



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“TEORÍA DEL AISLAMIENTO SÍSMICO PARA  
EDIFICACIONES”**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA  
LILY MARLENE BONILLA SOSA**



**DIRECTOR DE TESIS: M.I. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ VEGA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**NOVIEMBRE 2012**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/183/12

Señorita  
LILY MARLENE BONILLA SOSA  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ VEGA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"TEORÍA DEL AISLAMIENTO SÍSMICO PARA EDIFICACIONES"**

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS
  - II. SISTEMAS DE DISMINUCIÓN DE EFECTOS SÍSMICOS EN ESTRUCTURAS
  - III. MODELO MATEMÁTICO DE APOYOS CON AISLAMIENTO SÍSMICO
  - IV. EJEMPLO DE APLICACIÓN
  - V. RESULTADOS
  - VI. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 9 de noviembre del 2012.  
EL PRESIDENTE

M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH\*gar.

## **DEDICATORIA**

### **A mis padres**

*Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor. Gracias por todo.*

### **A Alan Rajhí**

*Por siempre creer en mí y ayudarme a dar lo mejor, por los momentos que pasamos juntos que hacen que las cosas sean menos pesadas.*

### **A José**

*Por acompañarme y ayudarme en los momentos que necesitaba ayuda, por tus consejos, tus motivaciones y tu amor.*

### **A mis compañeros de clase**

*Por compartir vivencias conmigo y darme sentimientos de alegría, amor y cariño que me dejaron muchas enseñanzas y experiencias. Y compartir conocimientos conmigo.*

*Y por último pero no menos importante, pues sin él ninguno de nosotros existiera. Porque me permitiste llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de tu infinita bondad, sabiduría, paciencia y amor. Gracias **DIOS.***

# ÍNDICE





<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
1.1 ANTECEDENTES	
1.2 OBJETIVOS	
<b>2. SISTEMAS DE DISMINUCIÓN DE EFECTOS SÍSMICOS EN ESTRUCTURAS</b>	<b>8</b>
2.1 SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL	
2.1.1 SISTEMAS ESTRUCTURALES DE CONTROL PASIVO	
2.1.1 SISTEMAS ESTRUCTURALES DE CONTROL ACTIVO	
2.1.1 SISTEMAS ESTRUCTURALES DE CONTROL HÍBRIDO	
<b>3. MODELO MATEMÁTICO DE APOYOS CON AISLAMIENTO SÍSMICO</b>	<b>39</b>
3.1 PARÁMETROS QUE DEFINEN EL MODELO BILINEAL DE UN AISLADOR SÍSMICO	
<b>4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN</b>	<b>46</b>
4.1 MARCO CON APOYOS CONVENCIONALES	
4.2 MARCO SOPORTADO POR AISLADORES DE BASE	
4.2.1 MODELO MATEMÁTICO	
4.2.2 CAPTURA DE LAS PROPIEDADES DE LOS AISLADORES SÍSMICOS CON COMPORTAMIENTO BILINEAL EN EL PROGRAMA SAP2000	
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>54</b>



5.1 COMPORTAMIENTO DE LOS AISLADORES EN EL MARCO

5.2 MODOS DE VIBRAR DEL MARCO CON AISLADORES SÍSMICOS

5.3 MODOS DE VIBRAR DEL MARCO SIN AISLADORES SÍSMICOS

**6. CONCLUSIONES 60**

**BIBLIOGRAFÍA 62**

# INTRODUCCIÓN





El presente trabajo tiene por finalidad desarrollar el conocimiento que se tiene sobre los diferentes sistemas de control estructural en la actualidad, y con base en ello, comparar los beneficios obtenidos por estos sistemas en comparación con los apoyos convencionales. En especial, considerando el caso de los aisladores de base. Esta demostración se hizo con ayuda del programa de cómputo SAP2000 versión 14 [Ref. 6].

Históricamente, los movimientos sísmicos representan un peligro para las estructuras causándoles daños permanentes tanto en cimentaciones como en la superestructura, y en algunos casos llegando al colapso de ésta.

Para ello, es necesario diseñar estructuras que resistan fuerzas sísmicas. Sin embargo, es nuestro deber hacer construcciones que puedan resistir tanto sismos de pequeña como de alta magnitud. Esto es, que las estructuras tengan una gran capacidad de deformación, y que inclusive, vaya más allá de su estado elástico.

Como solución a esta situación, se crearon los sistemas de control estructural, los cuales han sido desarrollados en esta tesis para un mayor conocimiento acerca de ellos.

### **Antecedentes y objetivos.**

Se presentan las dificultades con las que ha tenido que lidiar la Ingeniería Sísmica al tener que diseñar estructuras que soporten sismos de distintas magnitudes. Entre sus soluciones, se comentan algunos de los sistemas actuales de control estructural.

Se menciona el caso que tomado para ejemplificar los beneficios que se adquieren con los aisladores sísmicos.





### **Sistemas de disminución de efectos sísmicos en estructuras.**

Se plantea la teoría sobre los sistemas de control estructural, cómo se clasifican, cuales son sus nombres, cómo se conforman, cómo trabajan y algunas edificaciones que fueron diseñadas con sistemas de control estructural

### **Modelo matemático de apoyos con aislamiento sísmico.**

Se describe el modelo matemático a utilizar en el modelo de aplicación. Asimismo, se determinan los parámetros que definirán el modelo matemático de un aislador sísmico.

### **Ejemplo de aplicación.**

Se desarrolla el ejemplo del modelo con aisladores sísmicos. Se hace una descripción general de él y la captura de sus parámetros en el ya mencionado programa de cómputo a utilizar (SAP2000).

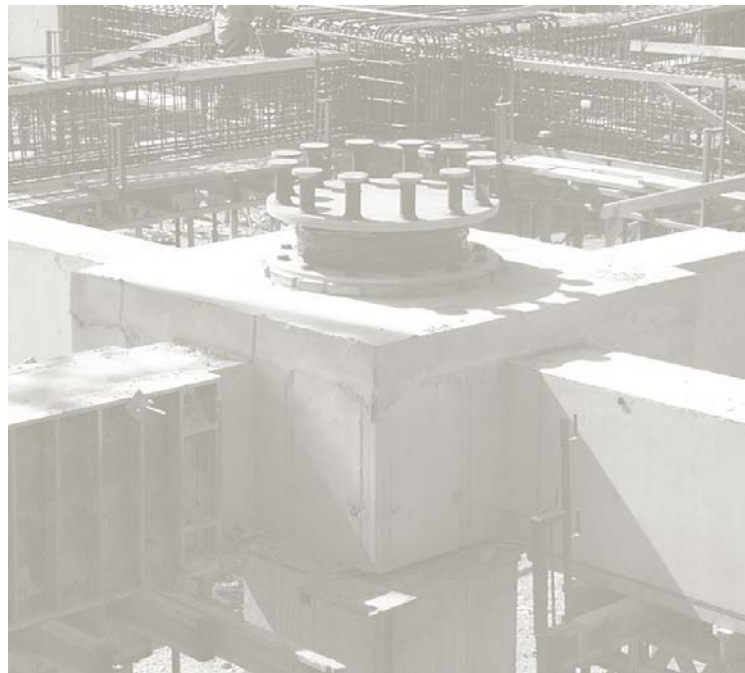
### **Resultados.**

Se exponen los resultados obtenidos del programa sobre el comportamiento de los aisladores sísmicos y sus modos de vibrar en la estructura, así como los modos de vibrar del marco con apoyos convencionales.

### **Conclusiones.**

Se mencionan las conclusiones a las que se llegó con este trabajo, así como comentarios sobre la forma en que deben diseñarse las estructuras que se encuentren bajo la acción de algún sismo o que estén ubicadas en alguna zona con gran sismicidad.

# 1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS





## 1.1 ANTECEDENTES

La **Ingeniería Sísmica** es el estudio del comportamiento de los edificios y las estructuras sujetas a carga sísmicas, entre sus prioridades destacan la obtención de altos niveles de seguridad y la mejora del comportamiento de las estructuras ante dichos eventos dinámicos (sismos).

Debido a los daños estructurales acontecidos en varios países se ha comenzado a cuestionar la efectividad de las estructuras convencionales y de los análisis empleados para valorar su respuesta. Se han llegado a cuestionar:

- a) Los sistemas de cálculo empleados
- b) La imposibilidad de determinar la demanda de ductilidad ante un evento sísmico y dónde se va a producir
- c) La presencia de fallas frágiles en sistemas supuestamente dúctiles
- d) La complejidad de detectar el daño en estructuras metálicas cuando éstas no manifiestan desplome y
- e) El elevado costo en reparación que supone un comportamiento dúctil basado en una disipación de la energía en el seno estructural y de forma dispersa.

Una tendencia actual en el diseño sísmico consiste en buscar sistemas de control ante sismos para que localicen la demanda de ductilidad en elementos determinados. Algunos sistemas proponen que la oferta de ductilidad resida en zonas de la propia estructura, como es el caso de los marcos excéntricos en estructuras de acero (Popov 1980). Otros consisten en el empleo de disipadores de energía externos a la estructura, si bien forman parte del sistema estructural, se emplean como nexo y ello permite su fácil restitución en caso de sufrir daño.



El problema de diseño sísmico puede eliminarse, en vez de resolverse; es decir, se puede intentar “deshacernos de los sismos en vez de combatirlos” [REF 5], aislando las estructuras del terreno. El hecho de separarlas de los movimientos del suelo se realizaría mediante la introducción de elementos flexibles entre la estructura y su cimentación.

Los sistemas propuestos en los últimos años giran sobre un mismo concepto: soportar las estructuras sobre sistemas muy flexibles lateralmente auxiliados con mecanismos disipadores de energía. El objetivo esencial es asegurar que el valor del periodo fundamental de vibración de la estructura se aleje del periodo dominante del sitio, de tal forma que los niveles de fuerza y aceleración en la estructura sean reducidos significativamente.

Los disipadores de energía reducen, igualmente, la fuerza en la estructura, proporcionándole a su vez una respuesta elástica, en algunos casos, sin que deba esperarse la reducción de la fuerza en estructuras que estén respondiendo más allá de la fluencia.

Para el diseño de este tipo de dispositivos disipadores de energía no existe todavía normatividad en México. Sin embargo, en otras partes del mundo si existen parámetros de diseño que se toman en cuenta.

## 1.2 OBJETIVOS

- Desarrollar el conocimiento que se tiene sobre los diferentes sistemas de control estructural en la actualidad.



## ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

---

- Demostrar los beneficios que se obtienen al utilizar sistemas de control estructural activo, en este caso, los aisladores de base.
- Estudiar el comportamiento de una estructura con apoyos convencionales y con apoyos de aislamiento sísmico, tomando como parámetros de comparación el período de la estructura y los desplazamientos relativos de entrepiso.

## **2. SISTEMAS DE DISMINUCIÓN DE EFECTOS SÍSMICOS EN ESTRUCTURAS**





## 2.1 SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL

El control estructural ante acciones sísmicas se está planteando como una alternativa al diseño sismorresistente convencional, basado en la combinación adecuada de energía elástica y de disipación de energía en sus elementos principales.

En la actualidad existen dispositivos dedicados a la disipación de energía que interactúa con la estructura. De esta forma, los elementos estructurales están sometidos a una sollicitación menor y por consiguiente, su nivel de daño sería minimizado.

Empleando estos sistemas, es posible controlar o disminuir los desplazamientos de la estructura haciendo uso de alguno o varios de los siguientes recursos:

- La modificación de las propiedades dinámicas del edificio, de forma que éste reduzca su energía de entrada o evite actitudes resonantes.
- La disipación de energía introducida al sistema estructural a partir de dispositivos mecánicos.
- El control con dispositivos que ejerzan fuerzas que contrarresten la acción sísmica.

Existen varias formas de clasificar a estos sistemas. La utilizada en este trabajo obtenida de las [Ref. 2 a 4], presenta:

1. Sistemas de control estructural pasivos

2. Sistemas de control estructural activos
3. Sistemas de control estructural híbridos

### 2.1.1 SISTEMAS ESTRUCTURALES DE CONTROL PASIVO

Los sistemas estructurales de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica, a diferencia del resto de los sistemas, además de no requerir aporte energético para su funcionamiento.

Los dispositivos de control pasivo producen fuerzas en respuesta al movimiento de la estructura (Figura 2.19). La energía total en un sistema estructural controlado pasivamente, incluyendo los dispositivos pasivos, no aumenta por dichos dispositivos.

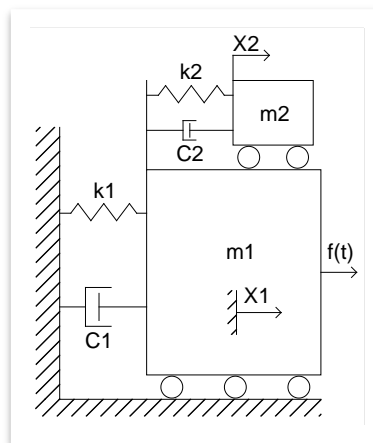


Figura 2.1 Representación de un sistema de control pasivo

La disipación pasiva de energía es una tecnología que mejora el desempeño de una edificación añadiendo amortiguación a su estructura, siendo el uso primario de los disipadores de energía la reducción de los desplazamientos sísmicos de la estructura. Los otros sistemas pasivos liberan energía por fluencia o por la plastificación del material.



Los sistemas pasivos de disipación de energía para el diseño y reforzamiento de estructuras han tomado gran auge, gracias a la ayuda de los procesadores electrónicos y la dinámica estructural, hoy en día existen numerosos ejemplos de estructuras construidas o reforzadas en países del mundo más propensos a amenazas sísmicas.

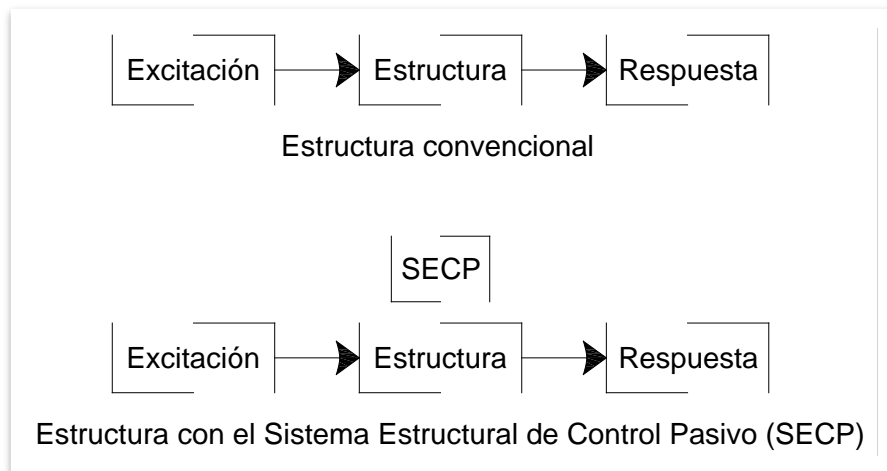


Figura 2.2 Configuración de una estructura

En la actualidad se han desarrollado cuatro diferentes sistemas de control pasivo, que son:

- Disipadores de energía
- Osciladores resonantes
- Cables de presfuerzo
- Aisladores de base

#### 2.1.1.1 DISIPADORES DE ENERGÍA

Los disipadores de energía son dispositivos que modifican la rigidez de la estructura y buscan concentrar en ellos la mayor capacidad de energía. Para su

funcionamiento dependen fundamentalmente de los desplazamientos relativos de los entresijos.

Se ubican generalmente en contraventeos y tienen como objetivo disminuir o eliminar la disipación de energía histerética en los elementos estructurales, especialmente en las conexiones viga-columna. Han sido usados también en combinación con aisladores de base.

De acuerdo con la manera en que disipan energía, pueden agruparse de la siguiente manera:

- Dispositivos de materiales con comportamiento elastoplástico
- Por extrusión
- Por fricción
- Dispositivos de materiales con comportamiento viscoelástico

### DISPOSITIVOS DE MATERIALES CON COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO

Estos dispositivos disipan energía gracias a su comportamiento histerético, ver Figura 2.3.

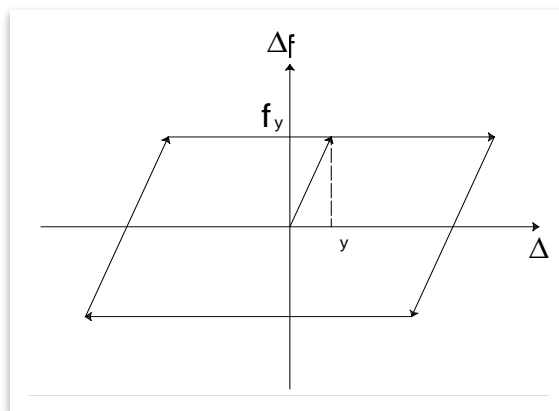


Figura 2.3 Comportamiento idealizado de los dispositivos elastoplásticos

La pendiente de la zona inelástica depende de las características de cada disipación de energía es más grande según el incremento del área bajo su curva de histéresis.

Existen diversos mecanismos que se manejan mediante este concepto. El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha estudiado el comportamiento de disipadores de energía en forma de “U” [Ref. 2]. Este dispositivo fue propuesto por Skinner, disipa energía al desplazarse una cara con respecto a la cara, tiene un comportamiento muy estable y el número de ciclos de carga que soportan depende de la amplitud de deformación a la que se someten.

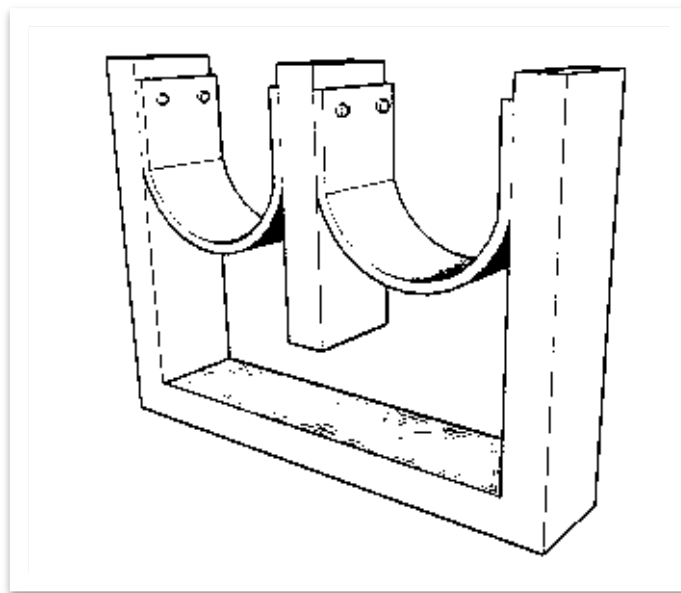


Figura 2.4 Dispositivos en forma de U

ADAS (Added Damping And Stiffness) es otro dispositivo compuesto por placas de acero con forma de “x”, esta forma favorece el desplazamiento entre ellas, provocando una doble curvatura. Si estas placas se empotraran, se obtendría un diagrama de esfuerzos casi uniforme en todo el peralte que cambia de signo en el eje neutro, provocando que el esfuerzo de fluencia alcance todo el volumen al mismo tiempo.

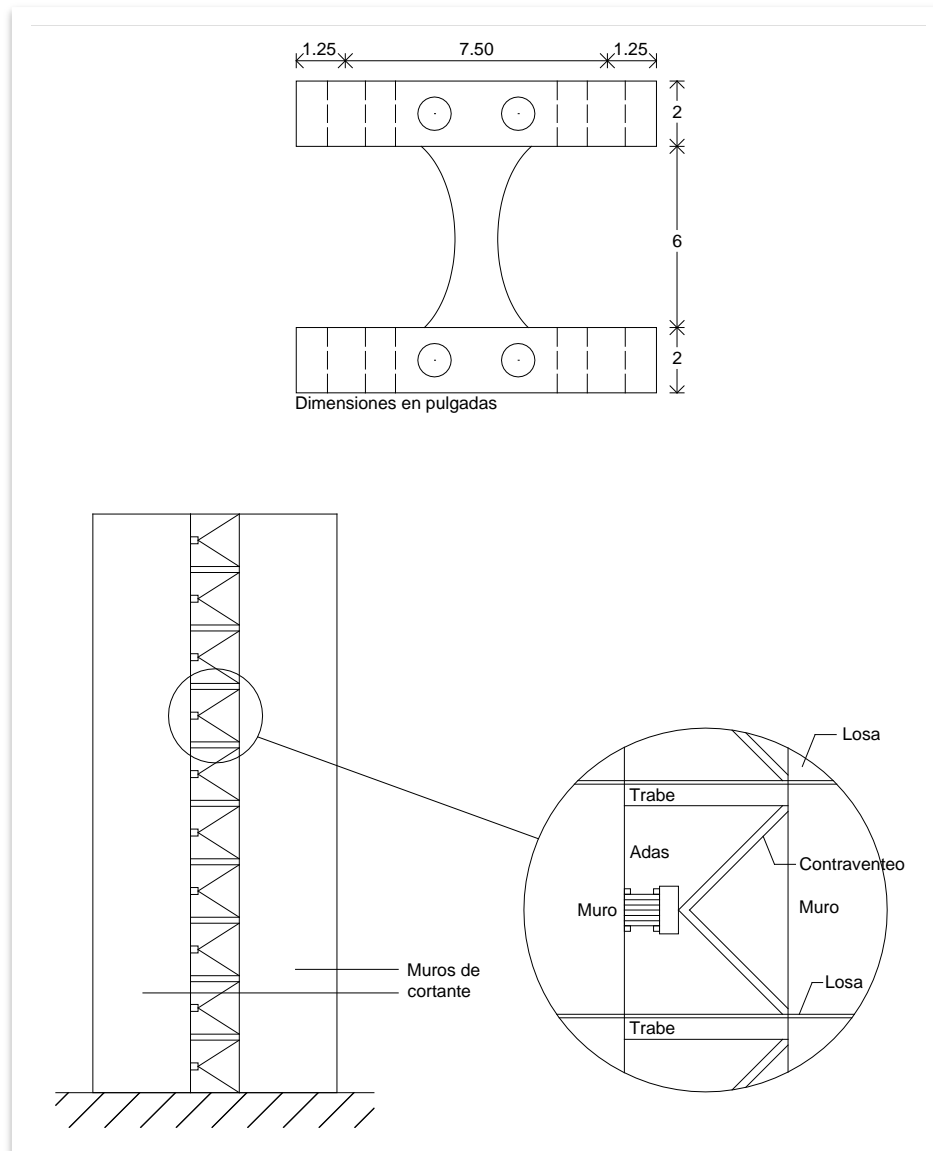


Figura 2.5 Dispositivo ADAS y su colocación en muros de cortante

Los dispositivos TADAS estudiados por Tsai, consisten en una placa triangular, empotradas en uno de sus lados a otra placa de acero, la cual se conecta al nivel superior del entrepiso. En el vértice se colocan pernos, provocando una deformación en curvatura simple.

## DISIPACIÓN POR EXTRUSIÓN

En estos sistemas, la disipación de energía se consigue al deformar transversalmente un determinado material dentro de un tubo con sección variable.

El sistema fue propuesto por Robinson y Greenbank, sin embargo, su aplicación fue realizada veinte años después por Robinson y Cousins.

El dispositivo está conformado por un tubo de acero con corazón de plomo, este se deforma para disipar energía, posteriormente recupera su sección original así como sus propiedades iniciales.

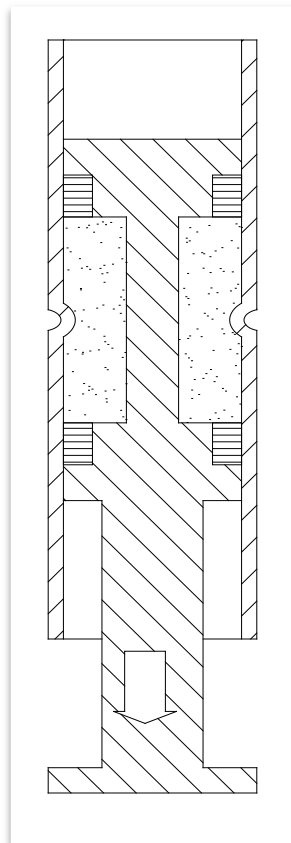


Figura 2.6 Disipador de energía por extrusión

## DISIPACIÓN POR FRICCIÓN

Estos sistemas se componen de 2 placas que son colocadas en las intersecciones de contravientos en forma de cruz, las cuales generan esfuerzos de fricción cuando hay desplazamientos laterales en la estructura, produciendo la disipación de energía.

Según resultados comparativos de modelos analíticos de marcos sometidos a sismos con dispositivos, generados por Pall y Marsh, muestran desplazamientos laterales de una tercera parte respecto a los modelos sin dispositivos.

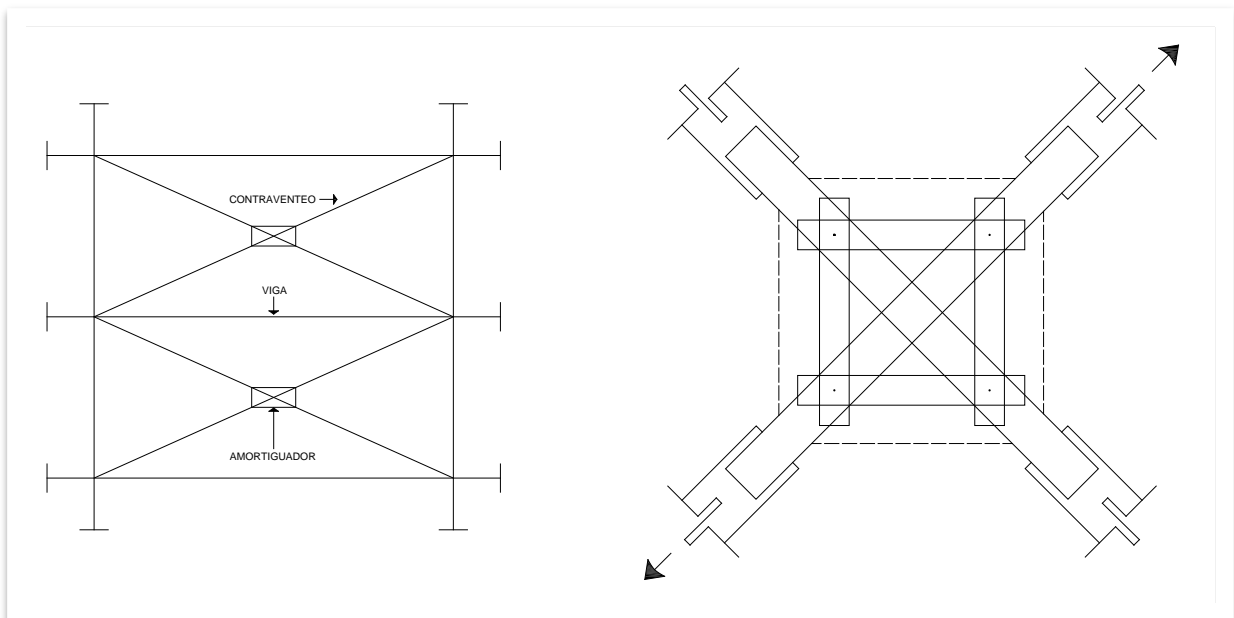


Figura 2.7 Disipador de energía por fricción

Scholl fue otro de los investigadores que experimentó con un dispositivo formado por acero y hule en un marco de un nivel, el cual mostró un incremento en el amortiguamiento y una diferencia en la rigidez con respecto a un marco sin dispositivos.

## DISPOSITIVOS DE MATERIALES CON COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO

Estos dispositivos se colocan como los de fricción; sin embargo, su comportamiento es diferente ya que disipan energía por calor.

Estos disipadores son parecidos a los amortiguadores de un carro, por lo cual su comportamiento viscoelástico es generalmente de polímeros, en ellos las fuerzas desarrolladas contienen componentes en y fuera de fase de movimiento de la estructura bajo excitación armónica.

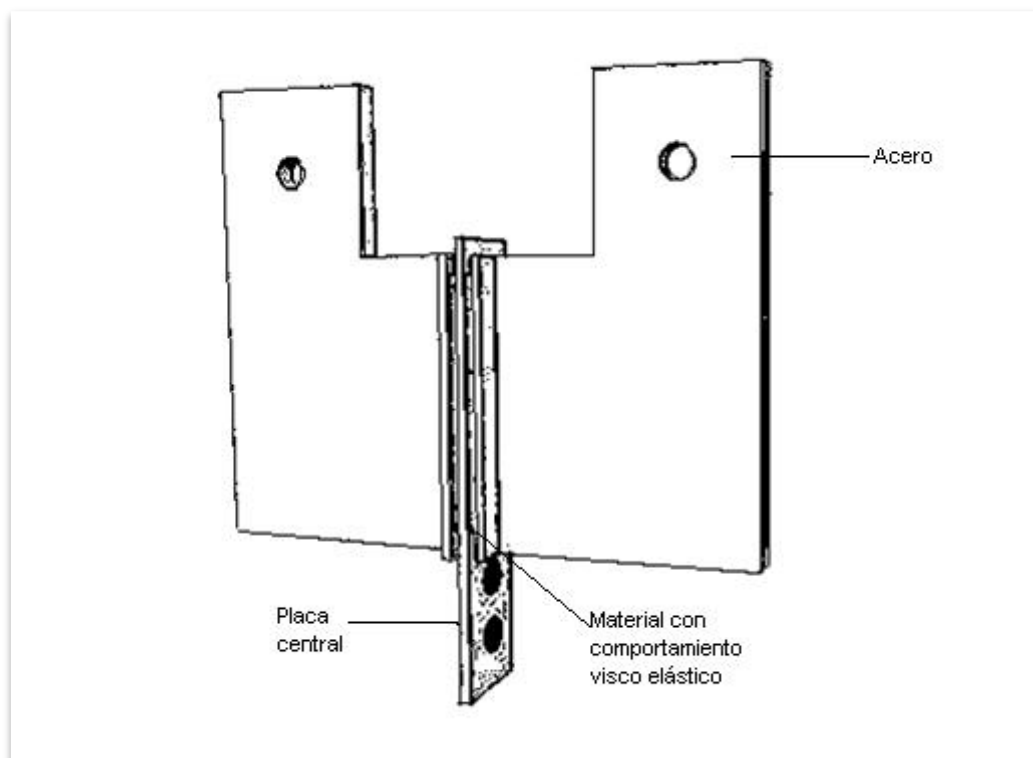


Figura 2.8 Disipador viscoelástico

### 2.1.1.3.1 EDIFICACIONES CON DISIPADORES DE ENERGÍA

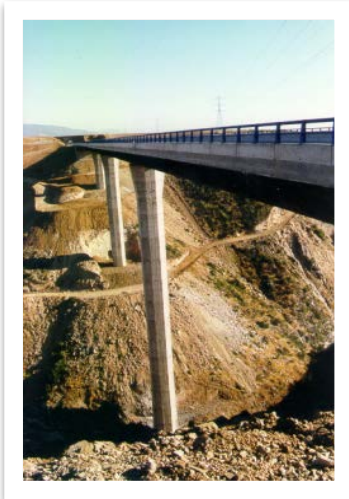
A continuación se muestran algunos ejemplos de edificaciones que cuentan con disipadores de energía, los cuales, como dice su nombre, ayudan a disipar energía ante un evento sísmico, permitiendo que la energía que llegue a la estructura sea menor.



#### Torre Titanium

Santiago de Chile

Cuenta con disipadores de energía, de estructura tubular en forma de “X” cada tres niveles. En caso de sismo, disminuye en 40% la oscilación ante la sacudida de la base.

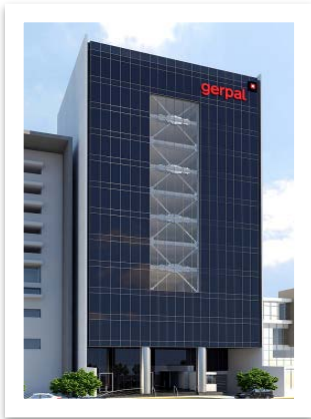


#### Puente Amolanas

Chile

A base de amortiguadores visco elásticos, que se componen de a un elemento viscoso que se deforma o con un elemento metálico que logra la fluencia fácilmente.





### Centro Empresarial Reducto

Miraflores, Perú

Se estructura de disipadores sísmicos de fluido viscoso.



### Torre Mayor

Distrito Federal, México

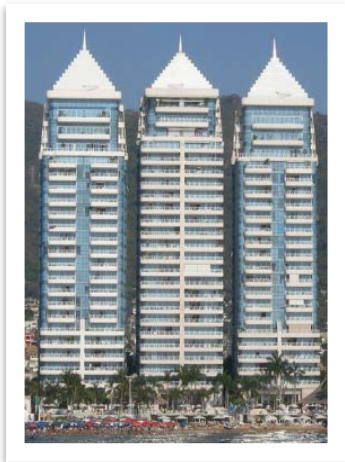
Está equipada con disipadores de energía en un sistema de amortiguadores altamente eficientes para reducir las fuerzas sísmicas y sus movimientos.



### Hospital de Cardiología

Distrito Federal, México

Se conforma por 18 torres metálicas que están sobre la cimentación, y estas a su vez soportan 5 disipadores de energía cada una. Éstos van anclados a cinturones de acero a los nodos de la estructura, uno por cada nivel del edificio.



Conjunto La Jolla

Acapulco, México

Amortiguadores metálicos de fluencia.



Estación de tren Chien-Tan

Taipei, Taiwán

Amortiguadores viscoelásticos.



Ski-Dome

Chiba, Japón

Amortiguadores metálicos de fluencia.



Hotel Atami Korakuen

Takenaka, Japón

Amortiguadores de rozamiento



Edificios de Columbia SeaFirst

Seattle, Estados Unidos

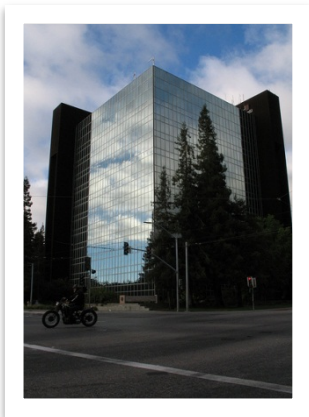
Amortiguadores viscoelásticos



Two Union, Square

Seattle, Estados Unidos

Amortiguadores viscoelásticos.



Edificio Santa Clara County

California, Estados Unidos  
Amortiguadores viscoelásticos.



Canadian Space Agency

Montreal, Canadá  
Amortiguadores de fricción.

### 2.1.1.2 OSCILADORES RESONANTES

Un oscilador resonante es un sistema de un grado de libertad, un elemento restitutivo y un mecanismo de disipación de energía, colocado en la parte superior de la estructura. Para que el oscilador pueda reducir la respuesta dinámica de la estructura debe existir una coincidencia entre las frecuencias naturales de vibración de la estructura y del oscilador resonante.

Los osciladores resonantes son bastante efectivos en la reducción de las vibraciones producidas por el viento en edificios altos y para la reducción de la respuesta sísmica.



### 2.1.1.3 AISLADORES DE BASE

Estos sistemas tienen como principio proteger a las estructuras de los sismos, para ello desacoplan a la estructura del movimiento del suelo logrando un incremento en el periodo fundamental de vibración en todo el sistema, incluyendo a los aisladores.

La protección a la estructura se consigue a partir de dispositivos flexibles a los movimientos horizontales y rígidos al desplazamiento vertical, situados entre los cimientos y la superestructura.

El aislamiento de base es más recomendable en estructuras rígidas y que no tengan una elevada relación altura-anchura, dado que pueden presentar grandes momentos de vuelco generando la pérdida de equilibrio. Además, al incrementar la altura, las ventajas obtenidas de la variación del periodo de vibración disminuyen.

Existen dos tipos de sistemas de aislamiento de base: los apoyos elastoméricos y los apoyos deslizantes.

A su vez, hay tres tipos de apoyos elastoméricos ampliamente usados: apoyos de caucho natural (NRB), apoyos de caucho con núcleo de plomo (LRB), y apoyos de caucho de alta disipación de energía (HDR).

Entre los primeros aisladores de base fabricados comercialmente, se encuentran los apoyos rectangulares o circulares formados con placas de neopreno intercaladas con placas de acero más delgadas (NRB).

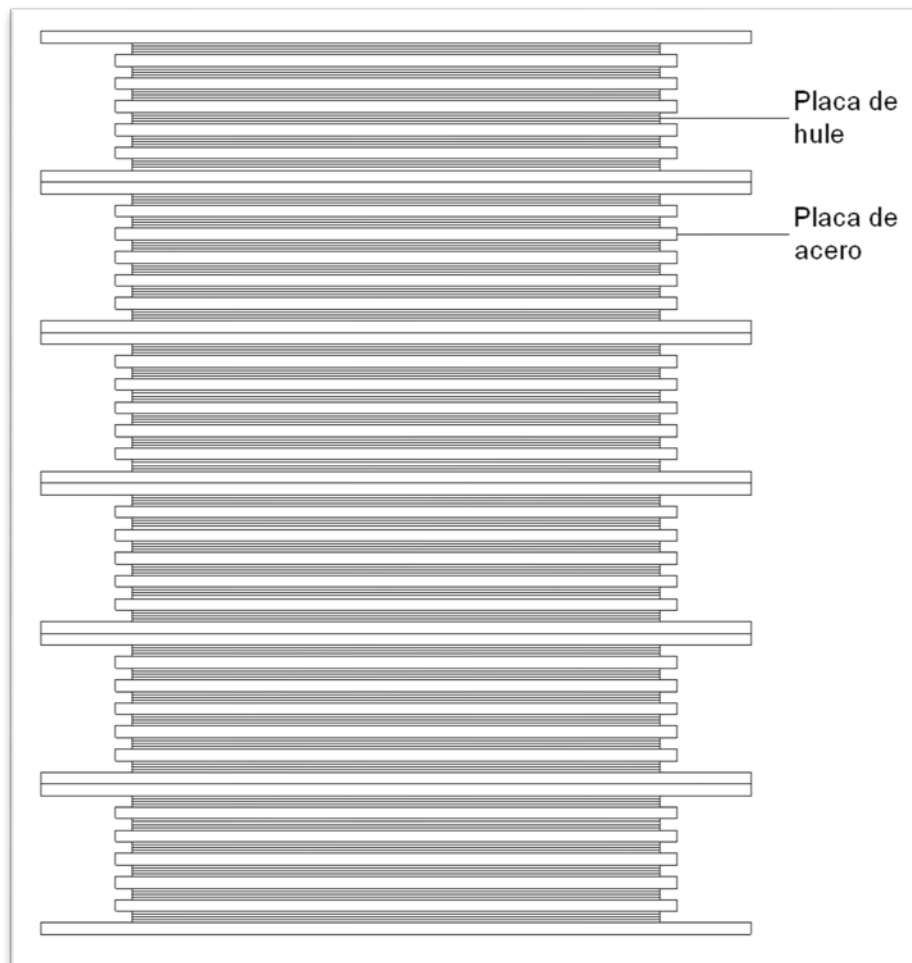


Figura 2.9 Aislador de base

Este dispositivo es muy flexible en su dirección horizontal, pero verticalmente posee una gran rigidez. Su objetivo fundamental es flexibilizar lateralmente a la estructural. Comúnmente son utilizados en puentes.

El aislador de base LRB fue utilizado por Robinson y Tucker, el cual tiene un corazón de plomo con la finalidad de disipar energía, al contrario del utilizado con neopreno.

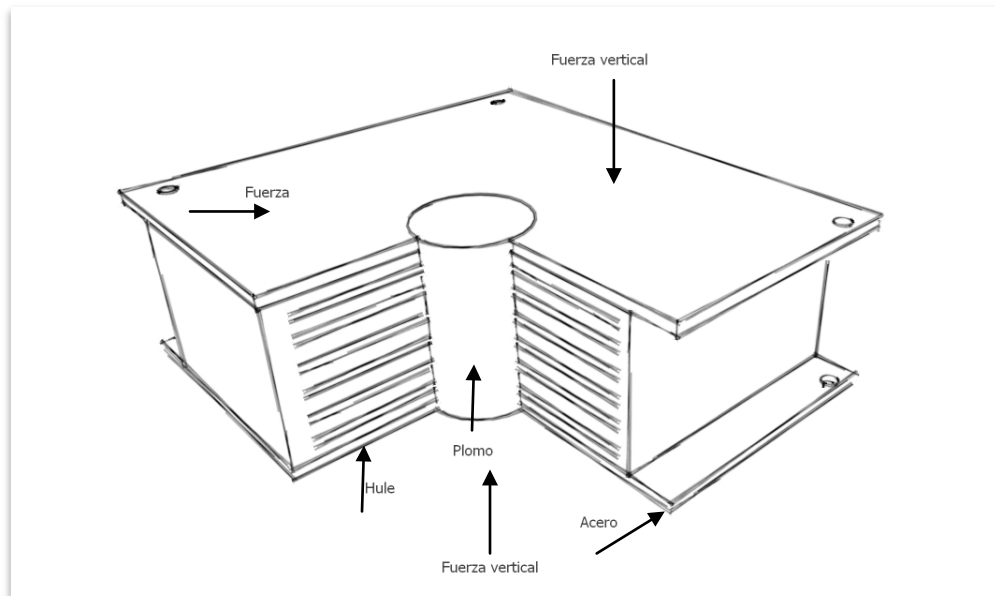


Figura 2.10 Aislador de base con corazón de plomo



Figura 2.11 Imagen real de un apoyo elastomérico

Los apoyos deslizantes poseen una superficie de deslizamiento que permite la disipación de energía por medio de las fuerzas de rozamiento. Uno de los dispositivos más innovadores es el sistema pendular friccionante que combina la acción del deslizamiento con la generación de una fuerza restitutiva debido a la geometría del deslizador.

Los aisladores de base han ido tomando fuerza a lo largo del tiempo, actualmente se han aplicado en varios países como Japón, Estados Unidos, Nueva Zelanda e Italia. En México no hay gran uso de este tipo de dispositivos.

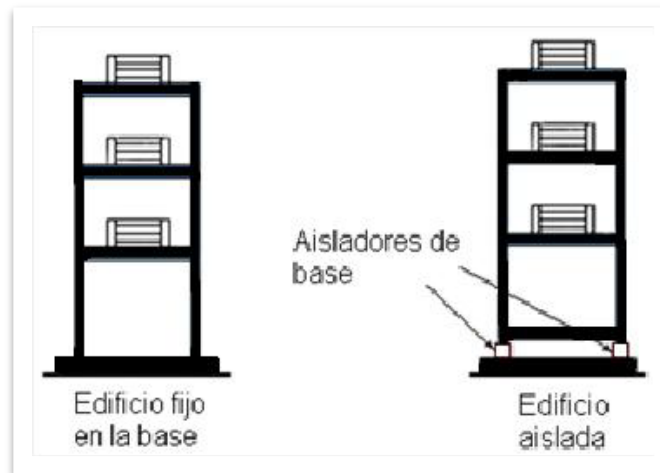


Figura 2.12 Descripción gráfica de la localización del aislador de base

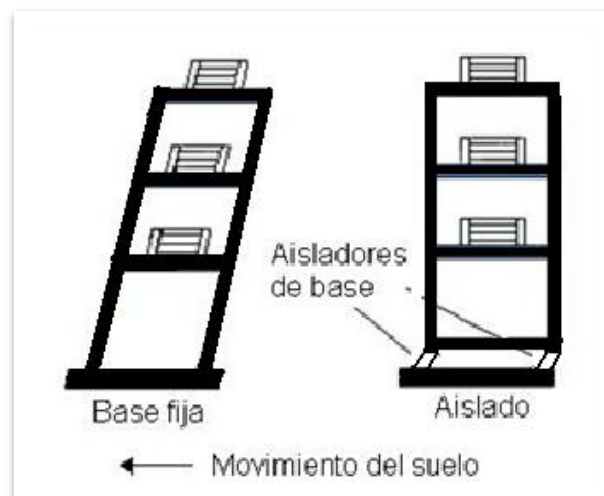


Figura 2.13 Descripción gráfica del comportamiento de una estructura con y sin aisladores de base ante un sismo

Actualmente existen numerosos proveedores de aisladores sísmicos alrededor del mundo entre los que se encuentran:



- Bridgestone (Japón)



Figura 2.14 Diversos lugares en los que se han ocupado los aisladores de base desarrollados por la compañía japonesa Bridgeston.

- Dynamic Isolation Systems (Estados Unidos)



Figura 2.15 Utah State Capitol's Isolator

- Kozo Keikaku Engineering Inc. (Japón)



Figura 2.16 Algunos de los proyectos a cargo de la compañía japonesa

- Seismic Energy Products (Estados Unidos)



Figura 2.17 Sus productos fueron utilizados en el Puente de Manhattan

- Vibro/Dynamics (Estados Unidos)



Figura 2.18 Aisladores elastoméricos

- Seismic Protection Technologies (Chile)

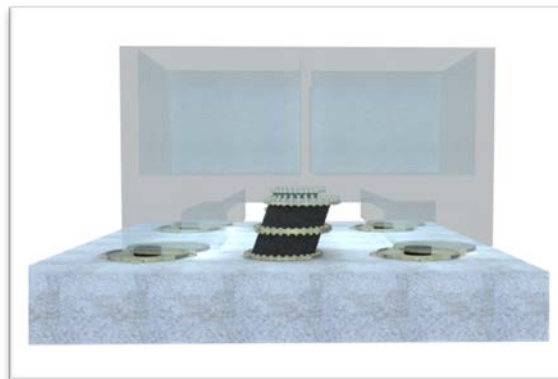


Figura 2.19 Detalle del aislador en el edificio Agustinas

#### 2.1.1.3.1 EDIFICACIONES CON AISLADORES DE BASE

A continuación se muestran algunas edificaciones que cuentan con aisladores de base.



Fire Command and Control Facility

Los Ángeles, Estados Unidos

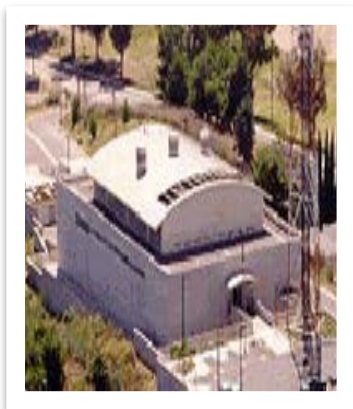
Aisladores de caucho natural con placas de acero.



Foothill Communities Law and Justice Center

California, Estados Unidos

Consta de 98 aisladores de capas múltiples, cojinetes de caucho natural reforzado con placas de acero.



Los Angeles County Emergency Operations Center

California, Estados Unidos

El COE utiliza 28 cojinetes de caucho natural de alto amortiguamiento.



### University of Southern California

California, Estados Unidos

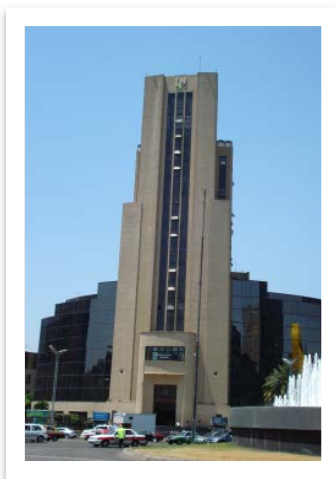
Marco de acero concéntrico apoyado en 68 aisladores de goma de plomo y 81 aisladores elastoméricos.



### Utah State Capitol

Utah, Estados Unidos

El sistema de aislamiento de la base se compone de 265 aisladores, cada uno pesa 5.000 kilos.



### El Moro

Distrito Federal, México

Se utilizó un nuevo sistema llamado flotación elástica.



### Hospital Militar

Santiago de Chile

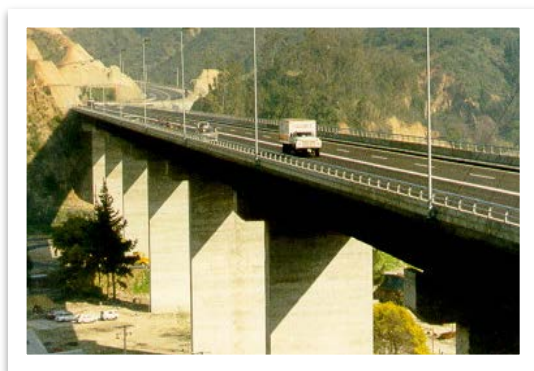
Consta de 162 aisladores sísmicos elastoméricos de 90 cm de diámetro, algunos se componen de corazón de plomo.



### Edificio Comunidad Andalucía

Santiago de Chile

Se construyó sobre un conjunto de 6 aisladores de goma de alto amortiguamiento.



### Viaducto Marga-Marga

Santiago de Chile

Se conforma por 36 aisladores sísmicos, distribuidos en 2 estribos y 7 cepas. Son de 3 tamaños distintos.



Tohoku Power Electrical Company

Miyako Japón

Se apoya en 120 aisladores elastoméricos con un cierto número adicional de amortiguadores de acero y plomo.



William Clayton Building

Wellington, Nueva Zelanda

Utiliza aisladores deslizantes.



The Union House

Nueva Zelanda

Edificio de 12 pisos, apoyando en un marco de concreto reforzado, controlado por un sistema elástico con placas afiladas de acero.

### 2.1.2 SISTEMAS ESTRUCTURALES DE CONTROL ACTIVO

Un sistema de control activo consiste en la modificación de la respuesta dinámica de la estructura a base de fuerzas externas de control. Para la aplicación de dichas fuerzas en la estructura se conectan sensores que midan las respuestas y las excitaciones externas en varias partes de la estructura en un tiempo determinado, dando como resultado la activación de los actuadores, los cuales son los encargados de aplicar las fuerzas necesarias para contrarrestar los movimientos sísmicos.

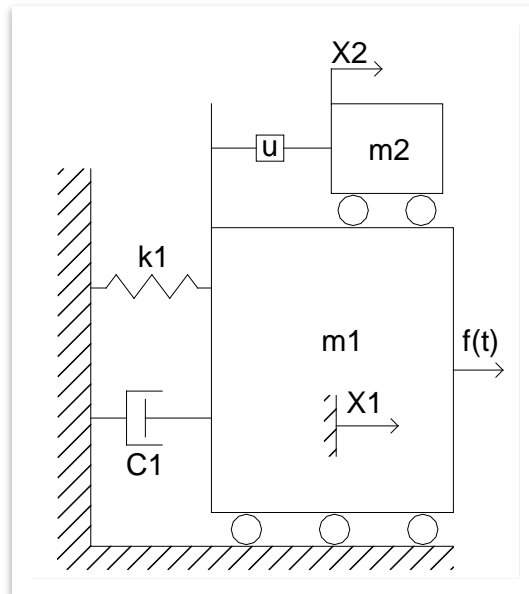


Figura 2.20 Representación de un sistema de control activo

Por lo tanto, se puede decir que la configuración básica de un sistema de control estructural consiste en:

- Sensores situados en la estructura para medir excitaciones externas y/o variables de la respuesta estructural.



- Sistemas controladores que calculen la fuerza a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos basados en los resultados arrojados por los sensores.
- Actuadores alimentados por fuentes de energías externas.

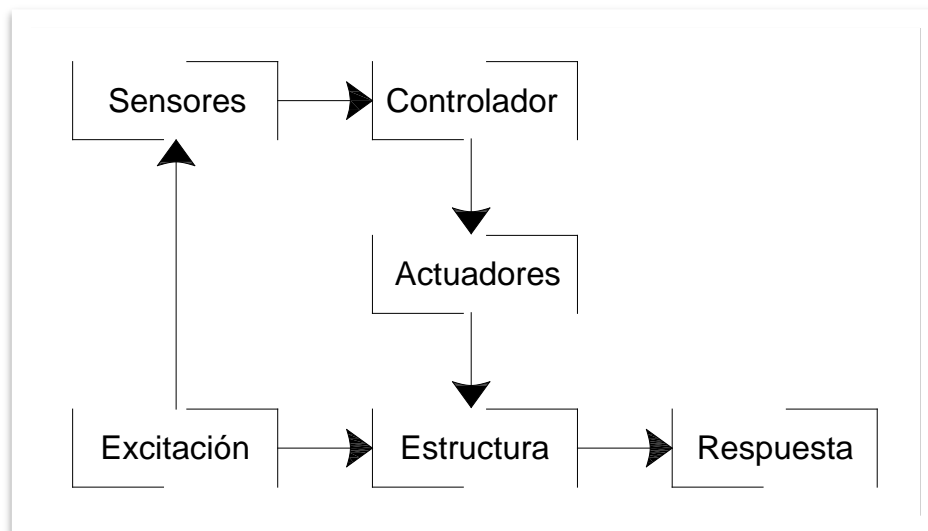


Figura 2.21 Sistema estructural de control activo

Los sistemas activos presentan grandes ventajas respecto a los sistemas pasivos, entre las que destacan:

- Mayor efectividad en control de la respuesta estructural.
- Efectividad menos sensible a las condiciones locales del suelo.
- Aplicación ante de un sistema activo usado tanto para el control estructural ante vientos como terremotos.
- Selección de los objetivos de control, permitiendo el confort humano sobre otros aspectos y la seguridad estructural ante una acción dinámica severa.

Sin embargo, los sistemas activos también presentan algunos inconvenientes, como lo son:

- Elevado costo en mantenimiento.
- Dependencia de fuentes de alimentación externas.
- La respuesta dinámica de edificios de varios grados de libertad y un posible comportamiento no lineal resulta imprevisible, así como un control a partir de sensores y actuadores limitados, planteando un problema dinámico complejo.

### 2.1.3 SISTEMAS ESTRUCTURALES DE CONTROL HÍBRIDO

Los sistemas híbridos son sistemas que emplean una combinación de sistemas activos y pasivos.

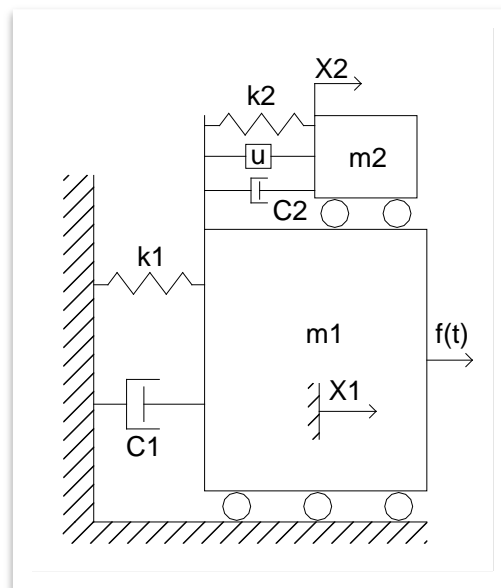


Figura 2.22 Representación de un sistema de control híbrido

Debido a que el sistema implica múltiples dispositivos de control funcionando simultáneamente, los sistemas de control híbrido pueden aliviar algunas de las

restricciones y limitaciones que existen cuando sólo uno de los sistemas (pasivo o activo) es utilizado. Además, debido a que el control se consigue a partir de la actuación de un dispositivo pasivo, el sistema de control híbrido es más fiable y presenta requerimientos energéticos inferiores que un sistema totalmente activo, sin embargo, puede resultar más complejo.

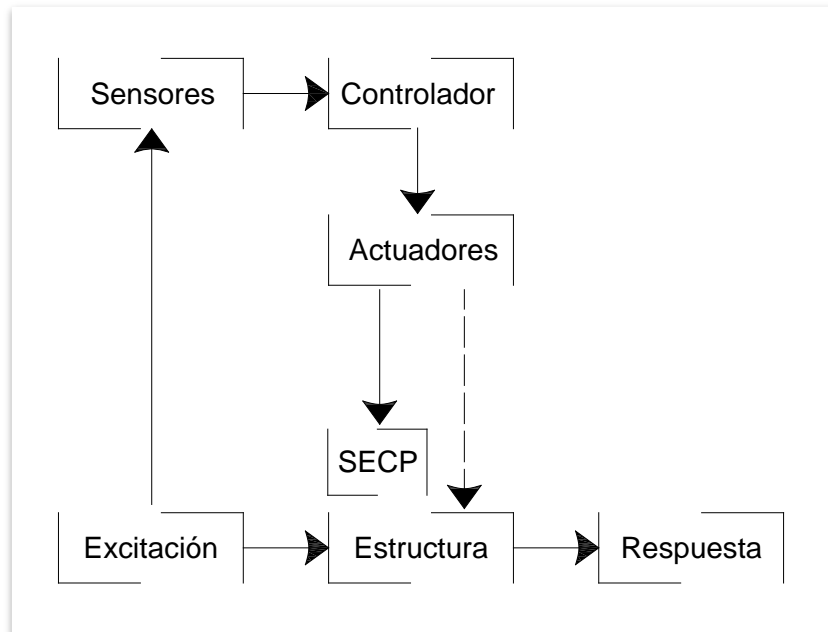


Figura 2.23 Sistema estructural de control híbrido

Existen dos sistemas híbridos que han despertado mayor interés, los de aislamiento de base con control activo del desplazamiento de base y el amortiguador de masa híbrida (HMD).

En el sistema de aislamiento de base con control activo su componente pasivo desacopla parcialmente la estructura del terreno, a costa de un desplazamiento significativo entre subestructura y superestructura, en ese momento el componente activo debe controlar dicho movimiento mediante un actuador, respetando la demanda energética.



El HMD se compone de una masa oscilante pasiva, la encargada de reducir la respuesta del edificio y de un actuador activo, destacando una mejora en la eficiencia del sistema y mayor rigidez frente a cambios dinámicos en la estructura.

### 3. MODELO MATEMÁTICO DE APOYOS CON AISLAMIENTO SÍSMICO





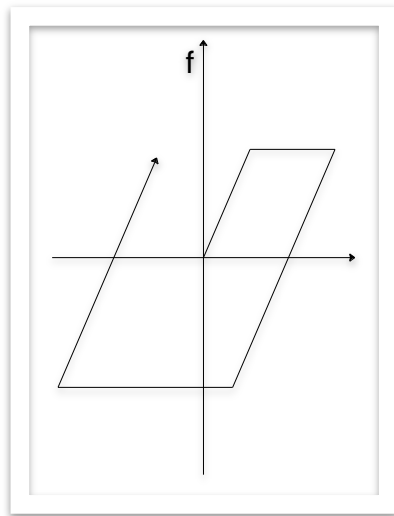
Los modelos matemáticos utilizados para la representación de la relación que hay en un sistema de masas entre la fuerza y el desplazamiento en una secuencia (aleatoria en eventos sísmicos) de carga y descarga reciben el nombre de modelos histeréticos.

Para una secuencia progresiva de cargas y descargas, la curva esquelética es la línea que une los puntos pico en la curva carga-deflexión. Asimismo, la curva que se obtiene bajo las inversiones de signos de la fuerza se llama curva de histéresis; esta curva se afecta significativamente por los materiales y el tipo estructural.

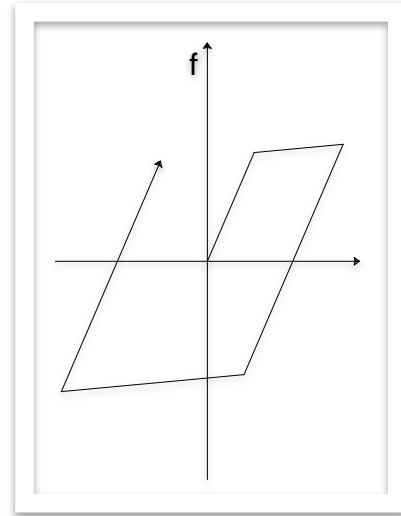
Una clasificación de este tipo de modelos es la que se basa en la presencia o no de pérdida de la capacidad disipativa, a partir de ahí, se pueden distinguir los modelos degradantes y los no degradantes.

Los modelos degradantes son utilizados en elementos estructurales de concreto reforzado de estructuras convencionales.

Entre los modelos no degradantes más simples se encuentran los bilineales, éstos han sido utilizados extensamente para estructuras de acero y de concreto armado. Este modelo consta de las siguientes características, considera 2 rigideces, la elástica y la de fluencia; las pendientes de descarga y de carga en reversa, es la misma de la etapa elástica. Según la figura que se muestra a continuación, la disipación de energía en este modelo varía dependientemente respecto a las deformaciones, es decir, para deformaciones de amplitudes altas se tiene mucha disipación de energía, y para amplitudes bajas no se considera disipación de energía histerética.



a) Elastoplástico perfecto



b) Bilineal

El modelo que ha sido más aceptado para la investigación y diseño de una estructura con aisladores de base es el modelo bilineal, esto se debe a que caracteriza las propiedades mecánicas de los aisladores adecuadamente tanto para aisladores elastoméricos como para aisladores de fricción.

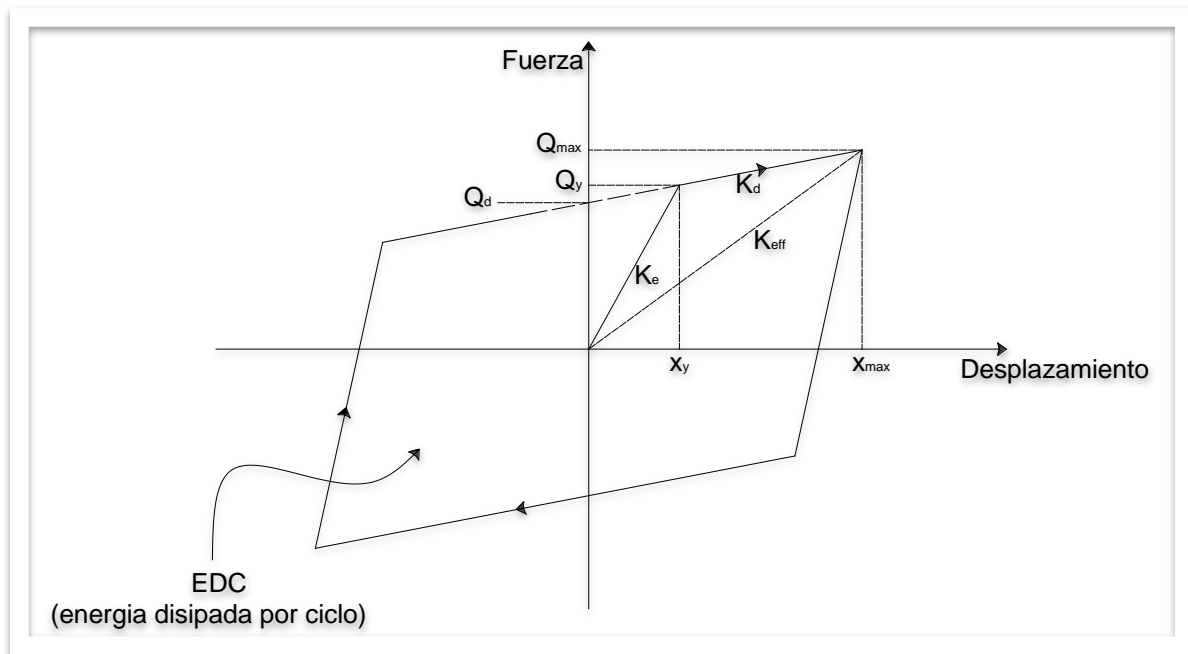


Figura 3.1 Modelo bilineal de histéresis de un aislador sísmico



### 3.1 PARÁMETROS QUE DEFINEN EL MODELO BILINEAL DE UN AISLADOR SÍSMICO

Para llevar a cabo el modelo bilineal de histéresis de un aislador sísmico, se deben definir tres parámetros básicos.

1. Rigidez Elástica  $K_e$
2. Rigidez Postfluencia  $K_d$
3. Fuerza Característica  $Q_d$

La rigidez elástica  $K_e$  se puede estimar de un ciclo de histéresis de pruebas de ensayos de apoyos elastoméricos o como un múltiplo de la rigidez a la postfluencia,  $K_p$ , para apoyos de núcleo de plomo.

La fuerza característica  $Q_d$ , se puede estimar de un ciclo de histerético para apoyos elastoméricos. Para los apoyos de núcleo de plomo,  $Q_d$  se obtiene del esfuerzo de fluencia del plomo.

La rigidez a la postfluencia,  $K_d$ , puede ser estimada mediante ensayos experimentales.

La rigidez efectiva  $K_{eff}$ , se puede encontrar en un ciclo de histéresis como la pendiente secante de pico a pico, y se define como la fuerza máxima entre el desplazamiento máximo que produce éste desplazamiento en un aislador.

De la Figura 3.1 se puede deducir la fuerza de fluencia como:

$$Q_y = K_e X_y \quad (3.1)$$





y la fuerza máxima:

$$Q_{m\acute{a}x} = Q_d + K_d X_{m\acute{a}x} \quad (3.2)$$

donde  $X_{m\acute{a}x}$  es el desplazamiento máximo de diseño del aislador.

De la ecuación (3.1) se obtiene:

$$X_y = \frac{Q_y}{K_e} \quad (3.3)$$

y su rigidez a la postfluencia es:

$$K_d = \frac{Q_y - Q_d}{X_y} \quad (3.4)$$

despejando  $Q_y$  de la ecuación (3.4), se tiene:

$$Q_y = Q_d + K_d X_y \quad (3.5)$$

sustituyendo la ecuación (3.5) en la (3.3)

$$X_y = \frac{Q_d + K_d X_y}{K_e} \quad (3.6)$$

de esta ecuación se puede evaluar el desplazamiento de fluencia como:

$$X_y = \frac{Q_d}{K_e - K_d} \quad (3.7)$$

A continuación se determinan las ecuaciones para calcular la rigidez lineal efectiva,  $K_{eff}$  y el amortiguamiento viscoso equivalente,  $\varepsilon_h$ .

Del modelo bilineal de histéresis del aislador sísmico (Figura 3.1), la rigidez efectiva se calcula como:

$$K_{eff} = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{X_{m\acute{a}x}} \quad (3.8)$$

Sustituyendo la ecuación (3.2) en la ecuación anterior:

$$K_{eff} = \frac{Q_d + K_d X_{m\acute{a}x}}{X_{m\acute{a}x}} \quad (3.9)$$

finalmente se tiene:

$$K_{eff} = K_d + \frac{Q_d}{X_{m\acute{a}x}} \quad (3.10)$$

Por otro lado, el amortiguamiento viscoso equivalente,  $\varepsilon_h$ , se determina como [Ref. 7]:

$$\varepsilon_h = \frac{\text{Área de histéresis del aislador}}{2\pi K_{eff} X_{m\acute{a}x}^2} \quad (3.11)$$

Del modelo histerético se tiene:

$$\varepsilon_h = \frac{2Q_d(X_{m\acute{a}x} - X_y)}{\pi K_{eff} X_{m\acute{a}x}^2} \quad (3.12)$$



sustituyendo las ecuaciones (3.7) y (3.10) en la ecuación (3.12)

$$\varepsilon_h = \frac{2Q_d X_{m\acute{a}x} - \frac{Q_d}{K_e - K_d}}{\pi \left( K_d + \frac{Q_d}{X_{m\acute{a}x}} \right) X_{m\acute{a}x}^2} \quad (3.13)$$

finalmente:

$$\varepsilon_h = \frac{2}{\pi} \frac{Q_d X_{m\acute{a}x} - \frac{Q_d^2}{K_e - K_d}}{K_d X_{m\acute{a}x}^2 + Q_d X_{m\acute{a}x}} \quad (3.14)$$



La estructura que se propone para este estudio se indica en la figura 4.1, que corresponde a una edificación para uso de oficinas de 8 niveles. De acuerdo con la zonificación propuesta en el Reglamento de Construcción del Distrito Federal, este marco se encuentra ubicado en la Zona I.

Este modelo se analizará bajo la influencia del sismo acontecido en la Ciudad de México en el año 1985, su registro sísmico fue obtenido de la estación ubicada en la mesa vibratoria del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

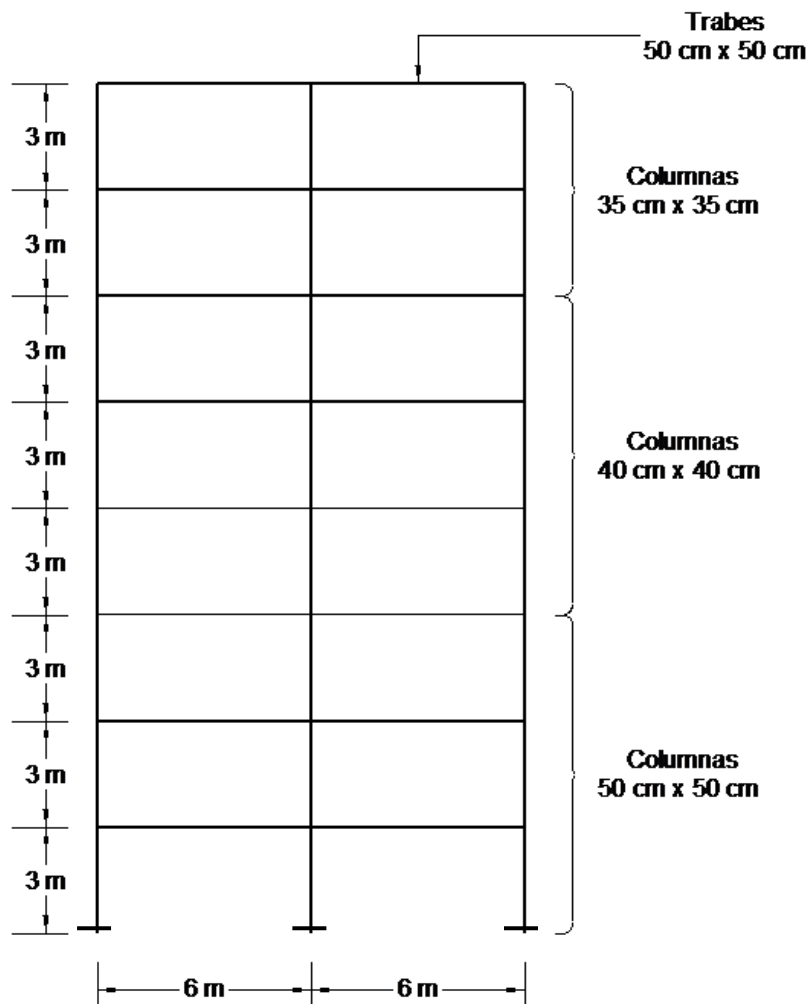


Figura 4.1 Vista frontal de la estructura a utilizar

## 4.1 MARCO CON APOYOS CONVENCIONALES

En la siguiente figura se muestra el marco antes descrito ya modelado en el programa sap2000 con sus apoyos convencionales y sus respectivos elementos estructurales.

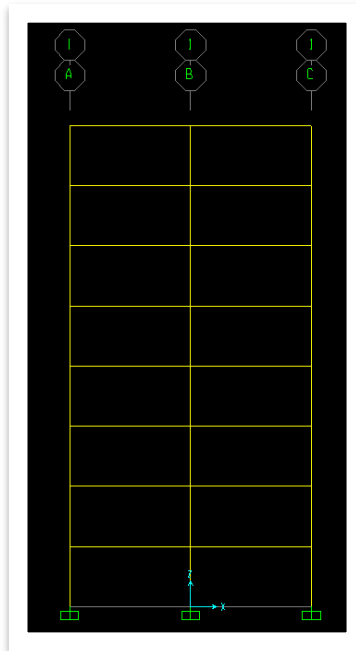


Figura 4.2 Vista sobre el plano xz del modelo con apoyos convencionales desde el programa SAP2000

## 4.2 MARCO SOPORTADO POR AISLADORES DE BASE

Se llevará a cabo el análisis no lineal de un marco soportado por dos tipos de aisladores en la base, previamente diseñados, con ayuda del programa SAP2000. Se utilizarán dos aisladores tipo 1, los cuales irán en los extremos del marco, y un aislador tipo 2 que irá en el medio.



#### 4.2.1 MODELO MATEMÁTICO

El marco a utilizar está colocado directamente sobre 2 tipos de aisladores de base fabricados por la empresa *DYS (Dynamic Isolation Systems)*. Estos aisladores tienen un corazón de plomo en el centro de 0.1m y 0.15m de diámetro respectivamente y rodeado por 20 capas de caucho apiladas.

Los aisladores fueron diseñados previamente con base en la capacidad de carga axial de las columnas. Para ello, se calculará la bajada de cargas tomando en cuenta los pesos propios de las columnas y trabes, así como las cargas vivas y muertas respectivas y áreas tributarias. Obteniendo así, cargas axiales de 72 t en las columnas de los extremos y 144 t en la columna del centro.

Sin embargo, los aisladores fueron diseñados para cargas axiales de 117t y 184t y máximos desplazamientos de 0.25m y 0.36m respectivamente. Se tomaron estos aisladores porque si se tomaban aisladores con menor capacidad de carga, sus máximos desplazamientos disminuían y eran menores a los que necesitaba el marco.

Considerando los arreglos de capacidad de carga, se buscaron en la base de datos de *DIS* los aisladores de base que producen y en ella se encontraron tabulaciones que contienen las propiedades de sus productos. Así pues, se hicieron los cálculos necesarios para obtener las rigideces elásticas, a la post fluencia, efectiva y la fuerza de fluencia, así como sus propiedades geométricas.

A continuación se presenta la tabla 4.1 con las propiedades de los 2 aisladores a utilizar.

Tabla 4.1 Propiedades de los aisladores de base.

Tipo de aislador	Rigidez lineal efectiva (t/m)	Rigidez lineal (t/m)	Fuerza de fluencia (t)	Relación de la rigidez de postfluencia a la rigidez de prefluencia	Rigidez vertical (t/cm)	Diámetro del aislador (cm)	Altura del aislador (cm)
1	92	510	8.2	0.1	11213	45.5	30
2	97	714	9.2	0.1	50968	57	30

En la figura 4.3 se muestra el marco ya modelado en el programa sap2000 con sus respectivos aisladores sísmicos y elementos estructurales.

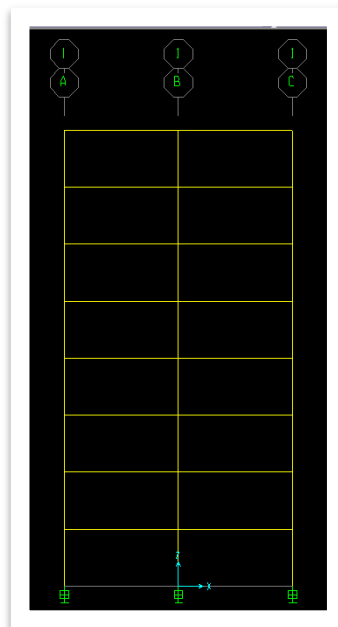


Figura 4.3 Vista sobre el plano xz del modelo con aisladores desde el programa SAP2000

## 4.2.2 CAPTURA DE LAS PROPIEDADES DE LOS AISLADORES SÍSMICOS CON COMPORTAMIENTO BILINEAL EN EL PROGRAMA SAP2000

### 4.2.2.1 PROPIEDADES DE LOS AISLADORES

Para poder determinarlas las propiedades de los aisladores sísmicos en el programa sap2000, se sigue la siguiente secuencia:



Define → Section Properties → Link/Support Properties

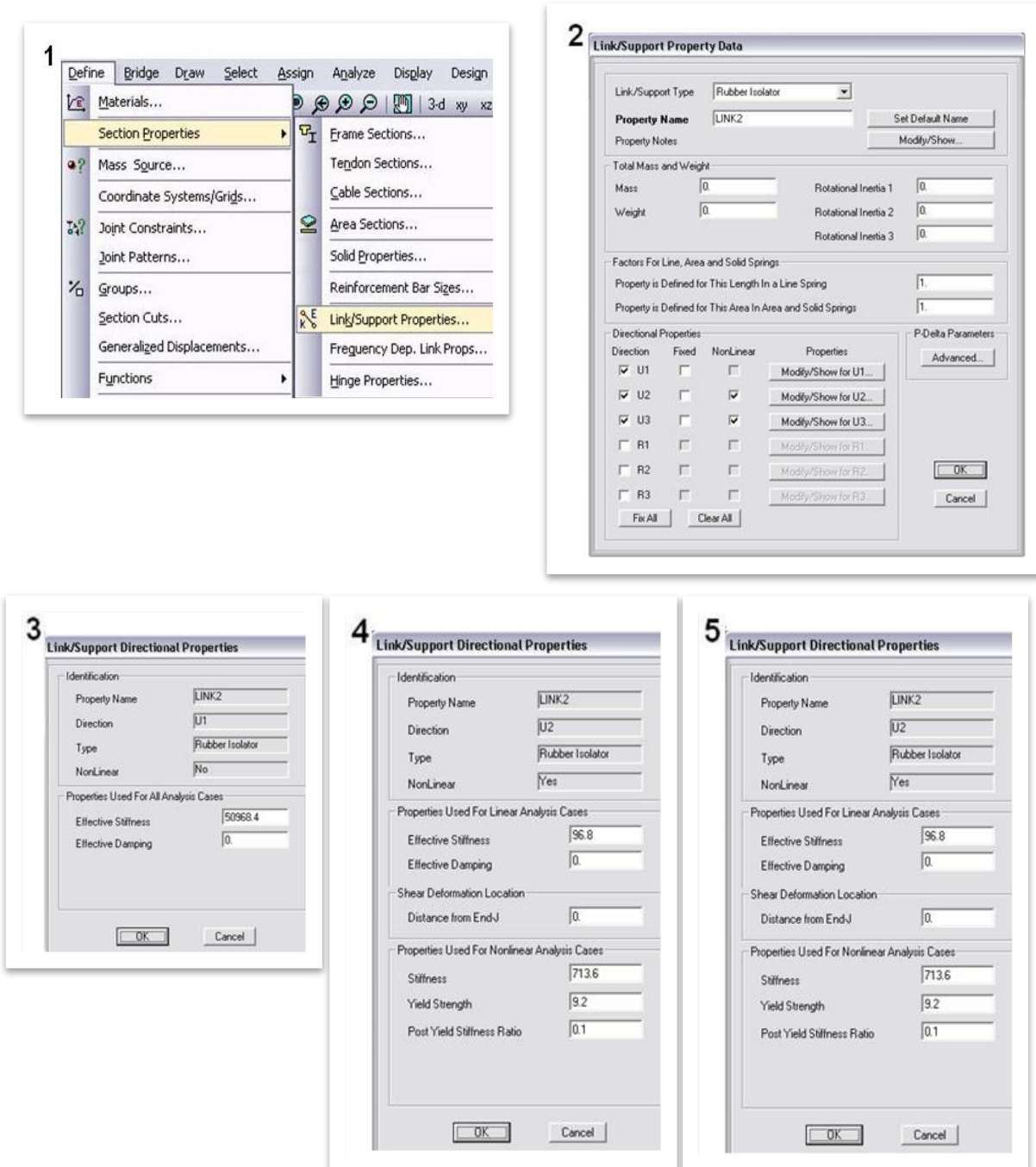


Figura 4.4 Secuencia de la captura de datos de las propiedades del aislador

## 4.2.2.2 DEFINICIÓN DEL REGISTRO SÍSMICO

La secuencia para definir el registro sísmico al que será sometido el marco es:

Define → Functions → Time History

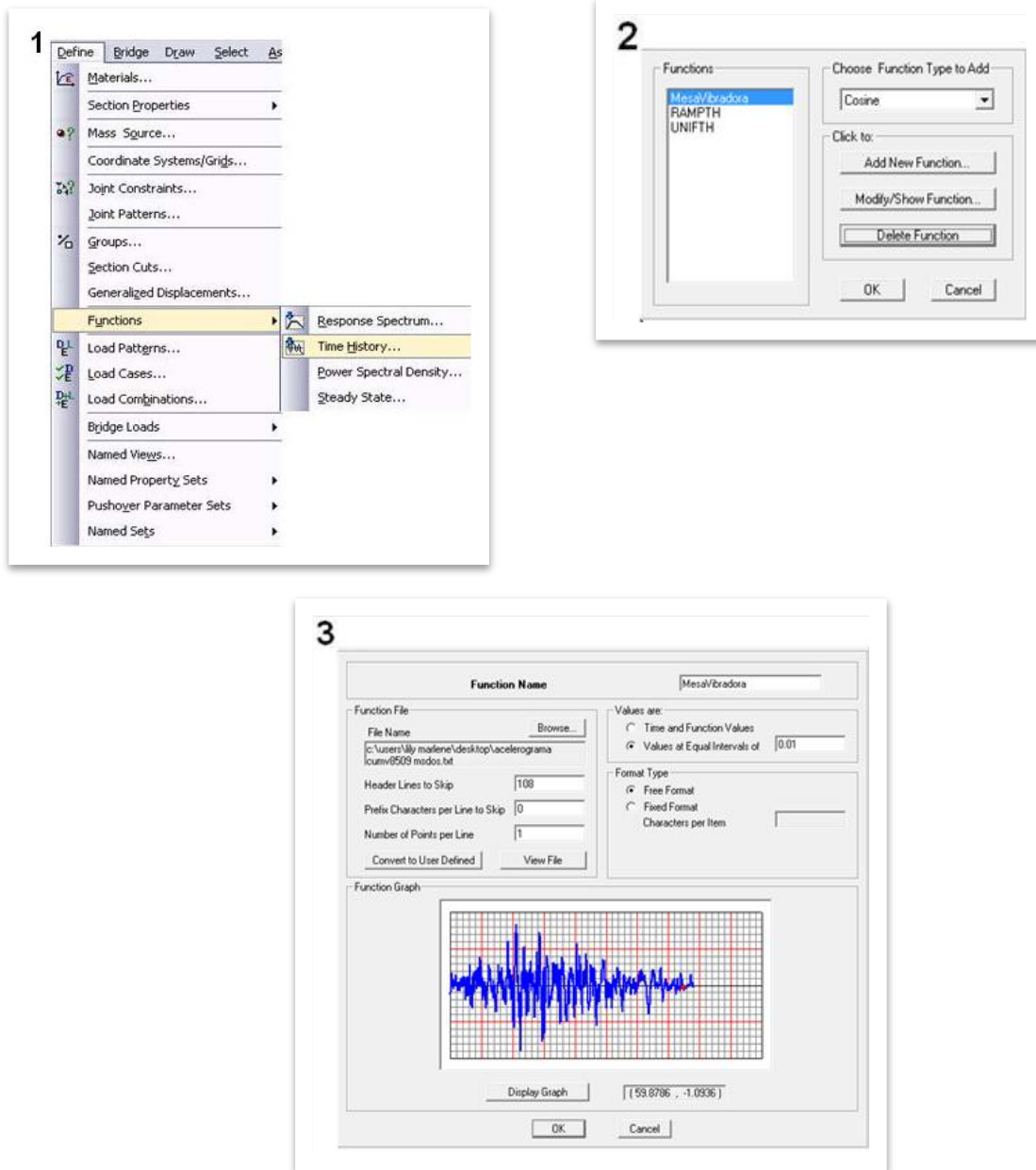


Figura 4.5 Definición de registros sísmicos

### 4.2.2.3 DEFINICIÓN DE CASOS SÍSMICOS

El caso sísmico a utilizar se nombró como Pasox y se determina de la siguiente manera:

Define → Load cases

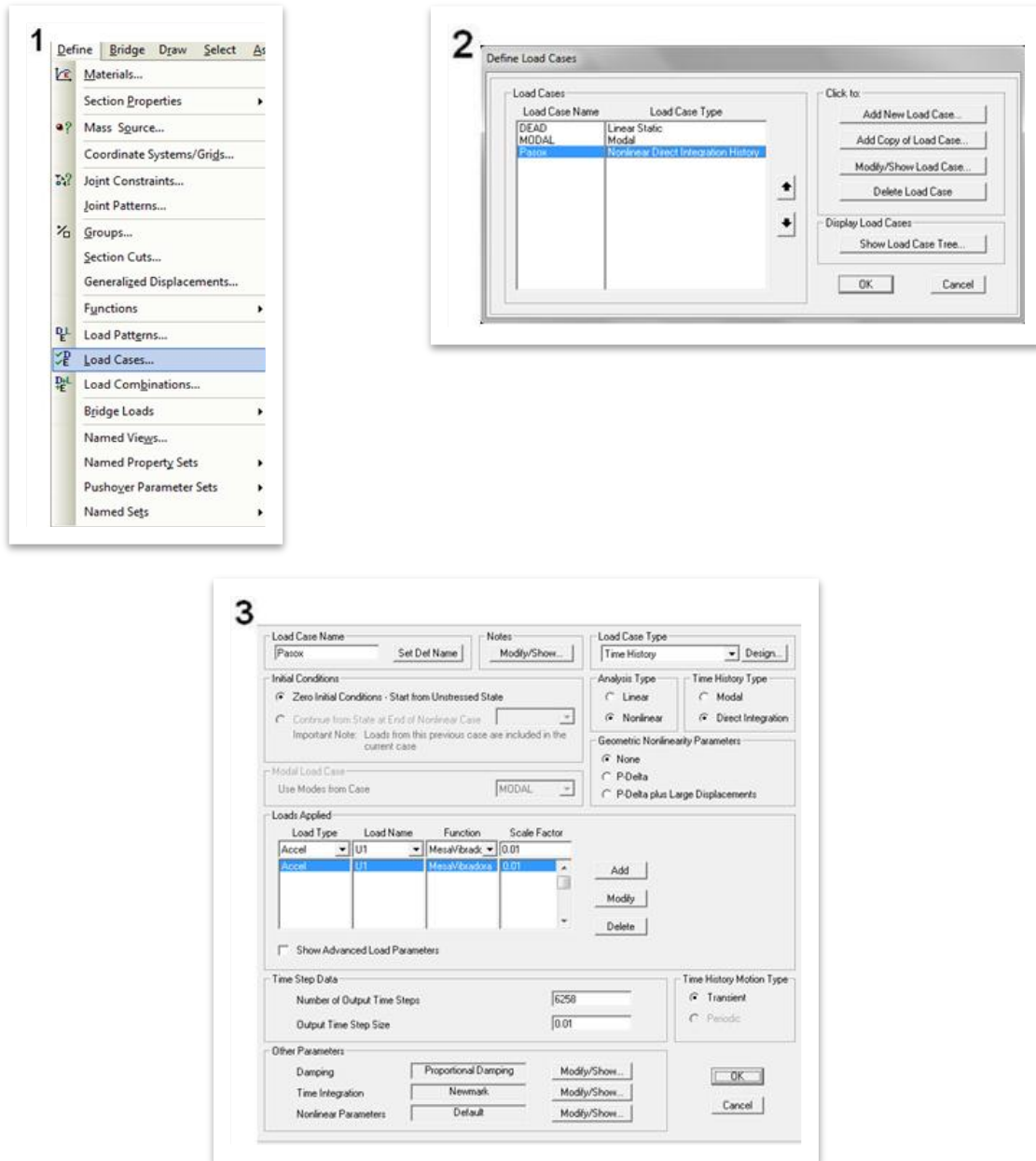


Figura 4.6 Definición de los casos sísmicos a utilizar

## 5. RESULTADOS



## 5.1 COMPORTAMIENTO DE LOS AISLADORES EN EL MARCO

El comportamiento descrito tanto en el aislador de base tipo 1 como en el tipo 2 es similar, demostrándose que hay fluencia en los aisladores y que presenta incrementos pero sin variar las rigideces elásticas ya que se puede ver que éstas mantienen la misma pendiente, es decir, son aproximadamente paralelas entre sí.

La figura 5.1 muestra el ciclo de histéresis que describe el aislador de base tipo 1 ubicado en los extremos del marco y sujeto al sismo acontecido en la ciudad de México en 1985.

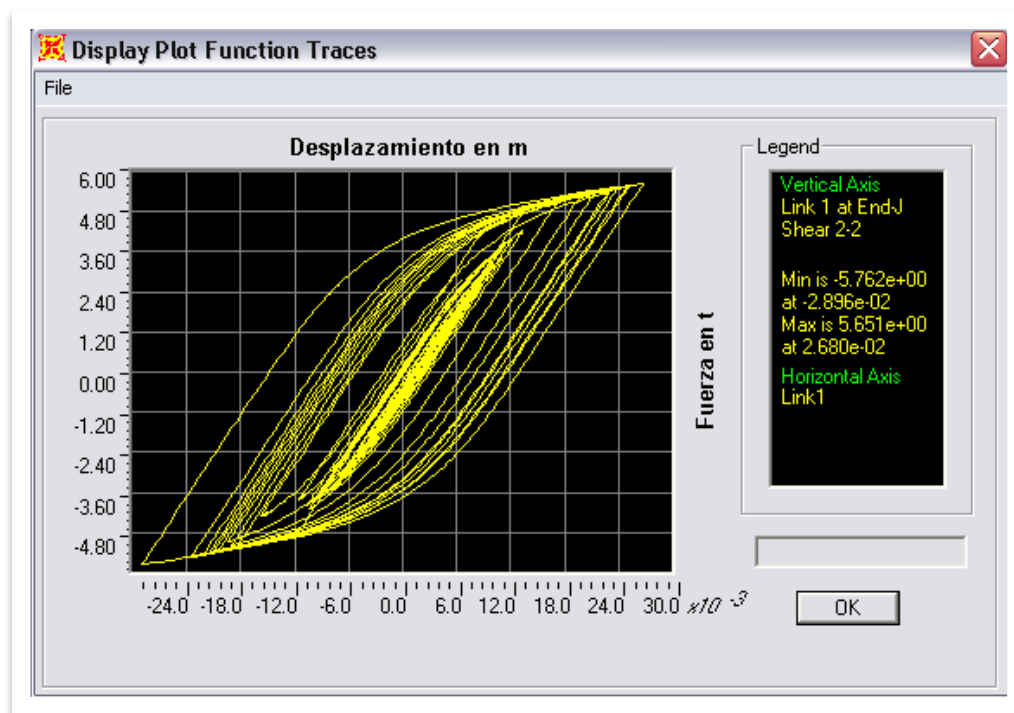


Figura 5.1 Ciclo de histéresis del aislador 1 ubicado en los apoyos extremos del marco.

La figura 5.2 muestra el ciclo de histéresis que describe el aislador de base tipo 2 ubicado en el apoyo del centro del marco.

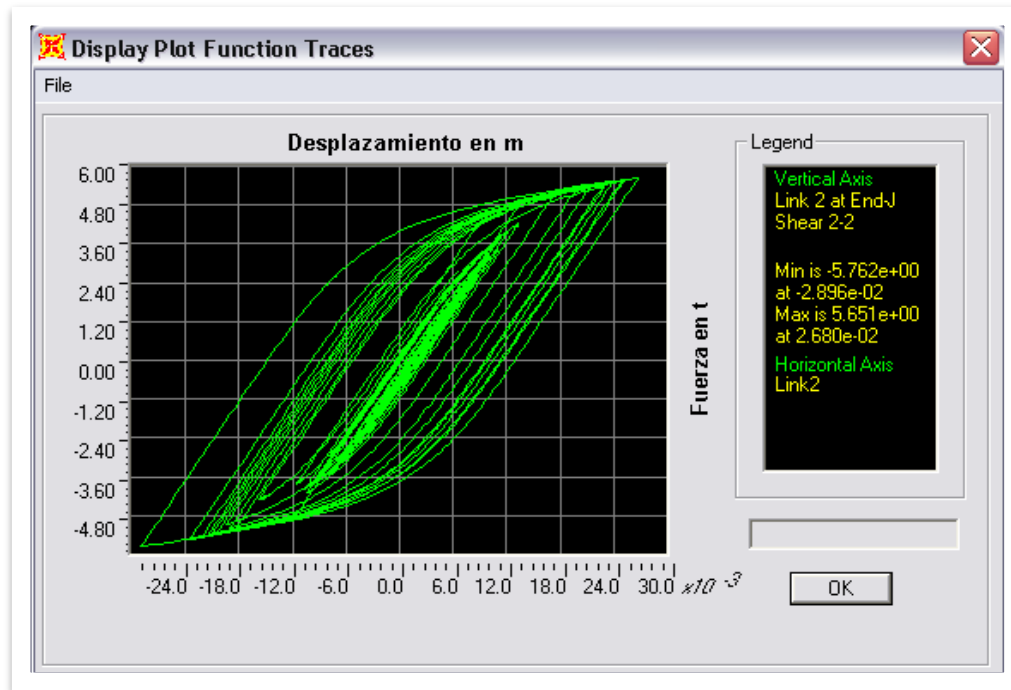


Figura 5.2 Ciclo de histéresis del aislador tipo 2 ubicado en el apoyo del centro del marco.

## 5.2 MODOS DE VIBRAR DEL MARCO CON AISLADORES SÍSMICOS

En la tabla 5.1 se presentan los valores de los modos de vibrar de la estructura con aisladores sísmicos en la base, obtenidos de los resultados del análisis empleando el programa sap2000.



Tabla 5.1 Modos de vibrar del marco con aisladores sísmicos.

Table: Modal Periods And Frequencies						
Output Case	Step Type	Step Num	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
			Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>
MODAL	Mode	1	2.653056	3.77E-01	2.37E+00	5.61E+00
MODAL	Mode	2	0.679212	1.47E+00	9.25E+00	8.56E+01
MODAL	Mode	3	0.327789	3.05E+00	1.92E+01	3.67E+02
MODAL	Mode	4	0.20592	4.86E+00	3.05E+01	9.31E+02
MODAL	Mode	5	0.155722	6.42E+00	4.03E+01	1.63E+03
MODAL	Mode	6	0.152956	6.54E+00	4.11E+01	1.69E+03
MODAL	Mode	7	0.140129	7.14E+00	4.48E+01	2.01E+03
MODAL	Mode	8	0.124933	8.00E+00	5.03E+01	2.53E+03
MODAL	Mode	9	0.105835	9.45E+00	5.94E+01	3.52E+03
MODAL	Mode	10	0.080714	1.24E+01	7.78E+01	6.06E+03
MODAL	Mode	11	0.06114	1.64E+01	1.03E+02	1.06E+04
MODAL	Mode	12	0.044868	2.23E+01	1.40E+02	1.96E+04

### 5.3 MODOS DE VIBRAR DEL MARCO SIN AISLADORES SÍSMICOS

En la tabla 5.2 se muestran los valores de los modos de vibrar de la estructura soportada por apoyos convencionales, obtenidos de los resultados del análisis empleando el programa sap2000.



Tabla 5.2 Modos de vibrar del marco con apoyos convencionales.

Table: Modal Periods And Frequencies						
Output Case	Step Type	Step Num	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
			Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	1.347928	7.42E-01	4.66E+00	2.17E+01
MODAL	Mode	2	0.443932	2.25E+00	1.42E+01	2.00E+02
MODAL	Mode	3	0.248629	4.02E+00	2.53E+01	6.39E+02
MODAL	Mode	4	0.162266	6.16E+00	3.87E+01	1.50E+03
MODAL	Mode	5	0.118823	8.42E+00	5.29E+01	2.80E+03
MODAL	Mode	6	0.095961	1.04E+01	6.55E+01	4.29E+03
MODAL	Mode	7	0.091546	1.09E+01	6.86E+01	4.71E+03
MODAL	Mode	8	0.073725	1.36E+01	8.52E+01	7.26E+03
MODAL	Mode	9	0.068973	1.45E+01	9.11E+01	8.30E+03
MODAL	Mode	10	0.068709	1.46E+01	9.14E+01	8.36E+03
MODAL	Mode	11	0.052127	1.92E+01	1.21E+02	1.45E+04
MODAL	Mode	12	0.036095	2.77E+01	1.74E+02	3.03E+04

En la figura 5.3 se podrá apreciar con mayor claridad el incremento del período de la estructura con aisladores sísmicos comparada con la que tiene apoyos convencionales, lo cual favorece en la disminución de las aceleraciones y, por lo tanto, en la magnitud de las fuerzas sísmicas.

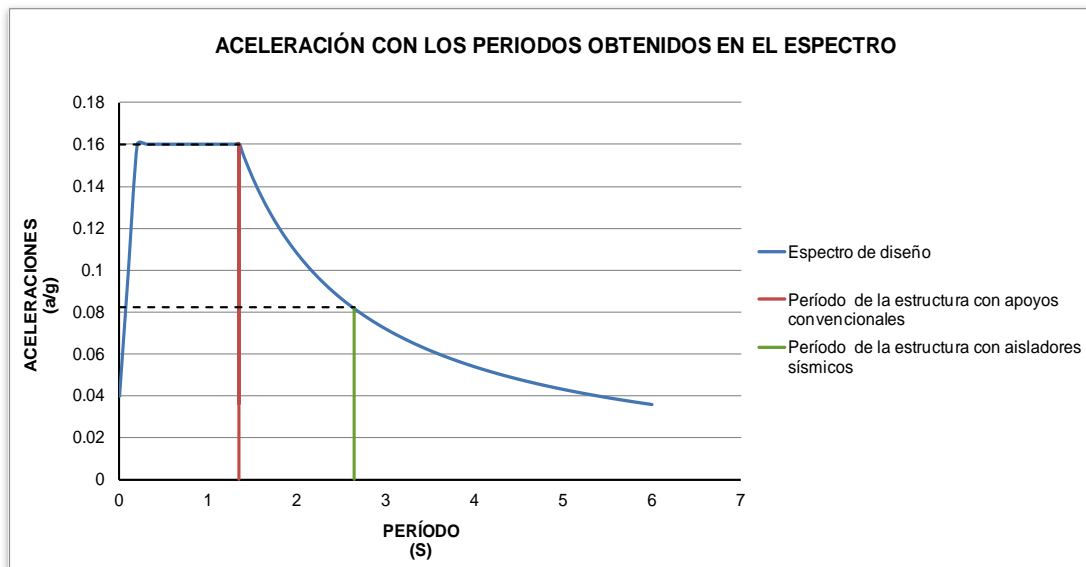


Figura 5.3 Gráfica del espectro de diseño y los períodos obtenidos de los análisis de los marcos.



En la figura 5.4 se podrá apreciar con mayor claridad los desplazamientos absolutos horizontales de cada nivel de la estructura, considerando apoyos con aisladores sísmicos y con apoyos convencionales.

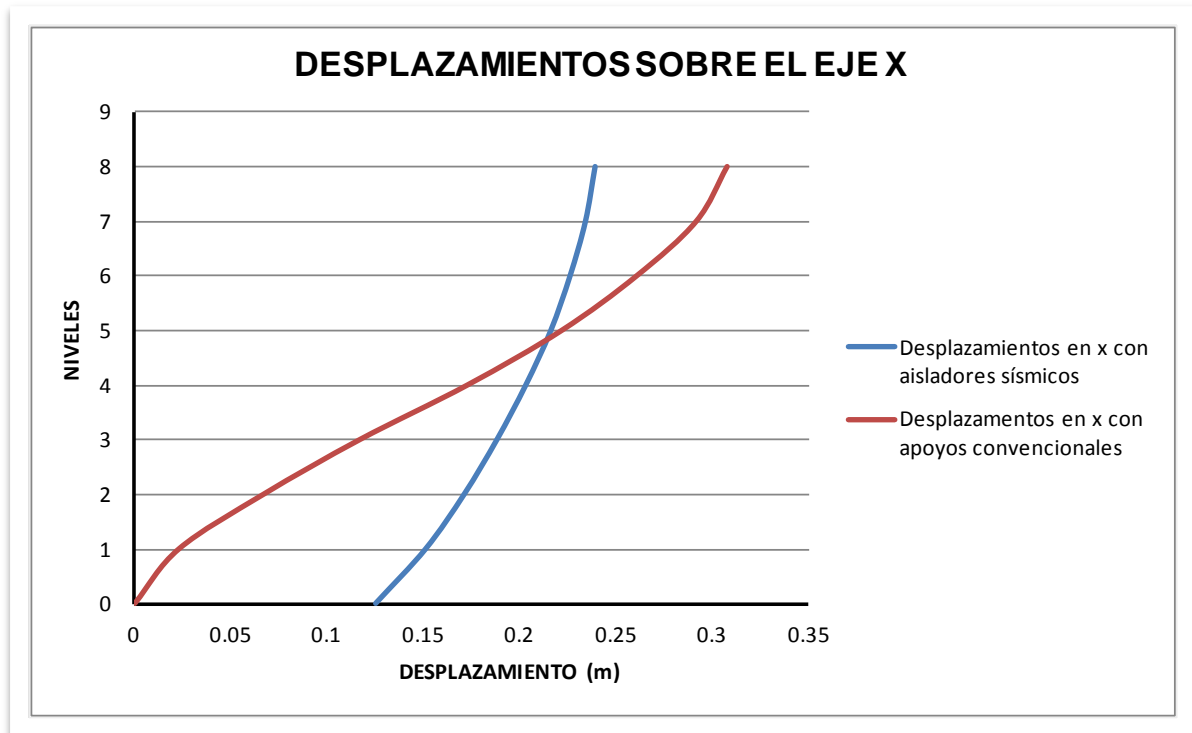
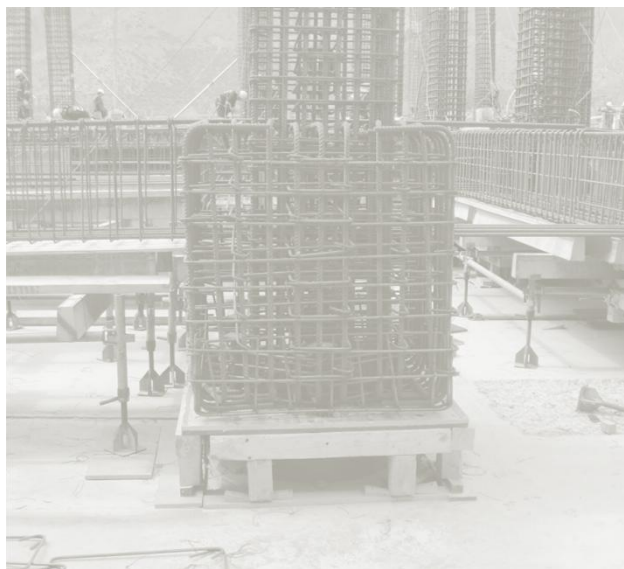


Figura 5.4 Gráfica de los desplazamientos absolutos horizontales de ambos marcos.

Se puede apreciar que los desplazamientos relativos de entrepiso, son menores cuando se emplean los apoyos con aislamiento sísmico, sucediendo lo contrario cuando se emplean apoyos convencionales, lográndose un mejor comportamiento de la estructura.

## 6. CONCLUSIONES





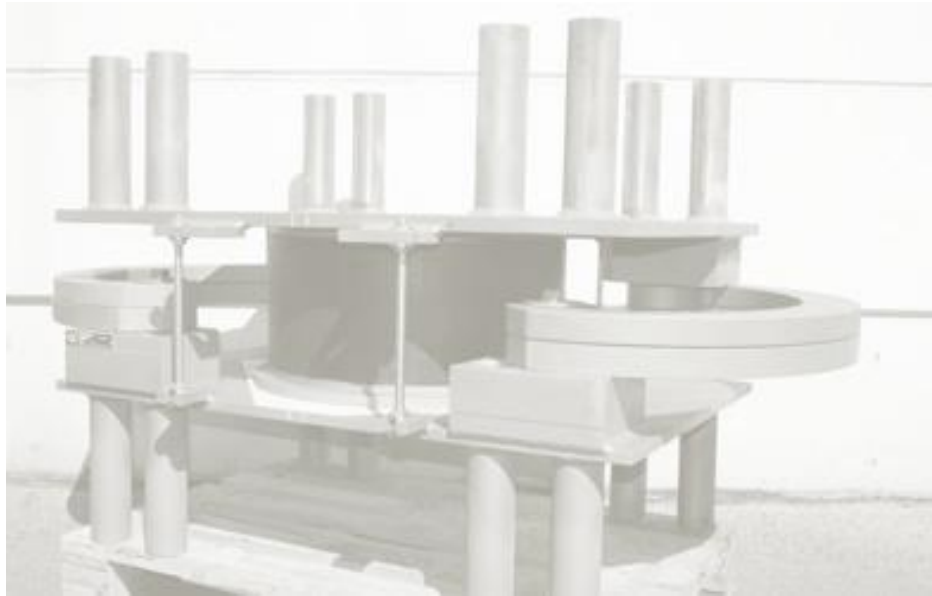
En este trabajo se hizo un análisis comparativo de una estructura de 8 niveles y 3 líneas de columnas, apoyada sobre aisladores de base en un caso y en el otro sobre apoyos convencionales. Para este análisis se consideró un evento sísmico, empleando el registro sísmico acontecido en la Ciudad de México en el año 1985.

Según los resultados obtenidos del análisis de las estructuras con apoyos convencionales y de aislamiento sísmico, se tomará como parámetros de comparación el período de la estructura y los desplazamientos relativos de entrepiso.

De acuerdo al estudio realizado, se puede concluir que:

- Al utilizar los aisladores de base, se obtienen mayores periodos de la estructura, y por lo tanto, menores aceleraciones, provocando que las fuerzas sísmicas disminuyan. Esto trae como beneficio menores acciones sobre la estructura y en consecuencia menores elementos mecánicos, lo que contribuye a menores demandas de diseño.
- Al tener menores demandas de diseño, se logran menores secciones de los elementos estructurales, lo que redundará en menor costo y peso total de la estructura.
- Se obtienen menores desplazamientos horizontales relativos de entrepiso, ayudando a un mejor comportamiento de la estructura (distorsiones).
- Con la inclusión de apoyos de aislamiento sísmico, se logra disipar mucho mejor la energía sísmica, ante este tipo de eventos naturales.

# BIBLIOGRAFÍA





1. Watson J. R., Inc., Isolation Bearing Devices for Bridges and other Civil Engineering structures, Watson J. R., Inc., EUA, 2002.
  
2. Jara J. M., Estado del arte sobre dispositivos para reducir daños provocados por temblores, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 47, 35-39, 1994.
  
3. Cahís X., Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sismorresistente, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción, España, Universidad Politécnica de Cataluña, 2000.
  
4. Soong T. T., y Spencer B. F., Active, Semi-active and Hybrid control of structures, Dept. of Civil, Structural and Environmental Eng., University of New York, EUA, 2000.
  
5. Sistemas de disipación pasiva de energía sísmica, Revista Construcción y Tecnología en Concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. 2009.
  
6. Computers and Structures Inc., SAP2000 Analysis Reference, Berkeley, California, EUA, 2010.



## BIBLIOGRAFÍA

---

7. Rodríguez M. A., Análisis estadístico de la respuesta sísmica de un puente con aisladores, Tesis de Maestría, Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, 2003.
  
8. Página de internet de la empresa Japonesa BRIDGESTON.
  
9. Página de internet de la empresa estadounidense DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS.
  
10. Página de internet de la empresa japonesa KOZO KEIKAKU ENGINEERING INC.
  
11. Página de internet de la empresa estadounidense SEISMIC ENERGY PRODUCTS.
  
12. Página de internet de la empresa estadounidense VIBRO/DYNAMICS.
  
13. Página de internet de la empresa chilena SEISMIC PROTECTION TECHNOLOGIES.
  
14. Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción del Distrito Federal del año 2004
  
15. Autodesk, **AutoCad 2012**, año 2011