

Capítulo 5

Estado actual del arte en los sistemas de aislamiento sísmico

5.1 Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo principal resumir la evolución que han tenido los sistemas de aislamiento sísmico a nivel mundial, sus principales parámetros de diseño, algunas alternativas utilizadas en la práctica profesional y el nivel de conocimiento, tanto teórico, como de aplicación práctica. Los sistemas de aislamiento y disipación de energía resultan ser técnicas relativamente nuevas para mitigar los efectos de los terremotos, sin embargo, en muy poco tiempo, han tenido un importante desarrollo y su implementación en proyectos de importancia son cada vez más frecuentes. Por lo tanto no resulta simple seguir en detalle las aplicaciones del aislamiento sísmico en el mundo porque dicha técnica se encuentra en un fuerte crecimiento.

Actualmente, en muchos proyectos de ingeniería, se han utilizado técnicas modernas para controlar los efectos de los terremotos, entre ellas los sistemas pasivos de control de vibraciones (disipadores de energía) y especialmente el aislamiento sísmico. Ambas constituyen herramientas eficientes para garantizar la seguridad de la construcciones frente a la ocurrencia de los terremotos. La protección no sólo se limita a los elementos estructurales, sino también a los no estructurales y fundamentalmente a los contenidos, en muchos casos de mayor valor económico que la construcción misma.

La implementación de los sistemas de aislamiento sísmico permiten reducir la demanda sísmica sobre las estructuras y asegurar su capacidad de resistencia frente a terremotos destructivos, por lo tanto dichas estructuras muestran un comportamiento elástico ante la ocurrencia de importantes terremotos.

Naeim et al, 1999, citan en su texto un anécdota que quizás puede interpretarse como el origen del aislamiento sísmico de base. “ *En agosto del año 1909 J. A. Calantarients, un médico del norte de Inglaterra, de la ciudad de Scarbourough, escribe una carta al director del servicio Sismológico de Chile con el objeto de llamarle la atención sobre un método de*

construcción que el mismo había desarrollado. Afirmaba que un edificio podía construirse en un país en el cual ocurrieran terremotos severos con un adecuado grado de seguridad si se garantizaba la existencia de una “junta” que permitiese un libre movimiento. Calantarients, que patentó su método en la oficinas de patentes de Inglaterra, proponía la construcción del edificio con junta deslizante (free joint) la cual se materializaba con un plano de arena fina, mica o talco lo que permitiría el desplazamiento del edificio ante la ocurrencia de un terremoto, de esta manera se reducían las fuerzas transmitidas por el mismo”.

Por lo tanto lo que J. A. Calantarients proponía fue una innovadora estrategia de diseño hoy conocida como aislamiento sísmico de base (Fig. 5.1 y 5.2.). Después de la propuesta del mismo se patentaron muchos mecanismos con el objeto de desacoplar el edificio de la acción de los terremotos, por ejemplo fueron construidos edificios sobre “bolas” en Savastopol, Ucrania y una escuela de cinco niveles en la ciudad de México; se construyó un edificio de cuatro niveles destinado a dormitorios para el observatorio estatal sismológico de Beijing sobre un plano de arena, dicha junta fue especialmente diseñada para que el edificio se desplazara frente a la ocurrencia de un terremoto (Naeim et al, 1999).

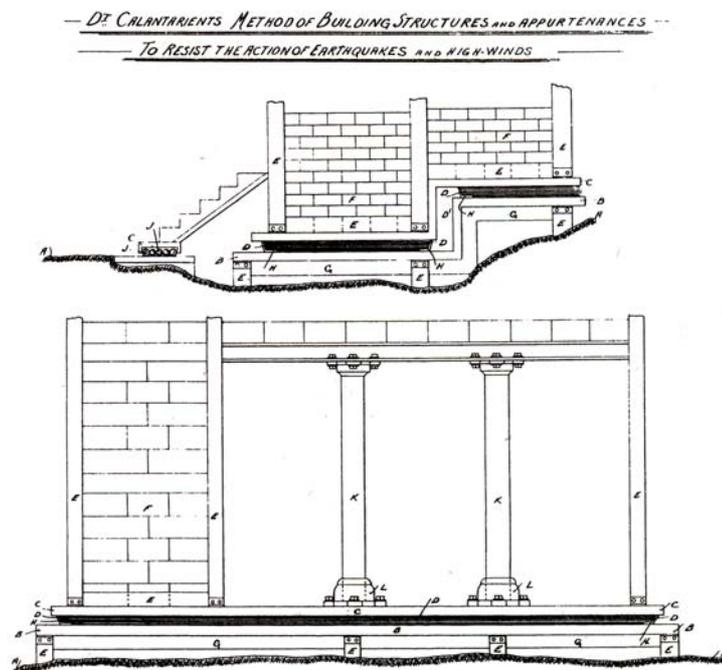


Fig. 5.1: Sistema de aislamiento de base del Dr. Calantarients. Una capa de talco (plano más oscuro) materializaba el sistema de aislamiento sísmico. (Fuente: Naeim F. et al., 1999)

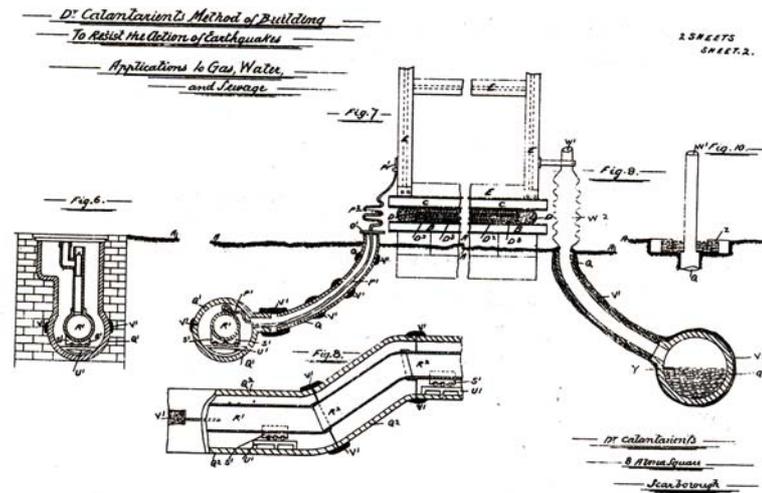


Fig. 5.2: Planos originales del sistema de conexión propuesto en los esquemas del Dr. Calantarients. (Fuente: Naeim F. et al., 1999)

Las primeras investigaciones sobre un edificio realmente construido sobre un sistema de aislamiento sísmico se atribuye a John Milne quien fue profesor de la carrera de ingeniería en minería en Tokio entre 1876 y 1895. La estructura fue construida sobre “bolas” contenidas en cajas de aceros. Por encima de las mismas existía una placa de acero tomada al edificio cuya superficie de contacto con las bolas era de forma cóncava, otra placa de idénticas características se ubicaba por debajo de las placas de aceros. El edificio fue instrumentado y aparentemente ensayado a movimientos sísmicos, las experiencias obtenidas fueron publicadas en 1885 en el informe de la Asociación Británica para el avance de la ciencia. El primer informe contemplaba un diámetro de bolas de 10 pulgadas, al año siguiente, en 1886, el trabajo fue actualizado y se publicaron los resultados para diámetros de bolas de 8, 1 y ¼ de pulgadas (Naeim et al, 1999).

Las aplicaciones prácticas concretas de los sistemas de aislamientos sísmicos comienzan a desarrollarse hace aproximadamente 25 años con el impulso de los aisladores elastoméricos. Los mismos son fabricados con láminas de goma vulcanizadas a planchas de acero, tienen una importante rigidez vertical lo que le permite soportar y transferir eficientemente las cargas verticales del edificio. Son muy flexibles lateralmente precisamente en la dirección más exigida ante la ocurrencia de terremotos. Desarrollos posteriores de los sistemas de aislamiento han permitido la fabricación de aisladores para puentes y control de vibraciones. En los últimos años se han ideado nuevos sistemas de aislamiento (friccionales, aisladores de goma con núcleo de plomo, goma de alto amortiguamiento, resortes, etc). Todos ellos

persiguen el mismo objetivo, desacoplar al edificio de los efectos destructivos de los terremotos.

El concepto de aislamiento sísmico es ampliamente aceptado en regiones sísmicas para proteger edificios importantes o que deban cumplir funciones esenciales después de ocurrido el terremoto, de hecho hay muchos ejemplos en Estados Unidos de Norteamérica, Japón, Italia y Nueva Zelanda, sin embargo también existen proyectos de menor costo para viviendas económicas de los cuales hay casos realmente construidos en Chile, China y Armenia. El edificio con aislamiento de base, motivo de la presente tesis, pretende ser el puntapié inicial para motivar la técnica de aislamiento en regiones sísmicas del oeste argentino, zonas donde hasta la fecha no se ha implementado ningún proyecto relacionado con ésta reciente tecnología a pesar del peligro sísmico de la región (Ver capítulo 3).

Otros de los beneficios importantes de los sistemas de aislamiento es la protección de los contenidos de importantes edificios (por ejemplo en el caso de hospitales el equipamiento tiene un costo muchas veces mayores que el edificio mismo). Suministrar una mayor resistencia al edificio, en muchos casos, no garantiza valores aceptables de distorsiones de piso o de aceleraciones en altura. Cantidades elevadas de distorsiones de piso causan daños en los componentes no estructurales y en sus contenidos. Aumentar la rigidez del edificio permitiría disminuir la distorsión de piso, sin embargo ello no garantiza una reducción de las aceleraciones, por otro lado reducir la rigidez del mismo permitiría reducir las aceleraciones pero no las distorsiones de piso. Los sistemas de aislamiento sísmico permiten controlar simultáneamente los dos parámetros porque el mismo posee la flexibilidad necesaria como para concentrar toda la deformación a nivel del sistema.

El aislamiento sísmico permite desacoplar la estructura de la componente horizontal del terremoto gracias a su baja rigidez en dicha dirección, ello le proporciona a la estructura una frecuencia natural que es mucho menor que aquella que tendría si el edificio fuese de base fija o tuviese la frecuencia predominante del terremoto. En general los sistemas de aislamiento mas utilizados a nivel mundial (elastoméricos o friccionales) poseen una importante rigidez vertical lo que no permite desacoplar el edificio de la componente en esa dirección del movimiento del suelo. Los terremotos de falla cercana presentan, en muchos casos, valores de aceleraciones verticales importantes (Ver figuras B-401 a B-417 del Anexo “B” del Capítulo

4), por lo tanto, en general, dichos sistemas de aislamiento sísmico no son efectivos para desacoplar a la superestructura de la componente vertical del terremoto.

Un análisis dinámico modal indica que, en el primer modo, la deformación se concentra a nivel del sistema de aislamiento sísmico de base, mientras que el edificio, emplazado por encima del mismo, se comporta como un cuerpo rígido. Los modos superiores que provocan deformaciones en la superestructura son ortogonales al primer modo y por lo tanto lo son a dicha componente del terremoto. Dichos modos superiores no participan en el movimiento, por lo tanto, las altas energías y distintas frecuencias del terremoto no pueden ser transmitidas a la superestructura (Naeim et al, 1999).

5.2 Evolución en el uso de los sistemas de aislamiento sísmico

Al mes de octubre del 2005, existían aproximadamente 4500 construcciones, en el mundo, con dispositivos no tradicionales para controlar los efectos de los terremotos, de los cuales 4000 correspondían a sistemas de aislamiento sísmico (Martelli A., 2005).

La primera aplicación en las que se utilizó aisladores elastoméricos para proteger una estructura de terremotos fue en 1969. La implementación del sistema de aislamiento sísmico fue realizada en una escuela de enseñanza básica en Skopje, Macedonia (ex Yugoslavia); el edificio tiene tres niveles y fue construido y diseñado por la empresa Swiss Engineers. (Naeim et al, 1999). El proyecto fue ejecutado cuando la tecnología de las planchas de goma, reforzadas con láminas de acero todavía no estaban muy desarrolladas.

Los proyectos más recientes hoy utilizan casi exclusivamente aisladores conformados por planchas de goma vulcanizadas a láminas de acero y en muchos países (Estados Unidos de Norteamérica y Nueva Zelanda) con núcleo de plomo para aumentar el amortiguamiento del sistema de aislamiento. Dichas planchas proveen una importante rigidez vertical pero mantienen su flexibilidad horizontal, el esquema general del aislador puede observarse en la Fig. 1.1. del Capítulo 1.

Muchos proyectos de aislamiento sísmico, particularmente en Nueva Zelanda y Japón, combinan aisladores de goma natural de alto amortiguamiento con amortiguadores

hidráulicos, barras de acero retorcidos o núcleo de plomo dentro del aislador elastomérico. Dichos elementos introducen una no linealidad de la respuesta que en parte complican el análisis teórico y por otro lado reducen el grado de aislamiento para los modos superiores de la excitación sísmica (Naeim et al, 1999). Sin embargo, la presencia de los amortiguadores hidráulicos funcionando en paralelo con aisladores, conducen a respuestas eficientes del sistema de aislamiento cuando se está en presencia de terremotos asociados a falla cercana (Jangid et al, 2001).

El primer edificio construido en Estados Unidos de Norteamérica, ubicado a 21 Km. de la falla de San Andrés, con un sistema de aislamiento sísmico de base fue el “*Foothill Communities Law and Justice Center*” en Los Ángeles, California. El edificio consta de una superficie de 15800 m², posee cuatro niveles y fue el primero en el que se utilizaron aisladores fabricados con goma natural de alto amortiguamiento.

A partir del anterior se sucedieron una serie de importantes proyectos entre los cuales pueden citarse: El edificio del centro de operaciones de Los Ángeles; el Centro de Administración del tránsito de Caltrans en Kearny Mesa, California; el Centro del Diagnóstico King and Drew en Willowbrook, un edificio para el estado de Los Ángeles finalizado en 1995 y emplazado a 3 Km. de la falla de Newport - Inglewood con una magnitud asociada de 7.5 (el diseño indicó un diámetro de aisladores elastoméricos de 100 cm.); un edificio para la fabricación de implementos de simuladores de vuelo en Salt Lake City, Utah ubicado próximo a la falla Wastach con una magnitud asociada de 7-7.5; un edificio para el laboratorio de la Agencia del Agua de Portland, etc. (Naeim et al, 1999).

Los sistemas de aislamiento sísmico no sólo se han utilizado en obras nuevas sino también en proyectos de edificios existentes. El problema que enfrentan las regiones de países desarrollados y no desarrollados emplazados en zonas de peligro sísmico, no es solamente la amenaza permanente de un terremoto destructivo sino, además, que muchos de sus construcciones (civiles, comerciales, industriales y de infraestructura) fueron construidas con códigos de edificación hoy obsoletos y en muchos otros casos con pocas prescripciones sísmicas. En alguna ocasión el edificio podrá ser demolido y reconstruido, en otros no, ya sea por razones económicas, sociales o históricas. Por lo tanto, hoy, los sistemas de aislamiento sísmico y de disipación de energía resultan ser técnicas no tradicionales para recuperar dichas construcciones con un grado de seguridad aceptable.

En relación a este tipo de recuperación edilicia y siempre haciendo referencia a Estados Unidos, los proyectos más destacados realizados en ese país son: el edificio municipal de la ciudad de Oakland construido en 1914; y el de la ciudad de San Francisco (diseñado en 1912 para reemplazar el destruido por el terremoto de 1906) y el edificio municipal de la ciudad de Los Ángeles construido en 1928. Previo a implementar los sistemas de aislamiento, los edificios presentaron daños en ocasión del terremoto de Loma Prieta de 1989 y en especial el de Los Ángeles con el terremoto de Northridge de 1994. En el edificio municipal de la ciudad de Los Ángeles se combinaron aisladores elastoméricos fabricados con goma de alto amortiguamiento y los mismos fueron colocados en combinación con amortiguadores viscosos dispuestos a nivel del sistema de aislamiento de la superestructura. (Naeim et al, 1999).

Otro tipo de aislador frecuentemente utilizado son los friccionales (Fig. 5.3). En los apartados siguientes se analizará más en extenso las características de los dos tipos de aisladores citados (elastoméricos y friccionales) junto a otros modelos menos conocidos.



Fig. 5.3: Aislador friccional modelo FPS. (Fuente: EPS Example Building Applications, disponible: <http://www.earthquakeprotection.com/buildings.html>)

En un proyecto de rehabilitación, realizado en 1992 en la escuela de minas *Mackay* de la Universidad de Nevada en Reno, se utilizaron en forma combinada aisladores friccionales con elastoméricos fabricados con goma de alto amortiguamiento. El mismo criterio se utilizó para el hospital *MLK/Drew*. La combinación de los dos aisladores permite obtener mayores valores de periodos del conjunto aislado gracias a la presencia de los aisladores friccionales, los aisladores elastoméricos son los encargados de suministrar las fuerzas restitutivas necesarias para el autocentrado (Kelly, 1982). El problema del autocentrado de los aisladores friccionales en los últimos años se ha solucionado diseñando la superficie de deslizamiento en forma de curva cóncava (Fig. 5.4).

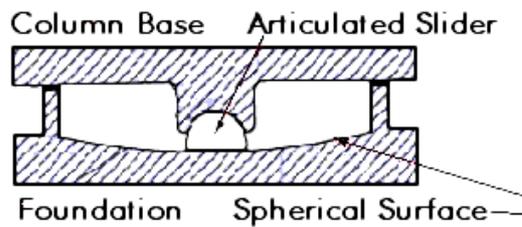


Fig. 5.4: Aislador friccional de péndulo invertido (Fuente: Protective Systems for Buildings: Application of Spherical Sliding Isolation Systems by Dr. Michael Constantinou. Disponible en http://mceer.buffalo.edu/infoservice/faqs/rsa5_ssi.asp)

Una reciente aplicación en la que se utilizó aisladores friccionales de péndulo invertido (Spherical Sliding Isolation Systems, FPS) fue la recuperación estructural del edificio de la corte de apelaciones de San Francisco, California, construido en 1905, con una superficie de 32.516 m² (el edificio sobrevivió con éxito al terremoto de San Francisco de 1906). Otro antecedente importante es la construcción de dos nuevos edificios en California, el primero el aeropuerto internacional de San Francisco y el nuevo edificio municipal de *Hayward* (Naeim et al, 1999).

De todas maneras en Estados Unidos de Norteamérica, contrariamente a lo que ocurre en Japón y China, las aplicaciones de los sistemas de aislamiento sísmico de base han crecido muy lentamente a pesar del buen comportamiento de las estructuras que tienen implementados sistemas de aislamiento. El buen desempeño también se ha observado en aquellas que se emplazan próximas al epicentro (< 30 Km. y en oportunidad de la ocurrencia del terremoto de Northridge de enero de 1994). Posiblemente la causa se deba al hecho de que

los códigos que reglamentan el diseño de edificios con aislamiento de base lo penalizan de alguna manera. Dichos códigos no permiten desarrollar plenamente las ventajas del sistema de aislamiento o bien, por ejemplo en California, para considerar los efectos de falla cercana exigen aumentar por lo menos un 15% la señal sísmica. Por tal motivo los edificios con sistemas de aislamiento sísmico en dicho país son solamente 100, de cuales muchos son edificios públicos (Martelli A., 2005).

La mayoría de las aplicaciones de aislamiento sísmico de base en Estados Unidos se encuentran concentradas en California, sin embargo hay otras construcciones en UTA, Oregón, Washington, Nevada y Tennessee (Martelli A., et al, 1998; Koh H. M., 2000 y Martelli A., et al, 2002)

El uso del aislamiento sísmico en Japón es mayor que en los Estados Unidos de Norteamérica. Después del primer proyecto realizado en 1986 el número de construcciones con aislamiento sísmico de base creció a cerca de diez edificios por año en 1990 y 1991. Con anterioridad al terremoto de Kobe de 1995, el país contaba con aproximadamente 100 edificios con sistemas de aislamiento de base, después de dicho terremoto y gracias al buen comportamiento de los sistemas de aislamiento, el número se incrementó a más de 600 en el año 2000 (Clark, et al 1999). En el pasado, los sistemas más comúnmente empleados utilizaban los aisladores elastoméricos de goma natural, solos o bien combinados con amortiguadores, sin embargo, en los últimos años se están utilizando, casi exclusivamente, aisladores elastoméricos fabricados con goma de alto amortiguamiento.

El edificio de mayores dimensiones a nivel mundial con aislamiento de base, el Centro postal del oeste del Japón, está localizado en la ciudad de Sanda, Kobe y el mismo consta de una superficie de 47.000 m². El periodo del edificio aislado es de casi 4 seg. y se encuentra emplazado a 30 Km. del epicentro del terremoto de Hyogo-Ken Nambu (Kobe) de 1995. Como dato interesante es posible citar que la aceleración por debajo del sistema de aislamiento fue de 400 cm/s² (0.41 g) mientras que en el sexto nivel del edificio la misma se redujo a 127 cm/s² (0.13 g); por otro lado, el desplazamiento estimado del sistema de aislamiento sísmico fue de 12 cm. (Naeim et al, 1999). El edificio no evidenció problemas en oportunidad del terremoto, sin embargo en otras construcciones próximas, que poseían fundaciones tradicionales, se manifestaron daños.

El buen resultado obtenido en el edificio del centro postal de Japón motivó que el número de aplicaciones de aislamiento de base se incrementara notablemente e inclusive se extendiese a edificios de viviendas, por ejemplo en marzo de 1997 se habían autorizado la construcción de 393 proyectos, de los cuales 228 correspondían a edificios de viviendas y 84 a oficinas públicas (Naeim et al, 1999). El crecimiento del aislamiento sísmico en Japón incluye además la construcción de 21 hospitales y 22 edificios gubernamentales. Estadísticas sobre el uso de los sistemas de aislamiento en Japón (Martelli A., 2005) indicaron que en el mes de Octubre del 2003 existían aproximadamente 1.700 edificios con sistemas de aislamiento sísmico, dicho número se incrementó a 2.700 en Junio del 2005.

En Japón, en los últimos años, se construyeron dos edificios que constituyen una importante aplicación desde el punto de vista de la técnica del aislamiento sísmico, fundamentalmente porque ambos edificios son de altura considerable. Se sabe que para dichos edificios los sistemas de aislamiento no pueden incrementar demasiado el periodo del mismo en relación a su condición de base fija y por otro lado es difícil controlar el desplazamiento lateral.

Contrariamente a lo precedente, en el año 2000 se construyó en Tokio un edificio de 87,40 metros de altura (19.224 m^2), en el cual se utilizaron 30 aisladores de goma de alto amortiguamiento y 99 amortiguadores elasto-plástico. En 2003 en Osaka, se construyó un edificio de 130 metros de altura (47.613 m^2) en el cual se utilizaron como aisladores 12 dispositivos conformados por bolas, 6 aisladores de goma de alto amortiguamiento con núcleos de plomo y 6 amortiguadores viscosos. Actualmente, 2007, se encuentra en proceso de construcción, en terrenos artificiales (Sagamihara, Tokio), un complejo de 31 edificios de 6 y 14 niveles proyectados con sistemas de aislamiento sísmico. El complejo incluye el edificio para estacionamientos en el cual se utilizaron 48 aisladores de goma con núcleo de plomo de 120 cm. de diámetro, 109 aisladores friccionales de 40 a 120 cm. de diámetro y 85 aisladores conformados por bolas, el periodo de dicha estructura aislada es de 6.70 seg., el peso de la superestructura es de 111.600 toneladas y el desplazamiento de diseño de aproximadamente 80 cm. (Martelli A., 2005).

En los últimos años Japón ha evidenciado un importante crecimiento de los sistemas de aislamiento sísmico en viviendas privadas de pequeñas dimensiones y no mayor de dos niveles gracias a la liberación en el uso de la tecnología. El número de viviendas son

aproximadamente 1.300 unidades y para ellas se han utilizados dispositivos de bolas (*“ball bearing”*) junto con amortiguadores viscosos. (Martelli A., 2005).

En Europa y particularmente Francia, fue el primer país que en la década del '70 reconoció los beneficios de los sistemas de aislamiento después de la construcción del colegio *“Pestolazzi”* en Skopje, Macedonia. En dicho colegio se utilizaron aisladores de goma de bajo amortiguamiento, donado por Suiza. Posteriormente se comenzaron a desarrollar nuevas técnicas para proteger las plantas nucleares e instalaciones de los terremotos que excedían picos de aceleraciones a 0.20 g. Para ello se desarrollaron aisladores de neopreno sintético y luego los mismos fueron combinados, para regiones de mayor importancia sísmica, con disipadores de acero, denominados *“EdF”*, sigla que responde al nombre de la empresa que lo desarrolló (Electricidad de Francia) (Martelli A., 2005). La combinación de ambos sistemas no sólo fueron utilizados en Francia (*Plantas de almacenamiento de combustible de Cruas PWR y La Hague*) sino también en Sur África (*Koeberg PWR*).

La técnica del aislamiento sísmico en Francia no sólo se ha limitado a instalaciones industriales sino también a edificios y puentes. El primer edificio fue una escuela de tres niveles en *Lambsec*, finalizada en 1977, mientras que en la década del '80 se construyeron más de 20 edificios destinados a viviendas de uno o dos niveles (Martelli A., 2005).

Otro país de Europa que ha trabajado fuertemente en aislamiento sísmico ha sido Italia, a través del *“Gruppo di Lavoro d' Isolamento Sísmico” (GLIS)*. En 1975 se utilizaron por primera vez las técnicas del control pasivo de vibraciones en el viaducto de *“Somplago”* en el cual se utilizaron aisladores friccionales y controladores de desplazamiento formado por topes de goma (Martelli A., 2005), la misma fue la primera aplicación de aislamiento sísmico en puentes en toda Europa

Distintos edificios han sido construidos en dicho país con aislamiento sísmico, entre los cuales se puede citar al Centro de Administración Nacional de Teléfonos (SIP) en Ancona, un edificio de cuatro niveles construido en Squillace Calabria (Vestroni et al, 1992). Además se han utilizado sistemas de aislamiento sísmico en grupos de viviendas prefabricadas (Giuliano, 1991) y se han realizado recuperaciones estructurales en edificios históricos utilizando sistemas de aislamiento (Sparacio, 1991).

Una de las primeras aplicaciones en Italia fue posible debido a que el código que regulaba las construcciones en zona sísmica no excluían formalmente a los sistemas pasivos de disipación de energía. En los años '90 el número de edificios con aislamiento sísmico eran aproximadamente 20, en el 2005 han aumentado a cerca de 30 y actualmente existen 65 en proyecto (Ver Fig. 5.5).

Entre las aplicaciones más recientes en Italia pueden destacarse: El Centro de Telecom en la región de Marche (ocho niveles y 25 metros de altura) en el cual se utilizaron aisladores de goma de alto amortiguamiento; algunas escuelas en las cuales se utilizaron los mismos tipos de aisladores pero instalados en conjunto con friccionales (San Giuliano di Puglia; Bojano en Campobasso, una escuela en Toscana y cuatro más en Marzabotto en Bologna). Las aplicaciones se extienden además a edificios destinados al manejo de la emergencia (Centro de Defensa Civil de Foligno, Perugia y la Red de terremotos y edificios civiles en Gaggio Montano, Bologna); hospitales (en Udine, Frosinone, Varese y Mirano), edificios públicos (en Nápoles, Región de Emilia-Romagna), iglesias (Dives in Misericordia en Roma) y muchas aplicaciones de recuperación en edificios históricos (Martelli A., 2005).

En la Fig. 5.5 puede observarse la evolución de las aplicaciones en Italia desde 1981 al año 2005 (Martelli, A., 2005).

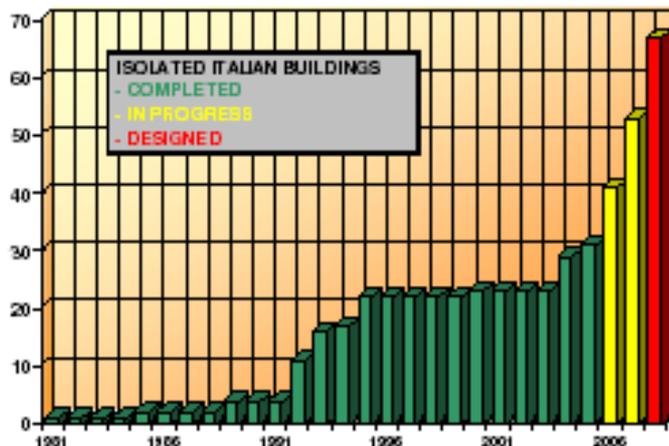


Fig.5.5: Evolución de los sistemas de aislamiento sísmico en Italia (Fuente: Martelli, A., 2005)

Dentro de Europa, Rusia, posee regiones que han registrado terremotos importantes (*Islas Sakhalin, Kamchatka, Siberia y el norte del Caucaso*). En dicho país los sistemas de aislamiento sísmico se comenzaron a utilizar en la década del '70, primero se emplearon

aisladores de goma de alto amortiguamiento y luego friccionales. Una de las primeras aplicaciones fue la recuperación del edificio histórico del banco de Irkutsk. Además de una escuela en Sakhalin; el “State Concert Hall” en Grozny en la República Checa y el Teatro Nacional del Drama en Gorno-Altai en Siberia. A diferencia de Japón y otros países, las nuevas aplicaciones en Rusia avanzan muy lentamente, en el año 2003 el número eran de 500, mientras que en el 2005 dicho valor no es mayor a 550 (Martelli A., 2005).

Nueva Zelanda puede considerarse como la “*cuna*” de los sistemas de aislamiento sísmico, dado que muchos conceptos fueron desarrollados originalmente en dicho país en particular, los aisladores de goma con núcleos de plomo, los cuales fueron exportados a otros países, especialmente a Japón y Estados Unidos.

El país tuvo su primer edificio con aislamiento de base en 1981, el mismo fue construido en Wellington (William Clayton) y en él se utilizaron por primera vez los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (Charleson, A., et al., 1987). Luego del mismo se han realizados otras aplicaciones entre las cuales se destacan: Un edificio de 12 niveles de hormigón armado (Unión House, Auckland) provisto además de un sistema de amortiguadores elasto-plástico para el control de las deformaciones; un edificio de 10 niveles de hormigón armado (Wellington Central Police) dotado de un sistema de amortiguadores por extrusión de plomo (Boardman, P. R., et al., 1983); el edificio del parlamento de Nueva Zelanda construido en mampostería en 1922 y recuperado estructuralmente con el uso de aislamiento sísmico (Poole, R. A. Et al., 1991) y un edificio de cuatro niveles construido en Petonia, próximo a Wellington donde el aislamiento sísmico utilizado también tiene la función de aislar el edificio de su entorno debido a las vibraciones de máquinas emplazadas en él (Dowrick, D. J., et al., 1991).

En China, al mes de Junio del 2005, el número de edificios con aislamiento sísmico era de 490, mientras que otros 25 edificios han sido protegidos con sistemas de disipación de energía. El “*Isolation House Building on Subway Hub*” representa una de las más importantes aplicaciones de aislamiento sísmico en dicho país, su construcción se completó en Junio del 2005 y consiste en edificios de 7 a 9 niveles con una superficie total de 480.000 m² (los edificios aislados se encuentran por encima de una imponente subestructura de 3 km², la cual alberga toda la infraestructura de trenes y subterráneos) (Martelli A., 2005).

En Taiwán, los sistemas de control de energía se comenzaron a utilizar recientemente y sobre todo después del terremoto de Chi-Chi en 1999 y de la revisión de la normativa sísmica del país. A partir de dicha revisión se permite el uso de sistemas de disipación de energía con ciertas restricciones. Al mes de diciembre del 2004 existían 24 edificios con sistemas de aislamiento sísmico y 87 edificios con sistemas pasivos de disipación (amortiguadores) (Martelli, A., 2005).

En Armenia los sistemas de aislamiento sísmico comenzaron a utilizarse fuertemente a partir del año 1994. El último terremoto importante que se registró en la región fue el de *Spitak* en 1988. Al 2005 existían 21 edificios con sistemas de aislamiento, el más reciente es un edificio público de 17 niveles de altura (Martelli, A., 2005).

En Sudamérica el país que más fuertemente ha trabajado en aislamiento sísmico ha sido Chile. Entre las aplicaciones más importantes pueden citarse: Un edificio para viviendas económicas que consta de dos departamentos de 50 m² cada uno por piso, una altura de cuatro niveles con aisladores elastoméricos a base de láminas de caucho reforzado con acero (Sarrazin, M. et al, 1989 y Moroni, M. O. et al, 1995); un puente de longitud 383 metros (Marga-Marga), consistente en un único tablero continuo apoyado en 36 aisladores elastoméricos reforzados con láminas de acero (Boroscheck, R., et al, 1997); un tramo elevado de 5 á 8 metros de la línea 5 del metro de Santiago (Sarrazin, M. et al, 1995), un edificio destinado a Hospital (Hospital Militar), ubicado en la comuna de La Reina en Santiago de Chile, el mismo consta de una superficie aproximada a 50.000 m² y posee cuatro niveles por encima del sistema de aislamiento En dicho edificio se utilizaron 164 aisladores elastoméricos reforzados con placas de aceros con diámetros de 70 y 90 cm. y el mismo representa la estructura aislada de mayores dimensiones en América Latina (Stagno, P. et al, 2001).

Debido a la renovación de gran parte de las rutas de Chile, en los últimos 15 años se han construidos varios puentes importantes en el país con algún tipo de protección sísmica. Algunos de los mismos, además del aislamiento sísmico, se le han suministrado dispositivos de disipación de energía. Además del puente citado en el párrafo anterior, pueden mencionarse entre otros, el puente “El Teniente” ubicado 335 Km. al norte de Santiago, ligeramente curvo de 196 metros de largo, sus vigas están apoyadas sobre placas de neopreno de 700 x 800 x 195 mm. en los estribos y de 400 x 500 x 155 mm. en las pilas (Benavides, et al, 2004); el puente “Amolanas”, ubicado 310 Km. al norte de Santiago, tiene un trazado recto

y continuo, de sección constante y de 268 metros de largo. En los estribos y pilas existen dos apoyos de neopreno en una caja fija de acero con lámina de teflón a excepción de la pila más alta donde sólo hay apoyo de neopreno. En ambos estribos hay dos amortiguadores viscoelásticos de “*Taylor Devices Inc.*” de 300 toneladas, desplazamiento máximo de + 200 mm. y velocidad máxima de 1.2 m/seg. (Sarrazin M., et al, 2001; Benavides, et al, 2004; Beltrán C., et al, 2004).

Existen muchas más aplicaciones sobre aislamiento sísmico a nivel mundial que las descritas precedentemente, por ejemplo en Turquía, Corea del Sur, Grecia, Portugal, Canadá y México (Martelli, A., 2005). La mayoría de los autores consultados coinciden que es difícil tener datos precisos y actualizados de las aplicaciones debido a que, afortunadamente, dicha técnica se encuentra en un fuerte proceso de crecimiento. En su último informe el “*Gruppo di Lavoro d’ Isolamento Sísmico*” de Italia (GLIS) ha publicado datos relacionados con algunas entrevistas realizadas a los máximos exponentes del sector (Forni., M., 2005), entre las cuales pueden citarse: según datos expresados por el JSSI (*Japan Society of Seismic Isolation*) los edificios con aislamiento sísmico en Japón son actualmente más de 2.500 de los cuales 1.300 son viviendas privadas. Lo anterior representa un aumento del 47% respecto a las construcciones que utilizaban el aislamiento sísmico en el año 2003. Dicho incremento se debe al hecho de que a partir del año 2000 la técnica ha sido liberada, es decir, no es necesario gestionar un permiso especial para ser implementada en construcciones civiles.

Según datos expresados por el EERC, Rusia, (*Research Centre of Earthquake Engineering*) indican que los edificios que utilizan sistemas de aislamiento sísmico son aproximadamente 550 es decir un 10% más respecto del año 2003. Datos de la Universidad de Guangzhou indican que en China las aplicaciones son de 512 es decir un 12% más que en el 2003.

En Armenia, según datos de *American University of Armenia* las aplicaciones son 19, lo que representa un 36% más de las que existían en el año 2003, sin contabilizar, en dicha estadística, tres grandes proyectos que se encuentran en elaboración. En Estados Unidos de Norteamérica las aplicaciones no han crecido de manera importante, debido a que los sistemas de aislamiento sísmico son penalizados por la rigurosidad de la normativa vigente, por lo tanto, los edificios estratégicos con sistemas de aislamiento son limitados. En Italia, en los últimos tres años, se han terminado 29 proyectos de aislamiento sísmico lo que aumenta el

total de aplicaciones a cerca de 60. En Fig. 5.6 se presenta una gráfica que muestra, en los países mencionados, el uso de sistemas de aislamiento sísmico.

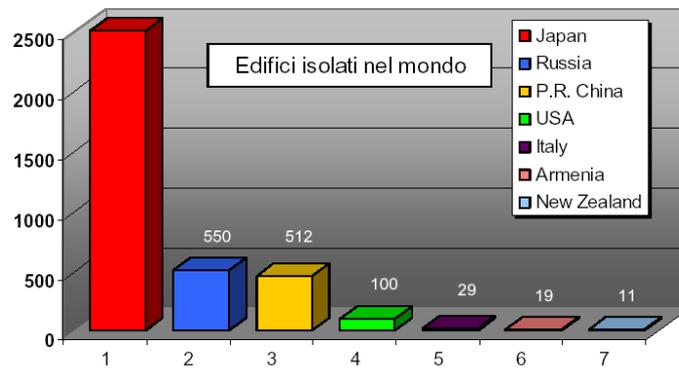


Fig. 5.6: Aplicaciones a nivel mundial de los sistemas de aislamiento sísmico (Fuente: Forni M., 2005 GLIS/Applicazioni05.pdf)

En la Fig. 5.7 se representa la manera en que ha evolucionado las aplicaciones de los sistemas de aislamiento sísmico en Japón y China en función de una estadística elaborada en el año 2004 (Forni., M., 2005).

En Argentina y particularmente en la región oeste, zonas de mayor peligro sísmico del país no existen otras aplicaciones que el edificio diseñado y construido en la Residencia de estudiantes de la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional (Tornello, et. al, 2003; 2004a, 2004b, 2004c, 2004d, 2005a, 2005b), motivo del presente trabajo.

El estado actual del arte en las aplicaciones de los sistemas de aislamiento sísmico a nivel mundial nos indica que existen numerosas aplicaciones en distintos países del mundo y de la región. Argentina y principalmente sus zonas más sísmicas, evidencian un importante retraso en la implementación de técnicas no tradicionales para el control de los efectos de los terremotos y entre ello los sistemas de aislamiento sísmico. Tanto el reglamento de uso en la provincia de Mendoza (CCSR, 1987) como el código de orden nacional (INPRES CIRSOC 103, 1991) no contemplan el uso de dispositivos para el control y disipación de energía, situación que acentúa aún más el retraso citado precedentemente si se lo compara, no sólo con países tecnológicamente avanzados, sino con otros de la región, especialmente Chile, el cual está logrando desarrollos y aplicaciones importantes ya ejecutadas y otras que se encuentran en proceso de proyecto.

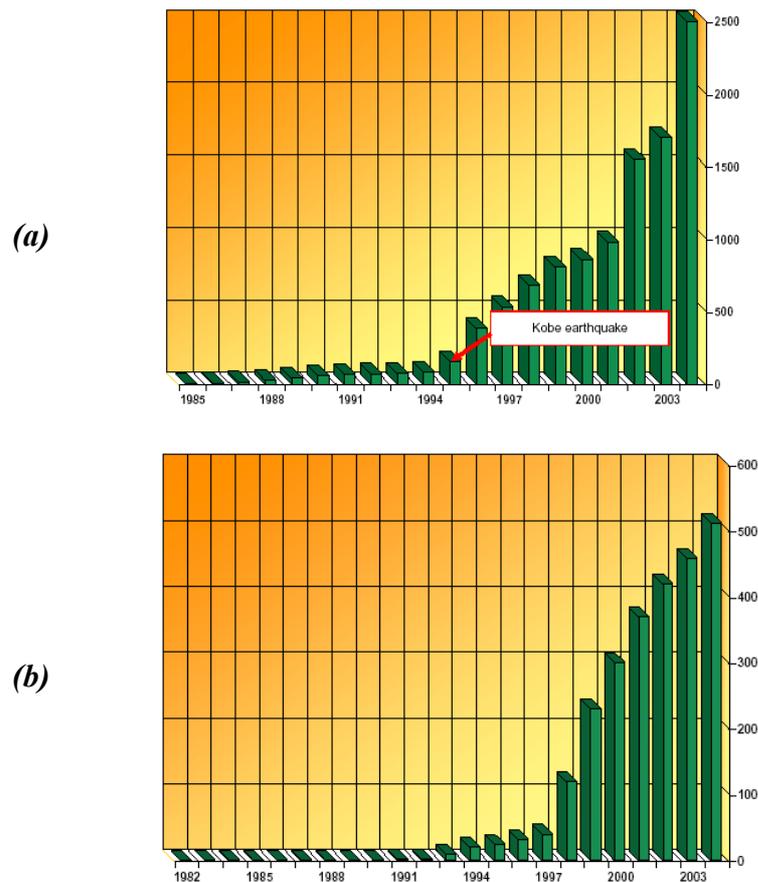


Fig. 5.7: Evolución de las aplicaciones en Japón (a) y en China (b) (Fuente: Forni M., 2005 GLIS/Applicazioni05.pdf)

5.3 Códigos

No muchos países tienen incluidos en sus códigos los sistemas no tradicionales de control activo y pasivo de disipación de energía. En algunos países si bien poseen un código al respecto, la utilización de sistemas no tradicionales y entre ellos los de aislamiento sísmico requieren la gestión de un permiso especial para ser implementados (Estados Unidos de Norteamérica), otros países, gracias a la actualización de sus códigos o a las consecuencias catastróficas de algún terremoto ocurrido en la región, han eliminado dicho requerimiento si bien estuvo vigente hasta hace muy poco tiempo (Ver punto 5.2) (*Europa y Japón*).

En Estados Unidos de Norteamérica el código más ampliamente difundido en sistemas de control activo y pasivo es el Uniform Building Code en su versión 1995 modificada en algunos aspectos en 1997 (UBC-97). El mismo define dos tipos de análisis, estático y dinámico. El primero se permite realizar solamente si la construcción a la cual se le implementará el sistema de aislamiento sísmico cumple ciertos requerimientos (tipo de suelo,

periodo del conjunto aislado, dimensiones en planta, altura de la construcción, etc), mientras que al segundo método no se le imponen limitaciones extremas. El código tiene definidas las expresiones de los desplazamientos laterales mínimos y máximos del conjunto aislado y un desplazamiento total que tiene en cuenta los efectos de torsión. Se definen expresiones de periodo efectivo del sistema aislado, espectros y acelerogramas de diseño. Establece los ensayos a realizar sobre los aisladores para determinar la rigidez efectiva y el amortiguamiento efectivo (UBC-97).

La versión del año 1997 modificó los coeficientes de proximidad a la falla por los cuales hay que afectar a los valores del desplazamiento estático del sistema de aislamiento. De acuerdo a lo tratado en el capítulo 4 se ha concluido que los efectos de proximidad a la falla introducen diferencias, en términos de velocidades y por lo tanto también de desplazamientos, cuando se tiene en cuenta la ubicación relativa del epicentro en relación con el emplazamiento de la construcción. Por lo tanto el UBC-97 introduce coeficientes que aumentan el desplazamiento estático del sistema de aislamiento para distancias menores a 7.5 Km. y 5 Km., mientras que para distancias mayores a 10 Km. dicho desplazamiento no se modifica (UBC-97).

El capítulo 13 del FEMA 450 (*Federal Emergency Management Agency, 2003*) define los requerimientos de diseño de las estructuras con aislamiento sísmico. En el mismo se precisan distintos parámetros del diseño, entre los cuales se distinguen: desplazamiento total de diseño, desplazamiento total máximo incluidos los efectos de la torsión accidental del sistema. Se definen, además, los espectros de diseño y los aspectos reglamentarios a tener en cuenta en la evaluación de la respuesta en el dominio del tiempo, sobre todo las relacionadas con los parámetros de los terremotos utilizados en el análisis.

Los métodos de análisis que especifica son: fuerzas laterales equivalentes (restringido a ciertos tipos de construcciones: clase, altura, periodo de la estructura aislada, etc), métodos dinámicos (sin limitaciones), espectros de respuesta (restringidas a construcciones clasificadas en una determinada clase) y métodos que tengan en cuenta las variaciones de las propiedades de los materiales de los aisladores. El código precisa además, los requerimientos de inspección y reemplazo de componentes ubicados en la interfase del aislamiento, los valores mínimos de las fuerzas laterales a considerar en la estructura con aislamiento y su distribución en altura (FEMA 450).

Por último el citado código indica los ensayos a realizar sobre los sistemas a utilizar en el aislamiento sísmico (número de elementos a ensayar, número de ciclos, cargas verticales que se deben aplicar, etc.), los parámetros a individualizar de los ensayos para definir el amortiguamiento efectivo (β_{eff}) y la rigidez efectiva tanto en su valor máximo como en el mínimo ($K_{D_{max}}$, $K_{D_{min}}$) (FEMA 450).

En 1994 la Comisión Europea de Energía atómica y ENEA (*Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente*), publican una guía para el diseño de plantas nucleares con sistemas de aislamiento sísmico (Forni, M., et al. 1994). Dichas guías abarcan una amplia gama de recomendaciones a tener en cuenta en los sistemas de aislamiento sísmico en general y en particular para las plantas nucleares. La guía consta de 15 capítulos los cuales tratan: definición de los terremotos para realizar un análisis de la respuesta en el tiempo, requerimientos de diseños y métodos de análisis de los sistemas de aislamiento, especímenes a ser ensayados, grado y margen de seguridad del sistema de aislamiento conjuntamente con el monitoreo a realizar en el tiempo.

Dicha guía es uno de los primeros documentos que advierte la necesidad de tener en cuenta los efectos de falla cercana (Ver Capítulo 4), basados en estudios del NUREG (*U.S. Nuclear Regulatory Comisión, 1979*) y llama la atención sobre el emplazamiento relativo de la estructura en relación con la fuente sísmica y de ello, la posición de la planta con respecto a la traza de la falla. Establece una diferencia entre terremotos que provienen de “*fuentes cercanas*” o de “*fuentes lejanas*”, mientras en los primeros el fenómeno de atenuación y condiciones locales posee una importancia menor con relación al tipo de movimiento de suelo, en los segundos las características del tipo de movimiento de suelo se encuentran fuertemente influenciados por los fenómenos de atenuación y condiciones locales del suelo (Forni, M., et al, 1994).

El Eurocode 8 (EC8) contiene dos capítulos destinado a sistemas de aislamiento sísmico, uno para edificios y el otro para puentes y viaductos (Martelli, A., 2005). El reglamento contiene aspectos que permite un diseño consistente no lineal de los sistemas de aislamiento. Otros capítulos contemplan el uso de estrategias de disipación de energía y de ellos, criterios generales y métodos de análisis para el diseño. De esta manera los sistemas de aislamiento sísmico no requieren (a partir de mayo/2003) permisos especiales para ser utilizados.

El reglamento EC8 es menos restrictivo que los reglamentos utilizados en Estados Unidos de Norteamérica (por ejemplo UBC-97) debido a que acepta utilizar ampliamente las ventajas y beneficios del aislamiento. Ello permite reducir, en forma importante, las aceleraciones y fuerzas en la superestructura en la medida que se acepte desarrollar el mecanismo de bloque rígido del edificio ubicado por encima de los aisladores. El reglamento permite, mediante un diseño apropiado del sistema de aislamiento, controlar los efectos de asimetría del edificio y con ello minimizar los efectos de torsión del edificio aislado.

Los diseños de sistemas de aislamiento sísmico en Japón, hasta el año 2000, requerían, como en otros países, la aprobación de una comisión especial. Con la formulación del nuevo código en el año 2001, dicha aprobación no es requerida a excepción de los grandes edificios, lo cual también se requiere para el caso de que el mismo sea de base fija.

Dentro de la región, Chile posee un código para el análisis y diseño de edificios con aislamiento sísmico designado como NCh2745. Of. 2003. El mismo ha sido diseñado siguiendo una estructura muy didáctica en cuanto al tema de aislamiento sísmico debido a que dedica buena parte de su estructura a explicar los propósitos del código. En el mismo se definen los procedimientos de análisis a utilizarse: métodos estáticos (restrictivos al emplazamiento de la estructura con relación a su distancia a la falla, tipo de suelo, altura, periodo efectivo de la estructura aislada, configuración de la estructura, etc.), métodos dinámicos y entre ellos el análisis espectral (restrictivos a estructuras emplazadas en un determinado tipo de suelo); análisis de la historia de la respuesta en el tiempo (sin restricciones) y análisis utilizando espectros de diseños específicos del lugar (para suelos muy blando o con proximidad a la falla menores a 10 Km. de distancia).

El reglamento muestra algunas leyes constitutivas clásicas para aisladores de goma de bajo amortiguamiento, con núcleo de plomo y de alto amortiguamiento junto a las expresiones para evaluar la resistencia característica (Q), el módulo efectivo secante (G_{ef}), la rigidez vertical de los aisladores (K_z) y la de posfluencia (K_p). El mismo esquema se presenta para los aisladores friccionales y sistemas híbridos. El código además precisa las expresiones para evaluar el periodo efectivo correspondiente al desplazamiento de diseño (T_D), al desplazamiento máximo (D_M) y total, el cual tiene en cuenta los efectos de torsión (D_{TD} , D_{TM}). Se definen los valores mínimos de las fuerzas laterales a considerar en la superestructura y su distribución con la altura de la misma (Nch 2745, 2003).

Para los análisis dinámicos define las características de los terremotos a considerar en el mismo e indica las condiciones de inspección y reemplazo de elementos que conforman el sistema de aislamiento sísmico; precisa los ensayos requeridos para el sistema de aislamiento (números de ensayos, número de ciclos y aprobación del sistema) (Nch 2745, 2003).

Los dos códigos en uso en la Provincia de Mendoza, Código de Construcciones Sismorresistente (CCSR, 1987) e INPRES – CIRSOC 103 (1991), no incluyen dentro de sus contenidos, sistemas de disipación de energía ni tampoco de aislamiento sísmico. Dicha falta pone en evidencia el retraso que manifiesta Argentina respecto a países avanzados y de otros de la región (Chile). En consecuencia es necesario e importante una inmediata revisión de los actuales reglamentos con el objeto de contar con un marco normativo que permita desarrollar las mencionadas técnicas en las prácticas habituales de la ingeniería. Los resultados y conclusiones de la presente tesis tienen como objeto, en parte, contar con material de apoyo para utilizarlo en aspectos normativos sobre sistemas de aislamiento sísmico.

5.4. Marco y formulación teórica del aislamiento sísmico

5.4.1. Teoría lineal del aislamiento. Funciones de transmisibilidad

El sistema de aislamiento sísmico más simple es aquel en el cual la masa “ m ” se encuentra soportada por un dispositivo de baja rigidez a los desplazamientos horizontales “ x ”, el cual cumple la función de aislar la misma de la excitación externa. La acción exterior del terremoto puede ser representada por un desplazamiento del suelo con variación sinusoidal “ u_g ” (Fig. 5.8).

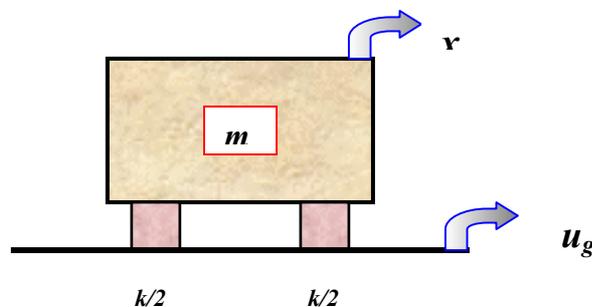


Fig. 5.8: Esquema básico del aislamiento sísmico (Fuente Kelly, J., 1993, 1996, adaptado)

La efectividad del aislamiento sísmico para proporcionar una protección de las vibraciones de la masa “ m ”, se define el concepto de **transmisibilidad** (“ T ”) (ecuación 5.3.; 5.6), como la relación entre el valor máximo de los desplazamiento absolutos de la masa y del suelo. La variación de los desplazamientos en el tiempo de la excitación exterior, se admite del tipo sinusoidal (ecuación 5.1) como también la respuesta en términos de desplazamientos de la masa “ m ” (ecuación 5.2).

$$u_g = \bar{u}_g e^{i\omega t} \quad 5.1.$$

$$x = \bar{x} e^{i\omega t} \quad 5.2.$$

$$T = \frac{\bar{x}}{\bar{u}_g} \quad 5.3.$$

Donde: \bar{x} = Máximo desplazamiento de la masa.
 \bar{u}_g = Desplazamiento máximo absoluto del terreno.
 ω = Frecuencia de la excitación exterior.

La transmisibilidad puede definirse también en término de una relación de aceleraciones absolutas, es decir:

$$\ddot{u}_g = \bar{a}_g e^{i\omega t} \quad 5.4.$$

$$\ddot{x} = \bar{a} e^{i\omega t} \quad 5.5.$$

$$T = \frac{\bar{a}}{\bar{a}_g} \quad 5.6.$$

\bar{a} = Máximo aceleración de la masa.
 \bar{a}_g = Aceleración máxima absoluta del terreno.

La ecuación de movimiento de la masa, sujeta a la acción del movimiento del suelo, se expresa mediante la ecuación (5.7). Luego si se define la razón de amortiguamiento crítico por la (5.8) y la frecuencia natural con (5.9), la ecuación de movimiento queda expresada con la forma indicada en la (5.10).

$$m \ddot{x} = -c(\dot{x} - \dot{u}_g) - k(x - u_g) \quad 5.7.$$

$$\beta = \frac{c}{2\omega_o m} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad 5.8.$$

$$\omega_o^2 = \frac{k}{m} \quad 5.9.$$

$$\ddot{x} = -2\omega_o \beta(\dot{x} - \dot{u}_g) - \omega_o^2(x - u_g) \quad 5.10.$$

Los valores de “ u_g ” y “ x ” han sido definidos por las ecuaciones (5.1) y (5.2) respectivamente, por lo tanto la expresión de amplitud de transmisibilidad queda:

$$\frac{\bar{x}}{\bar{u}_g} = \frac{1 + 2i\beta\Omega}{1 + 2i\beta\Omega - \Omega^2} \quad 5.11.$$

Donde: $\Omega = \frac{\omega}{\omega_o}$

ω = frecuencia de la excitación exterior.

ω_o = frecuencia propia del sistema.

El cociente de la suma de complejos tiene solución en el campo real ⁽¹⁾, por lo que la expresión de la amplitud de la transmisibilidad queda expresada por la ecuación (5.12):

$$T = \left[\frac{1 + 4\beta^2\Omega^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2} \right]^{1/2} \quad 5.12.$$

Si se analiza la ecuación (5.12) se observa que cuando $\Omega=0$ el valor de $T = 1$.

Cuando $\Omega=1$ $T = (1 + 4\beta^2)^{1/2} / 2\beta$. Cuando β es pequeño, $T \approx 1/2\beta$. Por otro lado cuando $T = 1$, $\Omega^2 = 2$, independientemente del valor de “ β ”, por lo tanto “ T ” es siempre menor que uno cuando $\Omega > \sqrt{2}$ (Tabla 5.9)

Tabla 5.9: Valores límites de la función de transmisibilidad “ T ” para amortiguamiento viscoso.

<i>Relación de frecuencias cuando tiende a...</i>	<i>Función de transmisibilidad (T) para amortiguamiento viscoso</i>
$\Omega \rightarrow 0$	$T \rightarrow 1$
$\Omega \rightarrow 1$	$T \rightarrow \frac{\sqrt{1+4\beta^2}}{2\beta} \approx \frac{1}{2\beta}$
$\Omega \rightarrow \sqrt{2}$	$T \rightarrow 1$
$\Omega \rightarrow \infty$	$T \rightarrow \frac{2\beta}{\Omega}$

La variación de la transmisibilidad “ T ” para un vibrador de un grado de libertad, en función de la relación de frecuencias y para distintos valores de “ β ”, se observarse en la figura 5.10.

La medición de la transmisibilidad suele realizarse en “decibeles” ($decibeles = 20 \log_{10} T$), por lo tanto es habitual que la representación se realice en escala logarítmica para el eje de las abscisas (Kelly, J., 1993, 1996). En ambos gráficos puede observarse que el valor de “ T ” decrece para valores altos de “ Ω ”. Es decir que para valores elevados de “ Ω ”, el valor de “ T ” disminuye con la relación: $T \approx 2\beta/\Omega$, por lo tanto valores altos de amortiguamiento tienden a reducir la efectividad del sistema de aislamiento para altas frecuencias, sin embargo el amortiguamiento es esencial para evitar la resonancia ($\Omega=1$).

$$(1) \quad \frac{|a+ib|}{|c+id|} = \frac{(a^2+b^2)^{1/2}}{(c^2+d^2)^{1/2}}$$

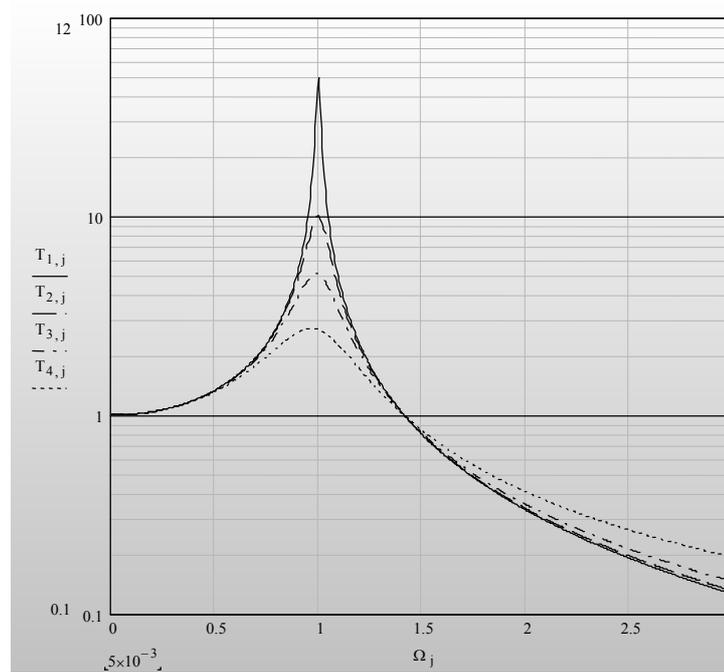


Fig. 5.10: Variación de la transmisibilidad “T” de un vibrador de un grado de libertad para amortiguamiento viscoso (Fuente: Módulo Dinámica de Suelos. Prof. Mauricio Sarrazin. Maestría en Ingeniería Estructural sismorresistente. FRM. UTN, 2004)

El modelo de viscosidad lineal no es adecuado para representar el comportamiento de ciertos tipos de aisladores (por ejemplo los elastoméricos) (Kelly, J., 1993, 1996), por lo que se hace necesario evaluar las funciones de transmisibilidad con amortiguamiento histerético. Las funciones de trasmisibilidad, para ambos tipos de amortiguamiento, son muy parecidas en su forma, sin embargo presentan diferencias, respecto al amortiguamiento viscoso y para valores de “ Ω ” tendiendo a uno e infinito. Para cumplir los objetivos de la presente tesis y dado el sistema de aislamiento utilizado para el desarrollo de la misma es pertinente el amortiguamiento viscoso en lugar del histerético por lo tanto en el punto 5.4.4. del presente capítulo se analiza la energía disipada en presencia de amortiguamiento viscoso.

Para el caso particular de estructuras con aislamiento sísmico es conveniente utilizar procedimientos de cálculos no lineales como podría ser el método paso a paso o historia de la respuesta en el dominio del tiempo. Sin embargo para ciertos tipos de aisladores (elastoméricos), (tema a tratar en el punto 5.4.6) es posible, mediante una linealización de las ecuaciones de movimiento, plantear un sistema lineal equivalente (Kelly J., 1991; Shustov, 1992; Skinner et al, 1993). Existen otros tipos de aisladores (friccionales) en los cuales es difícil linealizar las ecuaciones de movimiento si bien se han propuestos modelos no lineales de un grado de libertad (Bozzo et al, 1990).

La teoría lineal del aislamiento sísmico de dos grados de libertad, se basa en considerar dos masas, la “ m_s ” que representa la masa de la superestructura y la “ m_b ” que considera la masa de la estructura de fundación que se encuentra por encima del sistema de aislamiento incluido el mismo (Fig. 5.11).

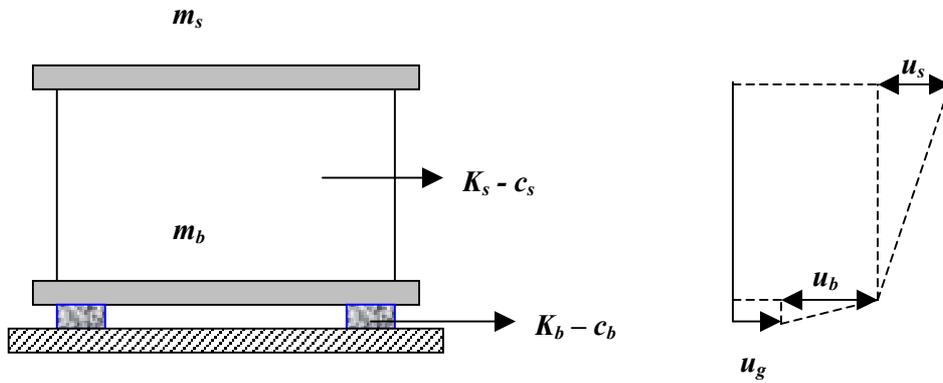


Fig. 5.11: Modelo de 2 GDL para representar la estructura aislada (Fuente: Naeim F., et al, 1999, adaptado)

En la figura precedente se representa con “ K_b ” y “ K_s ”, las rigideces del sistema de aislamiento y de la superestructura respectivamente, con “ c_b ” y “ c_s ” los coeficientes de amortiguamiento viscoso de los dos niveles considerados, “ u_g ”, el desplazamiento absoluto del terreno, “ u_b ”, el desplazamiento relativo del sistema de aislamiento con respecto al suelo y “ u_s ”, el desplazamiento relativo de la superestructura con respecto a la fundación.

Se define:
$$M_t = m_b + m_s \quad 5.13.$$

La ecuación del movimiento del modelo de dos grados de libertad se expresa como:

$$(m_s + m_b)\ddot{u}_b + m_s \ddot{u}_s + c_b \dot{u}_b + k_b u_b = -(m_s + m_b)\ddot{u}_g \quad 5.14.$$

$$m_s \ddot{u}_b + m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s = -m_s \ddot{u}_g \quad 5.15.$$

Tratándose de un sistema de dos grados de libertad se puede utilizar la notación matricial:

$$\begin{bmatrix} M_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad 5.16.$$

$$M_t \ddot{u} + C \dot{u} + K u = -M_t j \ddot{u}_g \quad 5.17.$$

Donde “ j ” es el vector que vincula el grado de libertad correspondiente al movimiento del suelo. La solución de la ecuación (5.17) está asociado a un problema de valores y vectores propios del tipo:

$$(K - \omega^2 M_t) \varphi = 0 \quad 5.18.$$

En la ecuación (5.18) el valor de “ ω ” representa la frecuencia del sistema y “ φ ” su correspondiente forma modal. La ecuación característica para la frecuencia puede explicitarse de la siguiente forma:

$$\omega^4 (1 - \gamma) - \omega^2 \left(\frac{K_b}{m_s + m_b} + \frac{K_s}{m_s} \right) + \frac{K_s}{m_s} \frac{K_b}{(m_b + m_s)} = 0 \quad 5.19.$$

El factor “ γ ” define la relación de masas:

$$\gamma = \frac{m_s}{(m_s + m_b)} = \frac{m_s}{M_t} \quad 5.20.$$

La solución de la ecuación (5.19) proporciona dos frecuencias naturales, asociadas a los dos grados de libertad del sistema. Si se define la frecuencia de la estructura y la del sistema de aislamiento, respectivamente como:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{K_s}{m_s}} \quad 5.21.$$

$$\omega_b = \sqrt{\frac{K_b}{m_b + m_s}} \quad 5.22.$$

La solución de la ecuación (5.19) resulta:

$$\omega_{1-2}^2 = \frac{\omega_b^2 + \omega_s^2}{2(1 + \gamma)} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4(1 - \gamma)}{(1 + \gamma)^2}} \right] \quad 5.23.$$

El coeficiente “ ε ” de la ecuación (5.23) representa la relación entre las frecuencias naturales.

$$\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} \quad 5.24.$$

Si se explicita las raíces de la ecuación (5.23), los valores de las frecuencias naturales pueden expresarse como:

$$\omega_1^2 \cong \omega_b^2(1 - \gamma\varepsilon) \qquad \omega_2^2 \cong \frac{\omega_s^2}{(1 - \gamma)}(1 + \gamma\varepsilon) \qquad 5.25.$$

La rigidez de estructura “ K_s ”, es muy alta comparada con la rigidez del sistema de aislamiento “ K_b ”, por lo tanto el factor “ ε ” tiene un valor pequeño. En general desde un punto de vista práctico es habitual tomar el valor ($\varepsilon = 0.01$) (Kelly J., 1991). En consecuencia el cuadrado de dicho valor es muy próximo a cero, el término $(1+\varepsilon)^2 \cong 1$ y la ecuación 5.25 queda reducida a las siguientes expresiones.

$$\omega_1^2 \cong \omega_b^2 \qquad \omega_2^2 \cong \frac{\omega_s^2}{(1 - \gamma)} \qquad 5.26.$$

El valor de “ ω_1 ” representa la frecuencia modificada del sistema de aislamiento y la “ ω_2 ” la frecuencia modificada de la estructura. De la observación de las anteriores ecuaciones se concluye que el período de una estructura con aislamiento sísmico es similar al período del sistema aislante. Conocidos los valores propios de las frecuencias “ ω_1 ” “ ω_2 ”, es posible expresar los vectores propios que permiten resolver el sistema lineal dado por la ecuación (5.18):

$$\varphi_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{\varepsilon}{\gamma} \end{bmatrix} \qquad \varphi_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{\gamma} \end{bmatrix} \qquad 5.27.$$

El vector propio correspondiente al primer modo de vibración indica que la totalidad del movimiento lateral de la estructura, se concentra en la base y el desplazamiento relativo entre los restantes pisos es una variable de segundo orden, por lo tanto, es posible considerar que el comportamiento estructural de edificios aislados sísmicamente es similar al de un sólido rígido con desplazamiento lateral concentrado en la base (Bozzo et al., 1990).

Si se utilizan los procedimientos clásicos de la dinámica estructural, los vectores propios (ecuaciones 5.27), permiten desacoplar las ecuaciones del movimiento dadas por las

expresiones (5.16. y 5.17). Dicho procedimiento conduce a los factores de amortiguamiento modal “ β ” y los de participación modal “ L ”:

$$\beta_1 = \beta_b (1 - 1.5 \gamma \varepsilon) \cong \beta_b$$

$$\beta_2 = \frac{\beta_s + \gamma \beta_b \varepsilon^{1/2}}{(1 - \gamma)^{1/2}} \left(1 - \frac{\gamma \varepsilon}{2}\right) \cong \frac{1}{(1 - \gamma)^{1/2}} (\beta_s + \gamma \beta_b \varepsilon^{1/2}) \quad 5.28.$$

$$L_1 = 1 - \gamma \varepsilon \cong 1 \quad L_2 = \gamma \varepsilon \quad 5.29$$

Los factores de amortiguamiento de la estructura y del sistema de aislamiento incluidos en las ecuaciones (5.28) pueden expresarse como:

$$2 \omega_b \beta_b = \frac{c_b}{m_s + m_b} \Rightarrow \beta_b = \frac{c_b}{2 \omega_b (m_s + m_b)}$$

$$2 \omega_s \beta_s = \frac{c_s}{m_s} \Rightarrow \beta_s = \frac{c_s}{2 \omega_s m_s} \quad 5.30$$

El valor de “ γ ” es siempre menor que la unidad y el “ ε ”, como se citó anteriormente es aproximadamente 0.01, por lo tanto el factor de participación del segundo modo es mucho menor que el del primer modo. Esta situación permite controlar los desplazamientos relativos de piso para estructuras que eventualmente se encuentren vibrando en el segundo modo. Por otro lado, es posible que la excitación sísmica tenga un contenido de frecuencias con un periodo predominante similar al primer modo de la estructura, es decir que la respuesta puede no ser favorable debido a que su valor máximo está condicionada por el coeficiente de amortiguamiento del sistema de aislamiento “ β_b ” (ecuaciones 5.30).

En consecuencia para diseñar una estructura con aislamiento sísmico es importante tener presente el contenido de frecuencias de los terremotos del lugar de emplazamiento del edificio. Los espectros para suelos blandos presentan una tendencia a aumentar la ordenada espectral según se incrementa el periodo de la estructura, por lo tanto no es aconsejable el empleo de aisladores elastoméricos (ver punto 5.4.6) en suelos blandos. La dependencia del contenido de frecuencias del terremoto no resulta tan marcada en otros tipos de aisladores, por ejemplo los friccionales (Bozzo et. al, 2000).

5.4.2. Teoría no lineal del aislamiento sísmico

Durante varios años la simulación numérica de las estructuras aisladas para encontrar y desarrollar algoritmos de cálculo no lineales eficientes que permitan soluciones, dentro de la no linealidad de las ecuaciones de movimiento, ha sido motivo de numerosos trabajos de investigación (Nagarajaiah et. al, 1991, Barbat, et al., 1997). Los métodos desarrollados proponen procedimientos para realizar la integración en el tiempo. Uno de los métodos utilizados se conocen como “*monolíticos*” los cuales no distinguen los grados de libertad asociados de la estructura de aquellos que corresponden al sistema de aislamiento sísmico, por lo tanto son métodos pocos eficientes para estructuras aisladas (Bozzo L. M., et al, 2000).

Los algoritmos basados en una “*condensación estática*” son los más utilizados porque permiten reducir el orden del problema no lineal al número de grados de libertad inelástico, es decir, por ejemplo en un edificio de cuatro niveles con tres grados de libertad por planta, tiene un total de quince grados de libertad, incluido los tres de la base, entonces un procedimiento numérico basado en la condensación estática reduce el problema no lineal a sólo los tres grados de libertad correspondiente a la base.

Por último existen métodos iterativos que permiten resolver las ecuaciones del movimiento de estructuras con aislamiento sísmico (Bozzo L. M., et al, 2000), se los conoce como métodos iterativos por bloques y resultan ser la combinación de procesos iterativos con la linealización de los términos no lineales (Barbat A., et al, 1996).

5.4.2.1. *Métodos monolíticos de integración paso a paso*

Para realizar un análisis no lineal de la respuesta sísmica de una estructura con aislamiento sísmico, la ecuación del movimiento puede expresarse como:

$$M_o \ddot{X} + C \dot{X} + f(X) = F \quad 5.31.$$

La ecuación es similar a la (5.38), donde el vector “ $f(X)$ ” representa las fuerzas no lineales, sin embargo el mismo puede linealizarse en términos de las fuerzas equivalentes pseudo estáticas en cada paso de tiempo:

$$f(X) = K_o X + F_N \quad 5.22.$$

En la última ecuación “ K_o ” representa la matriz de rigidez, la cual es lineal y puede ser evaluada con la tangente inicial; “ F_N ” representa el vector de pseudofuerza el cual es función del tiempo. La ventaja de utilizar pseudofuerzas se debe a que la matriz de rigidez original se descompone una sola vez, al inicio de la integración y precisamente este hecho es lo que hace que el método numérico sea poco eficiente. Por lo tanto el problema no lineal se resuelve evaluando las fuerzas equivalentes en cada paso, si ellas corresponden a un número reducido de grados de libertad, el procedimiento numérico puede ser aceptable (Bozzo L. M., et al, 2000).

5.4.2.2. Métodos de iteración por bloques

Encontrar la solución no lineal de un sistema con aislamiento no es una tarea simple debido a las diferencias importantes de rigideces entre la estructura y la base. Dichas diferencias exige que los incrementos de tiempos, en un análisis paso a paso, sean muy pequeños, por lo tanto requieren un gran número de iteraciones lo que hace su convergencia muy lenta (Barbat A., et al, 1996). Por la causa explicada el método realiza esquemas de iteración por bloque, lo que permite reducir el número de iteraciones y disminuye el tiempo de convergencia (Bozzo L. M., et al, 2000).

Con el objeto de expresar los lineamiento globales del método se supone un ejemplo para un problema genérico acoplado:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22}(y) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} \quad 5.33.$$

En las ecuaciones del sistema (5.33), “ z ” e “ y ”, son vectores por determinar, “ q_1 ” y “ q_2 ” son los vectores de carga y “ A_{ij} ” con $i, j = 1, 2$, son matrices donde “ A_{22} ” depende del valor de “ y ”. Las ecuaciones del sistema (5.33) están acopladas linealmente. La matriz “ A_{22} ” se linealiza de la siguiente forma:

$$A_{22}(y^i) y^i \approx A_{22}^L y^i + \psi^{i-1} \quad 5.34.$$

A_{22}^L , es la forma linealizada de A_{22} . Entonces la ecuación (5.33) puede ser puesta como:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22}^L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z^i \\ y^i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 - \psi y^{i-1} \end{Bmatrix} \quad 5.35.$$

A partir de la ecuación (5.35) se emplea la iteración por bloque de Gauss-Seidel, de tal manera que se pueden expresar las siguientes dos ecuaciones acopladas (Bozzo L. M., et al, 2000):

$$A_{11} z^i = q_1 - A_{12} y^{i-1} \quad 5.36.$$

$$A_{22}^L y^i = q_2 - \psi y^{i-1} - A_{21} z^i \quad 5.37.$$

Con estas ecuaciones es posible formular un procedimiento iterativo por bloques. Se resuelve primero la ecuación (5.36) dando un valor a “ z^i ” y este se emplea para resolver la ecuación (5.37) para obtener el valor de “ y^i ”. El procedimiento se repite de la manera indicada hasta tanto el algoritmo matemático tenga convergencia.

De la observación de los métodos de análisis no lineal expuestos se concluye que el uso de los mismos, como herramienta de trabajo, requiere de una sólida formación en dicho campo. La ingeniería estructural hoy cuenta con herramientas de trabajo que resuelven con cierta fluidez problemas no lineales en general y también lo hacen para los sistemas de aislamiento sísmico. Programas computacionales para fines múltiples y específicos, (SAP, ETAB, 3D-BASIS-ME etc.) de ediciones recientes, han incorporado rutinas que permiten evaluar la respuesta no lineal de estructuras con aislamiento sísmico de base utilizando algunos métodos de la dinámica estructural (*modal, historia en el dominio del tiempo y paso a paso*). Esta herramienta, muy poderosa por cierto, permite “*ensayar*” distintas soluciones en un tiempo aceptable de manera tal de optimizar el diseño del sistema de aislamiento. El trabajo final de la presente tesis se ha apoyado fuertemente en dicha herramienta como elemento de trabajo. Muchos otros trabajos, relacionados con la evaluación de la respuesta de sistemas con aislamiento de base, han utilizado dichos programas computacionales con resultados aceptables (Wolf, E., et al, 2004).

5.4.3. Teoría del aislamiento sísmico de base aplicada a edificios de varios grados de libertad

La extensión de la teoría lineal del aislamiento sísmico de dos grados de libertad a varios grados de libertad fue formulada por Kelly J. (1993, Chapter 4, pp. 37 á 46). El modelo analítico es similar al de dos grados de libertad. Para varios grados de libertad, expresada en forma matricial, la formulación puede expresarse como:

$$M_o \ddot{X} + C \dot{X} + K X = -M_o J \ddot{u}_{g(t)} \quad 5.38$$

Se explicitan las matrices de la ecuación (5.38):

$$M_o = \begin{bmatrix} m_b + m_{tot} & J^t M_s \\ M_s J & M_s \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & C_s \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \quad J = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x_b \\ X_s \end{bmatrix}$$

(i) (ii) (iii) (iv) (v)

En la matriz (i) la “ M_s ” representa la matriz de masas del edificio y la “ m_{tot} ”, sumatoria de las masas del edificio ($m_{tot} = \sum_{i=1}^n m_i$).

En la matriz (ii) “ C_s ” representa la matriz de amortiguamiento de la estructura. En la (iii) “ K_s ”, es la matriz de rigidez de la estructura y en todos los casos el subíndice “ b ” está referido a las características del sistema de aislamiento.

Como en el caso de dos grados de libertad, la solución de la ecuación (5.38) está asociado a un problema de valores y vectores propios de la forma de la ecuación (5.18).

$$(K - \omega^2 M_o) \varphi = 0 \quad 5.39.$$

Las frecuencias y las formas modales pueden obtenerse aplicando métodos clásicos de la dinámica estructural que permitan encontrar la solución de la ecuación (5.39). Sin embargo la extensión realizada por Kelly J. (1993, 1996), indica que dichos métodos pueden conducir a errores numéricos originados por el mal condicionamiento de la matriz de rigidez debido a que aparece un elemento en la diagonal, dos órdenes de magnitud inferior al resto. Para darle solución a este problema el autor (Kelly J., 1993, 1996) propone un método iterativo que parte de las frecuencias y modos de vibración de la estructura con base fija. Los resultados numéricos indican que el procedimiento es adecuado, ya que las frecuencias a partir del

segundo modo no son afectadas de manera significativa por la presencia del sistema de aislamiento (Bozzo et al, 2000).

5.4.4. Influencia del amortiguamiento en la respuesta de los sistemas con aislamiento sísmico

El concepto de amortiguamiento adquiere relevancia para los fines de la tesis debido, fundamentalmente, al sistema de aislamiento sísmico utilizado en el desarrollo de la misma. Como podrá observarse en los capítulos que siguen el sistema implementado responde a los conocidos como sistemas mixtos o híbridos, en los cuales se destacan la presencia de aisladores instalados junto a amortiguadores, en este caso, viscoelásticos, por lo tanto es importante tener presente el concepto de disipación de energía asociada especialmente al amortiguamiento viscoso.

La ecuación de movimiento para sistemas traslacionales de un solo grado de libertad es representada por la ecuación 5.40, mientras que el factor de amortiguamiento o relación de amortiguamiento “ ξ ” se define por la ecuación (5.41).

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f_{(t)} \quad 5.40.$$

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c\omega_n}{2k} \quad 5.41.$$

Donde: c : Coeficiente de amortiguamiento del sistema.
 k : Rigidez del sistema.
 m : Masa del sistema.

El amortiguamiento critico “ c_c ”, se define por la expresión (5.42) y la razón de amortiguamiento “ ξ ”, por la (5.43).

$$c_c = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} \quad 5.42.$$

$$\xi = \frac{c}{c_c} \quad 5.43.$$

Un sistema vibratorio dinámico en el cual ($0 < \xi < 1$) se lo conoce como sistema *subamortiguado*, si ($\xi > 1$), se lo denomina sistema *sobreamortiguado*. Cuando $\xi = 1$ se dice que el sistema es *amortiguado críticamente*.

Los diferentes tipos de amortiguamiento, utilizados en los diseños de dispositivos especiales de disipación de energía, se encuentran referidos al amortiguamiento viscoso, el cual puede resumirse muy brevemente con el siguiente concepto. Cuando un líquido viscoso fluye alrededor de un émbolo en un cilindro (Fig. 5.12), la fuerza de amortiguamiento que se genera es proporcional a la velocidad relativa entre los dos límites que confinan el líquido.

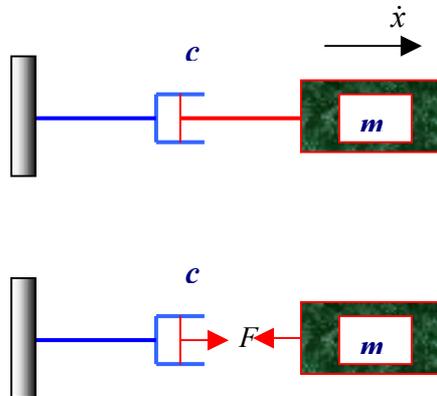


Fig. 5.12: Representación de un amortiguador viscoso.

En la figura anterior el pistón se desplaza con una velocidad (\dot{x}) respecto de la carcasa del cilindro, la cual está fija. La magnitud de la fuerza del amortiguador “ F ” siempre actúa en la dirección opuesta a la velocidad. La magnitud de la fuerza del amortiguador $F(\dot{x})$ es una función no lineal de la velocidad o bien puede considerarse aproximadamente una función lineal de la misma, lo cual depende de la construcción del amortiguador y del rango de velocidades. En el caso lineal, la relación se expresa según se indica en la ecuación (5.44).

$$F(\dot{x}) = c \dot{x} \tag{5.44}$$

Donde “ c ” es el coeficiente de amortiguamiento definido anteriormente. Para el caso de un amortiguador viscoso no lineal definido por una función “ $F(\dot{x})$ ”, el amortiguamiento viscoso lineal equivalente, próximo a una velocidad de operación “ $\dot{x} = \dot{x}_l$ ”, se determina con la ecuación 5.45.

$$c_e = \frac{dF(\dot{x})}{d\dot{x}} \Big|_{\dot{x}=\dot{x}_i} \quad 5.45.$$

La energía disipada por un amortiguador viscoso lineal puede expresarse por la ecuación 5.46.

$$E_d = \int F_D dx = \int F_D \dot{x} dt = \int c \dot{x}^2 dt = c \int \dot{x}^2 dt \quad 5.46.$$

Además del amortiguamiento viscoso, existen otros tipos de amortiguamientos entre los cuales se destacan: amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco, amortiguamiento por fluido o del cuadrado de la velocidad y amortiguamiento estructural o del material. Los dos primeros son amortiguamientos no lineales, mientras que el estructural es lineal. Es habitual relacionar los tres modelos de amortiguamiento con el modelo de amortiguamiento viscoso por medio de una cantidad llamada amortiguamiento viscoso equivalente “ c_{eq} ”, que es el valor del coeficiente de amortiguamiento “ c ” que se requiere para disipar la misma cantidad de energía por periodo de oscilación armónica forzada (Balachandran, B., et al, 2005).

En un sistema vibratorio, las fuerzas asociadas a la rigidez y la inerciales son conservativas, por lo tanto el trabajo que efectúa cada una de las fuerzas en cada uno de los ciclos de oscilación forzada es cero, en consecuencia, si se desea determinar la disipación de energía en un sistema vibratorio sólo debe ponerse atención en el amortiguador o en la fuerza de disipación (F_D). El valor de la energía disipada queda expresada por la ecuación (5.46).

Es posible suponer, para excitaciones armónicas de sistemas lineales después de que los transitorios se extinguen, que las respuestas de desplazamiento y velocidad tienen la forma que indican las ecuaciones (5.47). El periodo de las respuestas de desplazamiento y velocidad es “ $2\pi / \omega$ ” y “ ω ” es la frecuencia de la fuerza.

$$\begin{aligned} x_{(t)} &= X_o \text{sen}(\omega t - \phi) \\ \dot{x}_{(t)} &= \omega X_o \text{sen}(\omega t - \phi) \end{aligned} \quad 5.47.$$

Si se admite un modelo de amortiguamiento viscoso lineal, la fuerza disipativa viene dada por la ecuación (5.44). Si se sustituye dicho valor en la ecuación (5.46), la energía disipada resulta la cantidad indicada en la (5.48).

$$E_{vis\ cos\ o} = c \int_0^{2\pi/\omega} \dot{x}^2(t) dt \quad 5.48.$$

Si en ésta ultima ecuación se reemplaza la respuesta en términos de velocidad, del grupo de ecuaciones (5.47), la energía disipada puede expresarse como indica la ecuación (5.49).

$$E_{vis\ cos\ o} = c\omega^2 X_o^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2(\omega t - \phi) dt = c \pi \omega X_o^2 \quad 5.49.$$

La ecuación (5.49) indica que la energía disipada es linealmente proporcional al coeficiente de amortiguamiento “c”, a la frecuencia de excitación “ω” y al cuadrado de la amplitud del desplazamiento “X_o”.

Para otros modelos de amortiguamiento también es posible cuantificar la energía disipada a través del amortiguamiento viscoso equivalente “*c_{eq}*” (Balachandran, B., et al, 2005). Si bien los mismos tienen menos relevancia para los objetivos de la tesis es posible citar que para el caso de amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco, la energía disipada (*E_{Coulomb}*) es proporcional al coeficiente cinético de fricción (*μ*), a la carga normal (*N = m.g*) y a la amplitud del desplazamiento (*X_o*) (ecuación 5.50.), mientras que el coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente es inversamente proporcional a la frecuencia de excitación y a la amplitud de la respuesta de desplazamiento (*X_o*) (ecuación 5.51).

$$E_{Coulomb} = 4\mu m g X_o \quad 5.50.$$

$$c_{eq} = \frac{4\mu m g}{\pi\omega X_o} \quad 5.51.$$

Por último para amortiguamiento por fluido, la energía disipada es proporcional a un coeficiente “*c_d*” el cual depende del área de la masa del liquido en una dirección normal y de la densidad de la masa del fluido; del cuadrado de la frecuencia de excitación y del cubo de la amplitud de desplazamiento (*X_o*) (ecuación 5.52), mientras que el coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente es proporcional a la frecuencia de excitación y a la amplitud de la respuesta (ecuación 5.53).

$$E_{\text{fluido}} = \frac{8}{3} c_d \omega^2 X_o^3 \quad 5.52.$$

$$c_{eq} = \frac{8 c_d \omega X_o}{3\pi} \quad 5.53.$$

La influencia del amortiguamiento en la respuesta de sistemas con aislamiento sísmico han sido evaluadas por distintos autores (Naeim F., et al, 1999, Jangid R., et al, 2001). Estudios teóricos del acoplamiento de las ecuaciones dinámicas para sistemas de aislamiento sísmico (Naeim F. et al., 1999), expresan conclusiones sobre la influencia del amortiguamiento en los valores de las aceleraciones de piso. En la práctica y para los casos frecuentes se asume que los términos ubicados fuera de la diagonal principal de la matriz de coeficientes de amortiguamiento “C” son despreciables, lo que permite resolver el sistema de ecuaciones del movimiento como un sistema desacoplado, bajo esta condición y con procedimientos simples es posible obtener, de manera rápida, la respuesta de la estructura con aislamiento sísmico (desplazamientos, cortes en la base, distorsión de piso, etc.).

Sin embargo para determinados terremotos, sobre todo y específicamente para los asociados a campo cercano, o para requerimientos de códigos actuales (UBC-97), se hace necesario controlar los importantes valores de desplazamientos que le imponen tales requerimientos. Dichos desplazamientos pueden ser limitados con la adición de amortiguamiento al sistema de aislamiento sísmico. Los aisladores más comúnmente utilizados (elastoméricos, friccionales, combinados, etc) son capaces de proveer valores de amortiguamiento limitados (del orden del 10%) y los mismos no son viscosos. Para valores más importantes de amortiguamiento, las ecuaciones no pueden desacoplarse por lo que deberían utilizarse un análisis más complejo, algunos de ellos desarrollados por otros autores (Kelly J., 1993, 1996).

Los trabajos realizados sobre el acoplamiento de las ecuaciones de movimiento realizados por Naeim F., et al. (1999) pueden resumirse en la gráfica de la Fig. 5.13, donde se representa la variación de la aceleración de piso en función del factor de amortiguamiento (β_d). El trabajo determina el valor de la aceleración máxima ($|\ddot{u}_s|_{\max}$), como suma de dos términos, $|\ddot{u}_s^{(1)}|_{\max}$, $|\ddot{u}_s^{(3)}|_{\max}$ y su valor máximo se obtiene para un amortiguamiento del 26%, mientras que el mínimo se obtiene para un 12%. Por lo tanto si uno aumenta el amortiguamiento se logra

reducir el desplazamiento del sistema de aislamiento a expensas de mayores valores de aceleración y distorsiones de piso.

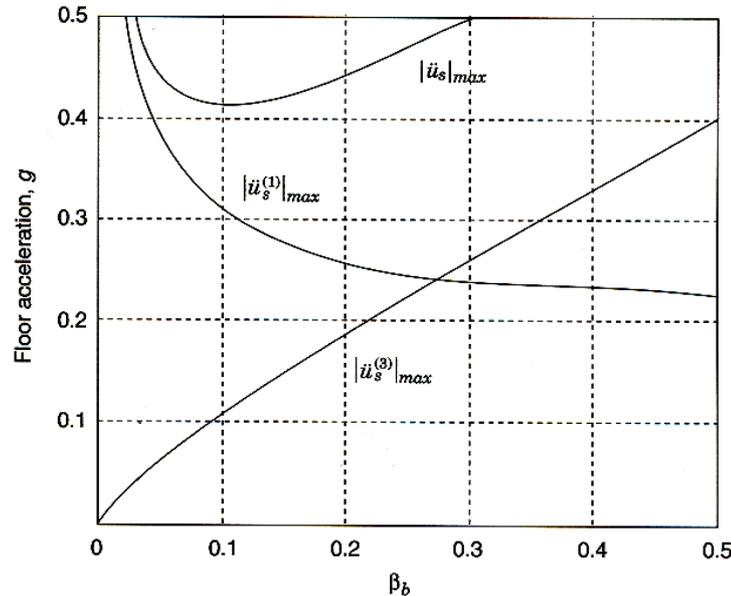


Fig. 5.13. Influencia del factor de amortiguamiento “ β_d ” en los valores de aceleraciones de piso (Fuente Naeim F., et al, 1999)

Si bien el autor destaca y concluye que el aumento de amortiguamiento puede ser perjudicial comparado con otro sistema de aislamiento sísmico, que contenga menor valor de amortiguamiento, se considera que la conclusión ofrece una respuesta parcial al problema sobre todo porque no contempla dos factores, el primero dar una solución a los efectos que provoca la presencia de pulsos largos en los terremotos de falla cercana (Ver capítulo 4) y la segunda los requerimientos de grandes dimensiones exigidas a los aisladores para controlar los valores de desplazamientos que imponen dichos pulsos (esto sin enumerar los espacios que deben disponerse para permitirse el libre movimiento).

Trabajos realizados para evaluar la respuesta del sistema de aislamiento para terremotos de falla cercana (Jangid, R. S., et al, 2001) obtuvieron conclusiones similares. Para valores crecientes de amortiguamiento, la aceleración absoluta de la estructura primero decrece tendiendo a un mínimo valor y luego crece en la medida que aumenta el valor del amortiguamiento. Se observa que existe un rango de valores de amortiguamiento (valores óptimos) del sistema de aislamiento sísmico para los cuales las aceleraciones en la estructura son menores. En consecuencia los desplazamientos se reducen en la medida que aumenta el

amortiguamiento, si dicho valor aumenta más allá del valor óptimo, el desplazamiento no se reduce ya demasiado y se observan mayores valores de aceleraciones en la estructura.

El trabajo analiza la respuesta de la estructura con sistema de aislamiento en términos de desplazamientos del sistema y de aceleración de la estructura para periodos de base comprendidas entre 1.5 y 3.0 seg., periodos de la estructura entre 0.25 seg. y 0.75 seg. y factores de amortiguamiento entre el 5% y el 70%. Efectivamente el desplazamiento se reduce en la medida que aumenta el amortiguamiento, independientemente del valor de periodo de la estructura (Fig. 5.14). El valor del amortiguamiento a partir del cual comienza a crecer nuevamente la aceleración en la estructura, después de haber pasado por un valor mínimo, es de aproximadamente el 30% para todos los casos (Fig. 5.15) (Jangid, et al, 2001)

El trabajo (Jangid, R. S., et al, 2001) compara la respuesta de distintos sistemas de aislamiento sísmico frente a terremotos de falla cercana y concluye que el aislador de la “*Electricite-de-France*” (EDF) (Ver 5.4.6) representa una elección adecuada para terremotos de falla cercana debido a una mejor respuesta en términos de aceleraciones en la estructura. Sin embargo dichas respuestas fueron encontradas con una idealización fuerza-desplazamiento típica de dispositivos con comportamientos elasto-plástico, característicos de sistemas con valores altos de amortiguamiento que permitan mantener los ciclos histeréticos estables y sin degradación de rigidez (Fig. 5.16).

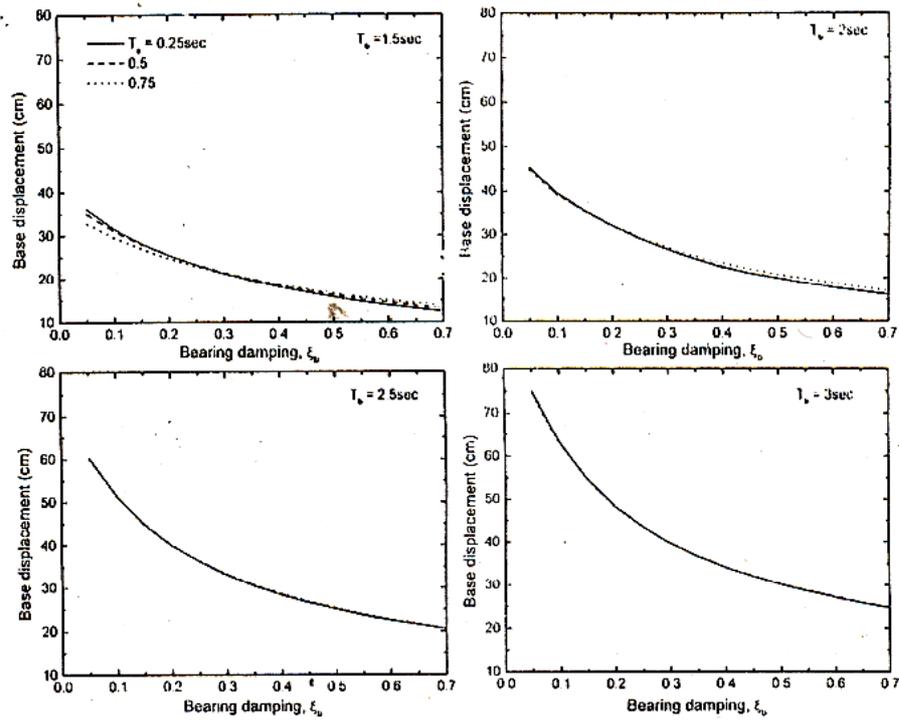


Fig. 5.14. Variación del desplazamiento en función del factor de amortiguamiento (Fuente: Jangid R. S., et al, 2001)

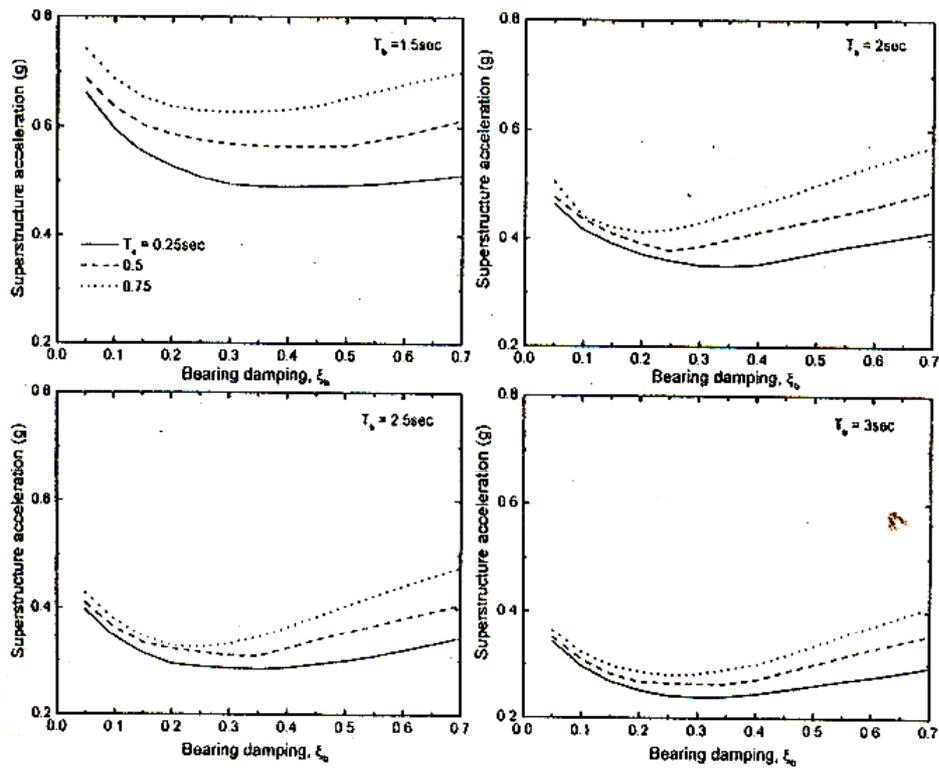


Fig. 5.15. Variación de la aceleración en función del factor de amortiguamiento (Fuente: Jangid R. S., et al, 2001)

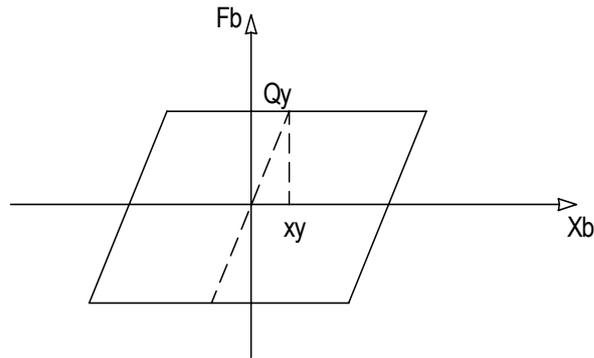


Fig. 5.16. Idealización “fuerza-deformación” de un dispositivo con comportamiento típico elasto-plástico (Fuente: Jangid R. S., et al, 2001)

5.4.5. Clasificación de los sistemas de control en la respuesta sísmica

Una clasificación acotado de los sistemas de aislamiento sísmico sería considerar solamente el punto de vista de la estrategia utilizada para disipar la energía que entrega el terremoto, sin embargo una visión más amplia del problema permite una clasificación según tres puntos de vistas que se encuentran relacionado con la solución ingenieril (Kitagawa Y., 1995).

1) Clasificación teniendo en cuenta los principios básicos de la dinámica

- 1.1) Sistemas para controlar las fuerzas sísmicas (Fig.5.17).
- 1.2) Sistemas para controlar el amortiguamiento (Fig. 5.18)
- 1.3) Sistemas para controlar las masas (Fig. 5.19)
- 1.4) Sistemas para controlar movimientos del terreno (Fig. 5.20)
- 1.5) Sistemas combinados entre los anteriores (También conocidos como sistemas híbridos).

2) Clasificación teniendo en cuenta la forma de disipación de energía

- 2.1) Sistemas pasivos de control (Fig. 5.21)
- 2.2) Sistemas activos de control (Fig. 5.22)

3) Clasificación teniendo en cuenta la posición del elemento disipador

- 3.1) Sistemas exteriores de disipación (por ejemplo sistemas de aislamiento sísmico) (Fig. 5.23)
- 3.2) Sistemas interiores de disipación (caso en el cual no entran los sistemas de aislamiento sísmico) (Fig. 5.24)

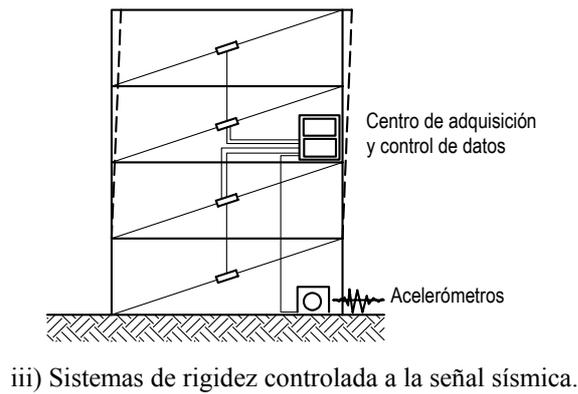
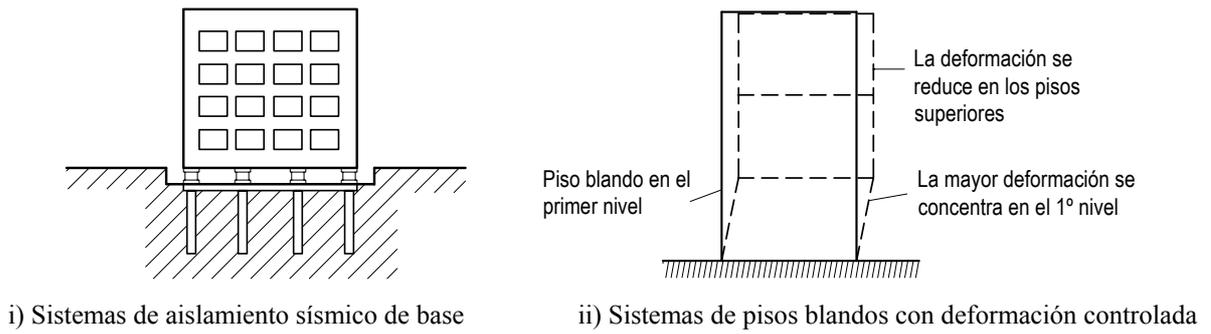


Fig. 5.17. Sistemas para controlar las fuerzas sísmicas (Fuente: Kitagawa Y., 1995, adaptado)

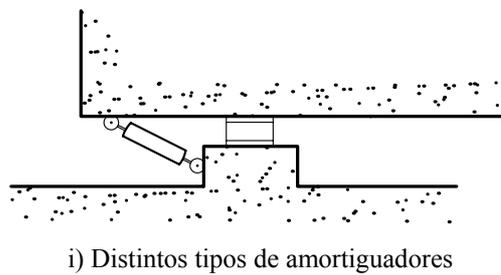


Fig. 5.18. Sistemas para controlar el amortiguamiento (Fuente: Kitagawa Y., 1995, adaptado)

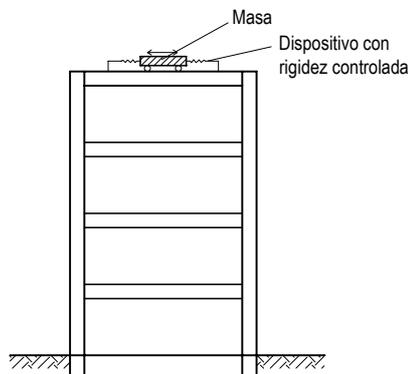


Fig. 5.19. Sistemas para controlar las masas (Fuente: Kitagawa Y., 1995, adaptado)

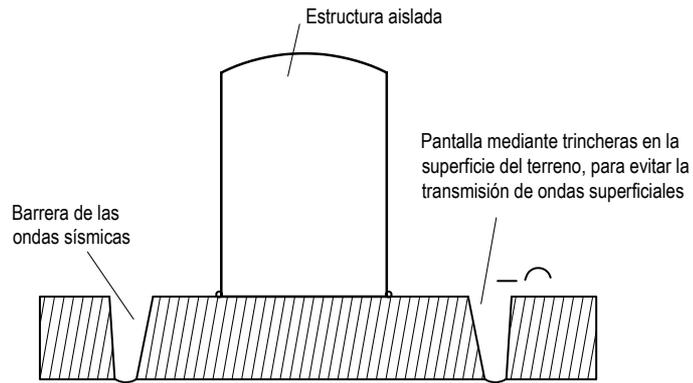


Fig. 5.20. Sistemas para controlar el movimiento del suelo (Fuente: Kitagawa Y., 1995, adaptado)

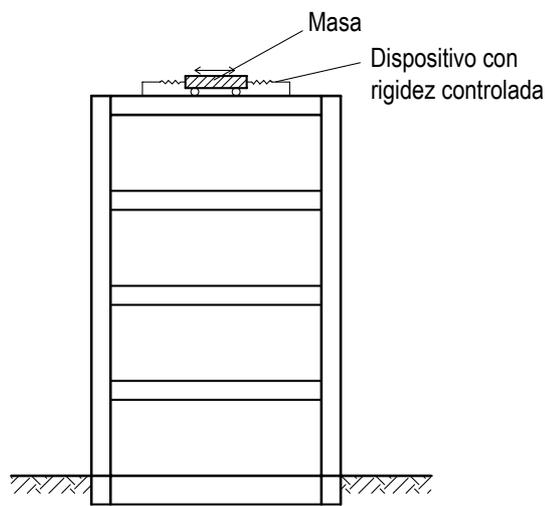


Fig. 5.21. Sistemas pasivos de control de energía.

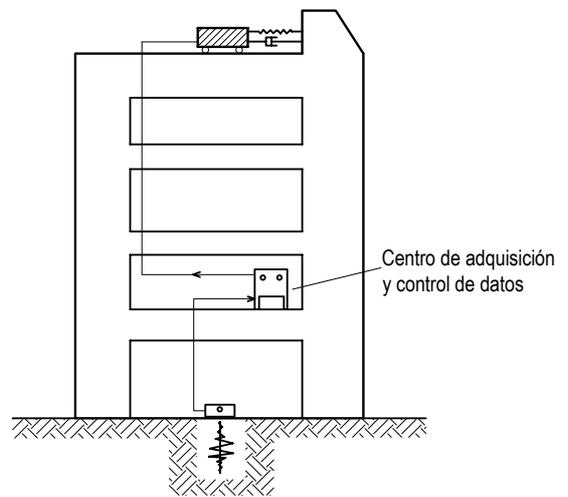


Fig. 5.22. Sistemas activos de control de energía.

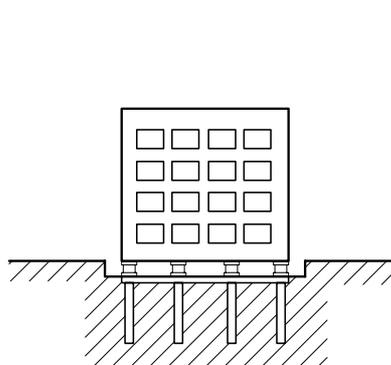


Fig. 5.23. Sistemas exteriores de disipación de energía.

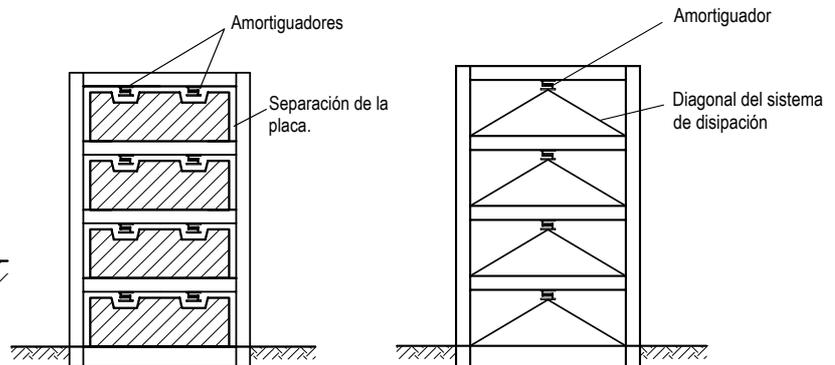


Fig. 5.24. Sistemas interiores de disipación de energía.

Por lo tanto y de acuerdo a ésta clasificación los sistemas de aislamiento sísmico de base se pueden definir como *“Sistemas pasivos exteriores de control y disipación de energía que permiten controlar las fuerzas sísmicas y amortiguamiento de las estructuras aisladas”*.

5.4.6. Dispositivos más frecuentemente utilizados en proyectos de aislamiento sísmico de base

Debido a la constante evolución de los sistemas de aislamiento sísmico a nivel mundial, es posible encontrar una amplia gama de dispositivos utilizados para tal fin. Sería extenso, y por otro lado escaparía a los objetivos de la tesis, realizar una amplia recorrida por todos ellos, sin embargo es posible sintetizar, en el presente punto, aquellos que pueden considerarse como *“clásicos”* dentro de la técnica, sin desconocer otros sistemas disponibles que han demostrado un comportamiento adecuado a los fines del aislamiento sísmico.

5.4.6.1. *Aisladores friccionales*

La estructura se apoya en dispositivos deslizantes y la disipación de energía se realiza a través de las fuerzas de fricción que se oponen al movimiento, un esquema general del dispositivo se muestra en figura (5.25). El comportamiento y la respuesta estructural de estos sistemas han sido estudiados por distintos autores (Constantinou, et al., 1984, Bozzo et al., 1990, Dorka 1994, Tsopelas et al., 1994).

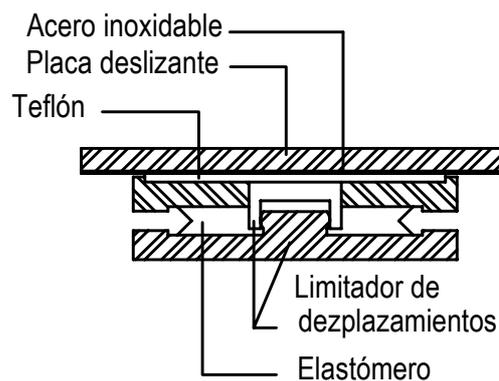


Fig. 5.25: Esquema genérico de un dispositivo utilizado para aislamiento sísmico de base del tipo friccionales.

El principio de los aisladores friccionales se basa en la ley de fricción de Coulomb dada por la ecuación (5.54).

$$F_f = \mu N_n \quad 5.54.$$

Donde: N_n = Fuerza normal en la interfase de aislación.
 $\mu = \tan(\phi)$, coeficiente de fricción.
 ϕ = ángulo de roce medido entre la normal a la superficie y la dirección de la reacción sobre el cono de fricción.

En la interfase es necesario un material con una superficie muy pulida, para ello se utiliza el acero inoxidable. Por otro lado es necesario contar con un material de bajo coeficiente de fricción, entre ellos el teflón (polytetrafluoroetileno PTFE) presenta dicha propiedad debido a que se pueden lograr coeficientes entre $0.02 < \mu < 0.12$, valores menores que los que presentan otros materiales (De la Llera, et al., 1998).

En la interfase teflón-acero, el coeficiente de fricción depende de la velocidad de deformación y de la presión de contacto. Dicho coeficiente aumenta con la velocidad y tiende a estabilizarse para valores de aproximadamente 10 cm/seg. (De la Llera, et al., 1998)

Para estos dispositivos la disipación de energía se realiza a través del amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco (ecuación 5.50), la cual es proporcional al coeficiente cinético de fricción, a la carga normal y a la amplitud del movimiento. El coeficiente de fricción es función de la naturaleza de la superficie de deslizamiento, velocidad relativa y de la presión de contacto, la cual puede variar con el tiempo. Investigaciones realizadas sobre dicho coeficiente de fricción (Mokha et al., 1988; Constantinou et al., 1990) concluyeron que la variación del coeficiente puede modelarse de acuerdo a la ecuación (5.55).

$$\mu_{(t)} = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) \exp(-b_f |\dot{x}_b|) \quad 5.55.$$

μ_{max} = coeficiente de fricción a velocidades altas.

μ_{min} = coeficiente de fricción a velocidades cercanas a cero.

b_f = parámetro que controla la variación del coeficiente de fricción en función de la velocidad.

\dot{x}_b = velocidad de deslizamiento.

Los dispositivos son fabricados con coeficientes de fricción que varían entre 0.10 y 0.30 y el mismo se representa como una función monótonamente creciente con la velocidad de deslizamiento (Bozzo, et al., 2000).

5.4.6.2. *Aisladores a base de sistemas pendulares friccionantes (FPS)*

El aislador detallado en el punto precedente no tiene por si mismo ninguna fuerza restitutiva que permita a la estructura volver a su posición inicial, por tal causa puede ocurrir que se presenten desplazamientos remanentes significativos. Esta característica hace que dichos sistemas no puedan utilizarse solos y generalmente son instalados juntos a otros aisladores o amortiguadores, encargados de proveer las fuerzas de restitución. Con el objeto de solucionar el inconveniente citado se utilizan placas deslizante con leves curvaturas que caracteriza al aislador pendular friccional (Figura 5.26).

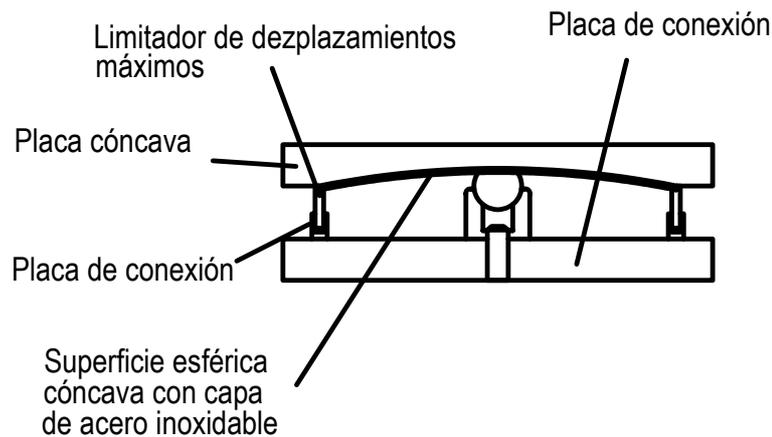


Fig. 5.26: Esquema genérico de un aislador pendular friccional.

El dispositivo emplea el peso propia de la estructura para recentrar el edificio minimizando los desplazamientos finales permanentes (Zayas et al., 1988; Zayas et al., 1990; Mokha et al., 1990). Los materiales que se utilizan son los mismos que los del aislador anterior (acero inoxidable y PTFE), la superficie esférica es de acero inoxidable y el patín de teflón de alta resistencia se articula de manera que se adapte adecuadamente a la superficie esférica una vez desplazado.

Condiciones de equilibrio indican que la fuerza (F) actuando sobre el patín cuando el mismo se desliza puede ser determinada por la ecuación (5.56) (De la Llera, et al., 1998).

$$F = \left(\frac{W}{R_e} \right) \delta + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{\delta}) \quad 5.56.$$

Donde:
 W = Fuerza normal sobre el patín del aislador.
 R_e = Radio de la superficie esférica.
 μ = Coeficiente de fricción.
 δ = Desplazamiento del patín del aislador.

El período secante del aislador pendular friccional se aproxima al período de un péndulo de radio " R_e ", oscilando en torno a un punto fijo (De la Llera, et al., 1998).

$$T_{sec} = 2\pi \sqrt{\frac{R_e \delta_0}{g(\delta_0 + \mu R_e)}} \rightarrow \left(2\pi \sqrt{\frac{R_e}{g}} \right)_{\delta_0 \rightarrow \infty} \quad 5.57.$$

δ_0 = Deformación máxima.

Por lo tanto si se dan valores a " R_e " es posible determinar en forma simple valores de periodo secante del aislador. Las ecuaciones propuestas son suficientes a los fines prácticos de diseño de los aisladores. En la figura 5.27., se muestra los resultados de un ensayo realizado sobre un aislador pendular friccional (Naeim F., et al, 1999).

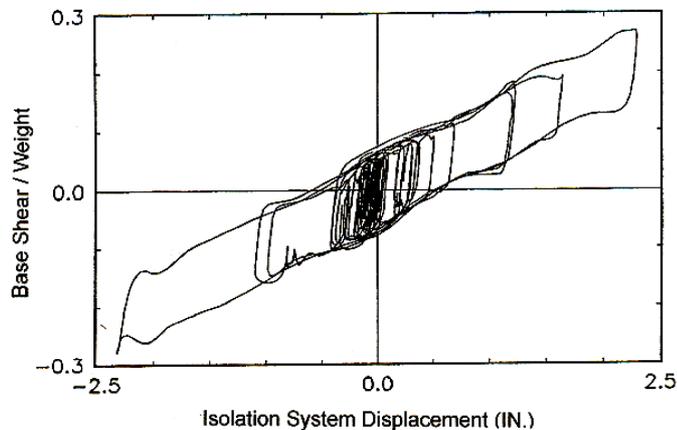


Fig. 5.27: Ensayo de un aislador pendular friccional realizado en mesa vibradora que muestra los ciclos histeréticos de carga deformación (Fuente: Naeim, F. et al., 1999)

5.4.6.3. *Aisladores elastoméricos a base de caucho natural o sintético (LRB)*

El aislador puede ser de sección circular o prismática y se encuentra conformado por capas de goma intercaladas con planchas de acero, las cuales cumplen la función de rigidizar el conjunto. Las capas de goma son vulcanizadas con las planchas de acero y el conjunto se dispone entre dos placas metálicas, una inferior tomada a la estructura de fundación y otra superior tomada a la superestructura (Figura 5.28). De acuerdo a las propiedades de la goma el aislador puede ser de bajo o alto amortiguamiento y el caucho que se utiliza para conformar las placas de goma pueden ser naturales o sintéticos. En algunas aplicaciones realizadas en Francia se ha utilizado el neopreno en lugar del caucho (Naeim, F., et al., 1999).

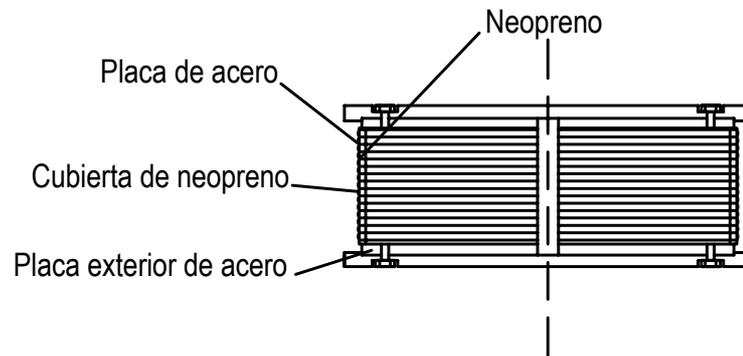


Fig. 5.28: Esquema genérico de un aislador elastomérico a base de goma reforzada.

La vulcanización de las capas de goma a las planchas de acero permite lograr una unión que resulta flexible en la dirección horizontal y rígida en sentido vertical. La respuesta de sistemas de aislamiento sísmico conformados por estos tipos de aisladores está influenciada por el valor del amortiguamiento y la rigidez equivalente del aislador (Kelly, J., 1993, 1996). El sistema lineal equivalente permite una solución aproximada simple de las ecuaciones de movimiento. El amortiguamiento equivalente para la goma varía significativamente en función del nivel de deformación ($0.05 \div 0.30$), sin embargo los valores que normalmente pueden lograrse son próximas al valor 0.10 (Bozzo L., et al., 2000).

El desarrollo de la goma con alto amortiguamiento fue obtenido en 1982 por *Malaysian Rubber Producers' Research Association (MRPRA)* y dicha característica permite diseñar sistemas de aislamiento sin la adición de mecanismos que provean un amortiguamiento

adicional. El amortiguamiento puede ser incrementado a valores comprendidos entre un 10 y un 15% con el 100% del esfuerzo de corte (Naeim, F. et al., 1999).

El amortiguamiento que provee el aislador de goma de alto amortiguamiento no es viscoso ni tampoco histerético, su respuesta se encuentra entre ambos. Para un amortiguamiento viscoso lineal la disipación de energía es función del cuadrado del desplazamiento, mientras que para amortiguamiento histerético tiende a ser lineal con el desplazamiento. Ensayos realizados sobre aisladores de goma de alto amortiguamiento indicaron que la energía disipada por ciclo es proporcional al desplazamiento hasta un valor que no supera los 5 cm (Fig. 5.29) (Naeim, F. et al., 1999). Esta propiedad permite modelar la respuesta de estos tipos de aisladores mediante una combinación de respuesta inicial lineal viscosa, seguida por un comportamiento elasto-plástico.

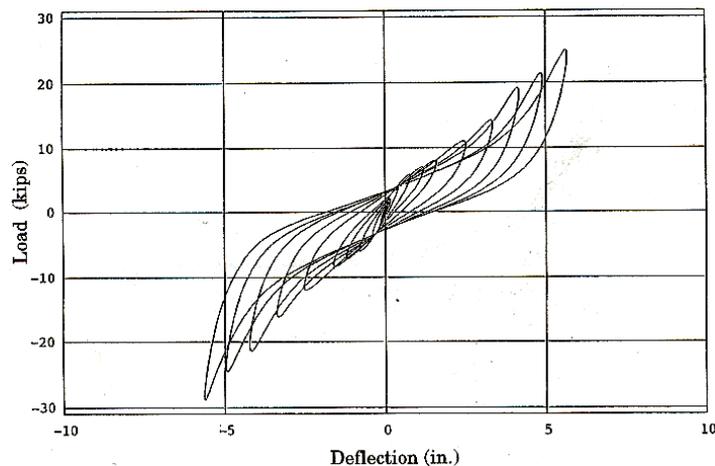


Fig. 5.29: Ensayo de un aislador de goma de alto amortiguamiento que muestra el comportamiento histerético (Fuente: Naeim, F. et al., 1999)

El proceso de diseño de aisladores elastoméricos requiere el control, entre otros parámetros, del pandeo del mismo, dado que, en deformación máxima, el área efectiva en compresión se reduce (Naeim, F., et al., 1999). Dicha verificación es citada como una diferencia respecto, por ejemplo, a un aislador pendular friccional. Por lo tanto para desplazamiento importantes del sistemas de aislamiento, originadas por la presencia de pulsos largos en movimientos de falla cercana, controlar el fenómeno de pandeo del aislador implica aumentar las dimensiones de la sección del mismo, situación que muchas veces no es posible lograr por distintos motivos (económicos, dimensiones del terreno, aspectos arquitectónicos, etc.)

En el Capítulo 7 se detallan las verificaciones que forman parte del diseño de un aislador elastomérico a base de goma reforzada debido a que el mismo ha sido utilizado como parte del proceso de diseño y como una variable de comparación entre la respuesta del mismo y la del sistema realmente instalado en el edificio.

5.4.6.4. *Aisladores elastomérico-friccionales (R-FBI)*

El aislador está conformado por varias placas recubiertas con teflón (PTFE) con un núcleo de goma (Fig. 5.30). La goma proporciona la fuerza restitutiva necesaria para evitar los desplazamientos remanentes, mientras que las placas deslizantes disipan energía por fricción.

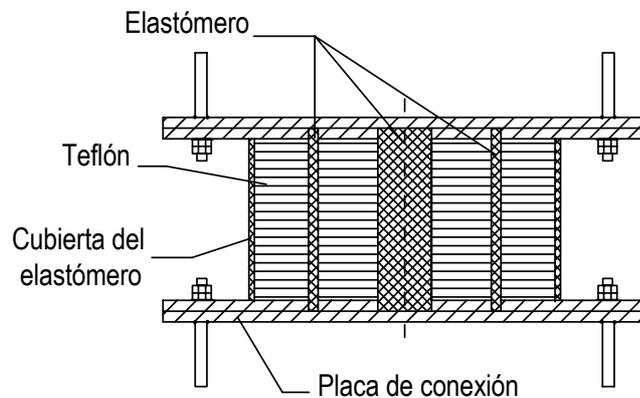


Fig. 5.30: Esquema genérico de un aislador elastomérico - friccionante

La respuesta de estos sistemas han sido estudiadas por distintos autores (Mostaghel et al., 1986 y 1987), mientras que la energía disipada por fricción ha generado distintos trabajos de investigación (Mostaghel et al., 1988; Mostaghel y Kelly, 1987). En la bibliografía se han individualizado otros modelos de aisladores que corresponden a la misma categoría pero con pequeñas variantes (Caspé et al., 1986 y Nagashima et al., 1987).

El sistema de aislamiento utiliza la acción en paralelo de la elasticidad de la goma y la fricción entre las placas recubiertas con teflón, por lo tanto la ecuación dinámica que representa el movimiento y la respuesta del conjunto aislado está función del coeficiente de amortiguamiento (c_b), de la rigidez equivalente del aislador (k_b) y del coeficiente de fricción (μ).

5.4.6.5. *Aisladores de la Compañía Eléctrica de Francia (Electricité France = EDF)*

El aislador fue originalmente diseñado para centrales nucleares. El dispositivo está conformado por dos placas deslizantes y neopreno reforzado colocado en serie (Fig. 5.31). Si la estructura con aislamiento se encuentra sometida a un movimiento sísmico de baja intensidad el sistema se controla con el neopreno, con el mismo mecanismo del aislador elastomérico a base de neopreno o caucho (natural o sintético) (LRB) (Ver punto 5.4.6.3). Por otro lado si la intensidad del movimiento es mayor y los desplazamiento comienzan a ser importantes la fuerza transmitida a la superestructura queda controlada por la fricción entre placas. Por lo tanto es posible pensar que las placas deslizantes proporcionan una seguridad adicional frente a terremotos de magnitud importantes.

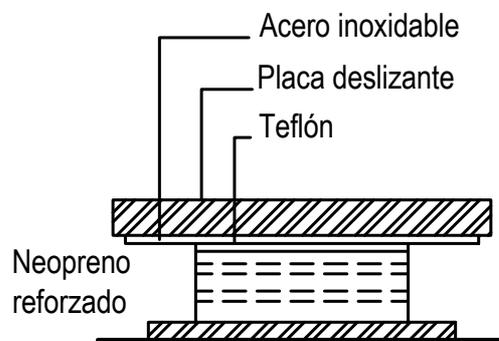


Fig. 5.31: Esquema genérico de un aislador de la Compañía Eléctrica de Francia.

La respuesta de estos sistemas han sido estudiadas por diversos autores (Tajirian et al., 1990, Rodwell et al. 1990). Otros estudios comparativos, para evaluar la respuesta de los mismos, indicaron que presentan un adecuado comportamiento frente a terremotos de falla cercana (Jangid et al., 2001), la investigación utilizó para estos tipos de aisladores coeficientes de fricción del orden de 0.20. La idealización de la ley fuerza- deformación, con valores altos de amortiguamiento, puede observarse en la figura (5.33).

La respuesta del conjunto aislado es similar a la de los aisladores elastoméricos a base de neopreno o caucho (natural o sintético), por lo tanto la ecuación dinámica que representa el movimiento es función del coeficiente de amortiguamiento (c_b), de la rigidez equivalente del aislador (k_b) y del coeficiente de fricción (μ).

5.4.6.6. *Aislador neocelandés (NZ)*

Alejar el período fundamental del un edificio del período predominante de un terremoto no garantiza plenamente la protección de la estructura, debido a una posible resonancia con otras frecuencias naturales más altas (Bozzo, L. M. et al., 2000). Por lo general diversos terremotos no muestran un período predominante claramente definido y es posible que la presencia de distintos picos espectrales conduzcan a amplificaciones dinámicas ya tratadas en el punto (5.4.1). Para controlar dichas amplificaciones es oportuno la adición de amortiguamiento, parámetro que permite, de una manera más eficiente, la disipación de energía.

El aislador neozelandés permite lograr valores de amortiguamiento mayores que los aisladores elastoméricos (LBR). Las características del aislador son similares a los (LBR) en cuanto a placas de goma y láminas vulcanizadas de acero, con la diferencia que los (NZ) poseen uno o varios núcleos de plomo (Robinson, 1982; Buckle et al., 1990, Skinner et al., 1993). Un esquema general del aislador (NZ) se muestra en figura (5.32).

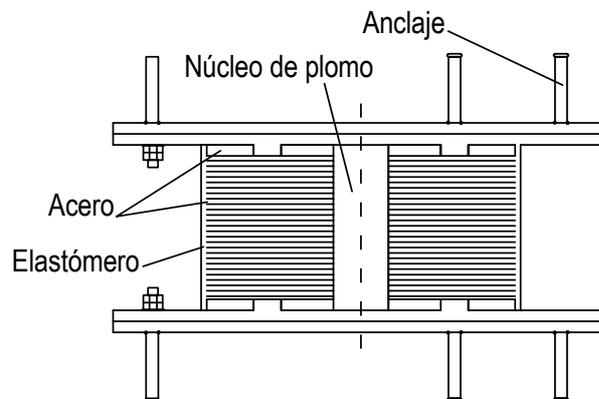


Fig. 5.32: Esquema genérico de un aislador neocelandés

El comportamiento mecánico de este sistema de aislamiento es similar al de un amortiguador lineal (Skinner et al., 1993), la presencia del núcleo del plomo permite aumentar el valor del amortiguamiento a valores aproximados al 15%, lo que admite reducir los desplazamientos horizontales y mejorar la disipación de energía (Naeim F. et al., 1999). La relación fuerza-desplazamiento puede modelarse mediante el modelo histerético indicado en la figura 5.33.

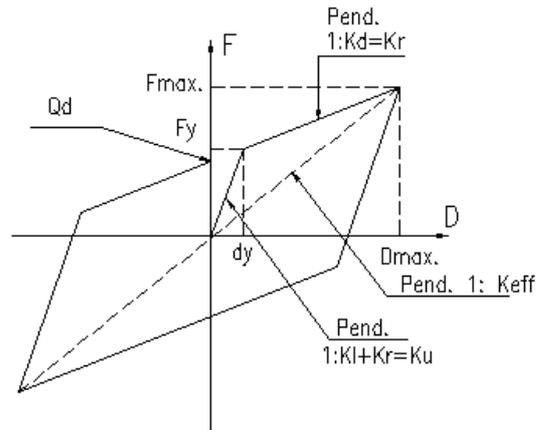


Fig. 5.33: Modelo histerético de la relación fuerza-desplazamiento de un aislador elastomérico con núcleo de plomo (NZ)

5.4.6.7. Aislador deslizante elástico-friccional (SR-F)

El aislador emplea la acción combinada del sistema elastomérico friccional (R-FBI) con la del sistema de la compañía eléctrica de Francia (EDF). La conexión se realiza de la misma manera que el sistema “R-FBI”, pero en la parte superior del aislador se le agregan placas deslizantes (Bozzo L. M. et al., 2000).

El diseño detallado permite que, para movimientos de baja intensidad, el sistema se comporta como el “R-FBI” y a medida que aumenta la demanda se observa un desplazamiento de las placas superiores. Dicho mecanismo desacopla el movimiento de la estructura del desplazamiento del terreno. El sistema admite desplazamientos permanentes los cuales se limitan por la acción elástica del neopreno. El coeficiente de fricción entre las placas deslizantes es relativamente alto por lo tanto es de esperarse desplazamientos, sólo cuando el movimiento del suelo sea importante.

La ecuación del movimiento para el aislador (SR-F) es más compleja que para el resto de los sistemas mencionados debido a la presencia de dos coeficientes de fricción distintos (Bozzo L. M. et al, 2000). El aislador se diseña con coeficientes de fricción entre las placas superiores mayores al coeficiente de fricción de las placas intermedias, los valores habituales son aproximadamente $\mu = 0.10$ para el primer caso y $\mu = 0.04$ para las placas intermedias.

5.4.6.8. Sistemas basados en resortes metálicos helicoidales:

Hasta la fecha han sido utilizados casi exclusivamente para aislar equipos industriales y otros de sus propias vibraciones para proteger sistemas próximos, otras aplicaciones han estado dirigidas al aislamiento de construcciones para filtrar las vibraciones del tránsito vehicular o de trenes. En primera instancia comenzó a aplicarse en máquinas de pequeño porte, luego se extendió a fundaciones de máquinas pesadas e instalaciones industriales de importancia, como ejemplo una platea de fundación de turbogeneradores (Stuardi et al., 2005). Sin embargo en los últimos años se han realizado estudios sobre la respuesta de estructuras aisladas utilizando dichos sistemas (Nawrotzki, P. 2000, 2001a, b; Stuardi, 2003, Stuardi et al., 2005, Tornello et al., 2003, 2004a, b, c, d, 2005a, b) cuando las estructuras se encuentran sujetas a la acción de los terremotos.

Posee la ventaja de que el comportamiento es conocido y controlado, es adecuado a las altas temperaturas (por lo tanto para su fabricación se utilizan determinadas aleaciones), no presenta fluencia ni tampoco desplazamiento residuales. Comparativamente con otros sistemas es de menor costo, presenta la desventaja de que el sólo resorte posee bajo amortiguamiento (cerca del 2%) por lo tanto es necesario utilizarlos con otros dispositivos que permitan aumentar dichos valores. Para soportar elevadas cargas deben utilizarse paquetes de resortes debido a que la capacidad de carga de un único resorte, relacionado con las dimensiones y diámetro del espiral tecnológicamente viable de fabricación, son bajas.

Los aisladores elastoméricos o friccionales, en sus distintos modelos, son habitualmente utilizados para suministrar aislamiento horizontal. Los sistemas basados en resortes metálicos han sido utilizados en viviendas para proveer aislamiento en las tres direcciones (Farzad, N. et al., 1999). Los sistemas GERB para aislamiento sísmico (GERB Control System[®]) fueron, originalmente diseñados, para controlar las vibraciones que generaban las turbinas en plantas hidroeléctricas. El sistema está conformado por paquetes de resortes con baja rigidez en sentido horizontal y vertical. Para aumentar el amortiguamiento del sistema de aislamiento se instalan junto con amortiguadores viscoelásticos (Visco[®]), (Fig. 5.34a, b).

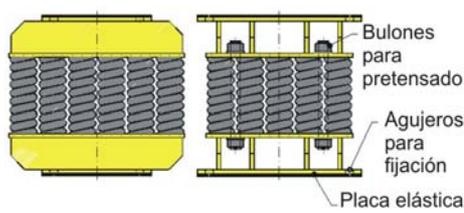


Fig. 5.34.a) Paquete de resortes metálicos GERB

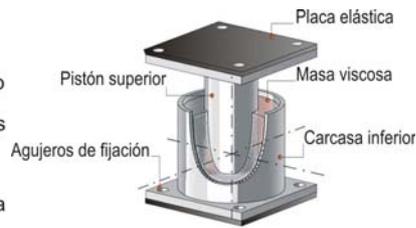


Fig. 5.34.b) Amortiguadores viscoelásticos GERB (Visco®)



El sistema presenta un fuerte acoplamiento entre el movimiento horizontal y el pendular debido a que el centro de gravedad de la estructura aislada se encuentra por encima del centro de rigidez del mismo (Fig. 5.35), por lo tanto el sistema es práctico en situaciones donde el centro de gravedad y el centro de rigidez se encuentran en el mismo nivel (caso que se presenta con mucha frecuencia en el reactor de una planta nuclear (Farzad, N. et al., 1999).

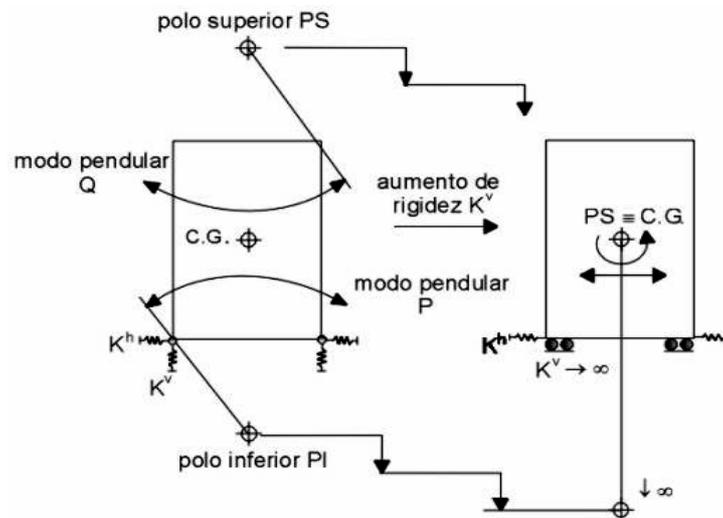


Fig. 5.35: Esquema general de los polos de rotación del sistema de aislamiento GERB para los modos pendulares

La rigidez vertical del resorte puede evaluarse con la ecuación (5.58) mientras que la lateral se encuentra influenciada por un efecto combinado de la flexión y torsión y puede ser evaluado con la ecuación (5.59).

$$k_v = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad 5.58.$$

$$k_l = \frac{10^6 d^4}{nD(0.204 h_s^2 + 0.256 D^2)} [Lb * inch] \quad 5.59.$$

Donde:

- G = Módulo de corte del material del resorte.
- d = Diámetro de la espira que conforma el resorte.
- n = Número de espiras activas.
- h_s = Altura libre del resorte.

El amortiguador viscoso (Fig. 5.34, b) está compuesto por una carcasa inferior que contiene una masa viscosa. El pistón de la carcasa superior penetra en una masa viscosa y genera una fuerza, también viscosa, en las tres direcciones ortogonales. Un manguito de protección cierra herméticamente ambas carcasas para evitar que ingresen elementos extraños de tal manera de impedir la contaminación de la masa viscosa. El sistema (aisladores de resortes helicoidales más amortiguador viscoso) presentan como característica una rigidez lineal, tanto horizontal como vertical y un amortiguamiento cuyo comportamiento se aproxima al lineal viscoso (Fig. 5.36).

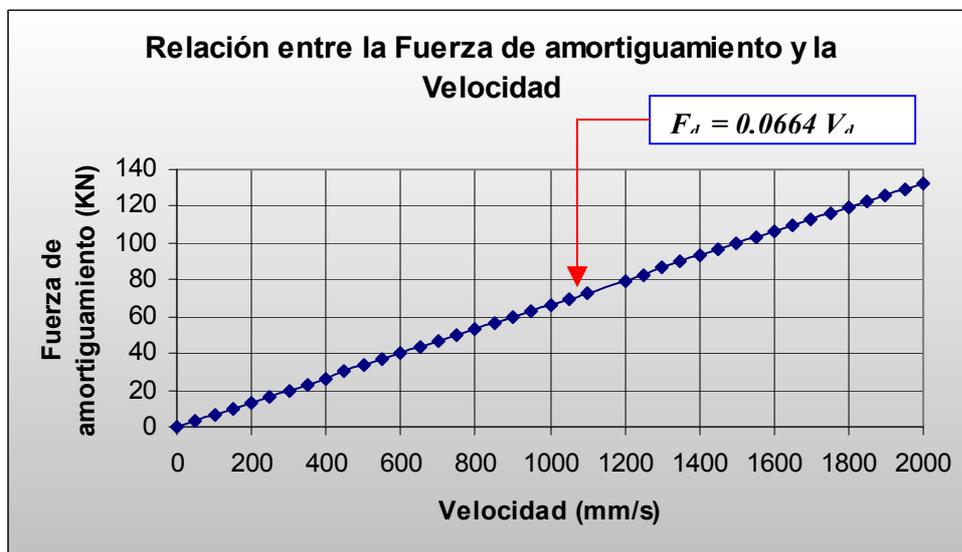


Fig. 5.36: Relación lineal entre la fuerza máxima de amortiguamiento y el valor máximo de la velocidad.

Debido a que el sistema ha sido utilizado en la Torre 3 de la residencia de estudiantes de la Facultad Regional Mendoza y es parte importante del desarrollo de la tesis, otros conceptos son ampliados en el Capítulo 7 (*Diseño del sistema de aislamiento sísmico*).

5.4.6.9. *Otros sistemas de aislamiento sísmico*

Dentro de esta categoría es posible encontrar una amplia gama de aisladores utilizados en distintas aplicaciones. Los primeros están representados, principalmente, por productos elaborados por empresas dedicadas a la fabricación de mecanismos para utilizarlos en el control y disipación de energía, los cuales poseen sus propias patentes (ALGA, VULCO, DIS, etc). Los segundos, se encuentran representados por dispositivos que han sido diseñados por determinados programas de investigación con la intención de proponer nuevos sistemas de aislamiento sísmico. De las dos categorías existen a disposición un abundante material para consultar y de fácil acceso, por lo tanto, realizar un estado del arte sobre la gran variedad de productos que existen en las dos líneas sería extenso y excedería los objetivos de la presente tesis.

5.4.7. Aislamiento de base para terremotos de falla cercana

Existen pocos estudios sobre la respuesta de estructuras con sistemas de aislamiento sísmico de base sujetas a terremotos de falla cercana y en algunos casos sus conclusiones son contradictorias. Las primeras investigaciones realizadas en dicha dirección (Heaton, T. H., et al., 1995) pusieron en duda la eficiencia de los sistemas de aislamiento sísmico emplazadas en zonas cercanas a las fallas. Los resultados de dichas investigaciones fueron incorporados al cuerpo normativo del UBC – 97 sin embargo, los diseños resultan extremadamente conservadores, aspectos muy criticados por muchos autores (Jangid, R. S. et al., 2001; Martelli, 2005).

Por otro lado la protección sísmica de estructuras aisladas sujetas a fuertes terremotos (presencia de pulsos largos de aceleración, velocidad y desplazamientos) no resulta ser una tarea simple (Gavin H., et al., 2002). Los mismos estudios citados anteriormente (Heaton T. H. et al., 1995) mostraron que los edificios con aislamiento de base sujetos a terremotos de falla cercana ($M_w = 7.0$), podrían producir, en el sistema de aislamiento, valores altos de distorsiones (los cuales excedían los 50 cm.) incluso para valores altos de amortiguamiento (25% del amortiguamiento crítico) y valores altos de desplazamientos en la interfase del sistema de aislamiento. Niveles altos de amortiguamiento reduce el desplazamiento del aislador en el modo fundamental pero se consiguen mayores fuerzas de corte en la superestructura, incrementos de aceleración en la misma. Por otro lado la contribución de los modos superiores puede incrementar los desplazamientos entre pisos (Gavin H., et al., 2002).

Investigaciones realizadas para evaluar la respuesta de estructuras aisladas frente a registros sísmicos obtenidos para falla cercana (orientados en dirección paralela y normal a la falla) (Jangid, R. S. et al, 2001) determinaron que el valor máximo del desplazamiento de la estructura aislada está fuertemente influenciado por la componente normal y no por la paralela a la falla. El trabajo evalúa el comportamiento de distintos sistemas de aislamiento y determina que el aislador de la Compañía Eléctrica de Francia conduce a una mejor respuesta frente a movimientos sísmicos asociados a campo cercano.

Otras investigaciones (Lee, T. Y. et al., 2004) indican la importancia de la adición de amortiguamiento en las estructuras de puentes para el control de los desplazamientos que imponen los movimientos asociados a falla cercana y la ubicación más conveniente de los mismos.

Trabajos de investigación en los cuales se comparan las respuestas de distintos sistemas de aislamiento sísmico para terremotos de falla cercana (Mazza, F. et al., 2004) indican que, para controlar los desplazamientos del sistema de aislamiento, que imponen los movimientos de falla cercana, la combinación de aisladores elastoméricos con amortiguadores viscosos sería una alternativa tan buena como la de combinar aisladores elastoméricos con friccionales. Con relación a la demanda de ductilidad de la estructura, los sistemas con aisladores elastoméricos instalados en paralelo con amortiguadores viscosos, no garantizan en todos los casos una mejor respuesta si se incrementa la relación de amortiguamiento equivalente (ξ). En éste último caso los aisladores friccionales en serie resultan ser más efectivos para controlar el daño de la estructura aislada.

Investigaciones orientadas a evaluar la respuesta para distintas configuraciones estructurales (simétricas o asimétricas) con distintos tipos de aisladores sísmicos y frente a movimientos de falla cercana (Wolf, E., D., et al., 2004) indican que aumentando ligeramente el valor del amortiguamiento en los aisladores elastoméricos, se observa una reducción de desplazamientos, distorsiones de piso, fuerzas cortantes, aceleraciones y velocidades. El uso de amortiguadores viscosos no lineales conduce a mayores valores de distorsiones de piso y fuerzas de corte que dispositivos con amortiguamientos viscosos lineales. Los resultados experimentales demostraron que una elevada no linealidad del sistema de aislamiento (por ejemplo aisladores elastoméricos combinados con friccionales) no tienen un alto impacto sobre los contenidos de la estructura aislada, aspecto confirmado por otras investigaciones

(Skinner et al., 1993). La respuesta de los contenidos de la estructura aislada depende del rango de frecuencia en relación con la frecuencia fundamental de la estructura aislada y del tipo de sistema de aislamiento sísmico utilizado.

Investigaciones realizadas sobre la influencia del amortiguamiento en la respuesta sísmica de estructuras con aislamiento sísmico de base y en el cual se consideraron movimientos asociados a falla cercana (Makris, N., et al., 1998) indicaron que las estructuras con bajo nivel de aislamiento y periodos ($T > 2.0$ seg.) son afectadas por las variaciones de las altas frecuencias de los pulsos largos, característicos de los movimientos de falla cercana. La disipación de energía mediante el mecanismo de fuerzas de fricción son eficientes para reducir los desplazamientos del sistema de aislamiento y del aumento de los cortes basales. Un valor bajo de amortiguamiento friccional ($\mu = 9\%$) aleja la posibilidad del efecto de resonancia en el sistema de aislamiento.

Mecanismos de disipación, asociados a la adición de amortiguamiento viscoso, también permiten una reducción del desplazamiento de la superestructura. La combinación de sistemas de aislamiento con baja fricción y amortiguamiento viscoso es una solución aceptable para controlar los desplazamiento que imponen los movimientos de falla cercana, sin embargo, es necesario asumir el costo de una mayor fuerza de corte en la base y aceleración en la superestructura. La investigación concluye que para evaluar la respuesta de los sistemas de aislamiento sísmico frente a movimientos de falla cercana, son adecuados los análisis dinámicos en el dominio del tiempo, análisis que por otro lado, requiere un conocimiento claro de las propiedades mecánicas del sistema de aislamiento (Makris, N., et al., 1998).

Otros trabajos de investigación (Gavin H. et al., 2002) concluyen que los efectos de los terremotos de falla cercana, con pulsos largos de velocidad, exigen mayores valores de amortiguamiento para la protección sísmica. Estructuras con amortiguamiento del primer modo mayores al veinte o treinta por ciento no presentan los modos clásicos habitualmente utilizados en la superposición de un análisis dinámico modal. Los resultados de la respuesta de la estructura muestran que si se incrementa el amortiguamiento decrece la respuesta del primer modo. Por el contrario, si se reduce el amortiguamiento se amplifica las respuestas de los modos superiores. Este efecto conduce a mayores valores de distorsiones y aceleraciones de piso en la superestructura, situación que se evidencia de manera más notable para estructuras con rigideces bajas.

El análisis de la historia de la respuesta en el dominio del tiempo realizada para 10 terremotos muestra que, incrementado el amortiguamiento se aumenta la distorsión de piso y la aceleración de mismo para sistemas de aislamiento con bajas rigideces ($T > 2.2 \text{ seg.}$). Dicho efecto es más notable para terremotos con presencia de pulsos largos (como es por ejemplo el terremoto de “Kobe” comparados con terremotos moderados, “El Centro”). La distorsión de base, sin embargo, decrece con el incremento del amortiguamiento para los 10 terremotos analizados (Gavin H. et al., 2002).

Trabajos realizados sobre el estudio de las respuestas de estructuras con disipadores de energía sometidos a terremotos de falla cercana y en el cual utilizaron espectros de respuesta para pulsos y balance energético, demostraron que los disipadores de energía no solamente disipan la energía que llega a la superestructura sino que también pueden incrementar o reducir el pico máximo de energía liberada (Xu Z. et al., 2007). Para evaluar las respuestas de los disipadores de energía los autores utilizan un modelo de pulso de velocidad y una función sinusoidal para representar los efectos de los terremotos de campo cercano. El trabajo concluye que los desplazamientos se encuentran fuertemente influenciados por el periodo del pulso y el periodo de la estructura, sin embargo, los resultados son distintos si la excitación es de tipo pulso o de tipo sinusoidal.

Otras conclusiones del trabajo (Xu Z. et al., 2007) indican que el amortiguamiento lineal ofrece un adecuado comportamiento para terremotos de baja y moderada intensidad, sin embargo, las demandas de fuerzas del amortiguador lineal, durante una excitación tipo pulso, puede ser alta. Esta situación conduce a una saturación del amortiguador o bien puede transferir elevadas fuerzas a la superestructura. Frente a terremotos de baja y moderada intensidad, amortiguamientos viscosos no lineales pueden ser más adecuados porque su capacidad se agota a velocidades más elevadas. El trabajo también evalúa las respuestas en términos de desplazamientos, aceleración y energía liberada cuando se utilizan amortiguadores viscosos no lineales. Los resultados indican que estos últimos presentan mayores ventajas que los aisladores viscosos lineales. Se observan reducciones en los valores máximos de los desplazamientos y de energía cuando la estructura está sujeta a una excitación tipo pulso y cuando el periodo del pulso es mayor que el periodo de la estructura.

5.5. Resumen

Del contenido del presente capítulo es sencillo deducir que no se ha logrado sintetizar en pocas páginas el estado del arte del aislamiento sísmico al momento de la producción escrita de esta parte de la tesis. Ello se debe fundamentalmente a la continua y constante evolución que tiene esta nueva técnica, no tanto desde el punto de vista de los fundamentos teóricos, sino también del desarrollo tecnológico y sus extensas aplicaciones.

Se ha realizado una extensa revisión bibliográfica que contempla los orígenes mismos del aislamiento (Calatarients J. A. en 1909) hasta nuestros días. Se ha revisado la evolución en el uso de los sistemas de aislamiento sísmico en distintos países del mundo, principalmente los más avanzados tecnológicamente (Japón, Estados Unidos de Norteamérica, Nueva Zelanda y países de Europa), donde la técnica del aislamiento sísmico ha tenido un mayor número de aplicaciones. La revisión incluye, además, a países de América del Sur y en particular Chile, país con mayor desarrollo y aplicaciones de sistemas de aislamiento sísmico de base en la región.

Se ha realizado una revisión de distintos códigos, que reglamentan a nivel mundial los diseños de los sistemas de aislamiento (UBC, FEMA, EC8, NCh2745). Se ha sintetizado el marco y formulación teórica del aislamiento sísmico y de ello en particular los temas que interesan al desarrollo de la tesis: *teoría lineal y no lineal del aislamiento sísmico; aplicación de la misma a edificios en altura y la influencia del amortiguamiento en la respuesta de los sistemas de aislamiento sísmico.*

Se ha realizado una clasificación de los sistemas de aislamiento dentro de un contexto general de las nuevas técnicas posibles para el control y disipación de energía y se ha efectuado una extensa revisión de las características más relevantes de los dispositivos más frecuentemente utilizados en las aplicaciones prácticas del aislamiento sísmico. Por último y atendiendo a los objetivos de la tesis, se ha realizado un estudio de las investigaciones y respectivas conclusiones sobre las publicaciones realizadas recientemente en sistemas de aislamiento sísmico de base, sujetos a terremotos de falla cercana.