

Amortiguamiento Sísmico Pasivo En Vivienda Urbana Y Rural

Francisco S. Yeomans R., PhD

*Instituto Tecnológico Y De Estudios Superiores De Monterrey, Monterrey, NL, México,
fyeomans@itesm.mx*

Delma V. Almada N., M.Sc. Ing.

*Instituto Tecnológico Y De Estudios Superiores De Monterrey, Monterrey, NL, México,
dalmada@itesm.mx*

Carlos E. Nungaray P., M.Sc. Ing.

*Instituto Tecnológico Y De Estudios Superiores De Monterrey, Monterrey, NL, México,
carlos.nungaray@itesm.mx*

Resumen

Con la idea de mitigar los efectos sísmicos en vivienda de interés social (urbana y rural) y reducir daños a estas y a sus habitantes, se desarrolló un sistema de aislamiento sísmico el cual tiene la función de desligar la vivienda del suelo y de esta manera reducir los efectos de los sismos en la construcción. Se estudio el comportamiento del sistema en vivienda urbana a base de materiales semi-manufacturados así como vivienda rural a base de adobe. La fricción se genera en la interfase entre la vivienda y el material deslizante colocado debajo de esta, dicho material deslizante consistió de rodillos, esferas y material granular, sobre la cual se desplanta el firme de la vivienda. Se construyó una mesa vibratoria de 1 grado de libertad en la que se probaron los sistemas deslizantes en un modelo escala 1:10, sujetos a movimiento armónico. Con los resultados experimentales se calibró un modelo de elementos finitos en el que se sujetó el prototipo a los sismos del Centro 1940, Kobe 1995 y Oaxaca 1999. Los resultados obtenidos muestran una reducción en aceleraciones así como en esfuerzos cortantes de un 50% respecto a la vivienda con cimentación tradicional.

Palabras Clave

Vivienda, Sismo, Aislamiento, Amortiguamiento, Sistemas Constructivos.

1. Introducción

Anualmente en nuestro planeta, los fenómenos naturales, como huracanes y sismos, causan grandes estragos en la población, principalmente en la de escasos recursos. Estos fenómenos además de causar la muerte de muchas personas, generan pérdidas millonarias en la infraestructura básica del país y particularmente en la vivienda. En México, la recurrencia de los sismos se debe a que se encuentra situado geográficamente en una zona con fallas tectónicas, como la de San Andrés, Placa de Cocos y de Rivera que provocan movimientos telúricos regularmente.

Con el fin de reducir el efecto de un sismo sobre una estructura dada, se puede modificar su capacidad de amortiguamiento y/o se puede aislar a esta del suelo que la soporta. La mitigación o amortiguamiento sísmico en las construcciones se puede clasificar en tres tipos: activo, semiactivo y pasivo [Kelly, 2003]. De los tres tipos de amortiguamiento, el pasivo –dado que no requiere de energía externa para su función- es en general de menor costo, lo cual lo hace ser factible económicamente para vivienda social.

Buscando reducir el efecto de los sismos en vivienda popular, se desarrolló en el ITESM un sistema de aislamiento sísmico de bajo costo. El presente reporte muestra la metodología usada así como los resultados obtenidos a la fecha.

1. Objetivo y Metodología

El objetivo de la investigación consistió en la determinación de la factibilidad tanto técnica como económica de un sistema de aislamiento sísmico para vivienda del tipo deslizante, es decir, un sistema basado en la fricción generada en la interfase entre la losa de cimentación de la vivienda y el suelo sobre la que se desplanta.

Primeramente se seleccionó el prototipo de vivienda a ser usado como referencia, estableciéndose dos prototipos: Urbano (vivienda a base de materiales semi-industrializados) y Rural (vivienda de adobe). Posteriormente, se efectuó un análisis de los diferentes sistemas de cimentación así como los procesos constructivos típicamente usados estableciéndose la losa de cimentación como el tipo más adecuado para aislar sísmicamente la vivienda seleccionada.

Se establecieron dos etapas en el desarrollo de la investigación: experimental y analítica. Para llevar a cabo la etapa experimental se diseñó y construyó una mesa vibratoria de un grado de libertad. La evaluación experimental permitió determinar la granulometría más adecuada del tipo de agregado que forma parte de la interfase entre el firme de la vivienda y el suelo. Adicionalmente permitió determinar la forma, el tamaño y distribución de los elementos de aislamiento adicionales a la grava que conforman dicha interfase. La etapa analítica consistió en la modelación de las viviendas prototipo mediante un análisis de elementos finitos calibrado con los resultados experimentales. Posteriormente, se sujetó el modelo a los sismos de El Centro 1940, Kobe 1995 y Oaxaca 1999, procediéndose a establecer conclusiones sobre el comportamiento de la vivienda urbana. Una vez establecida la factibilidad técnica del sistema para vivienda urbana se procedió a evaluar experimentalmente el comportamiento de la vivienda rural considerando el efecto del suelo que la rodea para dos estados límites: fricción reducida en la interfase y fricción nominal. Finalmente se establecieron conclusiones sobre el comportamiento del sistema de amortiguamiento en vivienda rural a base de adobe.

2.1 Selección del prototipo de vivienda y construcción del modelo.

Con el fin de estudiar un tipo de vivienda que fuese representativa de las condiciones de la vivienda urbana y rural, se analizaron las bases de datos nacionales. Para la vivienda urbana se seleccionó como prototipo a la tipo 1N-2 de INFONAVIT. Esta vivienda construida a base de materiales semi-industrializados es de un nivel, tiene dos recamaras y la superficie total de construcción es de 47m². Para la vivienda rural se usó como referencia el censo de vivienda rural efectuado por la Universidad de Guerrero (Salgado Rodríguez, 2002), seleccionándose como prototipo una vivienda a base de muros de adobe y techumbre a base de armaduras de madera soportando teja de barro recocido de 48 m² de construcción.

Para realizar las pruebas experimentales se construyeron modelos con escala geométrica de 1 a 10 y escala de secciones transversales de sus elementos de 1 a 15. Estas escalas fueron determinadas en base a las limitantes de dimensiones y capacidad de carga de la mesa vibratoria [Charton, 1954]. El modelo a escala de vivienda urbana se construyó con mortero cemento-arena relación 1:4. El modelo a escala de la vivienda rural se construyó fabricando adobes a partir de una mezcla de barro, arena y paja. El firme actuando como losa de cimentación fue construido sobre una capa de arena No. 16, para simular las condiciones de rugosidad normales que se tendrán al momento de construir la vivienda, ver Imágenes 1 y 2. Sin embargo, con el fin de simular las condiciones extremas del comportamiento del sistema con un mínimo de fricción en la interfase, para la vivienda rural también se construyó un firme sin arena.



Imagen 1. Construcción Del Modelo De Vivienda Urbana A Escala 1 A 10.

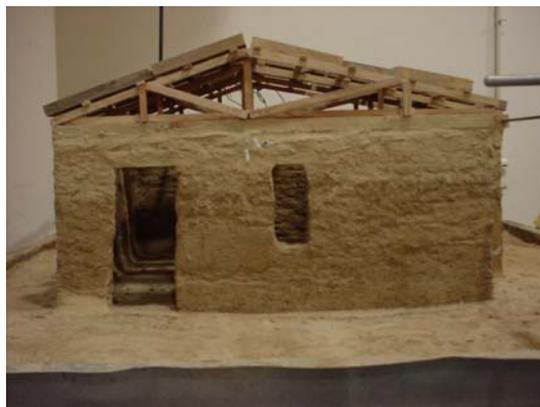


Imagen 2. Construcción Del Modelo De Vivienda Rural A Escala 1 A 10.

2.2 Mesa vibratoria

Para evaluar experimentalmente el comportamiento de la vivienda sujeta a movimiento armónico bajo diferentes propuestas de sistemas deslizantes, se diseñó y construyó una mesa vibratoria de un grado de libertad. Las características físicas de la mesa fueron: 100 x 100cm de área útil, un grado de libertad de translación, función de desplazamiento senoidal con frecuencia entre 4.5Hz a 14.5Hz y amplitud de 5.6 a 10 cm. Con aceleraciones entre 0.1 y 1 de la aceleración de la gravedad, ver Imagen 3.



Imagen 3. Mesa Vibratoria Aislada Y Con Modelo A Escala.

2.3 Agregado de la interfase.

Con el fin de encontrar el agregado de la interfase que permita mayores desplazamientos en la vivienda, se probaron en la mesa vibratoria cuatro tipos, dos granulometrías de arena (No. 16 y No. 8) y dos de grava (1.27cm y 0.95cm). La prueba se realizó colocando un cuerpo rígido de peso equivalente a la vivienda tipo sobre el material granular variando su espesor. El sistema se sujeto a carga armónica variable. En base a los resultados de estas pruebas se determinó que el material que permite un mejor deslizamiento es la arena No. 16. Esto quiere decir que en el prototipo (vivienda real) se utilizara grava de 1.27cm de tamaño máximo.

2.4 Pruebas en el modelo

Las pruebas realizadas utilizando solo arena No. 16 como interfase entre el suelo y la vivienda, arrojaron como resultado que la vivienda no sufre desplazamientos apreciables para aceleraciones menores al 70% de la aceleración de la gravedad, lo que indica que el sistema propuesto – losa de cimentación y arena como interfase - no tendría ventajas en su aplicación con respecto a la vivienda tradicional.

Para reducir la fricción entre la losa de cimentación y la arena de interfase de modo tal que se pueda desacoplar (desligar) el suelo del movimiento de la vivienda, se evaluó experimentalmente el efecto de introducir elementos en la interfase losa-arena. Se analizaron dos variantes basados en: arena con rodillos y arena con esferas. Se consideraron dimensiones y separaciones diversas de los cilindros y esferas, ver Imagen 5.



Imagen 5. Interfase A Base De Arena #16 Y Esferas A 20cm Y 5cm De Separación.

El uso de rodillos no presentó ventajas apreciables con respecto al comportamiento de la arena sola. Las esferas con 5 cm. y 10 cm. de separación en el modelo presentaron un buen comportamiento ya que los desplazamientos máximos se alcanzaron para una aceleración del 30% de la gravedad. Se seleccionó la separación de 10 cm. por cuestión de costo.

2.5 Propiedades Físicas de la Interfase

La fricción de la interfase así como la rigidez equivalente del sistema fueron determinadas para poder efectuar su modelación matemática. En la Figura 1 se muestra un diagrama de cuerpo libre del modelo del sistema de aislamiento.

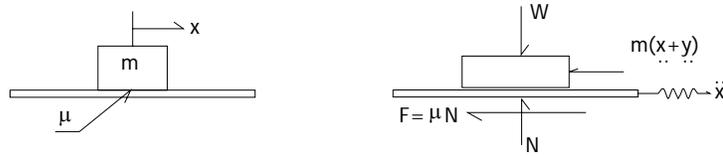


Figura 1. Modelo De Cuerpo Libre Del Sistema De Aislamiento.

El desarrollo de la ecuación para determinar el coeficiente de fricción se obtuvo considerando a la vivienda como un cuerpo rígido de un solo grado de libertad.

$$M \left(\ddot{Y} + \ddot{X}_o \right) = F \quad (1)$$

$$f = \text{signo}(\dot{Y}) * \mu * M * g \quad (2)$$

$$M \left(\ddot{Y} + \ddot{X}_o \right) = \text{signo}(\dot{Y}) * \mu * M * g \quad (3)$$

$$\mu = \frac{\ddot{Y} + \ddot{X}_o}{\text{signo}(\dot{Y}) g} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\ddot{Y} + \ddot{X}_o}{g} \quad (5)$$

Donde F, es la fuerza inercial, f es la fuerza de fricción, μ es el coeficiente de fricción, M es la masa, g la aceleración de la gravedad, \ddot{x}_o la aceleración de la mesa, \ddot{y} la aceleración del modelo respecto a la mesa y \dot{y} es la velocidad del modelo.

Se calcularon las aceleraciones de la mesa vibratoria y del modelo a diferentes velocidades de prueba, dando como resultado (Ecuación 5) coeficientes de fricción que varían entre 0.11 y 0.47.

Una vez conocidos los coeficientes de fricción se obtuvo la rigidez equivalente de la arena para cada velocidad de prueba utilizando la Ecuación 6 [Naheim y Kelly, 1999], que se obtiene de sustituir la fuerza en la ecuación de la rigidez por μW .

$$k = \frac{\mu W}{d} \quad (6)$$

Donde d es el desplazamiento relativo total del modelo, W el peso del modelo, obteniéndose valores de rigidez equivalentes del suelo que varían entre 0.107W y 0.593W.

Finalmente, se determinó la rigidez equivalente de la interfase en el prototipo (vivienda escala 1:1) usando un factor de escala de 1:10, obteniéndose:

$$\text{Para aceleraciones menores a } 0.21g: \quad k \approx 0.05W \quad (7)$$

$$\text{Para aceleraciones mayores a } 0.21g: \quad k \approx [0.05W \text{ a } 0.01W] \quad (8)$$

2.6 Verificación analítica del modelo de Vivienda Urbana

Para calibrar el modelo de elementos finitos con los resultados experimentales se procedió a analizar la vivienda a escala sujeta al movimiento armónico de la mesa vibratoria. El modelo se discretizó en elementos placa de 3cm x 3cm y se le asignaron las propiedades en base a las pruebas hechas en el laboratorio (módulo de elasticidad, resistencia, etc.). Como fuerza excitante se utilizaron los acelerogramas de la mesa vibratoria a los cuales fue sometido el modelo y se establecieron las condiciones de frontera reales, tomando en cuenta la rigidez calculada de la arena con esferas.

Los desplazamientos obtenidos analíticamente para diferentes aceleraciones y sobrecargas en vivienda, fueron comparados con los experimentales observándose que ambos resultados tienen prácticamente la misma frecuencia, siendo el desplazamiento calculado mayor al experimental en no más de un 10%, ver Figura 3. De esta manera se calibró el modelo para poder realizar análisis de viviendas reales (escala 1:1).

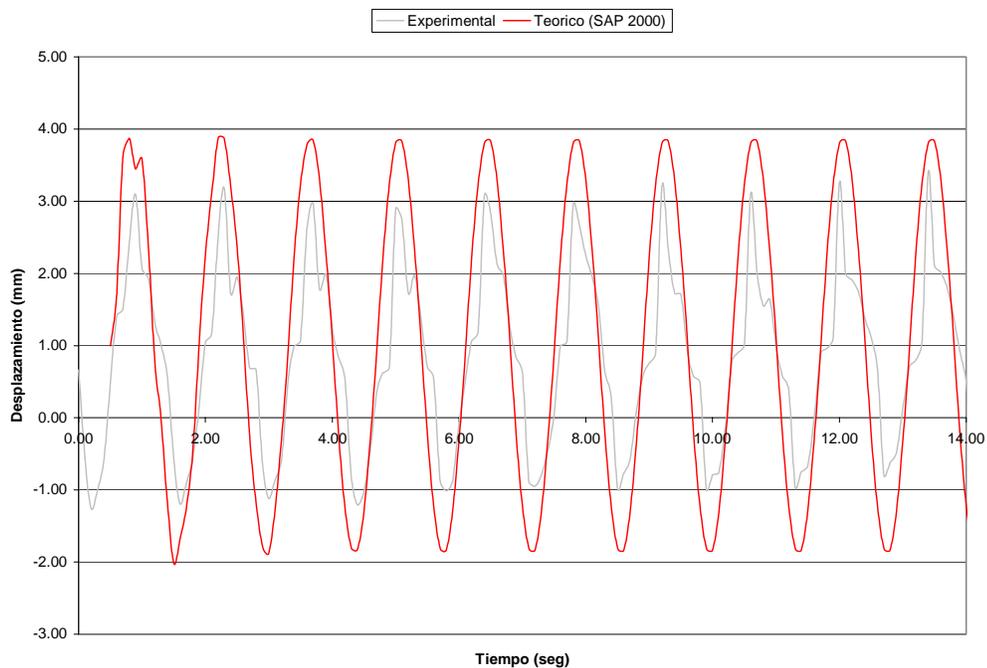


Figura 3. Comparación De Desplazamientos Experimentales Y Analíticos.

2.7 Análisis del Prototipo de Vivienda Urbana

El análisis del prototipo (escala 1:1) se realizó con la vivienda de cimentación tradicional y la vivienda con el sistema de aislamiento propuesto, ambos bajo el efecto de los sismos de el Centro 1940, Kobe 1995 y Oaxaca 1999, reportándose la condición más crítica correspondiente a Kobe (magnitud 7.2).

En este análisis se observó que se redujeron las aceleraciones (Figura 4) y esfuerzos cortantes en la vivienda aislada (Figura 5) en aproximadamente la mitad de aquellos correspondientes a la vivienda tradicional. Además, los esfuerzos cortantes en la vivienda tradicional rebasan el esfuerzo de diseño y el esfuerzo de agrietamiento, ver Tabla 1.

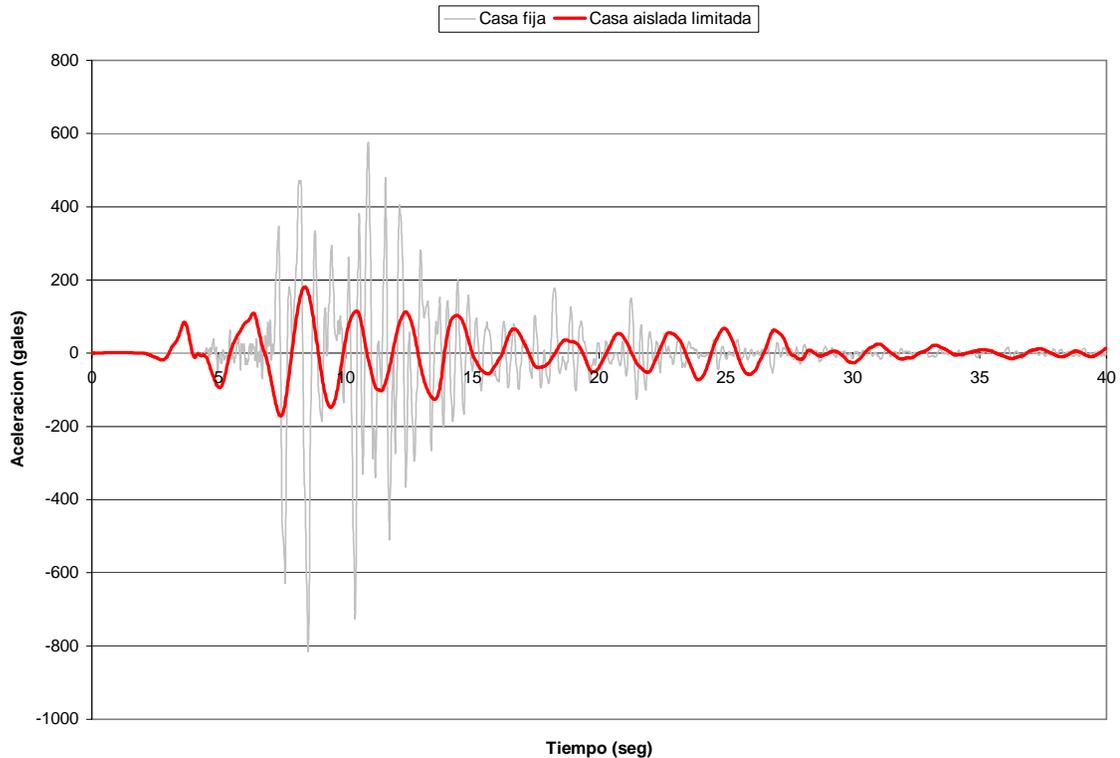


Figura 4. Aceleración De La Vivienda Urbana Con Cimentación Tradicional (Fija) Y Vivienda Aislada Para Sismo De Kobe 1995.

Tabla 1. Esfuerzos Cortantes En Vivienda Para Condiciones De Servicio. Modificada de [Miranda, 1999] y [NTCDF]

| Sismo | Vivienda fija Kg/cm ² | Vivienda aislada Kg/cm ² | Esfuerzo admisible Kg/cm ² | Esfuerzo de agrietamiento Kg/cm ² | Esfuerzo de falla Kg/cm ² |
|-----------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Kobe | 1.66 | 0.64 | 0.78 | 1.60 | 2.00 |
| El Centro | 1.00 | 0.50 | 0.78 | 1.60 | 2.00 |
| Oaxaca | 1.64 | 0.03 | 0.78 | 1.60 | 2.00 |

2.8 Análisis del Modelo de Vivienda Rural

El estudio del modelo de vivienda rural se efectuó bajo los mismos lineamientos aplicados al modelo de vivienda urbana, es decir, el modelo construido en la mesa vibratoria se sujeto al mismo tren de aceleraciones, velocidades y desplazamientos que al modelo previo. Sin embargo, fueron cuatro las características distintivas de este segundo estudio. Primero, se estudió el efecto de suelo en el sistema al incluir un espesor de 7 cms. en el modelo, equivalente a tener un espesor de 0.70 mt. en el prototipo (vivienda a escala real). Segundo, se estudio el efecto de reducir la fricción en la interfase mediante la fabricación del firme con interfase sin rugosidad, buscando evaluar el comportamiento del sistema bajo este estado límite. Tercero, se llevó el modelo de vivienda rural (adobe) al colapso, para posteriormente rehabilitar sus muros usando como adhesivo resina epoxica, sujetando de nueva cuenta el sistema rehabilitado al tren de cargas. Cuarto, se incluyó en la evaluación experimental de la vivienda modelo, un anillo periférico que busca mantener limitados los desplazamientos relativos de la vivienda respecto al suelo que la rodea. Los resultados de este segundo estudio efectuado en el modelo de vivienda rural esta aun en proceso, pero algunos de los resultados y conclusiones preliminares se presentan a continuación.

3. Conclusiones

El sistema de aislamiento propuesto a base de esferas de 10cm de diámetro espaciadas a cada metro en una cama de grava con tamaño máximo de agregado de 1.27cm en 12 cm. de espesor, tiene resultados significativos al reducir en sismos de intensidad alta las aceleraciones y esfuerzos cortantes en mas del 50 % de los obtenidos en la vivienda con cimentación tradicional.

Para sismos de baja intensidad los cuales apenas pudieran ser percibidos por el hombre, se espera que la vivienda aislada tenga el mismo comportamiento que cualquier otra vivienda de cimentación tradicional, sin embargo, la ventaja de la aplicación de este sistema se presentará para sismos de intensidad media (del orden de 0.3g) donde las viviendas tradicionales típicamente sufren agrietamientos mientras que la vivienda aislada podrá permanecer sin agrietarse, y para sismos de alta intensidad donde las viviendas tradicionales corren el peligro de colapsarse, la vivienda aislada sufrirá menores daños [Yeomans et al., 2004].

El efecto de incluir dentro de las condiciones de frontera no una superficie rígida (evaluación experimental original en modelo de vivienda urbana) sino un espesor adecuado de suelo, aparentemente no produce diferencias apreciables en el comportamiento del sistema. Sin embargo, falta aun incluir el efecto trepidatorio del movimiento del suelo que puede influir en la magnitud de la fricción de la interfase losa de cimentación - suelo.

El comportamiento del sistema de amortiguamiento pasivo propuesto, se ve afectado radicalmente al reducir la fricción a un mínimo, colocando a la vivienda en una situación precaria ante los movimientos sísmicos, pues los desplazamientos resultantes son excesivos. Deberá procurarse generar una rugosidad de al menos 1.27 cm. en la base de la losa de cimentación en su construcción para contar con la fricción adecuada en la interfase.

El uso de resina epóxica como adhesivo en la rehabilitación de muros de adobe fue satisfactorio, pues el sistema rehabilitado al ser sujeto al mismo tren de carga previo, desarrolló grietas en los muros fuera de las zonas rehabilitadas.

El uso de un cerramiento o anillo periférico, como contención en el sistema de mitigación propuesto, debe ser analizado en detalle, pues si ofrece una rigidez instantánea y no paulatina, provoca efectos desbastadores sobre la vivienda al recibir el contacto instantáneo con el anillo como una fuerza reactiva de impacto.

4. Agradecimientos

La presente investigación fue desarrollada con el apoyo del Centro de Investigación en Diseño y Construcción del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM). El trabajo fue llevado a cabo en el laboratorio de Ingeniería Estructural del Departamento de Ingeniería Civil. Este proyecto fue patrocinado por el ITESM vía programa CAT-003.a través de la Cátedra de Desarrollo e Innovación de Procesos y Tecnologías de Vivienda.

Referencias

1. Kelly, J. M. (2003). "Base Isolations: origins and development", National Information Service for Earthquake Engineering, University of California, Berkeley, USA.
2. Charlton T. M., (1954). "Model Analysis of Structures", John Wiley & Sons, Inc.
3. Naheim F. y Kelly J.M. (1999). "Design of Seismic Isolated Structures", John Wiley & Sons, Inc.

4. Miranda E., (1999). “Comportamiento Mecánico de la Mampostería Reforzada”, Edificaciones de Mampostería para Vivienda, Fundación ICA.
5. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería, DF.
6. Yeomans, Francisco; Almada, Delma; Martínez, Joel, (2004). “Seismic Isolation for Low-Income Housing”, World Congress on Natural Disaster Mitigation. New Delhi, India.
7. Salgado Rodriguez, Alberto (2002). “Seguridad Sísmica de la Vivienda Económica en el Estado de Guerrero”, Universidad Autonoma de Guerrero.

Información Biográfica

Dr. Francisco S. YEOMANS REYNA. Dr. Yeomans es Director del Centro de Investigación en Diseño y Construcción del ITESM, es profesor titular del Departamento de Ingeniería Civil del mismo Instituto. Actualmente es coordinador del programa de Posgrado en Ingeniería Civil y Coordinador de la Cátedra de Desarrollo e Innovación de Procesos y Tecnologías de Vivienda.

M. Sc. Ing. Delma V. ALMADA NAVARRO. La Ingeniera Almada es profesora asociada del Departamento de Ingeniería Civil del ITESM así como investigadora asociada al Centro de Investigación en Diseño y Construcción del mismo Instituto. Actualmente forma parte del claustro de profesores del programa de Posgrado en Ingeniería Civil y es co-asesora de la Cátedra de Desarrollo e Innovación de Procesos y Tecnologías de Vivienda.

M. Sc. Ing. Carlos E. NUNGARAY PEREZ. El Ingeniero Nungaray es candidato a Doctor por la Universidad de Alberta, es profesor asociado del Departamento de Ingeniería Civil del ITESM así como investigador asociado al Centro de Investigación en Diseño y Construcción del mismo Instituto. Actualmente coordina el área de Ingeniería Estructural del programa de Posgrado en Ingeniería Civil y es co-asesor de la Cátedra de Desarrollo e Innovación de Procesos y Tecnologías de Vivienda.