del CONACYT por acuerdo entre el ITESM y la Universidad Texas A&M. El trabajo se realizó en el laboratorio de estructuras de la Universidad Texas A&M. El proyecto fue patrocinado por el ITESM vía el programa CAT-003 a través de la Cátedra de Desarrollo e Innovación de Procesos y Tecnologías de Vivienda y el CONACYT.

Referencias

ABAQUS User Manual, Providence, Rhode Island, 2003.

Danaher Motion, "Linear Ball Bushing Bearings and Components", 2003-2004 Edition, Wood Dale, Illinois.

Harris, H. y Sabnis, G. (1999). Structural Modeling and Experimental Techniques. CRC Press, United States.

Mathews, E.H., van Wyk, S.L., Richards, P.G., Rousseau, P.G. Renewable Energy, Vol. 5, No. 5-8, pp 1231-1234, Aug, 1994.

Nagarajaiah, S., Gozdowski, E., Unidirectional Shaking Table for Testing Small Scale Structural Models: Design and Development. Engineering Mechanics: A Force for the 21st Century, Proceedings of the 12th Engineering Mechanics Conference, pp. 779-782, May, 1998.

Thompson, W., "Concept of an Earthquake-Proof Hut for Mexico (and Other Countries)." Renewable Energy, Vol. 6., No. 8., pp. 977-981, 1995.