

January 2001

Aislamiento de cimentaciones para mejorar la respuesta sísmica de estructuras

Leonardo Dueñas Osorio

Universidad de La Salle, Bogotá, revista_uls@lasalle.edu.co

Follow this and additional works at: <https://ciencia.lasalle.edu.co/ruls>

Citación recomendada

Dueñas Osorio, L. (2001). Aislamiento de cimentaciones para mejorar la respuesta sísmica de estructuras. *Revista de la Universidad de La Salle*, (32), 51-61.

This Artículo de Revista is brought to you for free and open access by the Revistas de divulgación at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in *Revista de la Universidad de La Salle* by an authorized editor of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

AISLAMIENTO DE CIMENTACIONES PARA MEJORAR LA RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

Leonardo Dueñas Osorio

Ingeniero Civil - Universidad de La Salle
Magíster en Ingeniería Civil - Universidad de los Andes,
Master en estructuras de MIT

El presente artículo se publica a manera de resumen de la Tesis de Grado para obtener el Título de MS on Engineering of the Massachusetts Institute of Technology, del Ingeniero Lasallista, Leonardo Dueñas. Este explica cómo es posible soportar estructuras sobre aisladores de caucho que en el momento de un sismo absorban los movimientos que se transmiten por el terreno donde está fundada la estructura. Con esto se consigue que la liberación de la energía del sismo afecte de manera muy leve estructuras de alto valor arquitectónico. Los aisladores amortiguan el evento sísmico permitiendo que la disipación de energía sea controlada y los desplazamientos relativos entre placas disminuyan al máximo.

Estos desarrollos tecnológicos son tan de avanzada que los códigos y normas sismoresistentes aún no los consagran y de los resultados de estas investigaciones posiblemente resulten modificaciones o recomendaciones a los mismos.



Según la práctica actual, para mejorar el comportamiento sísmico de las estructuras y obtener una respuesta adecuada ante un terremoto de gran magnitud, las proveemos de una óptima combinación de rigidez y ductilidad que les permitan disipar la energía impuesta por el sismo a través de deformaciones permanentes en el rango inelástico, que aunque pueden prevenir el colapso, no mitigan el deterioro físico y patrimonial que el daño estructural representa. Por lo tanto, se debe empezar a pensar en un diseño sismoresistente que permita a las estructuras soportar un sismo con un período de retorno de 500 años o más (representativo de un sismo de diseño de gran magnitud), sin que éste genere deterioro severo en la rigidez de la estructura debido a la acumulación de deformaciones plásticas. La necesidad de tales diseños se hace evidente después de la ocurrencia de movimientos telúricos desastrosos como los que han azotado recientemente a India (27 de enero de 2001-magnitud de 7.9), El Salvador (14 de enero de 2001-magnitud de 7.6), Taiwan (20 de septiembre de 1999-magnitud de 7.7), Turquía (17 de agosto de 1999-magnitud de 7.8), y Colombia (25 de enero de 1999-magnitud de 5.9) En estos casos, muchas de las estructuras antiguas, diseñadas y construidas sin criterios sismoresistentes colapsaron y gran parte de las edificaciones recientes concebidas bajo una normativa sísmica presentaron graves deterioros.

Es así como conceptos alternativos para mejorar la respuesta sísmica de las estructuras empiezan a cobrar fuerza; además el aislamiento de las cimentaciones, como uno de ellos, se proyecta positivamente entre las estrategias con factibilidad de ser aplicadas en nuestros países latino-americanos, altamente amenazados por la dinámica actividad sísmica del cinturón del pacífico. El aislamiento de las cimentaciones es un procedimiento basado en la idea de reducir la demanda sísmica en vez de incrementar la capacidad de resistencia sísmica de las estructuras. Dicha demanda es una función de las propiedades dinámicas de la estruc-

tura, como el período natural de vibración y el amortiguamiento, aunque también depende de las características del suelo y de las fallas activas que amenazan una zona en particular. La capacidad, por su parte, es una función compleja de resistencia, rigidez y ductilidad dada por las propiedades de los materiales y por la configuración estructural del sistema de resistencia sísmica. Por lo anterior, un diseño apropiado de aislamiento de las cimentaciones redundará en un comportamiento esencialmente elástico de las estructuras durante un terremoto de gran magnitud.

Para lograr la nombrada reducción en la demanda sísmica de las estructuras, es

necesario desacoplarlas del suelo al nivel de su fundación, a través de rodillos, esferas, interfaces de arena o tambores de caucho, siendo estos últimos los que han dado un empuje para la aplicación práctica del concepto. En la Figura No.1 se muestra un esquema del aislamiento de la cimentación con tambores de caucho.

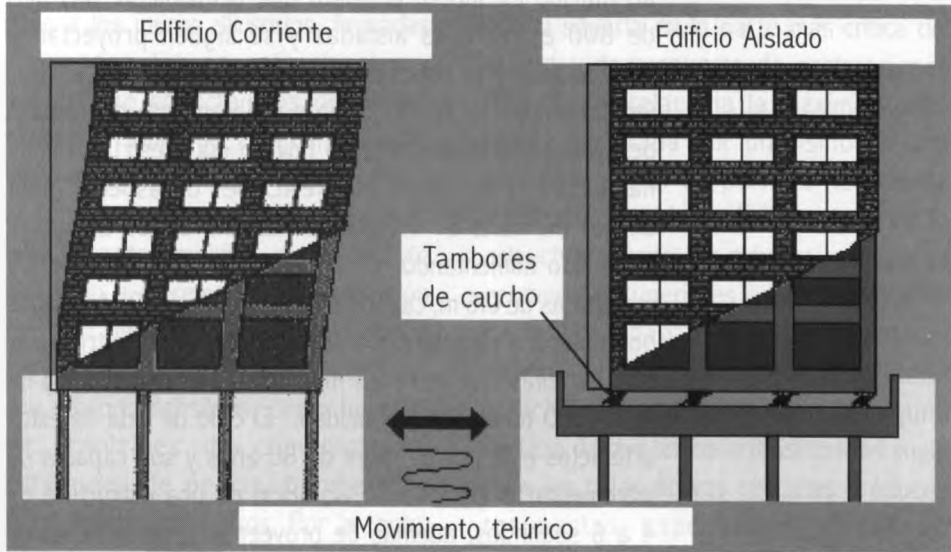


Figura No. 1 – Esquema del sistema de aislamiento de fundaciones con cojines de caucho.
(Fuente: <http://www.kajima.com>)

El desarrollo de los tambores de capas múltiples de caucho en los años 70's en Nueva Zelanda permitió reducir los costos de producción de dichos artefactos, hechos al vulcanizar láminas de caucho con delgadas placas de acero que actúan como refuerzo. Estos tambores o cojines de caucho son muy rígidos verticalmente y pueden soportar la carga vertical transmitida por la estructura, además de ser muy flexibles en sentido horizontal, permitiendo a las edificaciones un movimiento lateral cuando están sometidas a movimientos del suelo. En la Figura No.2 se presenta el esquema de un aislador de caucho de múltiples capas. A pesar de su desarrollo, no fue sino hasta principios de los años 90's que se empezaron a diseñar y construir sin temores algunas estructuras con aislamiento de fundaciones a través de tambores de caucho, especialmente en los Estados Unidos y en Japón.

Sin embargo, después de los terremotos de Northridge (USA) y Kobe (Japón) en enero de 1994 y 1995, respectivamente, la aplicación de este sistema se incrementó exponencialmente debido al adecuado comportamiento que tuvieron las pocas estructuras existentes aisladas en su fundación, teniendo la mayor aceptación en Japón, al punto que actualmente hay más de 800 estructuras aisladas y se siguen proyectando edificaciones más esbeltas con relaciones de aspecto cada vez mayores. La investigación y mejoramiento del sistema permite aplicar este concepto hoy en día a estructuras de hasta 150 m de altura, con relaciones de aspecto (alto/ ancho) de hasta 6. Además, el tamaño de los aisladores ha venido aumentando, siendo comunes diámetros de 1.5 m y alturas de 0.6 m, capacidad de carga de 2.000 toneladas por unidad y resistencia a tensión (para las estructuras muy esbeltas que generen momentos de volcamiento) de hasta 600 toneladas por unidad. El ciclo de vida de estos artefactos esta por el orden de 80 años y son capaces de incrementar el período de vibración de una estructura de 4 a 6 segundos, además de proveer amortiguamiento en caso de sismo intenso (10 a 20% con respecto al amortiguamiento crítico), bien sea por la fluencia de corazones de plomo insertos dentro de los aisladores o a través de cauchos con propiedades amortiguadoras.

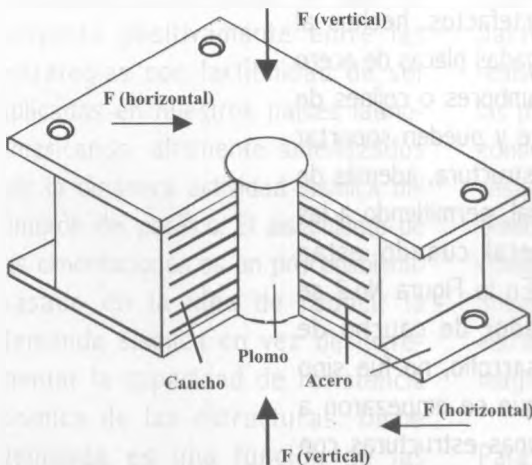


Figura No.2 - Esquema de un aislador con capas múltiples de caucho, corazón de plomo para brindar rigidez ante cargas de servicio y amortiguación ante cargas de diseño.

Ya en la práctica, como ingenieros estructurales, debemos enfrentar un dilema básico de cómo minimizar la deriva y la aceleración por piso al tratar de proveer una resistencia sísmica adecuada. Grandes deformaciones relativas entre pisos (deriva), causan daño a los muros divisorios, fachadas y componentes no estructurales y equipo que conectan los diferentes niveles. Sin embargo, esta deriva puede ser minimizada dando más rigidez a la estructura, la cual a su vez transmite o hasta amplifica el movimiento del suelo e incrementa la aceleración por piso de estructura, la cual puede ser nociva para edificaciones esenciales con equipos sensibles, como hospitales, centrales de comunicación, estaciones de policía, bomberos y laboratorios, entre otros. Por lo tanto, una forma práctica de reducir simultáneamente la deriva y la aceleración por piso, es a través del aislamiento de la cimentación, el cual concentra el desplazamiento en el nivel de aislamiento, mientras reduce dramáticamente las deformaciones relativas o derivas y también la demanda sísmica.

Este aislamiento desacopla el edificio o estructura de las componentes horizontales del movimiento telúrico, al interponer los nombrados tambores de caucho con baja rigidez horizontal entre la estructura y su fundación. El efecto de esta capa de aislamiento es incrementar de cuatro a diez veces el

período natural de vibración de la estructura, con respecto al período de vibración si ésta estuviera empotrada, y con respecto al período dominante de la señal sísmica. Por ejemplo, una estructura de 6 pisos puede tener un período de vibración de 0.5 a 0.6 segundos, el cual podría situarla en la parte más crítica del espectro de respuesta de aceleraciones (curva que relaciona la máxima aceleración generada por un sismo en una estructura, con su período natural de vibración), es decir, la demanda de la estructura puede ser máxima con valores cercanos o superiores a una aceleración de la gravedad (1.0 g). Aplicando un sistema de aislamiento de la cimentación a dicha estructura, y teniendo alguna certeza de que las características del suelo y de las fallas activas cercanas producen respuestas espectrales críticas en períodos de vibración menores a los períodos de diseño del sistema de aislamiento, es posible que al incrementar el período de vibración de la edificación con los aisladores, la estructura quede situada en un punto del espectro que no induce aceleraciones a la misma por encima de 0.2 a 0.3 g. En la Figura No. 3 se muestra la reducción en la aceleración que experimenta la estructura aislada en un espectro de diseño.

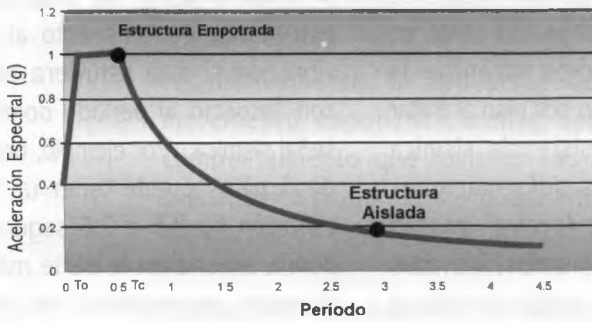


Figura No.3 – Disminución en la aceleración espectral experimentada por una estructura aislada en su cimentación.

Aunque los tambores de caucho como aisladores han demostrado ser efectivos, también existen algunas estrategias para aislar las estructuras del suelo, tomando ventaja de las fuerzas de gravedad de la edificación (peso propio). Entre ellas se encuentran los sistemas de fricción tipo péndulo -FPS- y los sistemas de esferas con fuerzas restituidoras. Los primeros disipan la energía en la interfase de deslizamiento como una función de la presión de contacto y la velocidad de movimiento. Este sistema utiliza una superficie cóncava de acero inoxidable

y una pequeña placa circular articulada, hecha de materiales compuestos, entre ellos teflón y grafito, permitiendo un movimiento relativo que semeja a un péndulo en presencia de fuerzas de fricción. La Figura No.4 presenta un esquema del sistema de fricción tipo péndulo. La fuerza lateral necesaria para inducir desplazamiento en el sistema depende de la curvatura de la superficie cóncava y de la carga vertical; además estas mismas propiedades permiten una acción que centra la estructura después de estar en movimiento.

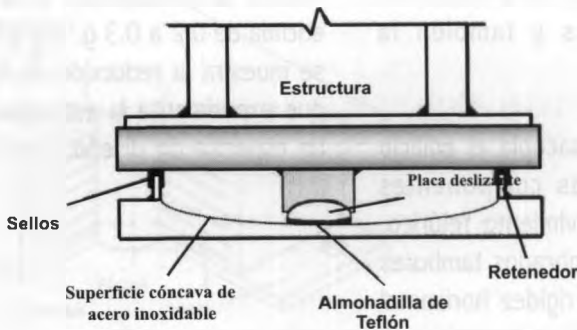


Figura No.4 – Esquema del sistema de fricción tipo péndulo.

La segunda estrategia, relacionada con los sistemas de esferas, consiste en ubicar dichas esferas de acero entre placas también de acero con superficies cóncavas. Un bajo coeficiente de fricción de rodamiento y un apropiado radio de esfera producen una aceleración de la masa de la estructura muy pequeña en caso de un evento sísmico. En forma análoga al FPS, el sistema de esferas permite una acción que centra la estructura después de estar en movimiento. La figura No.5 presenta el esquema del sistema de esferas con fuerza restitutiva.

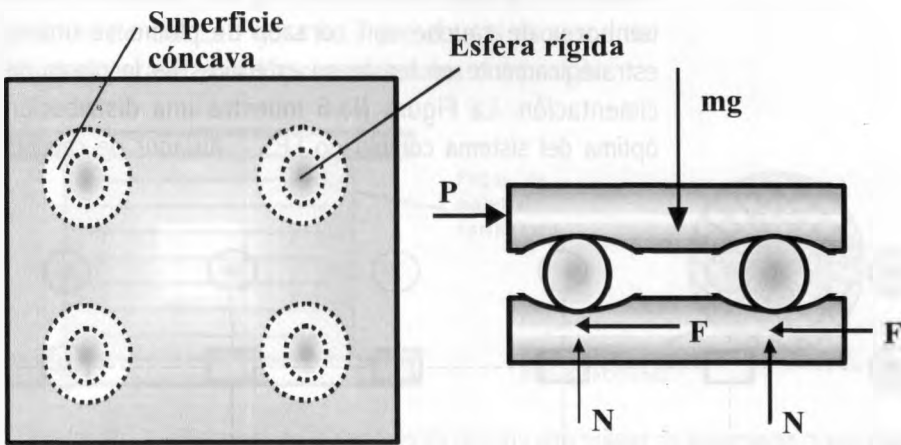


Figura No.5 – Esquema del sistema de esferas con fuerza restitutiva.

ESTRATEGIAS PARA DISMINUIR COSTOS

Dado que el diseño sismo-resistente tradicional permite deformaciones plásticas de las estructuras ante el evento sísmico de diseño, los costos de reparación y rehabilitación deben tenerse en cuenta en el largo plazo para hacer una comparación con respecto a un sistema de aislamiento de las fundaciones, el cual puede ser actualmente más costoso en su inversión inicial, pero que ante el evento de diseño los costos de reparación serían mínimos. Por otra parte, el aislamiento de fundaciones sería más efectivo si se aplicara para proteger edificaciones esenciales e históricas, las cuales tienen valores muy difíciles de

cuantificar, dado el servicio que prestan a la sociedad, en caso de desastre así como el concepto arquitectónico y de ingeniería que representan. Por lo anterior, con el fin de impulsar esta tecnología en nuestros países, se deben plantear estrategias que permitan disminuir la inversión inicial. Una primera alternativa consiste en combinar los sistemas basados en deslizamiento como FPS y los aisladores de caucho. Ambos sistemas son completamente compatibles y permiten tener un control de los desplazamientos horizontales, capacidad para centrar la estructura y además proveer rigidez torsional si los tambores de caucho con corazón de plomo se ubican estratégicamente en las áreas exteriores de la planta de cimentación. La Figura No.6 muestra una distribución óptima del sistema combinado FPS – Aislador de caucho.

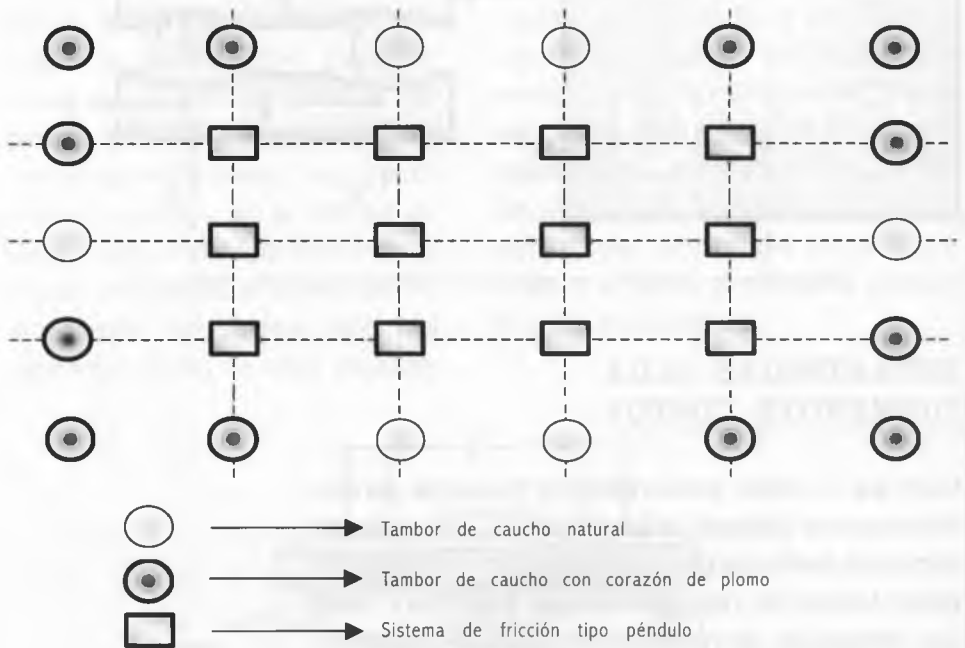


Figura No.6 – Distribución óptima del sistema de aislamiento híbrido FPS – Tambor de Caucho.

Una segunda estrategia corresponde a la utilización de materiales compuestos para reforzar los cojines de caucho que reemplazarían al acero y presentarían propiedades mecánicas superiores. Los materiales compuestos son formados por dos fases, una continua y relativamente frágil llamada matriz y otra discontinua más rígida y fuerte correspondiente al refuerzo. Para que el compuesto sea efectivo, debe ser reforzado por fibras continuas en direcciones múltiples con el fin de obtener una distribución que permita analizarlo como un material isotrópico, y que facilite el estudio del comportamiento elástico, inelástico y de resistencia. La Figura No.7 presenta el esquema de refuerzo para el aislador con materiales compuestos.

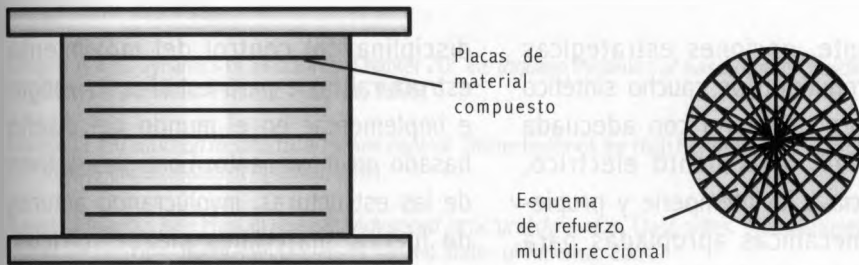


Figura No.7 – Refuerzo de aisladores de caucho con placas de materiales compuestos.

Otra estrategia corresponde a la utilización de aisladores longitudinales, los cuales pretenden distribuir la carga vertical en una superficie más amplia y disminuir los requisitos de rigidez vertical para soportar las grandes cargas concentradas que los tambores de caucho soportan, lo cual tiene un impacto directo en el número de capas requeridas por el aislador y por ende en el volumen de material reforzado a utilizar, es decir, en el precio (aproximadamente U.S.\$1 por pulgada cúbica) Este sistema es similar a unas zapatas corridas, con el aliciente para el aislador longitudinal de ser responsable únicamente de las deformaciones horizontales, despreciando las consideraciones para cargas verticales, ya que éstas son ahora distribuidas uniformemente a la cimentación. La Figura No. 8 muestra la distribución de un sistema con aisladores de caucho longitudinales.

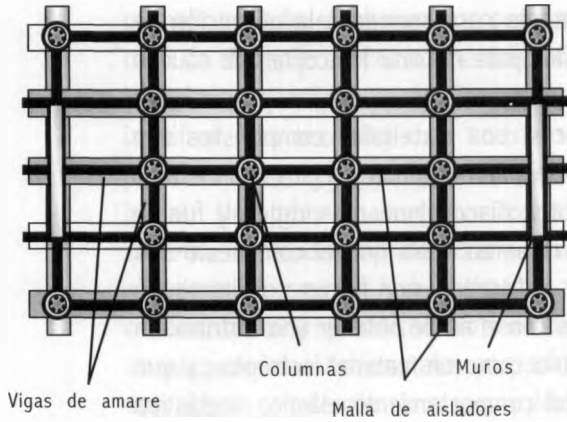


Figura No.8 – Distribución de aisladores de caucho longitudinales para distribuir uniformemente las cargas verticales.

Finalmente, opciones estratégicas como producción de caucho sintético basado en propileno con adecuada flexibilidad, aislamiento eléctrico, resistencia a la intemperie y propiedades mecánicas apropiadas para deformaciones transversales de cortante; o la producción de caucho y manufactura de los tambores con capas múltiples de refuerzo con materia prima y mano de obra local, pueden generar posibilidades a corto plazo para determinar un esquema de aplicación del sistema que se adapte de manera óptima a las condiciones socioeconómicas de nuestros países latinoamericanos.

Las anteriores eran opciones estratégicas pertenecientes al concepto de aislamiento de las fundaciones, el cual a su vez, es sólo una pieza en el gran mar de posibilidades que la emergente

disciplina del control del movimiento estructural tiene para estudiar, investigar e implementar en el mundo del diseño basado en movimiento. Controles activos de las estructuras, involucrando actores de fuerza, materiales piezoeléctricos, materiales adaptables y mecanismos que varían sus propiedades de rigidez y amortiguamiento en tiempo real, son nuestra próxima meta. Por lo tanto, con el control pasivo conformado por amortiguadores y aisladores, debemos preparar a la ingeniería estructural para enfrentar el gran reto de acoger a la informática, la ingeniería mecánica y demás especialidades afines, integrándolas en la mencionada disciplina del control del movimiento estructural, permitiéndonos a largo plazo ser pioneros en estas nuevas tecnologías y aprovechar la incalculable capacidad física e intelectual que ha sido demostrada en los proyectos de ingeniería ya ejecutados en el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Naeim, Farzad. KELLY, James M. *Design of Seismic Isolated Structures*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica – ANIDIS. Gruppo di Lavoro Isolamento Sismico – GLIS, 2000. <<http://rin365.arcoveggio.enea.it/glis>>
- Takenaka Corporation. *Seismic isolation and vibration control building, 2001*. <http://www.takenaka.co.jp/takenaka_e/quake_e/menshin/menshin.htm>
- Bridgestone Corporation. *Rubber technology for seismic isolation*. Bridgestone's work on seismic isolation, 1992. <<http://moment.mit.edu/documentLibrary/Paper004/paper004.html#1>>
- Almazán, José L. Juan C. De la llera. y José A. Inaudi. *Modeling aspects of structures isolated with the frictional pendulum systems*. Earthquake engineering and structural dynamics. Vol. 27 (1998): 845-867.
- Qiang Zhou. Xlin Lu. Qingmin Wang. Dingguo Feng. Qianfeng Yao. *Dynamic analysis of structures base-isolated by a ball system with restoring property*. Earthquake engineering and structural dynamics. Vol 27 (1998): 773-791.
- Chopra, Anil K. Dynamics of Structures. Chapter 20: *Earthquake Dynamics of Base-Isolated Buildings*. United States of America: Prentice-Hall, Inc, 1995.
- Connor J.J. *Introduction to structural motion control*. Online textbook for High Performance structures classes at MIT. United States of America, 2001.
- Kausel, Eduardo, José Manuel Roësset, *Advanced structural dynamics*. Class notes. Massachusetts Institute of Technology. Texas A&M University. United States of America, 2000.
- Kelly, James M. *Earthquake-Resistant Design with Rubber*. Second Edition. Great Britain: Springer-Verlag London Limited, 1997.
- Bachas Noelle, et. al. *The rehabilitation of Mitchell Hall for seismic upgrade*. Master of Engineering at MIT. High performance structures project. United States of America, 2001.
- SAP2000 - Analysis Reference, Vol. 1 *Integrated finite element analysis and design of structures*. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California – United States of America, 1997.
- Schneider, Robert R. Dickey, Walter L. *Reinforced masonry design*. Second edition. United States of America: Prentice-Hall, Inc, 1990.
- Daniel, Isaac M. Ishai, Ori. *Engineering mechanics of composites materials*. United Sates of America: Oxford University press, 1994.
- Foreign labor statistics. *International comparison of foreign labor statistics, 2001*. <<http://stats.bls.gov/flsdata.htm>>