

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“ MODELOS DE COMPUTADORA PARA EL ANÁLISIS DE  
SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL PASIVO ANTE  
ACCIONES SÍSMICAS ”**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A  
GERARDO BEVIA PÉREZ**



**DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**NOVIEMBRE 2005**

**m.340366**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Gerardo Bevia Pérez

FECHA: 26- Enero 2005

FIRMA: 



## Agradecimientos

Doy gracias a **Dios** por haberme dado la suficiente entereza al culminar una etapa muy importante en mi vida.

Con respeto y admiración a mis padres, **Ma. Elena y Francisco**, que me dieron un ejemplo único, además de educarme para ser la persona que ahora soy, apoyarme a cada momento con amor, cariño y dedicación, por brindarme la dicha de nacer y por darme el privilegio de ser su hijo.

A mis abuelas, **Anita y Angelita** que aunque ya no están conmigo, se que allá dónde están deben estar orgullosas de la confianza que depositaron en mí y supe responder, así como a todo el cariño que me brindaron los últimos años de sus vidas.

Sinceramente a mis hermanos, **Fabiola, Paco y Rudy**, por haber sido parte fundamental en el desarrollo de mi persona, además de sus valiosos consejos que me sirvieron y me servirán para toda la vida.

A mis cuñados, **Jose, Dany y Karina**, que con su apoyo y buenos deseos hicieron posible esta etapa tan importante en mi vida, y por ser tal como son.

A mi sobrinita, **Ivy Vanessa** que con el ejemplo de sus padres Paco y Jose, me dió fuerza para seguir en éste camino de superación y así brindarle un modelo para el futuro.

A **mis primos y mis tíos**, que gracias a sus logros personales me han impulsado a no quedarme atrás y así seguir por el camino del éxito junto a ellos.

A mi director de tesis, el **Dr. José Alberto Escobar Sánchez**, por su apoyo incondicional, por su tiempo, asesoría, paciencia y su amistad, en la orientación del desarrollo de éste trabajo.

---



## Agradecimientos



A **mis amigos** de la Facultad de Ingeniería, que con las experiencias que pasamos durante nuestra vida académica me hicieron abrir los ojos y siempre ver lo positivo de las cosas.

A **David Muñoz**, que gracias a su ayuda y paciencia supe elaborar una parte indispensable en este trabajo.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por dejarme ser parte de la nueva visión que los profesionistas necesitamos para el impulso del desarrollo de México y el privilegio de ser egresado de la mejor Universidad.

A la **Facultad de Ingeniería** y a sus **profesores**, por haberme dejado estar en sus aulas y depositado en mí la confianza para lograr un México mejor.





## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
1.1 Antecedentes	
1.2 Objetivos	
1.2.1 Planteamiento del problema	
1.2.2 Objetivo general	
1.2.3 Objetivos particulares	
<b>2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL</b>	<b>9</b>
2.1 Sistemas de control estructural	
2.1.1 Sistemas estructurales de control pasivo	
2.1.1.1 Disipadores de energía	
2.1.1.2 Aisladores de base	
2.1.1.3 Osciladores resonantes	
2.1.1.4 Cables de pretensionamiento	
2.1.2 Sistemas estructurales de control activo	
2.1.3 Sistemas estructurales de control híbrido	
<b>3. MODELO MATEMÁTICO Y PARÁMETROS QUE DEFINEN EL COMPORTAMIENTO DE UN DISIPADOR DE ENERGÍA Y UN AISLADOR DE BASE</b>	<b>22</b>
3.1 Modelo matemático y parámetros que definen el comportamiento no lineal de un disipador de energía	
3.1.1 Modelo matemático de Ramberg - Osgood	

---



---

3.1.2	Parámetros que definen el comportamiento inelástico de un disipador de energía	
3.2	Modelo matemático y parámetros que definen el comportamiento de un aislador de base	
3.2.1	Modelo matemático para simular el comportamiento de un aislador de base	
3.2.2	Parámetros que definen el comportamiento de un aislador de base	
<b>4.</b>	<b>MODELOS DE APLICACIÓN</b>	<b>31</b>
4.1	Descripción del modelo matemático de un marco con disipador de energía	
4.1.1	Propiedades y ajuste de parámetros del disipador de energía utilizado	
4.1.2	Excitación sísmica	
4.1.3	Captura de las propiedades del disipador de energía en SAP2000 para el análisis no lineal del marco	
4.1.4	Resultados obtenidos	
4.2	Marco con disipador de energía ensayado en laboratorio	
4.2.1	Propiedades y ajuste de parámetros del disipador de energía ensayado En laboratorio	
4.2.2	Captura de las propiedades del disipador de energía en SAP2000 para el análisis no lineal del marco	
4.2.3	Resultados obtenidos	
4.3	Diafragma rígido soportado por aisladores de base	
4.3.1	Modelo matemático	
4.3.2	Construcción del modelo matemático para la estructura aislada	
4.3.3	Captura de las propiedades de los aisladores sísmicos con comportamiento bilineal en el SAP2000	
4.3.3.1	Propiedades de los aisladores	
4.3.3.2	Registros sísmicos	

---



---

4.3.3.3	Definición de pares de registros sísmicos	
4.3.4	Resultados	
4.3.4.1	Modos de vibrar del diafragma rígido	
4.3.4.2	Comportamiento de los aisladores en el diafragma rígido	
4.4	Puente vehicular Infiernillo II	
4.4.1	Descripción geométrica del puente vehicular	
4.4.2	Modelo matemático	
4.4.3	Acciones sísmicas	
4.4.4	Captura de las propiedades de los aisladores de base en SAP2000	
4.4.4.1	Propiedades de los materiales utilizados en la estructura	
4.4.4.2	Propiedades de los aisladores	
4.4.4.3	Definición de registros sísmicos	
4.4.5	Resultados	
4.4.5.1	Modos de vibrar del puente	
4.4.5.2	Comportamiento de los aisladores en el puente	
5.	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>59</b>
5.1	Comparación del modelo teórico y experimental del disipador de energía del Marco	
5.1.1	Ventajas que ofrecen los disipadores de energía en el marco	
5.2	Comparación del modelo teórico y experimental del marco con disipador de Energía ensayado en laboratorio	
5.2.1	Ventajas que ofrecen los disipadores de energía en el marco con disipador de energía ensayado en laboratorio	
5.3	Comparación del modelo teórico y experimental de los aisladores de base del diafragma rígido	

---





---

5.3.1	Ventajas que ofrecen los aisladores de base en el diafragma rígido	
5.4	Comparación del modelo teórico y experimental de los aisladores de base del puente	
5.4.1	Ventajas que ofrecen los aisladores de base en el puente	
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>73</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</b>	<b>76</b>

---



## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por finalidad estudiar el comportamiento y los parámetros que definen a diferentes sistemas estructurales de control pasivo. En especial, de disipadores de energía y aisladores de base con ayuda del programa de cómputo SAP2000 versión 7.40 [Ref. 1]. Así utilizando diferentes modelos matemáticos, se lograrán los parámetros obtenidos por registros de laboratorio o por el mismo fabricante de dichos dispositivos.

La construcción de edificios resistentes a sismos presenta incógnitas aún sin despejar, y otras que aún no han sido planteadas. Los movimientos sísmicos constituyen un peligro para la estructura, por lo que se necesita idear nuevos sistemas constructivos y en consecuencia de análisis y diseño de estructuras resistentes a sismos intensos, a fin de ofrecer mayor seguridad social [Ref. 2].

Históricamente, las estructuras han demostrado ser vulnerables ante las acciones sísmicas causando daños permanentes en la cimentación y en la superestructura, y en algunos casos se ha llegado al colapso de la estructura. En general, las estructuras resisten los efectos sísmicos, por una combinación de resistencia, deformabilidad y capacidad de disipación de energía.

Por lo anterior, se deben de diseñar estructuras que resistan fuerzas sísmicas. Para ello, se ha considerado una fuerza horizontal estática igual a un décimo del peso de la estructura, lo cual funcionó por muchos años en el caso de puentes. Sin embargo, durante sismos severos, la experiencia demostró que las estructuras así diseñadas se deformaban más allá de su límite elástico y que resistieron debido a que fueron capaces de deformarse inelásticamente y de disipar la energía impartida por los sismos.

El objetivo principal del diseño sísmico fue entonces, construir estructuras con una gran capacidad de deformarse más allá del estado elástico. Con lo anterior se forman articulaciones plásticas, de modo que los requerimientos de resistencia pudieran ser reducidos, llevando esto a una reducción en su costo sin reducción de la resistencia sísmica.



Actualmente esta hipótesis permanece como una de las más utilizadas para la construcción de estructuras, sin embargo presenta las siguientes desventajas [Ref. 3]:

- Bajo carga cíclica producida por un sismo severo puede ocurrir un deterioro progresivo de los componentes estructurales, lo que puede llevar a reparaciones costosas y difíciles de realizar.
- Se producen desplazamientos, lo cual, puede ocasionar un mal funcionamiento de la estructura.

Como resultado de estudios sobre estructuras reales sujetas a sismo, tales edificios contarían con dispositivos cuya función fuera principalmente la absorción de energía. Skinner, Kelly y Heine [Ref. 4] han estudiado el comportamiento de varios tipos de absorbedores de energía, basados en la deformación plástica del acero con bajo contenido de carbono. Los especímenes estudiados incluyen barras cuadradas y rectangulares sometidas a torsión, flexión de vigas de sección rectangular, roiado de placas delgadas en forma de U, y combinaciones de todos estos dispositivos.

Para lograr este objetivo, se desarrollan los siguientes temas:

**Antecedentes y objetivos.** Se presenta de forma sintetizada, lo que se ha propuesto anteriormente ante acciones sísmicas severas, hasta llegar a los sistemas actuales de control estructural. También se describe el problema que se va a analizar, así como del objetivo general y los objetivos particulares que se pretenden alcanzar en la realización de este trabajo.

**Estado actual del conocimiento de los sistemas de control estructural.** Se destacan los diferentes sistemas de control estructural enfocándose especialmente en los dispositivos de control estructural pasivo. Se presentan los diferentes tipos de disipadores de energía y aisladores de base que se conocen en la actualidad, así como la funcionalidad de éstos.



**Modelo matemático y parámetros que definen el comportamiento de un disipador de energía y a un aislador de base.** Se describen los modelos matemáticos a emplear en los modelos de aplicación, tanto para el disipador de energía como para el aislador de base. También se menciona el arreglo de parámetros que maneja el programa de cómputo SAP2000 con el modelo matemático empleado.

**Modelos de aplicación.** Se exponen cuatro ejemplos donde se emplean tanto disipadores de energía como aisladores de base. Se hace una descripción general de cada modelo, así como de la captura de datos para los parámetros que definen a los dispositivos. Se incluyen los resultados del programa de cómputo en cuanto al comportamiento que tienen los dispositivos de control pasivo en cada modelo (ciclos de histéresis).

**Discusión de resultados.** Se analiza tanto la respuesta experimental como la teórica, comparando y haciendo consideraciones de las ventajas que ofrece el dispositivo empleado.

**Conclusiones y recomendaciones.** Se anotan las conclusiones a que se llega en este trabajo, así como de las recomendaciones que se deben de seguir para futuros estudios sobre el tema.



# 1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

## 1.1 Antecedentes

La norma norteamericana de la construcción (UBC 1997), manifiesta que, en caso de acción sísmica, el daño estructural y no estructural es admisible, siempre que no comporte colapso y pérdida de vidas humanas. Los motivos son de carácter económico: una estructura dúctil presenta aceleraciones absolutas inferiores (y, consecuentemente, también esfuerzos menores) a las producidas en comportamiento lineal y elástico y conduce a secciones de menor dimensión. El diseño convencional adoptado de forma común por las normas sismorresistentes se basa en los conceptos de ductilidad e hiperestaticidad estructural.

El daño estructural acontecido tras terremotos como el de Northridge (1994) y Kobe (1995) ha obligado a cuestionar la efectividad de las estructuras convencionales y de los métodos de análisis empleados para valorar su respuesta. Se han cuestionado: i) los sistemas de cálculo empleados, ii) la imposibilidad de determinar la demanda de ductilidad ante un evento sísmico y dónde se va a producir, iii) la presencia de fallas frágiles en sistemas supuestamente dúctiles, iv) la complejidad de detectar el daño en estructuras metálicas cuando éstas no manifiestan desplome y v) 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 que localicen la demanda de ductilidad en elementos determinados [Ref. 6]. Ello supone claras ventajas: i) resulta más factible garantizar la demanda de ductilidad, ii) el control de calidad en materiales y en ejecución puede ser más intenso en las zonas donde se establece la oferta de ductilidad y iii) el daño resulta más previsible y la reparación más económica que en los sistemas basados en el daño estructural disperso. Algunos sistemas proponen que la oferta de la ductilidad resida en zonas de la propia estructura, como es el caso de los marcos excéntricos en estructuras de acero (Popov 1980). Otra posibilidad consiste en el empleo de disipadores de energía externos a la estructura. Si bien forman parte del sistema estructural, se emplean como nexos y ello permite su fácil restitución en caso de sufrir daño.

Existen numerosas propuestas para la protección de una estructura y ante una acción sísmica: i) desacoplar los elementos estructurales mediante una abertura, rellena



posteriormente con material muy flexible. Esta técnica puede resultar efectiva en la limitación del daño no estructural, pero no aprovecha la capacidad resistente de los marcos; ii) Brokken y Bertero (1981) plantean la unión de los cerramientos con los pórticos mediante conectores y mallas metálicas que eviten la rotura de los tabiques. Esta solución aprovecha la resistencia y la rigidez de los cerramientos, pero dificulta enormemente el establecer un modelo de predicción; y iii) la conexión entre cerramientos y estructura principal con conectores especiales, introduciendo una abertura al igual que en la primera propuesta, de forma que el desplazamiento de entrepiso se concentre en los conectores.

Una primera clasificación permite hablar de sistemas de control pasivo, sistemas de control activo, sistemas de control semiactivo y sistemas de control híbrido. Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y, a diferencia del resto de sistemas, no precisan de aporte energético para su funcionamiento.

Los sistemas activos, semiactivos e híbridos están formados por actuadores de fuerza y/o elementos pasivos, controladores a tiempo real y dispositivos sensores instalados en la estructura. Estos elementos trabajan conjuntamente a través de un algoritmo de control de la respuesta estructural. Los sistemas pasivos se clasifican en sistemas de aislamiento de base, de disipación de energía y en osciladores resonantes [Ref. 6]. Los aisladores de base, situados sobre la cimentación y soportando el edificio, desacoplan parcialmente el edificio del movimiento del terreno, disminuyendo la energía transmitida a la superestructura y consecuentemente su respuesta estructural. Los disipadores de energía no alteran la energía, que depende básicamente del período fundamental y de la masa del edificio, manifestando su eficiencia maximizando la energía disipada y disminuyendo la respuesta estructural.

Los sistemas inerciales acoplados (TMD) introducen masas adicionales, normalmente situadas en la parte alta de los edificios, cuya excitación absorbe parte de la energía cinética introducida por el terremoto. Las propiedades más valiosas de los sistemas pasivos son su robustez (no dependen de fuentes de energía y son mecánicamente simples) y el costo competitivo de los edificios que los utilizan en comparación con los construidos de forma convencional. Existen en la actualidad unos centenares de edificios construidos en el mundo con estos sistemas, algunos sometidos a terremotos severos como el de Kobe, Japón en 1994.



Los sistemas activos contrarrestan los efectos del sismo directamente mediante actuadores situados en el seno estructural. La gran demanda de energía que comporta su actuación ante un sismo severo y la complejidad de los algoritmos de control los convierte en sistemas poco robustos.

Ante la necesidad de una respuesta efectiva ante excitaciones dinámicas comprendidas en una banda amplia de frecuencias y de un menor consumo energético, se desarrollan los sistemas híbridos y semiactivos. Los sistemas híbridos son muy similares a los sistemas activos, sin embargo en ellos intervienen elementos pasivos que permiten reducir el consumo energético del sistema ante un evento sísmico. Los sistemas semiactivos emplean dispositivos de control pasivo, sin consumo energético, cuyas características de capacidad de carga permiten ser modificadas y controladas a tiempo real mediante actuadores de bajo consumo (por ejemplo, válvulas de caudal variable) a través de sistemas y algoritmos de control parecidos a los empleados en los sistemas activos e híbridos.

En Japón se han dotado a un gran número de edificios de marcos de acero con tableros especiales de concreto reforzado, cuya función principal es la absorción de energía. Sin embargo, en este sistema son desfavorables el incremento de peso del edificio, y la dificultad para reemplazar los tableros debido a su tamaño y peso.

El problema de diseño sísmico puede (al menos en teoría) 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. González Flores [Ref. 6] propone soluciones de aislamiento de estructuras soportadas por rodillos o esferas, combinados con amortiguadores de aceite o cables que limitan los desplazamientos horizontales.

Los sistemas propuestos en los últimos años giran sobre un mismo concepto: soportar las estructuras sobre sistemas muy flexibles 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.



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

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Planteamiento del problema**

La ausencia de una normatividad nacional de diseño que permita determinar un dispositivo de disipación de energía adecuado para un caso en particular, hace necesario el estudio de la influencia de los parámetros que definen éstos mecanismos. En este trabajo, se lleva a cabo la modelación matemática mediante un programa de análisis estructural comercial de los dispositivos de los sistemas estructurales de control pasivo. Especialmente se citan disipadores de energía y aisladores de base, especificando los parámetros necesarios para su modelación en el programa de cómputo SAP2000 Non Linear Versión 7.40 [Ref. 1]. Para estudiar el comportamiento de los modelos matemáticos utilizados y sus parámetros se ilustran cuatro ejemplos en la aplicación de dichos dispositivos.

### **1.2.2 Objetivo general**

Determinar los parámetros, obtenidos directamente del fabricante o del laboratorio, que definen el comportamiento de disipadores de energía y / o de aisladores de base. Estos son necesarios por el programa de cómputo para poder modelar el comportamiento que tendrán ante un sismo dichos dispositivos.

### **1.2.3 Objetivos particulares**

Durante el desarrollo del presente trabajo, se cumplen los siguientes objetivos particulares:

- Presentar el estado actual del conocimiento de los diferentes sistemas de control estructural.





- Conocer y manejar diferentes modelos matemáticos asociados a los parámetros de disipadores de energía y aisladores de base.
- Determinar los parámetros con que se define el comportamiento de disipadores de energía y aisladores de base, con respecto en los requerimientos especificados por el programa de cómputo.
- Obtener la información básica sobre el comportamiento de los disipadores de energía y de los aisladores de base en las estructuras estudiadas.



## 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL

### 2.1 Sistemas de control estructural

La Ingeniería estructural tradicional ha estado principalmente centrada en tratar de diseñar estructuras que sean capaces de soportar las cargas impuestas por sismos a través de una combinación adecuada de energía elástica y de disipación en sus elementos principales. Sin embargo, con el desarrollo de nuevos materiales es posible contribuir a la protección estructural utilizando dispositivos dedicados a la disipación de energía.

La función que cumplen estos dispositivos es la de absorber y disipar una parte de la energía que ingresa a 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 usando uno o varios de los siguientes recursos:

- Al modificar las propiedades dinámicas del edificio de forma que éste reduzca sus desplazamientos o se evite resonancia.
- Al disipar energía sísmica introducida al sistema estructural a partir de dispositivos mecánicos.
- Al controlar la respuesta estructural con dispositivos que ejerzan fuerzas que contrarresten la acción sísmica.

Existen varias formas de denominar a estos sistemas. En este trabajo se presentará la clasificación que se hace en las [Ref. 6 a 8]:

- Sistemas estructurales de control pasivo
- Sistemas estructurales de control activo
- Sistemas estructurales de control híbrido



## 2.1.1 Sistemas estructurales de control pasivo

El diseño sísmico tradicional de estructuras reduce las fuerzas dinámicas inducidas por sismos severos por medio de la capacidad de disipación de energía disponible en los elementos estructurales y sus conexiones.

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 pasivos son elementos de carácter reactivo cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo que se encuentren. Son sistemas que intervienen alterando las propiedades dinámicas de la estructura provocando una reducción de su respuesta estructural. Entre las ventajas más notables se encuentran el bajo costo y su buen comportamiento.

En la figura 2.1 se muestra de manera esquemática la configuración básica de cualquier estructura, así como el de un sistema estructural con control pasivo (SECP); ante diferentes acciones o excitaciones.



a) Estructura convencional



b) Estructura con el Sistema Estructural de Control Pasivo (SECP)

Figura 2.1 Configuración de una estructura



Existen cuatro sistemas principales de control pasivo desarrollados en la actualidad:

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

### 2.1.1.1 Disipadores de energía

Los disipadores de energía modifican la rigidez de la estructura y buscan concentrar en ellos la mayor capacidad de la disipación de energía. Para su funcionamiento depende fundamentalmente de los desplazamientos relativos de los entrepisos.

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. Se pueden agrupar a su vez, de acuerdo con la manera en que disipan energía en los siguientes tipos:

**Dispositivos de materiales con comportamiento elastoplástico.** Su comportamiento histerético idealizado es semejante al mostrado en la figura 2.2. La pendiente de la zona inelástica depende de las características de cada dispositivo y la disipación de energía es más grande a medida que se incrementa el área bajo la curva de histéresis.

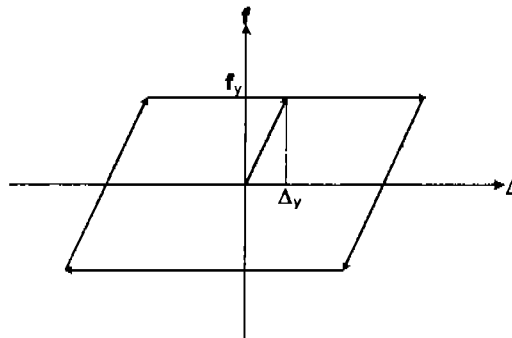


Figura 2.2 Comportamiento Idealizado de los dispositivos elastoplásticos



El dispositivo mostrado en la figura 2.3 fue estudiado por Skinner [Ref. 6]. Consiste en dos placas en forma de U que disipan energía al desplazarse una cara con respecto a la otra. La parte central del dispositivo se une a un nivel de la estructura y las partes extremas al nivel inmediato superior mediante barras.

Los desplazamientos relativos entre los niveles ocasionan el movimiento conocido como rolado por flexión mediante el cual se disipa energía.

En la figura 2.4 se muestra un dispositivo compuesto por placas de acero con sección transversal en forma de X, llamadas ADAS (Added Damping and Stiffness) [Ref. 6]. La variación de la sección transversal obedece a que al desplazarse un nivel respecto a otro, las placas se deforman en doble curvatura, si se empotran las placas, se genera un diagrama de esfuerzos casi uniforme en todo el peralte que cambia de signo en el eje neutro. Esto ocasiona que el esfuerzo de fluencia se alcance prácticamente en todo el volumen al mismo tiempo.

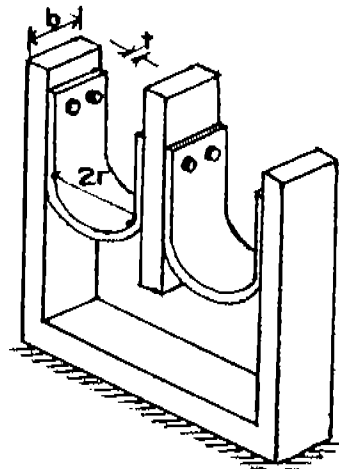


Figura 2.3 Dispositivos en forma de U [Ref. 6]

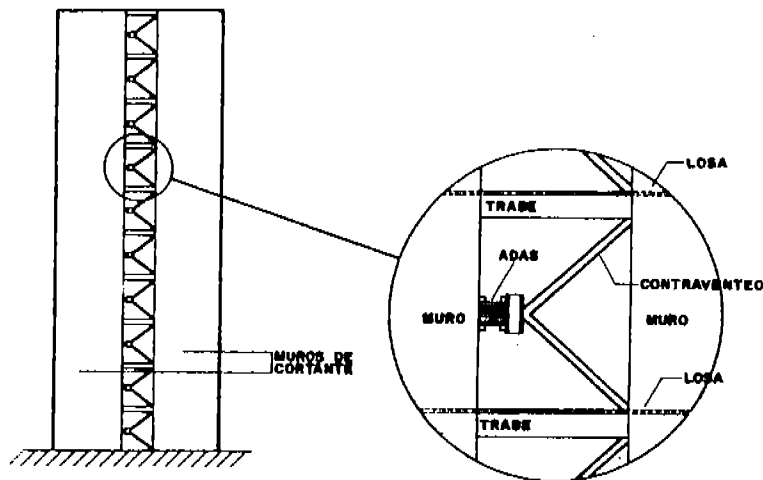
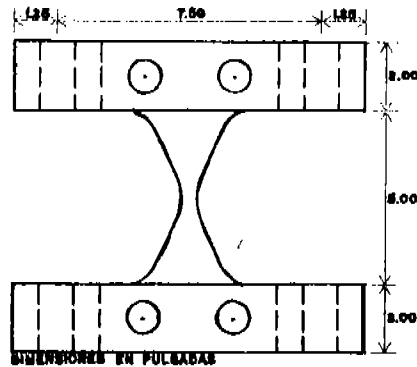


Figura 2.4 Dispositivo ADAS y su colocación en muros de cortante [Ref. 6]

**Disipación por extrusión.** En estos sistemas, la disipación se logra al deformar la sección transversal de una pieza. Esto ocurre cuando se mueve el material disipador, generalmente de plomo, dentro de un tubo de sección variable. Como se puede observar en la figura 2.5, al deformarse plásticamente el plomo se disipa energía y al recuperar su sección original se recristaliza y recupera sus propiedades iniciales.



Un dispositivo como el de la figura 2.5 fue sometido a ciento veintitrés ciclos de carga y descarga con ciclos histeréticos casi rectangulares y sin degradación apreciable [Ref. 6].

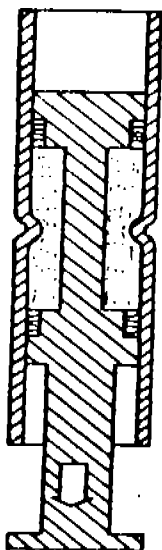


Figura 2.5 Disipador de energía por extrusión [Ref. 6]

**Disipación por fricción.** Los disipadores por fricción consisten en colocar en las estructuras dos placas en la intersección de contravientos en forma de cruz. Al desplazarse lateralmente en la estructura se producen esfuerzos de fricción por el contacto entre las placas.

El sistema mostrado en la figura 2.6, se conecta con barras al marco y disipa energía por fricción, al desplazarse una diagonal con respecto a la otra. El diseño busca evitar el deslizamiento bajo cargas de servicio, lo que da rigidez adicional al marco y, al sobrepasar un umbral, se inicia la disipación de energía por fricción.

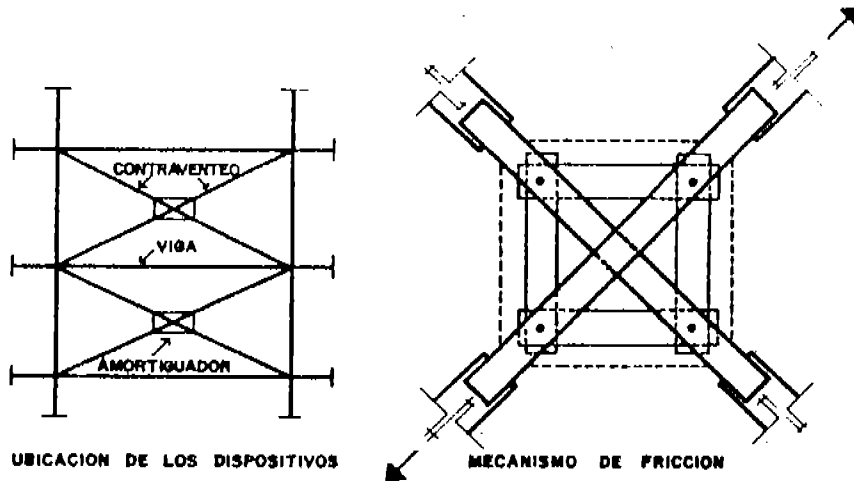


Figura 2.6 Disipador de energía por fricción [Ref. 6]

El dispositivo mostrado en la figura 2.7, fue estudiado por Scholl [Ref. 6], formado con acero y hule colocándose igual que el anterior, en la intersección de los contraventeos. El estudio experimental de un marco de un nivel con estos elementos [Ref. 6], muestra incremento en el amortiguamiento y modificación en la rigidez con respecto al marco sin dispositivos.

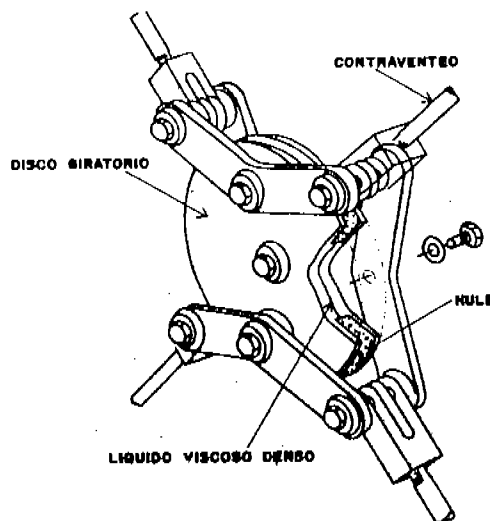


Figura 2.7 Disipador de energía por fricción de Scholl [Ref. 6]





**Dispositivos de materiales con comportamiento viscoso y viscoelástico.** Estos disipadores se colocan en forma similar a los de fricción. Su comportamiento es muy diferente, al depender la energía disipada de la velocidad. Los dispositivos de comportamiento viscoso de uso más frecuente, consisten en un fluido cuyo movimiento se produce por el desplazamiento de un pistón. Por otra parte, los dispositivos de comportamiento viscoelástico son generalmente polímeros. En ellos las fuerzas desarrolladas suelen contener componentes en fase y componentes fuera de fase de movimiento de la estructura bajo excitación armónica. Un ejemplo de este dispositivo se muestra en la figura 2.8.

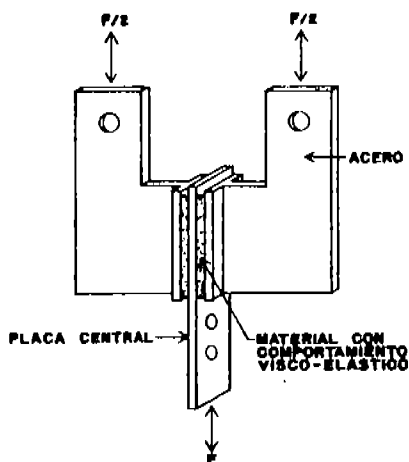


Figura 2.8 Disipador viscoelástico [Ref. 6]

### 2.1.1.2 Aisladores de base

Estos sistemas tienen como finalidad aislar a la cimentación de la superestructura. Al colocarlos se alarga considerablemente el periodo fundamental de vibración de la estructura. Se han aplicado fundamentalmente en lugares donde los temblores que ocurren tienen gran contenido de frecuencias altas, así, la estructura se aleja de los periodos con amplificaciones importantes del terreno.

La protección del efecto de los sismos se consigue a partir de dispositivos flexibles en dirección horizontal y rígidos en vertical, situados entre los cimientos y la superestructura.



El principal inconveniente que se presenta en estructuras con gran relación altura – ancho son los momentos de volteo que se generan y que pueden provocar la pérdida del equilibrio. Además, al incrementarse la altura, las ventajas obtenidas al variar el periodo de vibración disminuyen.

Las primeras aplicaciones de estos sistemas fueron en puentes debido a que estas estructuras normalmente se apoyan sobre placas de neopreno para permitir el libre desplazamiento ocasionado por cambios de temperatura. Esto permitió la sustitución, sin mayores modificaciones, de las placas de neopreno por aisladores de base.

Entre los primeros aisladores de base fabricados comercialmente se encuentran los apoyos rectangulares o circulares formados por placas de hule intercaladas con placas más delgadas de acero como se muestra en la figura 2.9. Este sistema es muy flexible horizontalmente pero tiene gran rigidez vertical. Su disipación de energía es pequeña y su objetivo fundamental consiste en flexibilizar lateralmente a la estructura.

Robinson y Tucker [Ref. 6] realizaron estudios con un aislador como el mostrado en la figura 2.10, en que se insertó un corazón de plomo con la finalidad de disipar energía. La principal ventaja sobre otros aisladores es el incremento de la disipación de energía.

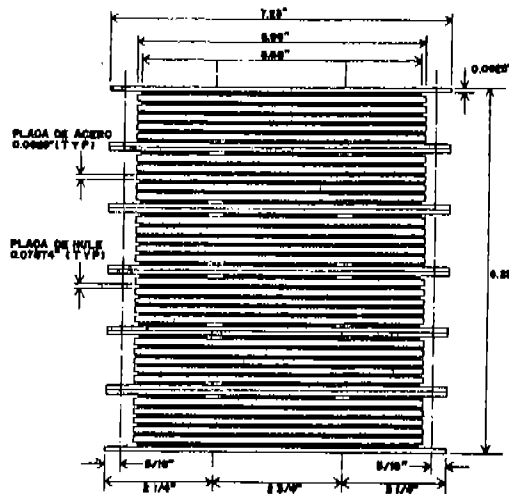


Figura 2.9 Aislador de base

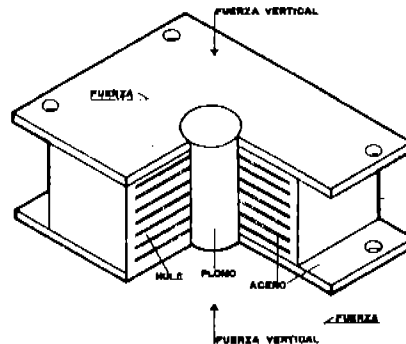


Figura 2.10 Aislador de base con corazón de plomo

### 2.1.1.3 Osciladores resonantes

La inclusión de una o varias masas, en la parte superior de un edificio puede modificar considerablemente su respuesta ante eventos sísmicos. Si éstas son seleccionadas como pisos adicionales con ciertas propiedades dinámicas, la respuesta de la estructura puede ser reducida.

En algunas investigaciones relacionadas con éstos dispositivos [Ref. 6], se ha demostrado que con ciertos parámetros dinámicos de las masas y la estructura, pueden obtenerse reducciones importantes de la respuesta. En un sistema de dos grados de libertad, si el periodo de la excitación coincide con el periodo de vibrar del segundo nivel o piso adicional, el movimiento del primer nivel es nulo y el segundo se ve sometido a una fuerza de igual magnitud y sentido contrario al de la fuerza de excitación. Al existir amortiguamiento, ambas masas se mueven pero los desplazamientos de la primera pueden reducirse de manera importante al elegir adecuadamente las propiedades dinámicas de la segunda masa.

### 2.1.1.4 Cables de preesfuerzo

Los sismos de septiembre de 1985 en la Cd. de México provocaron grandes daños, lo que obligó a buscar sistemas alternativos de reparación y rigidización de estructuras. Uno de éstos sistemas consistió en reforzar escuelas con la inclusión de cables de preesfuerzo como



contraventos de la estructura para incrementar su resistencia y rigidez, lográndose reducciones importantes en sus desplazamientos laterales.

Aunque no es propiamente un sistema de disipación sísmica, el comportamiento de las estructuras que se han estudiado en México, hace posible y atractivo el sistema como una posible opción para la reducción de daños sísmicos. El buen desempeño del sistema se ha comprobado en estudios de edificios de uno y dos niveles [Ref. 6].

### 2.1.2 Sistemas estructurales de control activo

El control activo se basa en el principio de eliminar las vibraciones de una estructura mediante la aplicación de fuerzas externas o modificando la rigidez lateral de la estructura durante la acción del sismo. El movimiento se detecta mediante la inclusión de sensores que miden la respuesta y las excitaciones externas en varias partes de la estructura. Los sensores se conectan a una computadora que envía señales a sistemas o actuadores que aplican fuerzas a la estructura con la finalidad de contrarrestar el movimiento, este sistema estructural de control activo se muestra esquemáticamente en la figura 2.11.

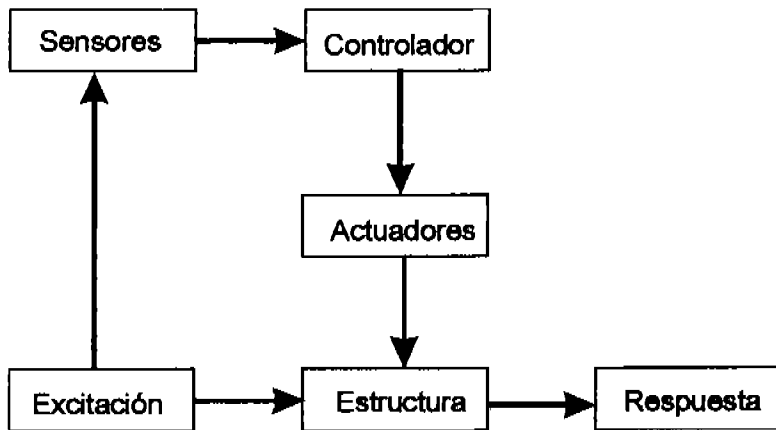


Figura 2.11 Sistema estructural de control activo



Un sistema estructural de control activo consiste básicamente en:

- Sensores situados en la estructura, empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa, o variables de la respuesta estructural, o de ambos tipos.
- Sistemas controladores que, basándose en las mediciones de los sensores y a través de un algoritmo de control, calculan la fuerza aplicada por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos.
- Actuadores, habitualmente alimentados por fuentes de energía externas, para ejercer las fuerzas necesarias para contrarrestar el movimiento de la estructura.

En comparación con los sistemas estructurales de control pasivo, los sistemas activos presentan las siguientes ventajas [Ref.7].

- Mayor efectividad en control de la respuesta estructural.
- Aplicación de un sistema activo que puede ser usado tanto para el control estructural ante vientos fuertes como terremotos.
- Selección de los objetivos de control, lo cual permite enfatizar, por ejemplo, el confort humano sobre otros aspectos del movimiento estructural en momentos no críticos, e incrementar la seguridad estructural ante una acción dinámica severa.

Sin embargo también presenta serios inconvenientes:

- Elevado costo en mantenimiento.
- Dependencia respecto a fuentes de alimentación e información externa.
- La respuesta dinámica de edificios de varios grados de libertad y un posible comportamiento no lineal resulta relativamente imprevisible, y su control a partir de un número limitado de sensores y actuadores, plantea un problema dinámico complejo.

### 2.1.3 Sistemas estructurales de control híbrido

Los sistemas híbridos son la combinación de sistemas activos y pasivos (figura 2.12). Debido a que el control se consigue a partir de la actuación de un dispositivo pasivo, los sistemas híbridos suponen mejoras con relación a los activos: en caso de que el componente activo no trabaje o falle, y aunque de forma menos efectiva, el sistema pasivo sigue ejerciendo funciones de control y los requerimientos energéticos son inferiores. Dos de los sistemas



híbridos que han despertado mayor interés son el amortiguador de masa híbrida (HMD) y el aislamiento de base con control activo del desplazamiento de base.

El HMD dispone de una masa oscilante pasiva que por sí misma reduce la respuesta del edificio, y de un actuador activo, el cual mejora la eficiencia del sistema y además le da mayor rigidez frente a cambios dinámicos de la estructura.

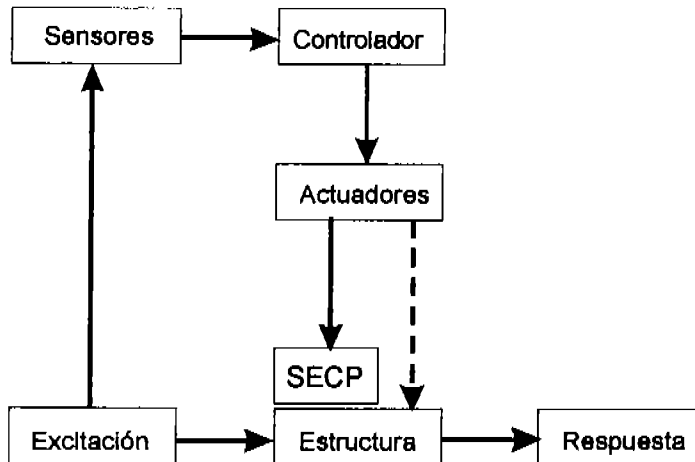


Figura 2.12 Sistema estructural de control híbrido

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. El objetivo del componente activo es el de controlar este movimiento mediante un actuador. Desde un punto de vista práctico, es importante que el control se consiga con una única fuerza, y que la demanda energética de ésta se encuentre dentro de unos límites aceptables.

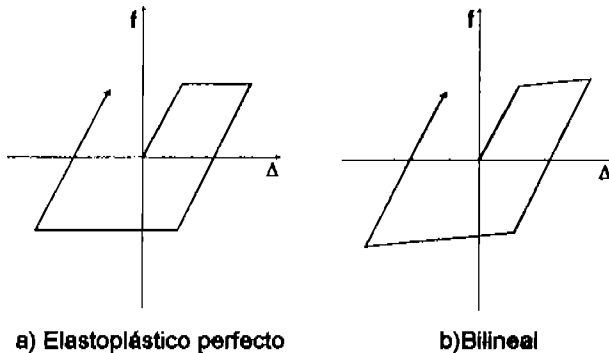


### 3. MODELO MATEMÁTICO Y PARÁMETROS QUE DEFINEN EL COMPORTAMIENTO DE UN DISIPADOR DE ENERGÍA Y UN AISLADOR DE BASE

#### 3.1 Modelo matemático y parámetros que definen el comportamiento no lineal de un disipador de energía

Los modelos histéricos pretenden expresar matemáticamente la relación entre la fuerza y el desplazamiento en una secuencia (aleatoria en eventos sísmicos) de carga y descarga. Una primera clasificación es en la presencia o no de pérdida de la capacidad disipativa, distinguiendo entre modelos degradantes y no degradantes. Los primeros se adoptan, por ejemplo, en elementos estructurales de concreto reforzado de estructuras convencionales. Los disipadores de energía elastoplásticos perfectos (fig. 3.1.a) no manifiestan degradación por lo que suelen adoptarse modelos no degradantes para describir su comportamiento histérico.

Los modelos no degradantes más simples son los bilineales (figura 3.1.b), con una rigidez segunda nula o positiva. Son muy empleados para representar el comportamiento no lineal del acero en estructuras metálicas, tanto en disipadores como en zonas en régimen plástico de la estructura principal. La mayoría de los análisis paramétricos para diseño sísmico de estructuras han adoptado estos modelos, siendo el más empleado el bilineal sin endurecimiento [Ref. 11].



a) Elastoplástico perfecto

b) Bilineal

Figura 3.1 Modelos histéricos



### 3.1.1 Modelo matemático de Ramberg – Osgood

El modelo matemático de Ramberg – Osgood [Ref. 6 y 11] ha sido usado frecuentemente por su capacidad de reproducir la disminución gradual de la rigidez. El modelo consiste de una curva esquelética y una familia de curvas histeréticas (fig. 3.2). La curva esqueleto se expresa como:

$$\frac{\delta}{\delta_y} = \frac{F}{F_y} + \alpha \left( \frac{F}{F_y} \right)^n \quad (3.1)$$

donde  $F$ ,  $F_y$ ,  $\delta$  y  $\delta_y$  son respectivamente la fuerza, la fuerza de fluencia, el desplazamiento y el desplazamiento de fluencia,  $\alpha$  y  $n$  son los dos coeficientes que definen la forma de la curva.

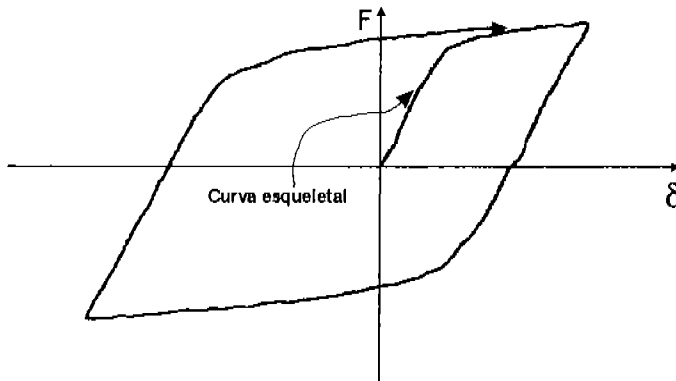


Figura 3.2 Modelo de Ramberg – Osgood

La curva histerética es dada de la siguiente forma:

$$\frac{\delta \pm \delta_i}{2\delta_y} = \frac{F \pm F_i}{2F_y} + \alpha \left( \frac{F \pm F_i}{2F_y} \right)^n \quad (3.2)$$





donde  $\delta_y$  y  $F_y$  son los valores obtenidos de desplazamiento y la fuerza.

Multiplicando la ecuación (3.1) por  $\delta_y$  y llamando  $F_o = F_y / (\alpha F_y)^{1/n}$ , se tiene la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{F}{K_y} + \left( \frac{F}{F_o} \right)^n = \delta_{elast} + \delta_p \quad (3.3)$$

donde  $K_y = F_y / \delta_y$ . Y además son los desplazamientos elásticos e inelásticos:

$$\delta_{elast} = \frac{F}{K_y} \quad (3.4)$$

$$\delta_p = \left( \frac{F}{F_o} \right)^n \quad (3.5)$$

### 3.1.2 Parámetros que definen el comportamiento inelástico de un disipador de energía

Los principales parámetros que definen el comportamiento de un disipador de energía son:

- Desplazamiento de fluencia,  $\delta_y$
- Fuerza de fluencia,  $F_y$
- Coeficientes que especifican la forma de la curva  $\alpha$  y  $n$

Del modelo de Ramberg – Osgood se pueden obtener otros parámetros de utilidad, el programa SAP2000 [Ref. 5], que permite considerar los dispositivos de aislamiento sísmico en estructuras denominado NL-Link Plastic 1, que es el que mejor se adapta al modelo.

En el modo no lineal del programa SAP2000, se muestran las propiedades del disipador de energía y el ajuste de parámetros se presentan a continuación y se muestran en la figura 3.3:

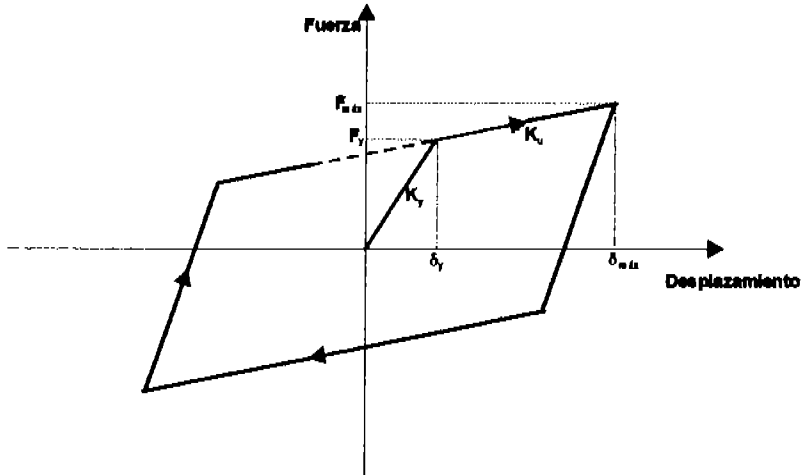


Figura 3.3 Parámetros que definen el comportamiento de un disipador de energía.

**Stiffness.**- El ajuste de éste parámetro se hace con la rigidez elástica ( $K_y$ ), que es igual a la relación que existe entre la fuerza de fluencia ( $F_y$ ) y el desplazamiento de fluencia ( $\delta_y$ ), es decir:

$$K_y = \frac{F_y}{\delta_y} \quad (3.6)$$

**Yield strength.**- Se ajusta con el parámetro de la fuerza de fluencia ( $F_y$ ).

**Post yield stiffness ratio.**- Es la relación que existe entre la rigidez a la postfluencia ( $K_u$ ) y la rigidez elástica ( $K_y$ ), es decir:

$$\frac{K_u}{K_y} = \frac{\frac{F_{max} - F_y}{\delta_{max} - \delta_y}}{\frac{F_y}{\delta_y}} \quad (3.7)$$

**Yielding exponent.**- Especifica la forma de la curva ( $n$ ).



## 3.2 Modelo matemático y parámetros que definen el comportamiento de un aislador de base

En la práctica, todos los aisladores de base se modelan considerando un comportamiento bilineal, basado en tres parámetros principalmente.

- Rigidez elástica,  $K_e$
- Rigidez a la postfluencia,  $K_d$
- Resistencia característica,  $Q_d$ .

En la figura 3.4, se muestra un ciclo de histéresis de un modelo bilineal típico.

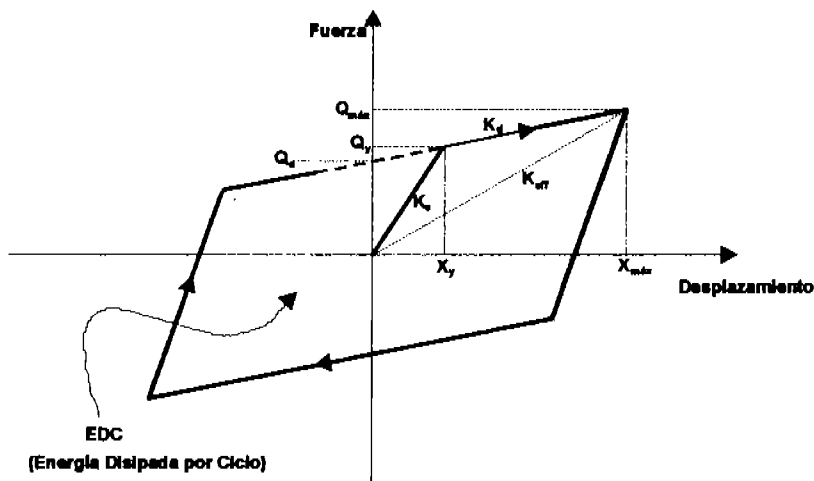


Figura 3.4 Modelo bilineal de histéresis de un aislador sísmico

### 3.2.1 Modelo matemático para simular el comportamiento de un aislador de base

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



La resistencia característica  $Q_d$ , se puede estimar de un ciclo histérico para apoyos elastoméricos. En el caso de apoyos con núcleo de plomo,  $Q_d$  se obtiene del esfuerzo de fluencia en el plomo. La rigidez a la postfluencia,  $K_d$ , puede ser estimada mediante ensayos experimentales.

La rigidez efectiva  $K_{eff}$ , está dada por la pendiente secante de pico a pico en un ciclo de histéresis, definiéndose como: la fuerza máxima entre el desplazamiento máximo que produce éste desplazamiento en un aislador.

En la figura 3.4:  $Q_y$ , es la fuerza de fluencia,  $Q_{máx}$  es la fuerza máxima,  $X_y$  es el desplazamiento en la fluencia y  $X_{máx}$  es el desplazamiento máximo.

### 3.2.2 Parámetros que definen el comportamiento de un aislador de base

De la figura 3.4 mostrada se deduce que la fuerza de fluencia aplicada a un aislador está dada por:

$$Q_y = K_e X_y \quad (3.8)$$

y la fuerza máxima  $Q_{máx}$ , será:

$$Q_{máx} = Q_d + K_d X_{máx} \quad (3.9)$$

donde  $X_{máx}$  es el desplazamiento máximo de diseño del aislador.

De la ecuación (3.8) se tiene:

$$X_y = \frac{Q_y}{K_e} \quad (3.10)$$

y su rigidez a la postfluencia  $K_d$  es:

$$K_d = \frac{Q_y - Q_d}{X_y} \quad (3.11)$$



despejando  $Q_y$  de la ecuación (3.11):

$$Q_y = Q_d + K_d X_y \quad (3.12)$$

sustituyendo la ecuación (3.12) en (3.10):

$$X_y = \frac{Q_d + K_d X_y}{K_e} \quad (3.13)$$

de esta ecuación

$$X_y K_e = Q_d + K_d X_y \quad (3.14)$$

$$X_y (K_e - K_d) = Q_d \quad (3.15)$$

finalmente, el desplazamiento en la fluencia,  $X_y$  se puede evaluar como:

$$X_y = \frac{Q_d}{K_e - K_d} \quad (3.16)$$

La rigidez lineal efectiva,  $K_{eff}$  y el amortiguamiento viscoso equivalente,  $\alpha_n$ , se calculan como sigue.

De la figura 3.4, la rigidez efectiva  $K_{eff}$  se calcula como:

$$K_{eff} = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{X_{m\acute{a}x}} \quad (3.17)$$

sustituyendo la ecuación (3.9) en la ecuación anterior:

$$K_{eff} = \frac{Q_d + K_d X_{m\acute{a}x}}{X_{m\acute{a}x}} \quad (3.18)$$

finalmente se tiene:

$$K_{eff} = K_d + \frac{Q_d}{X_{m\acute{a}x}} \quad (3.19)$$



Por otro lado, el amortiguamiento viscoso equivalente,  $\varepsilon_h$ , se determina como [Ref. 11]:

$$\varepsilon_h = \frac{\text{Área de histéresis del aislador}}{2\pi K_{\text{eff}} X_{\text{máx}}^2} \quad (3.20)$$

de la figura 3.4, se tiene:

$$\varepsilon_h = \frac{2Q_d(X_{\text{máx}} - X_y)}{\pi K_{\text{eff}} X_{\text{máx}}^2} \quad (3.21)$$

sustituyendo las ecuaciones (4.16) y (4.19) en la ecuación (4.21):

$$\varepsilon_h = \frac{2Q_d \left( X_{\text{máx}} - \frac{Q_d}{K_o - K_d} \right)}{\pi \left( K_d + \frac{Q_d}{X_{\text{máx}}} \right) X_{\text{máx}}^2} \quad (3.22)$$

finalmente:

$$\varepsilon_h = \frac{2}{\pi} \frac{Q_d X_{\text{máx}} - \frac{Q_d^2}{K_o - K_d}}{K_d X_{\text{máx}}^2 + Q_d X_{\text{máx}}} \quad (3.23)$$

Cuando se realizan ensayos de laboratorio a los aisladores sísmicos, de su gráfica fuerza – desplazamiento, se puede conocer el área que encierra el ciclo histérico, entonces el amortiguamiento viscoso equivalente será:

$$\varepsilon_h = \frac{EDC}{2\pi K_{\text{eff}} X_{\text{máx}}^2} \quad (3.24)$$

donde EDC es la energía histérica disipada por ciclo, o área de histéresis del aislador (figura 3.4), que se puede calcular como:

$$EDC = 4X_{\text{máx}} Q_d \quad (3.25)$$



Para obtener la respuesta de las estructuras con aisladores, se hará un análisis no lineal paso a paso. Para ello se usará el programa de análisis estructural SAP2000, que permite considerar los dispositivos de aislamiento sísmico en estructuras. En el caso del aislador de base, el programa toma al dispositivo como un N-Link Isolator 1, que es el mejor se adapta al modelo matemático.

Básicamente, el modelo no lineal que utiliza el SAP2000, requiere las siguientes propiedades.

**Effective stiffness** (Rigidez efectiva).- El ajuste de éste parámetro es con la rigidez efectiva ( $K_{eff}$ ), que se obtiene a partir de la ecuación (3.19).

**Stiffness** (Rigidez elástica).- Se ajusta con el parámetro de la rigidez elástica ( $K_e$ ) y se calcula con la ecuación (3.8).

**Yield strength** (Fuerza de fluencia).- Se introduce al programa con el parámetro de la fuerza elástica ( $Q_d$ ).

**Post yield stiffness ratio** (Relación de rigidez a la postfluencia respecto a la rigidez elástica).- Éste dato se obtiene con las ecuaciones (3.11) y (3.8) respectivamente, es decir, la relación ( $K_d / K_e$ ).



## 4. MODELOS DE APLICACIÓN

### 4.1 Descripción del modelo matemático de un marco con disipador de energía

En la figura 4.1.a se muestra un disipador de energía de fricción para ser empleado como conector entre el marco y un muro de mampostería reforzada. En la figura 4.1.b se muestran los valores de las propiedades de las secciones transversales de la viga y las columnas, así como las propiedades geométricas del marco. La inercia de cada elemento se calculó considerando comportamiento de cortante, esto es:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \frac{Kh^3}{12E} \quad (4.1)$$

donde  $h$  es la altura del marco y  $E$  el módulo de elasticidad del acero, y  $K$  la rigidez lateral del marco.

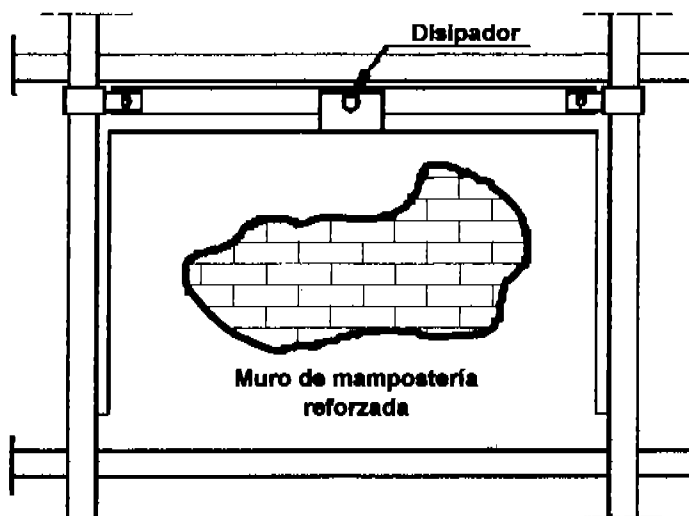


Figura 4.1.a Marco con disipador de energía y muro de mampostería



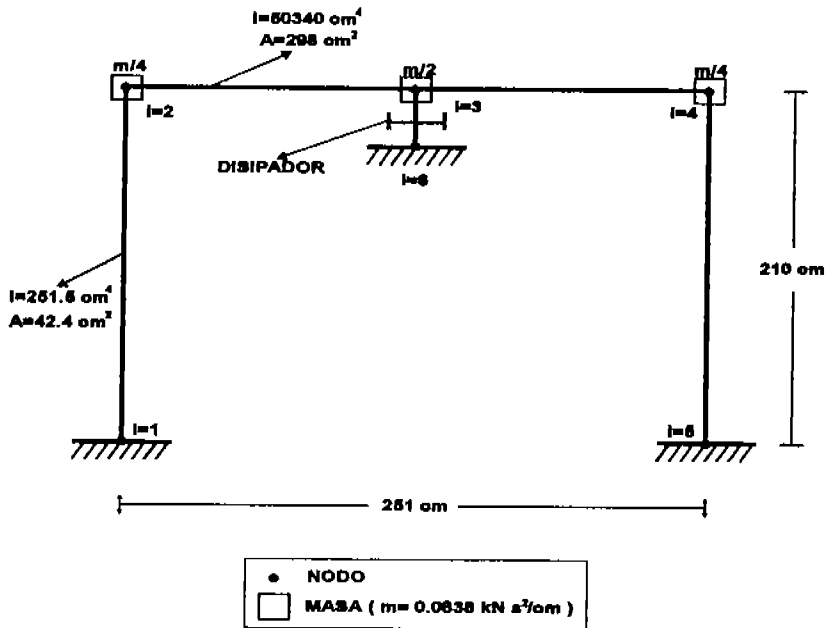


Figura 4.1.b Propiedades y características geométricas del marco

Figura 4.1 Modelo matemático y características de un marco con disipador de energía

### 4.1.1. Propiedades y ajuste de parámetros del disipador de energía utilizado

El sistema disipativo real consta de dos muros de concreto con sus respectivos disipadores de cortante (figura 4.1.a). El modelo recoge esta realidad introduciendo la rigidez de los muros en el disipador de energía. Las propiedades del modelo matemático ( Modelo de Ramberg – Osgood) del disipador se muestran en la tabla 4.1.



Parámetro	Valor
$F_y$	26 kN
$\delta_y$	0.5 mm
$\alpha$	1
$n$	15

Tabla 4.1 Propiedades del disipador de energía.

Para el análisis no lineal paso a paso se utilizó el registro sísmico de Santa Cruz California, EUA [Ref. 7]. Para introducir los datos al programa, en la barra de herramientas se selecciona **NL-Link Properties** y se elige la opción **Plastic 1**, ya que es el que más se adapta al modelo matemático de Ramberg – Osgood.

Para el parámetro **Stiffness** se tiene:

$$K_v = \frac{F_y}{\delta_y} = \frac{26}{0.05} = 520 \frac{kN}{cm}$$

El parámetro **Yield strength** se obtiene como:

$$F_y = 26 \text{ kN}$$

El **Post yield stiffness ratio** se obtiene, como se muestra a continuación:

Proponiendo  $F_{max} = 30 \text{ kN}$ , se obtiene  $\delta_{max}$  como:

$$\frac{\delta}{\delta_y} = \frac{F}{F_y} + \alpha \left( \frac{F}{F_y} \right)^n$$

donde  $F = F_{max} = 30 \text{ kN}$ ;  $\delta_y = 0.05 \text{ cm}$ ;  $F_y = 26 \text{ kN}$ ;  $n = 15$  y  $\alpha = 1$ ; sustituyendo valores y despejando  $\delta = \delta_{max}$ , se tiene:

$$\delta_{max} = \left[ 0.05 \cdot \frac{30}{26} \right] + \left[ 0.05 \cdot 1 \left( \frac{30}{26} \right)^{15} \right] = 0.485 \text{ cm}$$



Finalmente para encontrar el Post yield stiffness ratio, se tiene:

$$\frac{K_p}{K_y} = \frac{30 - 26}{\frac{0.485 - 0.05}{26}} = 0.000837$$

Finalmente, el Yielding Exponent se obtiene a partir de la tabla 4.1:

$$n = 15$$

### 4.1.2 Excitación sísmica

En la tabla 4.2 se muestran las características del registro sísmico de Santa Cruz California y en la figura 4.2, se muestra gráficamente.

IDENTIFICACIÓN	DURACIÓN (s)	ACELERACIÓN MÁXIMA (gals)	TIEMPO DE ACELERACIÓN MÁXIMA (s)
Santa Cruz	39.98	489.39	4.04

Tabla 4.2 Características del sismo de Santa Cruz California

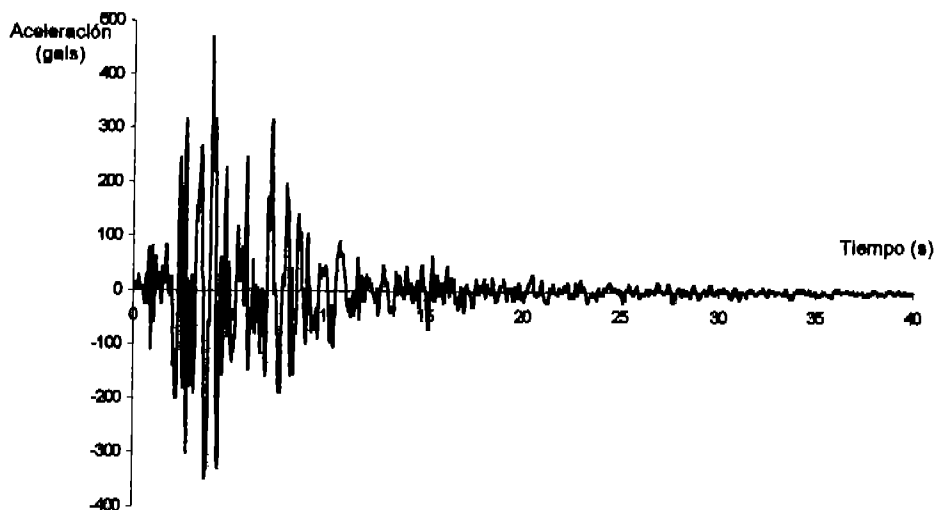


Figura 4.2 Registro del sismo de Santa Cruz



### 4.1.3 Captura de las propiedades del disipador de energía en SAP2000 para el análisis no lineal del marco

Después de haber introducido al programa las secciones transversales y los momentos de inercia de las columnas y la viga, se definen las propiedades del disipador de energía en la opción **NL-Link Properties**, del menú **Define**. Así, para el caso del disipador denominado **DISENER** se tiene la siguiente secuencia para la captura de los datos mostrada en la Fig. 4.3.

- 1 **Materials...**  
**Frame Sections...**  
**Shell Sections...**  


---

**Static Load Cases...**  
**Moving Load Cases** ▶  
**Joint Patterns...**  
**Groups...**  


---

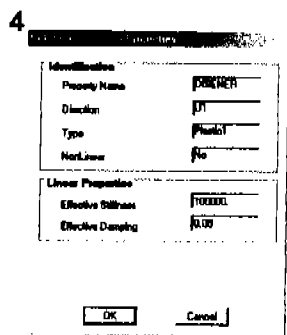
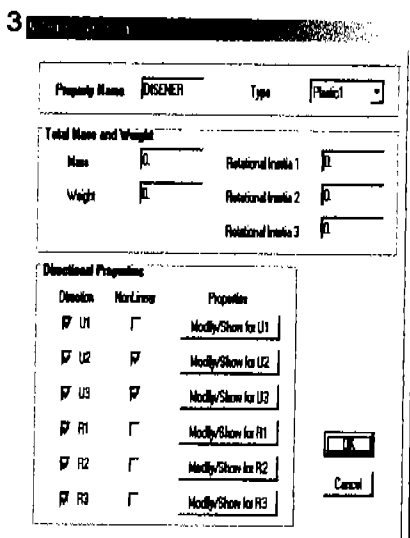
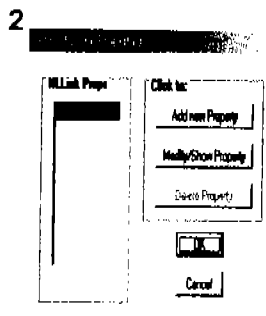
**Response Spectrum Functions...**  
**Time History Functions...**  
**Response Spectrum Cases...**  
**Time History Cases...**  


---

**Hinge Properties...**  
**Static Pushover Cases...**  


---

**Load Combinations...**





5

Definición de Propiedades

<b>Identificación</b>	
Property Name	DISENPA
Location	U2
Type	Plastic
NonLinear	Yes
<b>Linear Properties</b>	
Effective Stiffness	0.
Effective Damping	0.
<b>Shear Deformation Location</b>	
Distance from End-J	0.
<b>NonLinear Properties</b>	
Stiffness	620.
Yield Strength	25.
Post Yield Stiffness Ratio	0.370E-04
Yielding Exponent	175.

OK Cancel

Figura 4.3 Secuencia de la captura de datos de las propiedades del disipador para el SAP2000

### 4.1.4 Resultados obtenidos

En la figura 4.4 se muestra el ciclo de histéresis que describe el disipador de energía, cuando está sujeto al sismo.

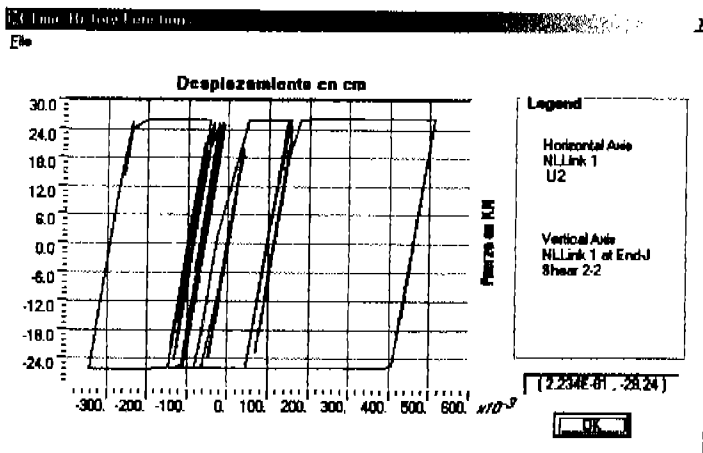


Figura 4.4 Ciclo de histéresis del disipador de energía.



## 4.2 Marco con disipador de energía ensayado en laboratorio

La figura 4.5 muestra el modelo de un marco con disipador de energía colocado en la diagonal, el cual fue ensayado en el laboratorio [Ref. 9].

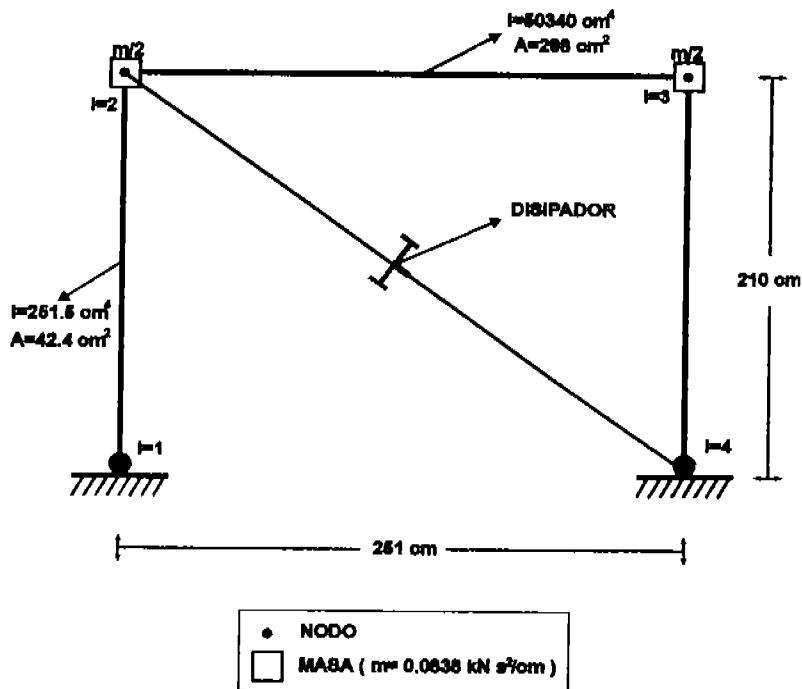


Figura 4.5 Modelo de un marco con disipador de energía ensayado en laboratorio.

### 4.2.1 Propiedades y ajuste de parámetros del disipador de energía ensayado en laboratorio

Las propiedades obtenidas de los estudios de laboratorio [Ref. 9] para el modelo matemático de Ramberg – Osgood, se muestran en la tabla 4.3.



Parámetros	Valores
$F_y$	84.7 kN
$F_{max}$	281 kN
$\delta_{max}$	40 mm
$\alpha$	0.967
$n$	3.37

Tabla 4.3 Propiedades del dissipador de energía.

Para análisis no lineal con SAP2000 se selecciona **NL-Link Properties** y se elige la opción **Plastic 1**, para empezar a introducir datos, ya que es el que mas se adapta al modelo matemático de Ramberg – Osgood.

El **Post yield stiffness ratio** se calcula para el modelo de Ramberg – Osgood con la rigidez a la postfluencia, como se muestra a continuación:

Proponiendo  $F_{max} = 281$  kN, se obtiene  $\delta_y$  como:

$$\delta_y = \frac{\delta_{max}}{\frac{F_{max}}{F_y} + \alpha \left( \frac{F_{max}}{F_y} \right)^n}$$

donde  $F = F_{max} = 281$  kN;  $\delta_{max} = 40$  mm;  $F_y = 84.7$  kN;  $n = 3.37$  y  $\alpha = 0.967$ ; sustituyendo valores y despejando  $\delta_y$ , se tiene:

$$\delta_y = \frac{40}{\frac{281}{84.7} + 0.967 \left( \frac{281}{84.7} \right)^{3.37}} = 0.069 \text{ cm}$$

Para el parámetro **Stiffness** se tiene:

$$K_y = \frac{F_y}{\delta_y} = \frac{84.7}{0.0684} = 1238.31 \frac{kN}{cm}$$



En el caso del parámetro **Yield Strength** se obtiene con:

$$F_y = 84.7 \text{ kN}$$

Finalmente para encontrar el **Post Yield Stiffness Ratio**, se tiene:

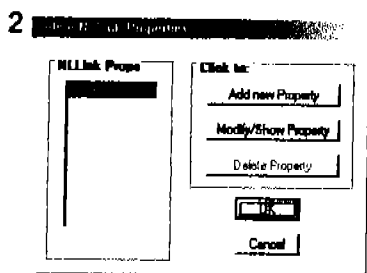
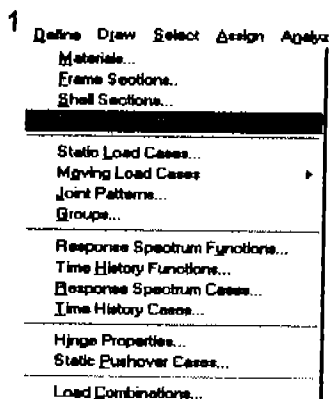
$$\frac{K_u}{K_y} = \frac{281 - 84.7}{\frac{4 - 0.0684}{84.7}} = 0.0403$$

El **Yielding Exponent**, el cual se obtiene directamente de la tabla 4.3:

$$n = 3.37$$

## 4.2.2 Captura de las propiedades del disipador de energía en SAP2000 para el análisis no lineal del marco

En el programa SAP2000 se elige la opción **NL-Link Properties**, del menú **Define**. Para el caso del disipador denominado **DISIP1** se tiene la siguiente secuencia para la captura de los datos mostrada en la figura 4.3.







3

Identification

Property Name DISIP1

Direction R1

Type Plastic

NonLinear No

Linear Properties

Effective Stiffness 100000

Effective Damping 0.08

OK Cancel

4

Property Name DISIP1 Type Plastic

Total Mass and Weight

Mass 0.0 Rotational Inertia 1 0.0

Weight 0.0 Rotational Inertia 2 0.0

Rotational Inertia 3 0.0

Directional Properties

Direction	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U1
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U3
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3

OK Cancel

5

Identification

Property Name DISIP1

Direction U2

Type Plastic

NonLinear Yes

Linear Properties

Effective Stiffness

Effective Damping 0.1

Shear Deformation Location

Distance from End 0.1

Non-Linear Properties

Stiffness 1234.567

Yield Strength 0.7

Post Yield Stiffness Ratio 0.0403

Yielding Exponent 3.37

OK Cancel

Figura 4.6 Secuencia de la captura de datos de las propiedades del disipador ensayado en laboratorio.

### 4.2.3 Resultados obtenidos

En la figura 4.7 se muestra el ciclo de histéresis del disipador de energía en el marco, cuando está sujeto al registro sísmico de Santa Cruz California.



Time History Functions

XI

File

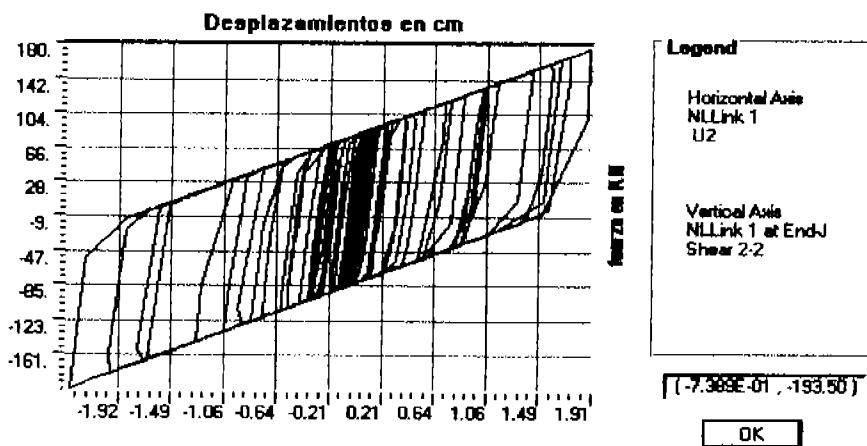


Figura 4.7 Ciclo de histéresis del dissipador de energía.

### 4.3 Diafragma rígido soportado por aisladores de base

Se revisa el análisis no lineal de un diafragma rígido soportado por aisladores en la base con el SAP2000. En la evaluación se emplean aisladores tipo A (blando) para los aisladores exteriores y tipo B (rígido) para los interiores, previamente diseñados. Se consideraron siete casos de pares de registros sísmicos (componentes ortogonales horizontales) adecuados para la modelación de edificios con aisladores sísmicos. Se presentan los resultados sobre el control de la respuesta máxima de este sistema, así como la máxima demanda de desplazamiento en las dos direcciones ortogonales.

#### 4.3.1. Modelo matemático

En la figura 4.8 se muestra las curvas fuerza – desplazamiento de los aisladores y en la tabla 4.4 se presenta sus propiedades, éstas se modelan utilizando el elemento ISOLATOR1.

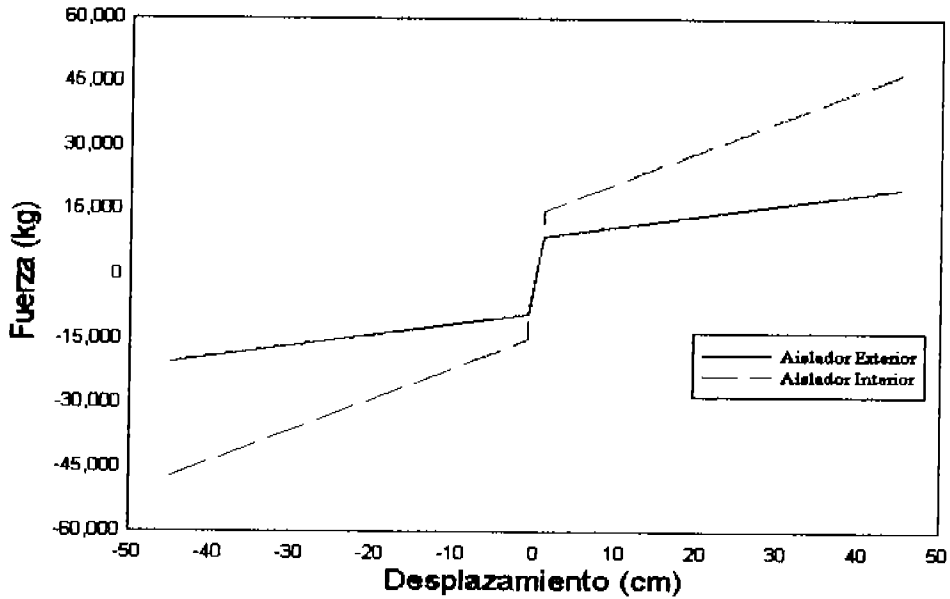


Figura 4.8 Relación fuerza-desplazamiento del aislador

Tipo de aislador	Intervalo de cargas de gravedad en el nivel de aislamiento (kg)	Rigidez lineal efectiva (kN/m)	Rigidez lineal (kN/m)	Fuerza de diseño (kN)	Frecuencia de amortiguamiento (segundos)	Amortiguamiento (cm)	Amortiguamiento (mm)	Amortiguamiento (mm)
5	60 – 100	110	794	7.94	0.043	1100	55	18
5	160 – 220	190	1270	12.7	0.055	2800	80	18

Se considera un factor de seguridad de 2

Tabla 4.4 Propiedades del cojinete de caucho de gran amortiguamiento.



### 4.3.2. Construcción del modelo matemático para la estructura aislada

Existen dos métodos para construir los modelos de una estructura aislada

- **Un modelo del sistema aislador separado del modelo representativo de la superestructura.** Se utiliza cuando se requiere el análisis de modelos sujetos a varios pares de registros sísmicos. Su limitación consiste en la inherente suposición del piso como un diafragma rígido.
- **Un modelo integrado del sistema aislador de la base y la superestructura.** Este modelo puede construirse con programas capaces de modelar las características no lineales de los aisladores (SAP2000). Su desventaja consiste en el gran volumen de datos y procesos numéricos asociados a un proyecto de aislamiento sísmico real.

En este trabajo se utiliza el primer método con el objetivo de conocer resultados preliminares. Sin embargo, se debe utilizar el segundo método durante la fase final para confirmar los resultados obtenidos y diseñar los elementos representados inadecuadamente en el primero. Para construir el modelo de la estructura aislada, no se modelaron los dos pisos sobre este diafragma si no que la masa total del edificio se colocó en el diafragma directamente sobre los aisladores.

Se examinó la respuesta del sistema sujeto a alguno de los siete pares de registros sísmicos de la tabla 4.5. El amortiguamiento en el sistema se supone que proviene totalmente del comportamiento histerético del aislador, sin embargo, para preservar la estabilidad numérica del esquema de solución y reducir el número de iteraciones, se asignó un amortiguamiento viscoso total del 1 % para el sistema estructural. En la figura 4.9 se muestra una vista tridimensional del sistema incluyendo los aisladores en la base.

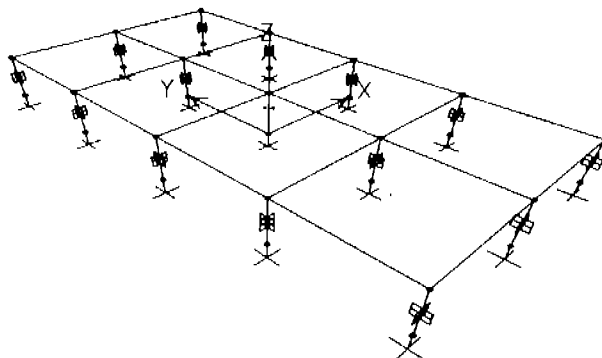


Figura 4.9 Vista tridimensional del modelo de aisladores, programa SAP2000

Par No.	Nombre	Estación	Año	Componentes	Desplazamiento máximo del aislador del terreno	Desplazamiento máximo del terreno
1	Imperial Valley, CA	Array # 6	1979	230°	100.7	55.1
				140°	63.1	27.0
2	Loma Prieta, CA	Hollister, South and pine	1989	0°	62.8	30.2
				90°	30.9	20.4
3	Loma Prieta, CA	Lexinton Dam	1989	0°	84.4	14.7
				90°	34.0	25.8
4	Landsers, CA	Lucerne Valley	1992	L	25.7	8.8
				T	88.4	28.2
5	Landsers, CA	Yermo Fire Station	1992	270°	50.8	41.3
				360°	29.0	22.8
6	Petrolia, CA	Petrolia	1992	0°	48.3	15.2
				90°	89.5	30.8
7	Northridge, CA	Sylmar, Country Hospital Parking Lot	1994	90°	77.0	15.2
				360°	129.0	32.5

Tabla 4.5 Registros sísmicos utilizados para el análisis no lineal del diafragma rígido

### 4.3.3 Captura de las propiedades de los aisladores sísmicos con comportamiento bilineal en el SAP2000

#### 4.3.3.1 Propiedades de los aisladores

Se definen las propiedades de los aisladores en la opción NL-Link Properties, del menú Define. Así, para el caso del aislador denominado ISOL1 se tiene la secuencia para la captura de los datos de la figura 4.10.



1

Define Draw Select Assign Analyz 2

Materials...  
 Frame Sections...  
 Shell Sections...  
 Static Load Cases...  
 Moving Load Cases...  
 Joint Patterns...  
 Groups...  
 Response Spectrum Functions...  
 Time History Functions...  
 Response Spectrum Cases...  
 Time History Cases...  
 Hinge Properties...  
 Static Pushover Cases...  
 Load Combinations...

Property Name JSOL1 Type Isolated

Total Mass and Weight  
 Mass 0.0 Rotational Inertia 1 0.0  
 Weight 0.0 Rotational Inertia 2 0.0  
 Rotational Inertia 3 0.0

Nonlinear Properties

Direction	NonLinear	Properties
U1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1
U2	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2
U3	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3
R1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1
R2	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2
R3	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3

OK Cancel

3

Link Properties

Link ID: JSOL2

Link to: Add new Property  
 Modify/Show Property  
 Delete Property

OK Cancel

4

Identify Properties

Identification

Property Name JSOL1  
 Direction U1  
 Type Isolated  
 NonLinear No

Linear Properties

Effective Stiffness 1.400E+08  
 Effective Damping 0

OK Cancel

5

Identify Properties

Identification

Property Name JSOL1  
 Direction U2  
 Type Isolated  
 NonLinear Yes

Linear Properties

Effective Stiffness 110000  
 Effective Damping 0

Shear Deformation Location

Distance from End-J 0

Non-Linear Properties

Stiffness 794000  
 Yield Strength 7940  
 Post Yield Stiffness Ratio 0.0428

OK Cancel

6

Identify Properties

Identification

Property Name JSOL1  
 Direction U3  
 Type Isolated  
 NonLinear Yes

Linear Properties

Effective Stiffness 110000  
 Effective Damping 0

Shear Deformation Location

Distance from End-J 0

Non-Linear Properties

Stiffness 794000  
 Yield Strength 7940  
 Post Yield Stiffness Ratio 0.0428

OK Cancel

Figura 4.10 Secuencia de la captura de datos de las propiedades del aislador Tipo A



### 4.3.3.2 Registros sísmicos

- 1
- Define Draw Select Assign Analy
  - Materials...
  - Frame Sections...
  - Shell Sections...
  - NLLink Properties...
  - Static Load Cases...
  - Moving Load Cases...
  - Joint Patterns...
  - Groups...
  - Response Spectrum Functions...
  - Response Spectrum Cases...
  - Time History Cases...
  - Hinge Properties...
  - Static Pushover Cases...
  - Load Combinations...

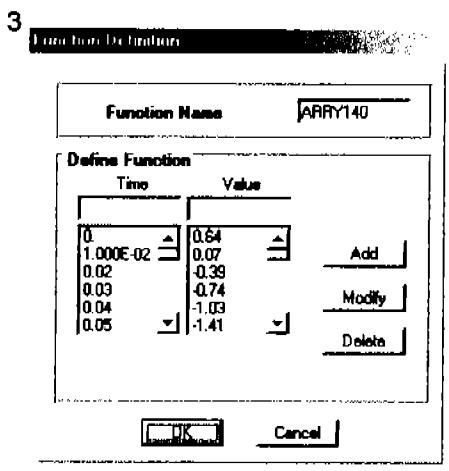
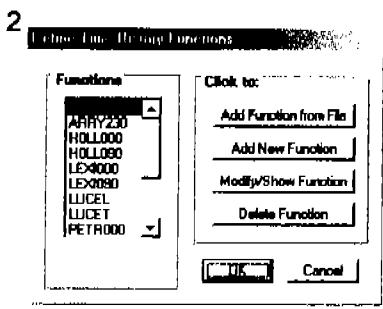


Figura 4.11 Definición de registros sísmicos



### 4.3.3.3 Definición de pares de registros sísmicos

1

- Define Draw Select Action Appear
- Materials...
- Frame Sections...
- Shell Sections...
- NLLink Properties...
- Static Load Cases...
- Moving Load Cases...
- Joint Patterns...
- Groups...
- Response Spectrum Functions...
- Time History Functions...
- Response Spectrum Cases...
- Hinge Properties...
- Static Pushover Cases...
- Load Combinations...

2

History Cases

Click to:

Add New History

Modify Selection History

Delete History

OK

Cancel

3

Time History Case Data

History Case Name SYLM

Options

Analyze Type Modal Damping

NonLinear Number of Output Time Steps 2000

Output Time Step Size 0.01

Envelopes Start from Previous History

Load Assignments

Load	Function	Scale Factor	Arrival Time	Angle
acc dir 1	SYLM360	0.01	0.	0.
acc dir 2	SYLM090	0.01	0.	0.

Add Modify Delete

OK Cancel

Figura 4.12 Definición de las historias del tiempo o pares de registros sísmicos





### 4.3.4 Resultados

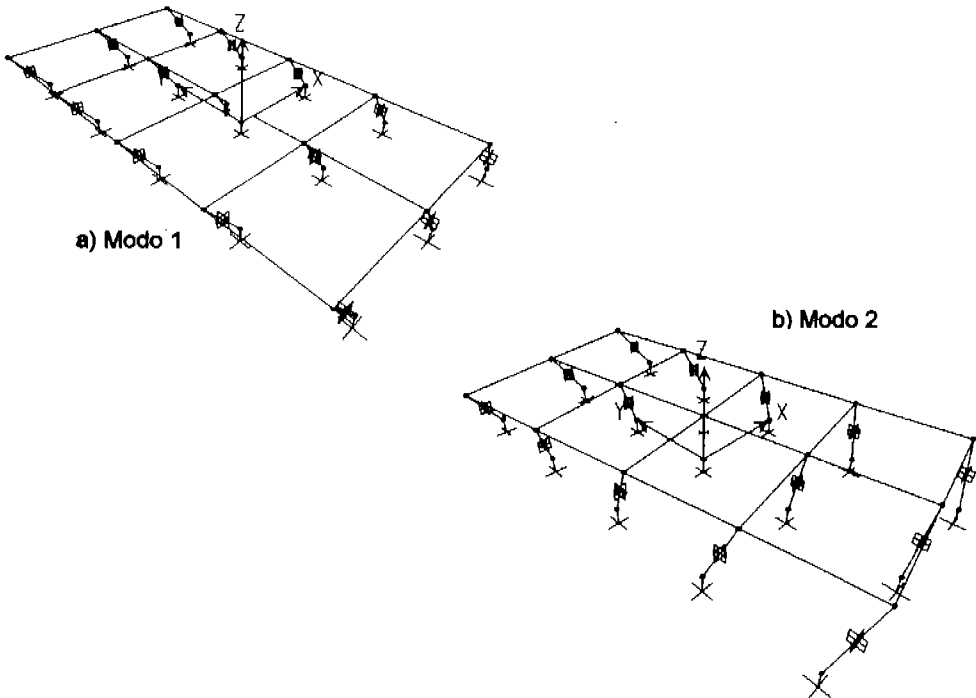
#### 4.3.4.1 Modos de vibrar del diafragma rígido

4.3.4.2

En la tabla 4.6 se muestran los valores de los primeros tres modos de vibrar del diafragma rígido y en la figura 4.13 se observan gráficamente.

Modo	Periodo
1	1.85 s
2	1.85 s
3	1.68 s

Tabla 4.6 Modos de vibrar del diafragma rígido



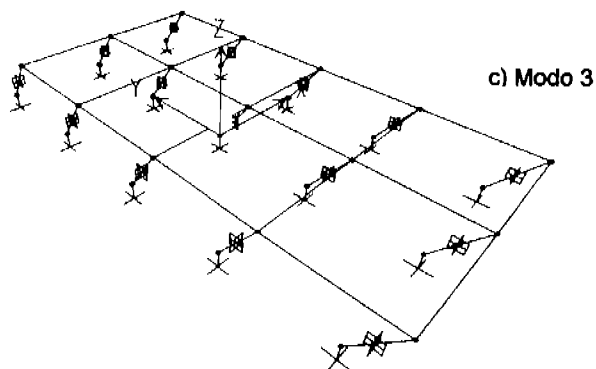


Figura 4.13 Primeros modos de vibrar del diafragma rígido

#### 4.3.4.2 Comportamiento de los aisladores en el diafragma rígido

La figura 4.14 muestra el ciclo de histéresis que describe el aislador de base número 5 que corresponde al aislador tipo A en el diafragma rígido.

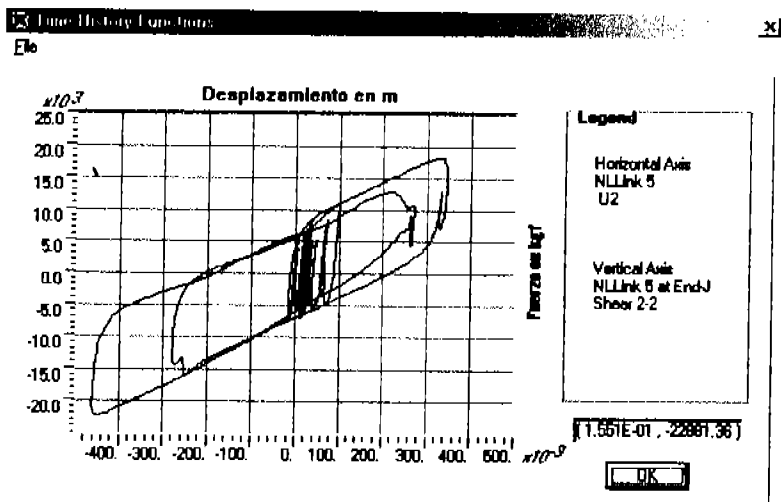


Figura 4.14 Ciclo de histéresis del aislador 5 cuando está sujeto a la historia del tiempo Sylmar de Northridge 1994.



## 4.4 Puente Vehicular Infiernillo II

### 4.4.1. Descripción geométrica del puente vehicular

Se revisa el análisis no lineal del Puente Vehicular Infiernillo II soportado por aisladores en la base [Ref. 11]. Este puente se ubica entre los estados de Michoacán y Guerrero, que es una zona de alta sismicidad, con la finalidad de cruzar el río Balsas. Se ubica a menos de 100 km de la costa del Pacífico, por lo que es muy probable que durante su vida útil ocurran importantes eventos sísmicos de gran magnitud.

Por esta razón, y la importancia del puente, las autoridades responsables de la construcción y mantenimiento decidieron mejorar su comportamiento sísmico sin olvidar las especificaciones de diseño que rigen la construcción de este tipo de estructuras. Por tal motivo, se emplearon aisladores sísmicos con el fin de proporcionar un buen comportamiento sísmico.

La longitud total del puente es de 520 m, que comprenden claros iguales de aproximadamente 104 m cada uno, en los cuales se colocará la superestructura a base de armaduras de acero de paso inferior, que albergará tableros de 15 m de ancho, con un peso aproximado de 1,475 t. A su vez, la superestructura se apoyará en pilas de concreto reforzado de longitud variable de aproximadamente 54, 74, 73, y 47 m. Las pilas descansan sobre cilindros de cimentación empotrados en su base debido a la colocación de pilotes inclinados, por lo que en sus análisis no se tomará en cuenta la interacción suelo estructura. En el extremo superior de cada cabeza se colocaron cuatro aisladores sísmicos, los que soportaran a las armaduras que cruzan los claros.

### 4.4.2 Modelo matemático

El modelo del puente se muestra en la figura 4.15, donde se aprecian los 5 claros, sus cuatro pilas intermedias y como estribos, los apoyos fijos a la izquierda y libres a la derecha. Se observa también como en el extremo superior de cada pila se colocaron los aisladores de base.

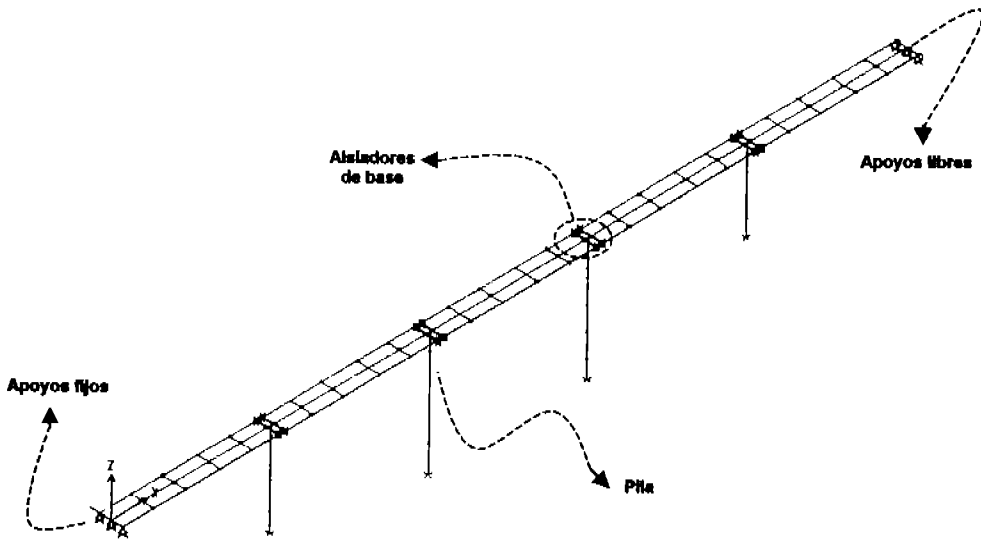


Figura 4.15 Modelo en SAP 2000 del Puente Vehicular Infiernillo II

En la figura 4.16, se muestra un detalle del cabezal y su conexión con la superestructura, donde se pueden ver los cuatro aisladores sísmicos, colocados en los extremos del cabezal, que a su vez unen a cada lado a las armaduras, modeladas con elementos finitos placa con peso equivalente al de la superestructura.

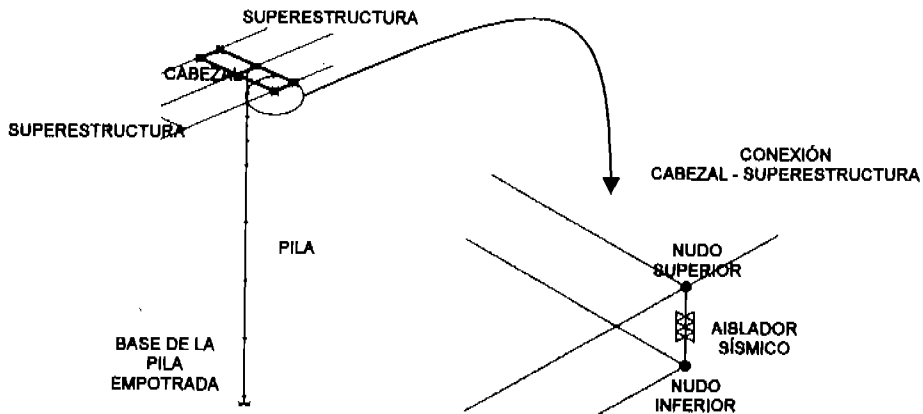


Figura 4.16 Detalle de la conexión del cabezal con la superestructura.



### 4.4.3 Acciones sísmicas

El puente se ubica en la zona D de acuerdo a las Normas para diseño por sismo de la CFE [Ref. 12]. En vista de que en el sitio del puente no se tienen aparatos de registro sísmico, se recurrió a la simulación de los sismos con base en un modelo de proceso estocástico de las aceleraciones del terreno [ Ref. 13]. Este modelo se define mediante un conjunto de funciones que describen la evolución de la amplitud y el contenido de frecuencias durante un temblor. Las características de éste sismo son los presentados en la tabla 4.7:

IDENTIFICACIÓN	DURACIÓN (#)	ACELERACIÓN MÁXIMA (gals)	TIEMPO DE ACELERACIÓN MÁXIMA (s)
RS - 1	20.00	436	7.72

Tabla 4.7 Características más importantes del sismo simulado.

La gráfica, tiempo – aceleración del sismo se representa en la figura 4.17.

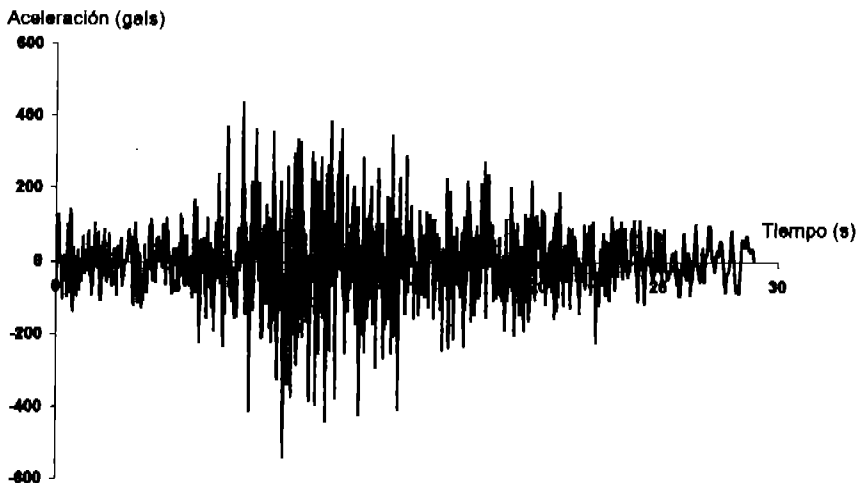


Figura 4.17 Registro sísmico simulado RS-1



### 4.4.4 Captura de las propiedades de los aisladores de base en SAP2000

#### 4.4.4.1 Propiedades de los materiales utilizados en la estructura

En la siguiente secuencia de captura de datos (Fig. 4.18 y Fig. 4.19), que se necesita para obtener un prediseño de la estructura, se muestran los materiales que se utilizaron, así como de las secciones propuestas.

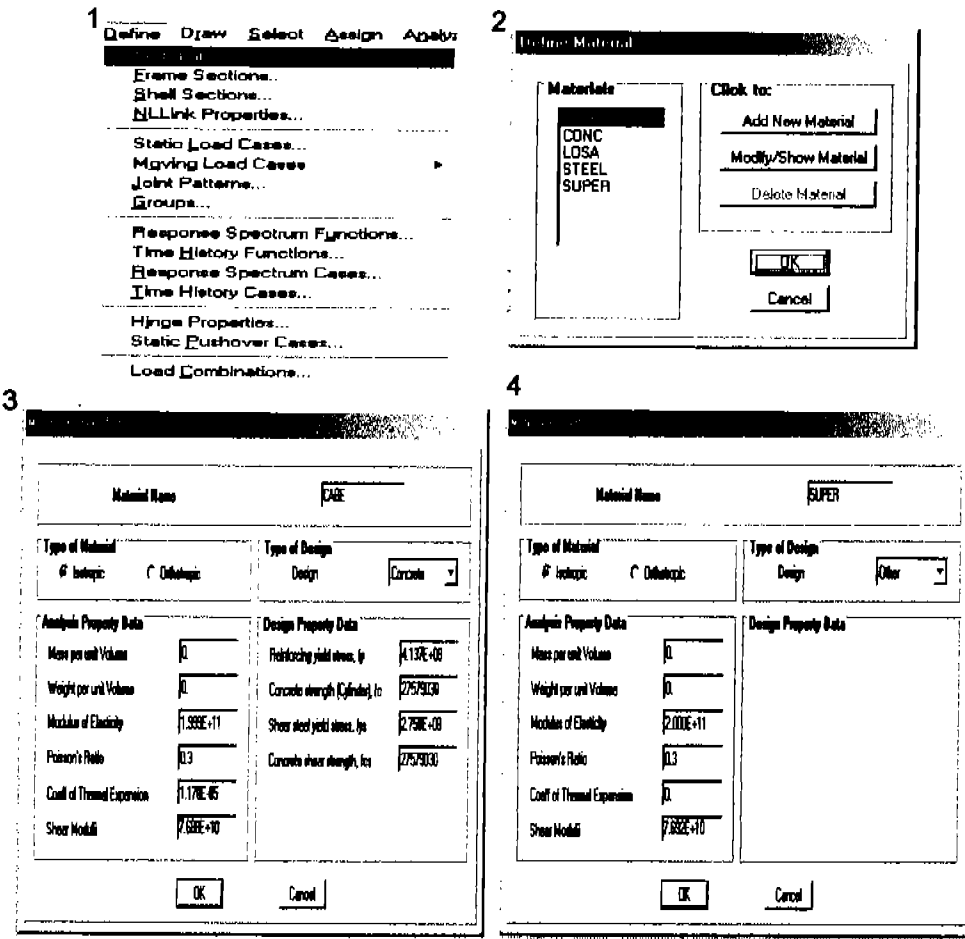


Fig. 4.18 Secuencia de captura de datos de los materiales utilizados en la estructura

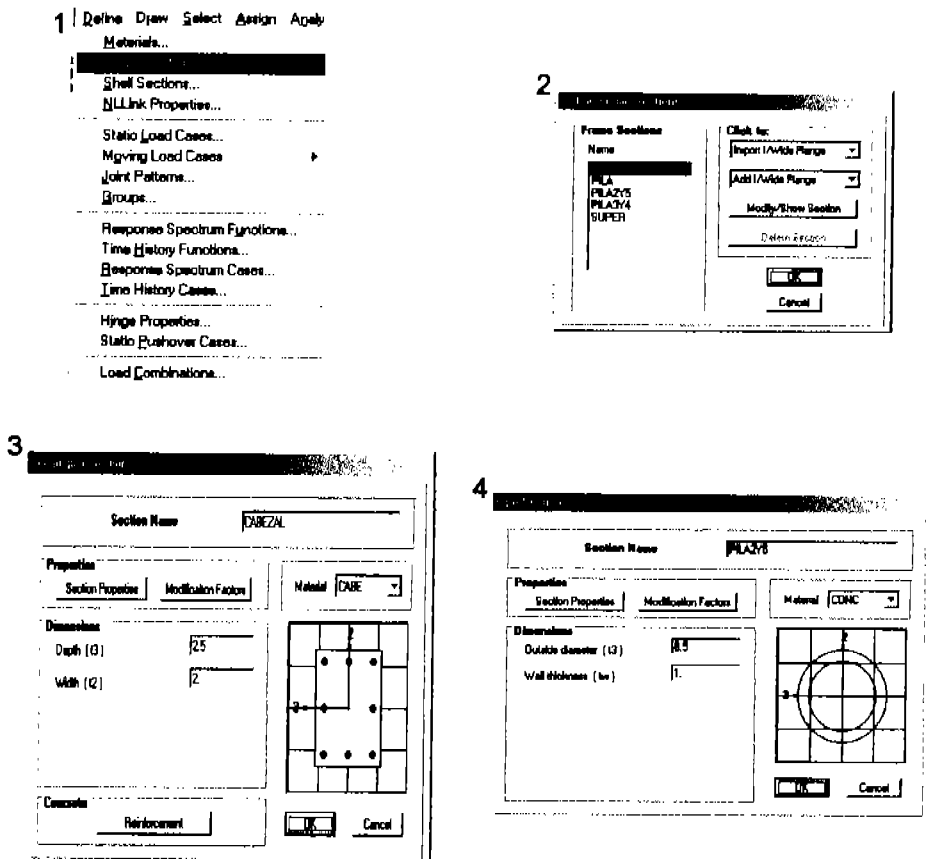


Figura 4.19 Secuencia de la captura de datos de las secciones transversales de la estructura.

#### 4.4.4.2 Propiedades de los aisladores

Después de precisar las propiedades de los materiales, se define la sección transversal de cada elemento que conforma la estructura y posteriormente se detallan las propiedades de los aisladores en la opción **NLLink Properties**, del menú **Define**, así para el caso del aislador denominado **NLPR1** se tiene la siguiente secuencia para la captura de los datos mostrada en la Fig. 4.20.



1 Define Draw Select Assign Analyz

- Materials...
- Frame Sections...
- Shell Sections...
- Define Properties**
- Static Load Cases...
- Moving Load Cases
- Joint Patterns...
- Groups...
- Response Spectrum Functions...
- Time History Functions...
- Response Spectrum Cases...
- Time History Cases...
- Hinge Properties...
- Static Pushover Cases...
- Load Combinations...

2

Define NLink Properties

NLink Props	Click to:
	Add new Property
	Modify/Show Property
	Delete Property
OK	
Cancel	

3

NLink Property Data

Property Name	NLPR1	Type	Isolator1
<b>Total Mass and Weight</b>			
Mass	0.	Rotational Inertia 1	0.
Weight	0.	Rotational Inertia 2	0.
		Rotational Inertia 3	0.
<b>Directional Properties</b>			
Direction	NonLinear	Properties	
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1	<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2	
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U3	
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1	
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2	
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3	





4

Identification

Property Name	NLPR1
Direction	J2
Type	Isolator
NonLinear	Yes

Linear Properties

Effective Stiffness	
Effective Damping	2713.5

Shear Deformation Location

Distance from End-J	0.
---------------------	----

Non-Linear Properties

Stiffness	9.736E+08
Yield Strength	284199.9
Post-Yield Stiffness Ratio	0.0117

OK Cancel

5

Identification

Property Name	NLPR1
Direction	A1
Type	Isolator
NonLinear	No

Linear Properties

Effective Stiffness	9.807E+12
Effective Damping	0.

OK Cancel

Figura 4.20 Secuencia de la captura de datos de las propiedades del aislador.

#### 4.4.4.3 Definición de registros sísmicos

La historia de tiempo que se indica en la figura 4.21, se indica tanto en el sentido longitudinal del puente, eje X global, como en sentido transversal, eje Y global, siguiendo el procedimiento descrito por el programa SAP2000. De acuerdo a la normatividad correspondiente [Ref. 12], se considera para el registro sísmico, la siguiente combinación:

- A – 100% del sismo en dirección X más 30% del sismo en dirección Y (100x30y)
- B – 30% del sismo en dirección X más 100% del sismo en dirección Y (30x100y)



- 1 Define Draw Select Assign Apply
- Materials...
  - Frame Sections...
  - Shell Sections...
  - NLLink Properties...

---

  - Static Load Cases...
  - Moving Load Cases... ▶
  - Joint Patterns...
  - Groups...

---

  - Response Spectrum Functions...
  - Response Spectrum Cases...
  - Time History Cases...

---

  - Hinge Properties...
  - Static Pushover Cases...

---

  - Load Combinations...

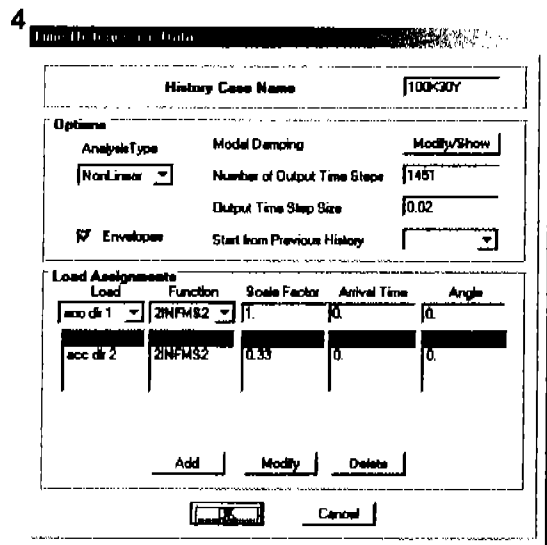
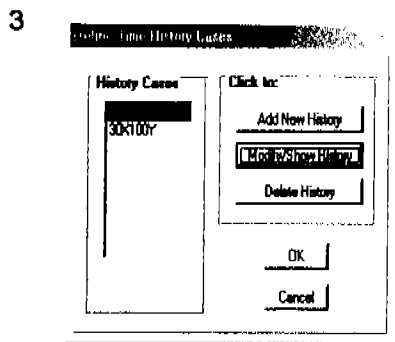
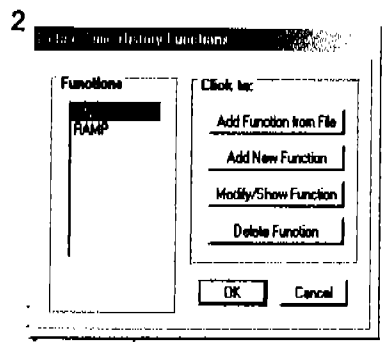


Figura 4.21 Definición de registros sísmicos



### 4.4.5 Resultados

#### 4.4.5.1 Modos de vibrar del puente

En la tabla 4.8 se muestran los valores de los primeros tres modos de vibrar del puente.

Modo	Periodo
1	2.03 s
2	1.61 s
3	1.57 s

Tabla 4.8 Modos de vibrar del diafragma rígido

#### 4.4.5.2 Comportamiento de los aisladores en el puente

A continuación se muestra en la figura 4.22 el ciclo de histéresis que describe el aislador de base número 7 que corresponde al aislador tipo A en el puente.

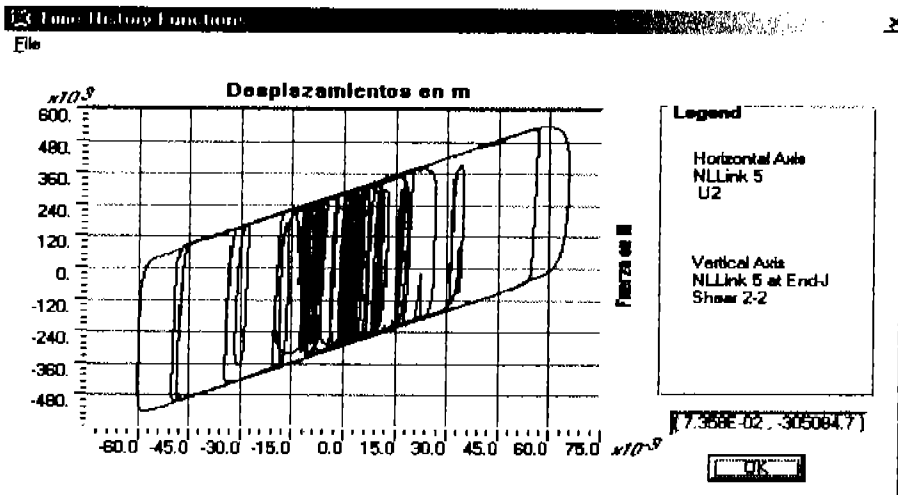


Figura 4.22 Ciclo de histéresis del aislador



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Comparación del modelo teórico y experimental del dissipador de energía del marco

En la fig. 5.1 se muestra con el modelo de Ramberg-Osgood, el modelo matemático teórico que se calculó para el marco con dissipador de energía de fricción.

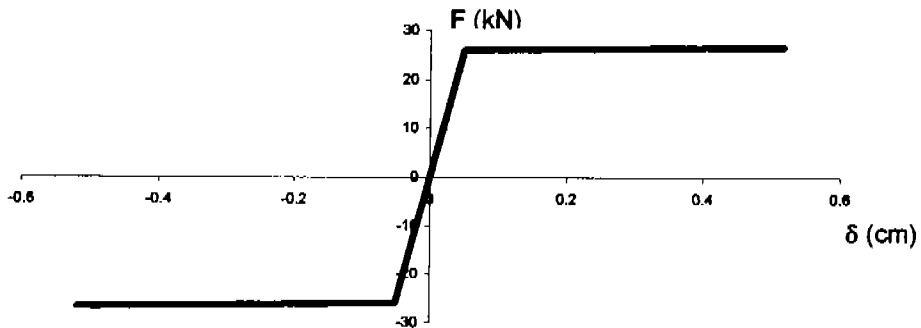


Fig. 5.1 Gráfica del modelo matemático de Ramberg-Osgood para el dissipador de energía

En la fig. 5.2 se muestra el ciclo histerético calculado con el programa SAP2000 cuando al marco está sujeto al registro sísmico de Santa Cruz California.

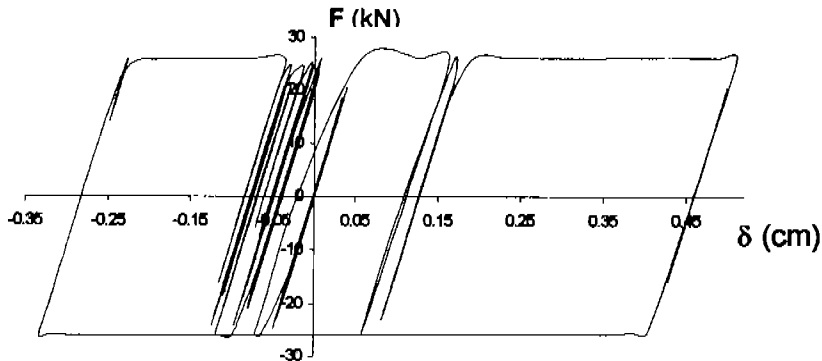


Figura 5.2 Ciclo Histerético del dissipador de energía (kN – cm)



En la figura 5.3 se ajustan los dos modelos, tanto el teórico (Ramberg-Osgood) como el experimental (SAP2000), para observar la similitud que ofrece el teórico contra el experimental.

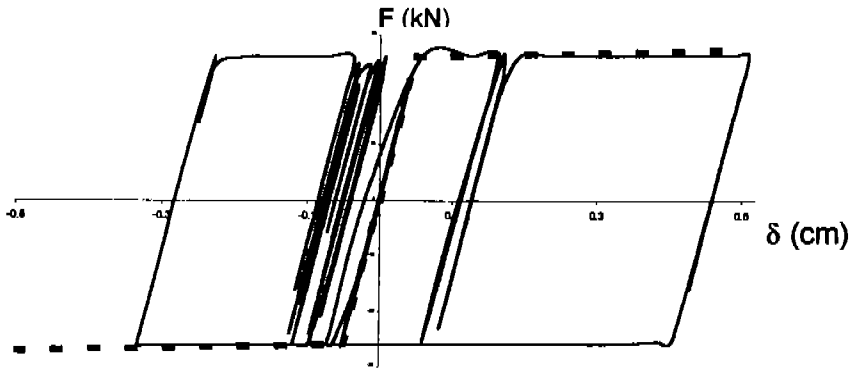


Figura 5.3 Comparación de los modelos teórico (—) y experimental (---)

### 5.1.1 Ventajas que ofrecen los disipadores de energía en el marco

En la figura 5.4 se muestra el modelo sin disipador de energía, ya que se quiere hacer notar de la importancia del dispositivo de control pasivo con respecto a los desplazamientos.

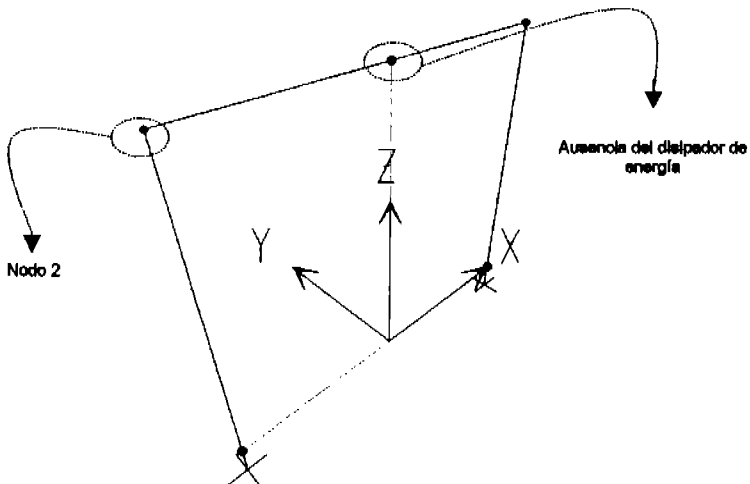


Figura 5.4 Marco sin disipador de energía



En la figura 5.5 se muestra la historia de desplazamientos que resiste el nodo número 2 del marco sin disipador de energía cuando está sujeto al registro sísmico, observando el máximo desplazamiento.

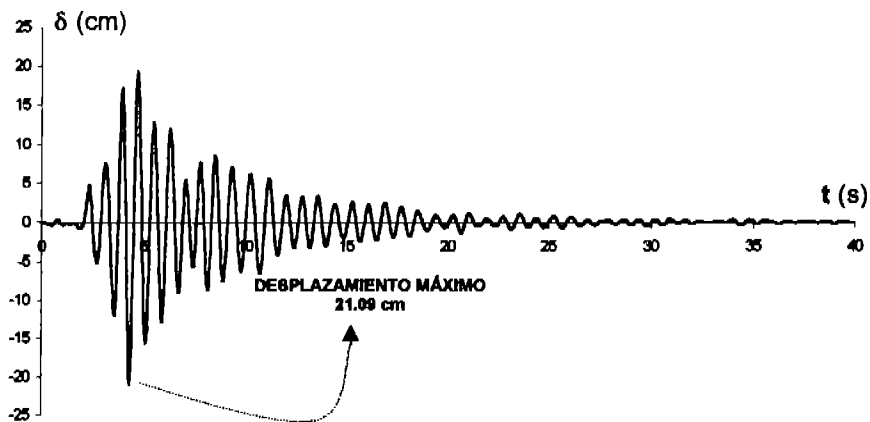


Figura 5.5 Historia de desplazamientos del nodo 2 sin disipador de energía

El modelo original del marco con disipador de energía y la referencia del nodo 2 (fig. 5.6).

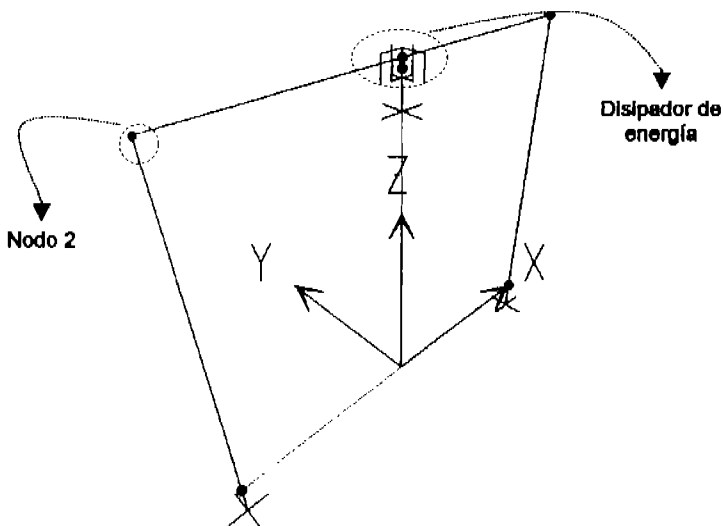


Figura 5.6 Modelo con disipador de energía



En la figura 5.7 se muestra la historia de desplazamientos que soporta el nodo número 2 del marco con disipador de energía cuando está sujeto al registro sísmico.

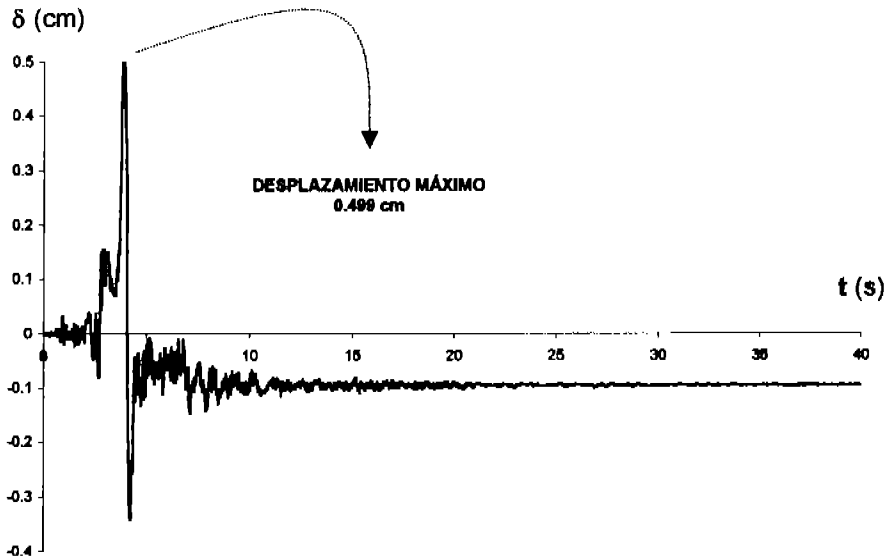


Figura 5.7 Historia de desplazamientos del nodo 2 con disipador de energía

La comparación de los resultados se muestra en la tabla siguiente (tabla 5.1):

Marco	Máximo	
	Tiempo (s)	Desplazamiento (cm)
Sin disipador	4.36	21.09
Con disipador	3.94	0.499

Tabla 5.1 Comparación de resultados de las historias de desplazamiento del nodo 2

En la figura 5.8 se muestran las historias de desplazamiento tanto con disipador de energía como sin él, esto nos lleva a que en la estructura con disipador de energía los desplazamientos son pequeños comparado con los desplazamientos que se ejercen sin el dispositivo de disipación de energía, esto implica que los esfuerzos generados en la estructura son menores al colocar el disipador de energía.

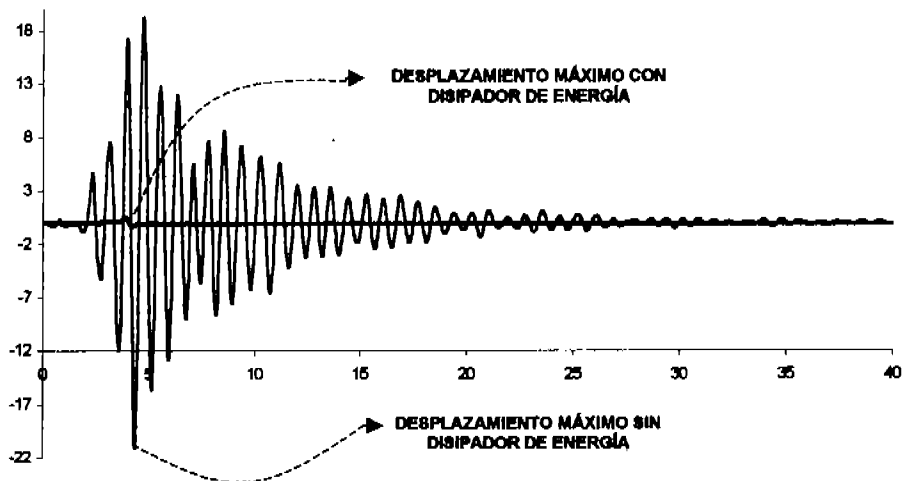


Figura 5.8 Historias de desplazamientos del nodo 2, con y sin dissipador de energía

## 5.2 Comparación del modelo teórico y experimental del marco con dissipador de energía ensayado en laboratorio

En la fig. 5.9 se muestra el modelo de Ramberg-Osgood que se utilizó para el marco con dissipador de energía ensayado en laboratorio.

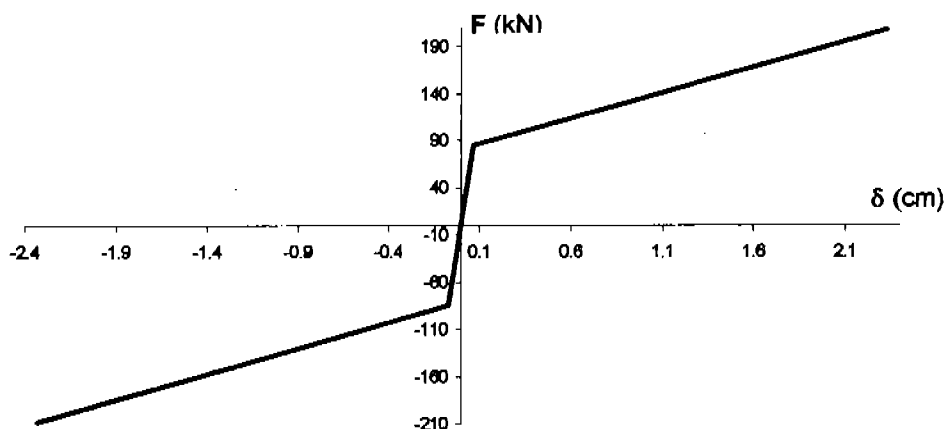


Figura 5.9 Modelo de Ramberg-Osgood para el dissipador de energía





En la fig. 5.10 se muestra el ciclo histerético que arroja el programa SAP2000 del disipador de energía ensayado en laboratorio.

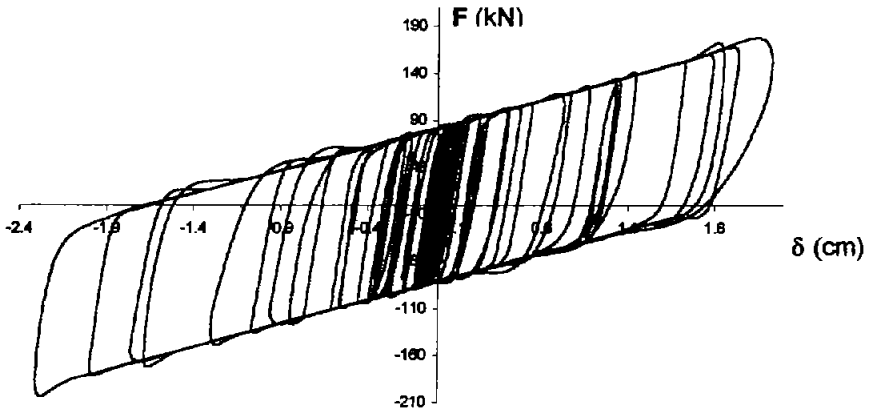


Figura 5.10 Ciclo Histerético del disipador de energía ensayado en laboratorio

En la figura 5.11 se ajustan los dos modelos, tanto el teórico (Ramberg-Osgood) como el experimental (SAP2000), para concluir que el modelo matemático propuesto se ajusta con gran proximidad al modelo que se calculó con SAP2000.

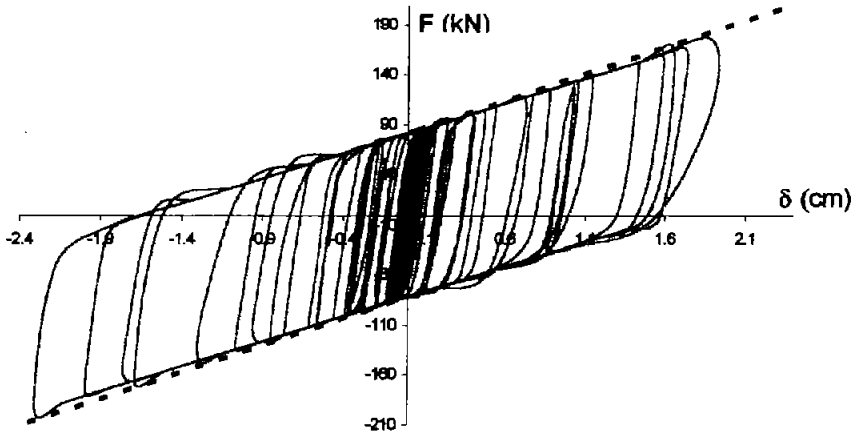


Figura 5.11 Comparación de los modelos teórico (—) y experimental (---)



### 5.2.1 Ventajas que ofrecen los disipadores de energía en el marco con disipador de energía ensayado en laboratorio

En la fig. 5.12 se muestra la historia de desplazamientos que sufre el nodo número 2 del marco con y sin disipador de energía y cuando está sujeto al registro sísmico especificado, observando el máximo desplazamiento.

La comparación de los resultados se muestra en la tabla 5.2:

Marco	Máximo	
	Tiempo (s)	Desplazamiento (cm)
Sin disipador	9.22	24.11
Con disipador	4.46	1.65

Tabla 5.2 Comparación de resultados de las historias de desplazamiento del nodo 2

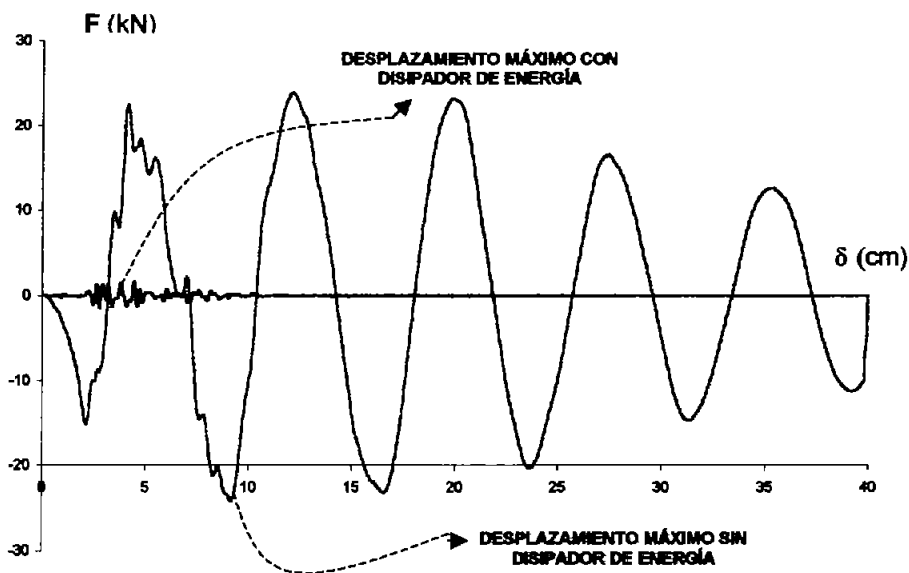


Figura 5.12 Comparación de los desplazamientos del nodo 2 con y sin disipador de energía



### 5.3 Comparación del modelo teórico y experimental de los aisladores de base del diafragma rígido

En la fig. 5.13 se denota en forma gráfica con el modelo empleado en el capítulo 3 sobre aisladores de base, el modelo matemático teórico que se calculó para el diafragma rígido del aislador tipo A y B especificado.

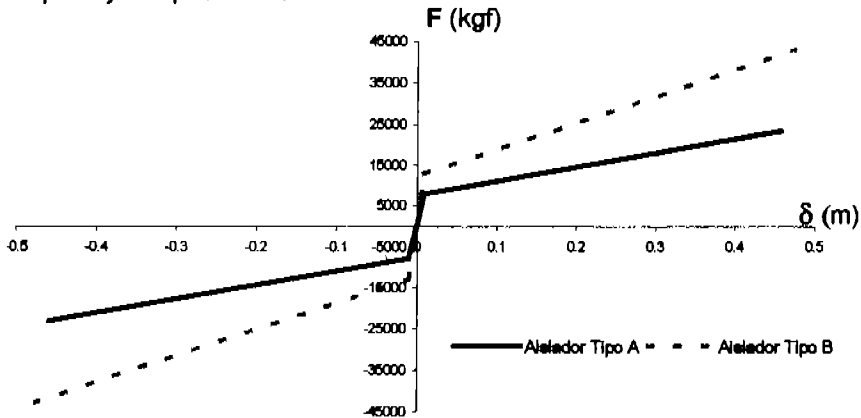


Figura 5.13 Gráfica del modelo matemático teórico de los aisladores empleados

En la fig. 5.14 se muestra el ciclo histerético que arroja el programa SAP2000 del aislador de base tipo A y en la fig. 5.15 del aislador tipo B cuando el diafragma rígido está sujeto a la historia del tiempo Sylmar de Northridge 1994.

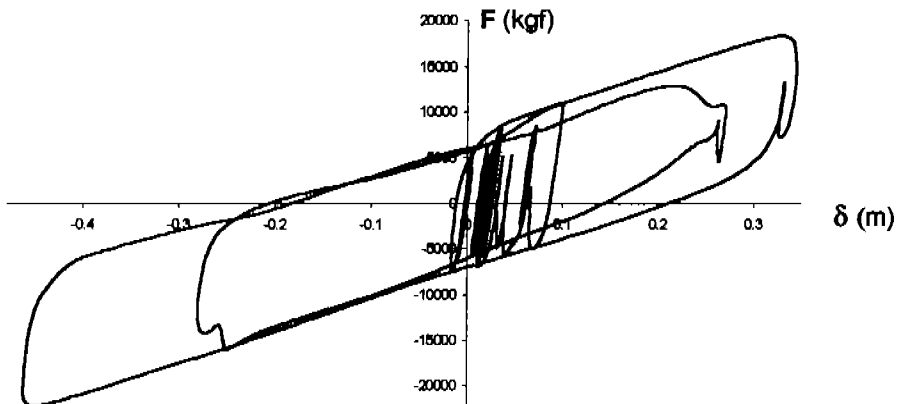


Figura 5.14 Ciclo Histerético del Aislador de base Tipo A

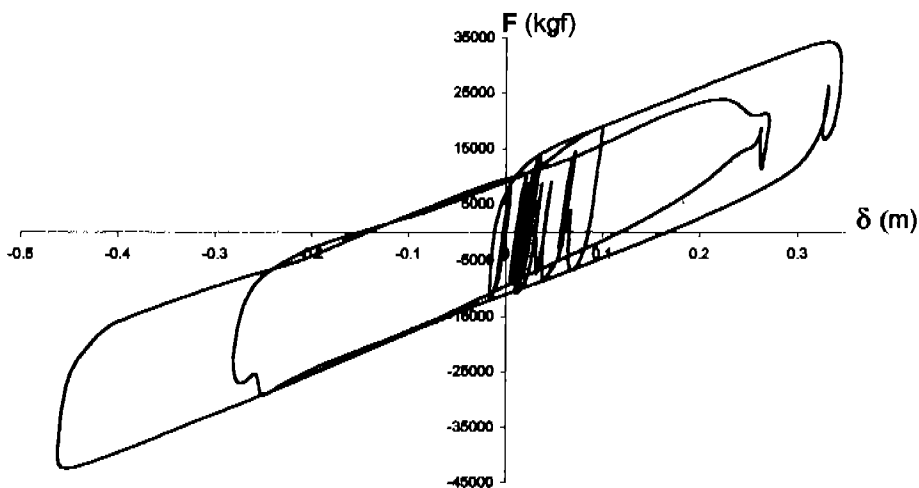


Figura 5.15 Ciclo Histerético del Aislador de base Tipo B

En la figura 5.16 se acoplan los dos modelos, tanto el teórico (obtenido del Capítulo 3) como el experimental (SAP2000), para observar la similitud que ofrece el teórico contra el experimental del aislador tipo A, y en la figura 5.17 para el aislador tipo B y así concluir que se obtuvo un buen modelado para el sistema de control pasivo.

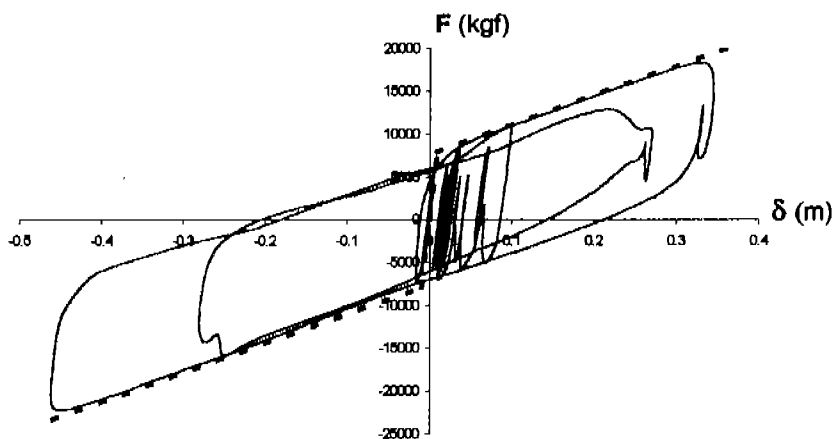


Figura 5.16 Comparación de los modelos teórico y experimental del aislador tipo A

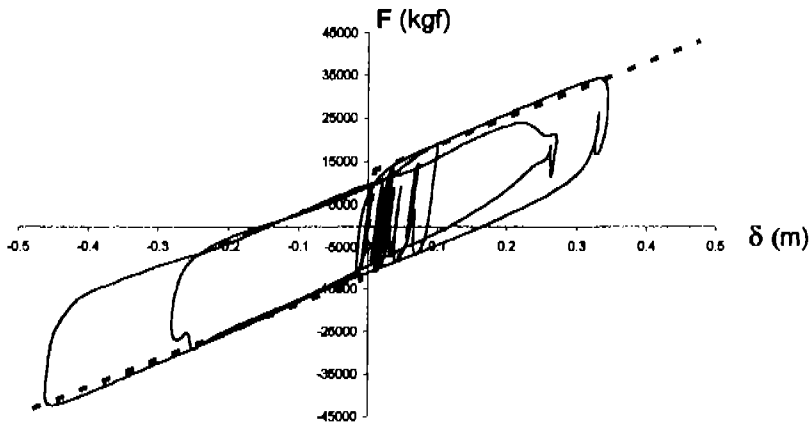


Figura 5.17 Comparación de los modelos teórico y experimental del aislador tipo B

### 5.3.1 Ventajas que ofrecen los aisladores de base en el diafragma rígido

En la figura 5.18 se muestra la gráfica de la historia de desplazamientos del nodo 16 cuando está sujeto a la historia de tiempo Sylmar de Northridge 1994; en la tabla 5.3 se muestra un resumen de los desplazamientos máximos obtenidos del análisis no lineal para los siete pares de registros sísmicos considerados. Puede observarse que el Par No. 1 y 7 controlan la respuesta máxima de este sistema, mientras que la respuesta de los cinco casos restantes resultaron menos significativas.

Par No.	Historia de Tiempo	Desplazamiento Máximo (cm)			Tiempo del Máximo (s)
		Dirección		Resultante	
		X	Y		
1	Array #9	61.8	33.5	70.4	5.06
2	Hollister, South Pine	8.8	25.6	27.0	8.38
3	Lecting Dam	23.3	22.3	31.9	4.41
4	Lucerne Valley	4.5	27.0	27.1	11.25
5	Yampa Fire Station	4.7	15.8	16.1	16.82
6	Penola	35.6	13.1	37.4	3.34
7	Sylmar, Hospital Parking Lot	48.1	33.5	60.0	5.06

Tabla 5.3 Desplazamientos obtenidos en el análisis no lineal del diafragma rígido

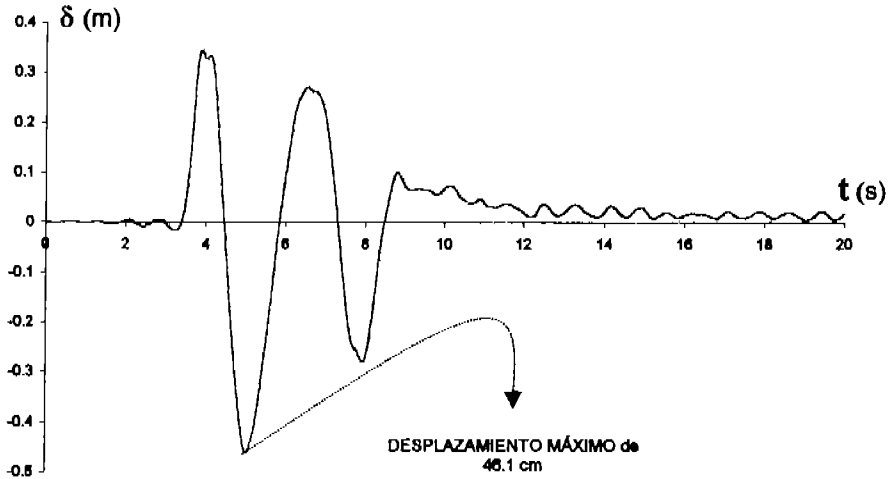


Figura 5.18 Historia de desplazamientos del nodo 16

Lo que se destacó con la utilización de las historias de desplazamientos del nodo 16 con respecto a las diferentes historias de tiempo (7 registros), fue la de comparar las resultantes que generan éstas para poder evaluar cual es la que ocasiona mayor respuesta de los elementos estructurales del diafragma rígido soportado por los aisladores de base, además se manifiesta que los desplazamientos obtenidos del programa SAP2000 son significativos, hablando de un promedio de alrededor de 37.13 cm de desplazamiento máximo esto ocasiona menor riesgo de daños en la estructura ante sismos, lo cual en comparación con la ausencia de aisladores de base en el diafragma la sollicitación de los elementos mecánicos sería mayor.

#### 5.4 Comparación del modelo teórico y experimental de los aisladores de base del puente

En la fig. 5.19 se muestra en forma gráfica con el modelo empleado en el capítulo 3 sobre aisladores de base, el modelo matemático teórico que se calculó para los aisladores de base del Puente Infiernillo II.

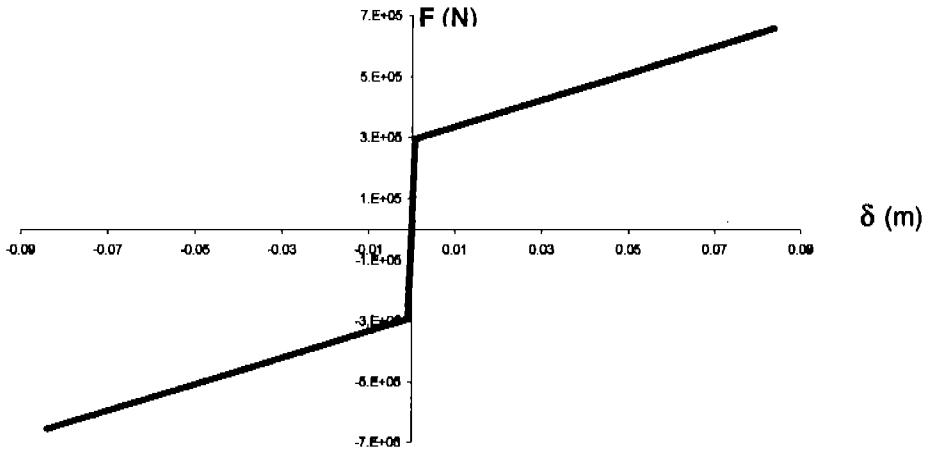


Figura 5.19 Gráfica del modelo matemático teórico de los aisladores empleados

En la fig. 5.20 se muestra el ciclo histerético que arroja el programa SAP2000 del aislador de base propuesto para el puente cuando está sujeto al registro sísmico especificado.

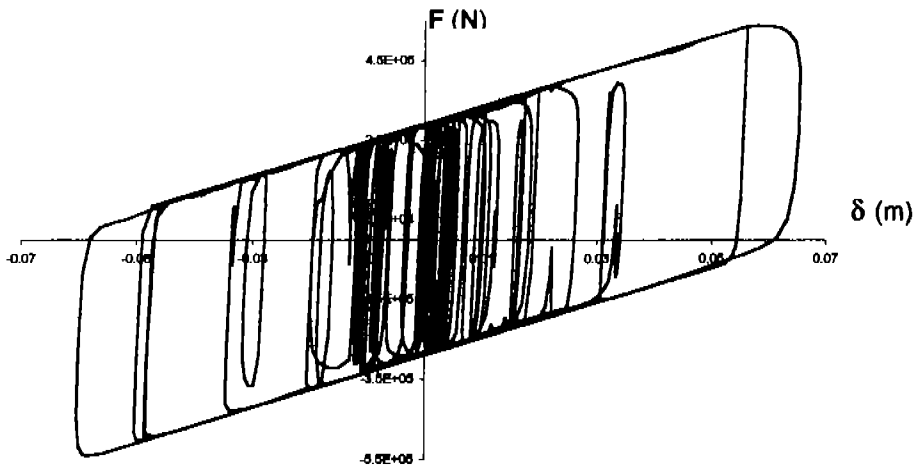


Figura 5.20 Ciclo Histerético del Aislador de base en el Puente



En la figura 5.21 se acoplan los dos modelos, tanto el teórico (obtenido del Capítulo 3) como el experimental (SAP2000), para observar la aproximación que ofrece el teórico contra el experimental del aislador de base propuesto.

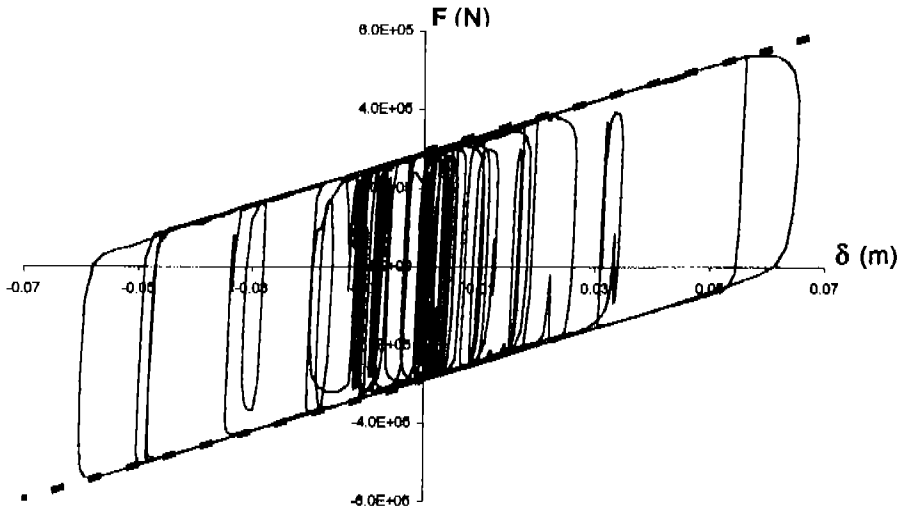


Figura 5.21 Comparación de los modelos teórico y experimental del aislador de base propuesto

### 5.4.1 Ventajas que ofrecen los aisladores de base en el puente

En la figura 5.22 se muestra el aislador de base no. 7 propuesto para el puente con la conexión del nodo 143 (cabezal) y 175 (superestructura) donde se aloja el aislador.

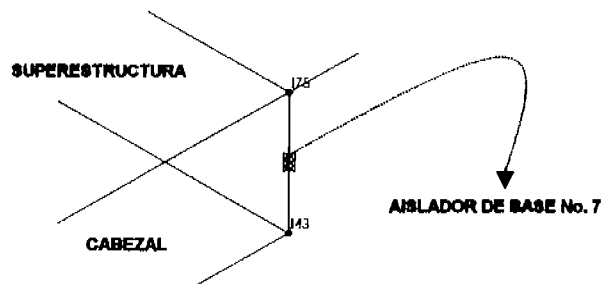


Figura 5.22 Alojamiento del aislador de base número 7





Se muestra a continuación en la fig. 5.23 las historias de desplazamiento tanto del nodo 143 como del 175 sujeto registro sísmico.

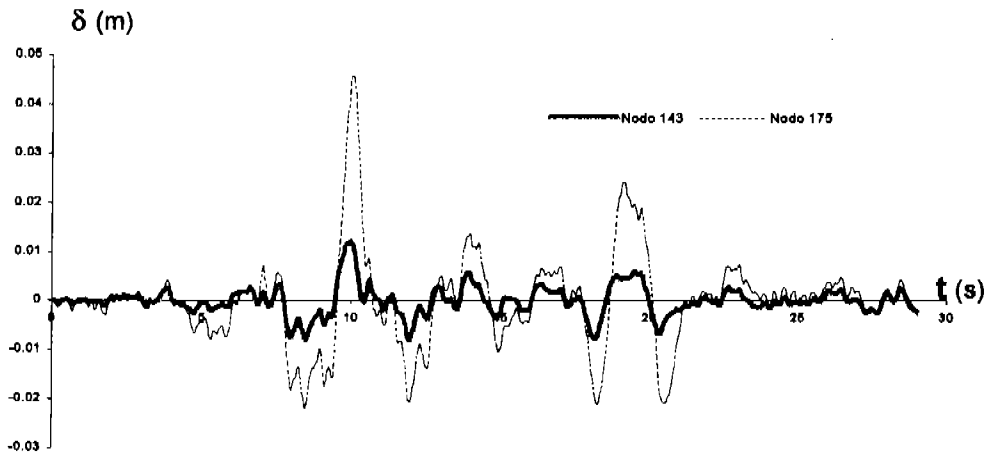


Figura 5.23 Historias de desplazamientos de los nodos 143 y 175

Los desplazamientos en los nodos en la armadura y en el cabezal cuando no existen aisladores es prácticamente igual, pero cuando se considera el aislamiento sísmico en el puente, los desplazamientos del nudo en la armadura (nodo 175) son mayores que los del nudo en el cabezal (nudo 143), ya que una de las funciones del aislador sísmico, es la de desacoplar a éstos elementos.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se determinaron los parámetros, obtenidos directamente del fabricante o del laboratorio, que definen el comportamiento de disipadores de energía y / o de aisladores de base, necesarios por el programa de cómputo empleado (SAP2000). Con estos datos es posible modelar el comportamiento que tendrán ante un sismo dichos dispositivos, así como de las ventajas que aportan a las estructuras donde se utilizan.

Se llevó a cabo la modelación matemática teórica de los disipadores de energía y de los aisladores de base. Del modelo matemático de Ramberg – Osgood se obtuvieron los parámetros necesarios para la modelación en el programa de análisis estructural SAP2000 de los disipadores de energía. En el caso de los aisladores de base se utilizó otro modelo matemático para ajustar los parámetros que el programa requiere. Para estudiar el comportamiento de los modelos matemáticos utilizados y sus parámetros se ilustraron cuatro ejemplos en la aplicación de dichos dispositivos.

Se describieron los pasos a seguir para la captura de las propiedades de los disipadores y los aisladores, así como de la introducción de datos de las historias de los sismos y de los ciclos de histéresis resultantes.

Para el primer ejemplo estudiado, se logró una aproximación entre el modelo de Ramberg – Osgood, y el del SAP2000 del ciclo de histéresis con respecto al desplazamiento máximo, presentándose un error relativo entre los dos modelos del 1.37%, obteniéndose así un modelo matemático confiable para el comportamiento del disipador de energía, ya que se puede concluir que son semejantes entre sí.

Con respecto a la historia de desplazamientos del nodo 2, se muestra que el marco que contiene al sistema estructural de control pasivo (disipador de energía), tuvo un desplazamiento máximo de 0.5 cm, mientras que sin disipador de energía se obtuvo un desplazamiento máximo de 21.09cm. Esto indica que se redujo un 97.64%. Lo anterior implica que los elementos estructurales que componen al marco se verán prácticamente sin sollicitación ante el sismo presentado, o incluso se puede volver a diseñar la estructura para un dimensionamiento óptimo y más barato.



El marco con disipador de energía ensayado en laboratorio, presentó un error relativo del 1.23% con respecto a los modelos matemáticos que resultaron del ciclo de histéresis de los desplazamientos máximos, es decir, que los modelos teórico y experimental fueron similares, ya que se empleó de igual manera que en el marco estudiado anteriormente, el modelo matemático de Ramberg – Osgood.

En las historias de desplazamiento del nodo 2 del marco con disipador de energía ensayado en laboratorio, se obtuvieron datos de disminución del desplazamiento máximo del 93.16%. Esto implica que la sollicitación de los elementos estructurales que componen al marco no sufrirán daño importante.

En el caso del diafragma rígido apoyado sobre aisladores de base, se revisó el análisis no lineal de la estructura considerándose siete casos de pares de registros sísmicos, así como dos tipos de aisladores, tipo A y B previamente diseñados. Se llega a la conclusión de que el modelo matemático teórico descrito en el Capítulo 3 proporciona resultados veraces, ya que resulta un error relativo de 2.28% en comparación al modelo experimental (SAP2000), con respecto al comportamiento que presenta del desplazamiento máximo en su ciclo de histéresis los aisladores de base presentados.

Se observó que los pares de registros sísmicos correspondientes a Array #6 y Sylmar controlan la respuesta máxima de este sistema. Para todos los casos, la máxima demanda de desplazamiento en las dos direcciones ortogonales es sensiblemente diferente. Con esto, ayuda a elegir de manera más conciente y con bases más sólidas la correcta utilización de este tipo de dispositivos.

Del modelo del Puente Infiernillo II se puede concluir que con respecto a los modelos matemáticos empleados para los aisladores de base, se presentó el desplazamiento máximo en su ciclo de histéresis un error relativo del 2.05%, es decir que los modelos representan en forma evidente el buen comportamiento de estos dispositivos.



Cuando se presenta el sismo, los desplazamientos del nudo en la armadura (nodo 175) son mayores que los del nudo en el cabezal (nudo 143), ya que una de las funciones principales del aislador de base sísmico, es la de desacoplar a estos elementos estructurales y así lograr un mejor comportamiento estructural durante el sismo.



## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- 1.- Computers and Structures Inc., *SAP2000 Analysis Reference*, Berkeley California, EUA, 1995.
- 2.- Ruiz S., Esteva L. y Guerra L., *Desarrollo y Evaluación de sistemas para limitar las acciones sísmicas para edificios*, Instituto de Ingeniería, UNAM, No. 391, 1977.
- 3.- García M. A., *Comportamiento sísmico de puentes con mecanismos disipadores de energía*, Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, FI – UNAM, 1998.
- 4.- Farzad N. y Kelly J. M., *Design of Seismic Isolated Structures (from theory to practice)*, John Wiley and Sons, Inc., EUA, 1999.
- 5.- Watson J. R., Inc., *Isolation Bearing Devices for Bridges and other Civil Engineering structures*, Watson J. R., Inc., EUA, 2002.
- 6.- Jara J. M., *Estado del arte sobre dispositivos para reducir daños provocados por temblores*, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 47, 35-39, 1994.
- 7.- Cahís X., *Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sísmorresistente*, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción, España, Universidad Politécnica de Cataluña, 2000.
- 8.- 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.
- 9.- Escobar, J A, Sánchez-Ramírez A R y Dyer J N (2002), *Study of the bending hysteretic behaviour of ductile steel plates for seismic energy dissipation*, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 29, pp. 853-862..
- 10.- Reyes T. A., *Análisis dinámico no lineal de un diafragma rígido con aisladores sísmicos bilineales*, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Guerrero, 1987.



- 11.- 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.
- 12.- Comisión Federal de Electricidad, *Manual de Diseño de Obras Civiles, Capítulo: Diseño por sismo*, México, 1993.
- 13.- Gómez R., Muñoz D., García M. M. y Escobar J. A., *Respuesta sísmica de un puente con la superestructura sobre apoyos disipadores de energía*, XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México, 2001.