

01161  
22



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA**

**TESIS DE MAESTRÍA**

**ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RESPUESTA SÍSMICA  
DE UN PUENTE CON AISLADORES**

**PRESENTADA POR**

**MIGUEL ANGEL RODRÍGUEZ VEGA**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**(ESTRUCTURAS)**

**DIRECTORES DE TESIS**

**DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ**

**DR. ROBERTO GÓMEZ MARTÍNEZ**



**CIUDAD UNIVERSITARIA  
2003**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por permitirme llegar con salud a culminar una etapa más en mi vida.

Con respeto y admiración a mis padres y hermana, sobre todo por que en estos momentos tan difíciles que hemos pasado, han mostrado entereza, madurez y unidad familiar, así como por su confianza que han depositado en mí. Gracias, los quiero mucho, que Dios los bendiga.

Gracias al Dr. José Alberto Escobar Sánchez, por su tiempo, asesoría, paciencia y orientación durante el desarrollo de este trabajo como director de tesis, así como por sus valiosos consejos como buen amigo que ha sido.

Gracias al Dr. Roberto Gómez Martínez, por su valiosa orientación, asesoría técnica y tiempo en la revisión de este trabajo, que con su entusiasmo me llevó a la culminación de mis estudios.

---

Con gratitud a mis sinodales: Dr. Orlando Javier Díaz López, Dr. Jaime García Pérez y al Dr. Oscar López Bátiz, por tu tiempo y dedicación en la revisión, corrección y complemento de este trabajo.

Con respeto agradezco a todos los profesores que me impartieron cátedra durante mis estudios de maestría en el Programa de Posgrado en Ingeniería, de esta gran institución que es la Universidad Nacional Autónoma de México.

A la Facultad de Ingeniería, que me ha impulsado y dado la oportunidad de dar un paso más en mis estudios, gracias por su apoyo en mi desarrollo académico y profesional.

Agradezco a todas las personas, compañeros de trabajo, amigos y familiares, que de alguna forma me han apoyado para llegar a este momento.

## INDICE

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RESPUESTA SÍSMICA  
DE UN PUNTE CON AISLADORES

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	4
2.1 Antecedentes	
2.2 Objetivo	
2.2.1 Planteamiento del problema	
2.2.2 Objetivo general	
2.2.3 Objetivos particulares	
3. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS	8
3.1 Sistemas de protección sísmica	
3.1.1 Sistemas de control pasivo	
3.1.1.1 Disipadores de energía	
3.1.1.2 Aisladores de base	
3.1.1.3 Masas resonantes	
3.1.1.4 Cables de preesfuerzo	
3.1.2 Sistemas de control activo	
3.2 Aplicaciones de sistemas aisladores en edificios	
3.3 Aplicaciones de sistemas aisladores a estructuras de puentes	
4. CARACTERÍSTICAS DE LOS AISLADORES SÍSMICOS	25
4.1 Principios básicos de la disipación de la energía sísmica	
4.1.1 Cambio del periodo fundamental de vibración	

---

4.1.2	Disipación de la energía	
4.1.3	Rigidez elástica para resistir cargas laterales pequeñas	
4.2	Generalidades de los aisladores sísmicos	
4.2.1	Sistemas basados en elastómeros	
4.2.2	Sistemas basados en deslizadores	
4.2.3	Sistemas basados en fricción elástica	
4.3	Normatividad	
4.3.1	Filosofía del diseño sísmico de puentes con aisladores sísmicos	
4.3.2	Normas AASHTO	
4.3.3	Criterios de diseño	
<b>5.</b>	<b>SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO EQS</b>	<b>40</b>
5.1	Características del aislador EQS	
5.2	Ventajas del sistema EQS	
5.3	Ensayes de laboratorio	
5.4	Especificaciones de diseño	
5.4.1	Diseño	
5.4.2	Construcción	
5.4.3	Instalación	
5.5	Aplicaciones	
<b>6.</b>	<b>PARÁMETROS QUE DEFINEN EL COMPORTAMIENTO DE UN AISLADOR</b>	<b>48</b>
6.1	Modelo de un apoyo aislador	
6.2	Parámetros que definen el comportamiento de un aislador EQS	
6.3	Rigidez lineal efectiva y amortiguamiento viscoso equivalente	
<b>7.</b>	<b>MÉTODO DE CONCENTRACIONES PUNTUALES</b>	<b>54</b>
7.1	Métodos de análisis probabilístico	

---

---

7.2	Método de concentraciones puntuales	
7.3	Aplicación del método de concentraciones puntuales	
7.3.1	Variables aleatorias del aislador	
7.3.2	Obtención de los parámetros estadísticos	
7.3.3	Obtención de las constantes y concentraciones	
8.	<b>DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PUENTE VEHICULAR</b>	65
8.1	Descripción geométrica del puente	
8.2	Acciones sísmicas	
8.3	Modelo del puente	
9.	<b>ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DEL PUENTE</b>	74
9.1	Identificación de la respuesta	
9.2	Análisis de la respuesta	
9.3	Probabilidad de excedencia de la respuesta	
9.3.1	Generalidades del diseño	
9.3.2	Confiabilidad de la estructura	
9.3.3	Probabilidad de ocurrencia en la respuesta	
10.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	103
	<b>REFERENCIAS</b>	106

**PAGINACION**

**DISCONTINUA**

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por finalidad estudiar el comportamiento dinámico de un puente vehicular, sometido a la acción de fuerzas sísmicas de gran magnitud. Este se ubica en una zona altamente sísmica en la República Mexicana, sobre el Río Balsas. En su proyecto se considera la inclusión de dispositivos de aislamiento sísmico, por lo que sería el primer puente vehicular en nuestro país que emplee estos mecanismos para reducir los efectos sísmicos.

Adicionalmente, como en cualquier estructura, siempre existen incertidumbres en los materiales a emplear, las magnitudes de las cargas estáticas y dinámicas que actúan, las dimensiones del sistema estructural o de un elemento estructural, etc., por lo que en este trabajo se considerará de manera explícita la variabilidad estadística de los parámetros que definen a las propiedades de los aisladores sísmicos, con el fin de estudiar su efecto sobre la respuesta estructural del puente.

Para lograr este objetivo, se estudia la respuesta de un puente vehicular de importancia, tanto por su magnitud como sistema estructural, como en cuanto a cubrir las necesidades sociales de este tipo de estructuras.

En este estudio se desarrollan los siguiente temas:

***Antecedentes y objetivos.*** Se plantea un panorama general de la importancia de la sismicidad en nuestro país y cómo debe tomarse en cuenta en el diseño de una estructura. Se presenta el objetivo general de esta investigación.

***Estado actual del conocimiento de los aisladores sísmicos.*** Se presenta un panorama general de sus inicios, desarrollo y aplicaciones en el mundo, principalmente para estructuras de edificios y puentes, ejemplificando con algunos casos de importancia, principalmente en Japón, Nueva Zelanda, Estados Unidos de Norteamérica, y algunos países de Europa..

***Características de los aisladores sísmicos.*** Se describen las bases de la dinámica estructural que originan la idea del aislamiento sísmico en general, así como algunos aspectos de normatividad para el caso de puentes.

***Sistema de aislamiento sísmico EQS.*** Se expone un panorama general de este tipo de dispositivos desarrollados por la empresa R.J. Watson, que nombraron como EradiQuake Isolation System, EQS, que se colocarán en el puente aquí estudiado, por lo que es importante conocer algunas de sus características, ventajas y desventajas, tipos de ensayos de calidad y resistencia en laboratorio, especificaciones de diseño, así como ejemplificar su aplicación en estructuras y su desempeño durante su vida útil.

***Parámetros que definen el comportamiento de un aislador.*** Se describen los parámetros que definen el comportamiento de un aislador sísmico y que a su vez son requeridos por el programa de cómputo a emplear para el análisis estructural no lineal del puente. Estos deben cumplir con las especificaciones de las normas que para tal fin emite

---

la AASHTO [Ref. 1]. Posteriormente, se emplea un método de análisis probabilista para obtener las propiedades estadísticas de la respuesta del puente.

***Método de Concentraciones Puntuales.*** Se describe en que consiste este método y su aplicación al estudio del puente, para considerar las incertidumbres en los parámetros estructurales que definen el comportamiento del aislador.

***Descripción técnica del puente vehicular.*** Se hace una descripción general de la geometría del puente, así como de algunas características de la forma en que se modeló en el programa de análisis, el cual es capaz de considerar como elementos estructurales a los aisladores sísmicos. Se menciona bajo qué condiciones de carga se analiza y cuáles son los registros sísmicos que se emplearon, así como sus combinaciones de cargas sísmicas para el análisis dinámico de la estructura paso a paso, haciendo trabajar a los aisladores sísmicos en su intervalo no lineal.

***Análisis de la respuesta.*** Se hace un análisis e interpretación de los resultados obtenidos de la respuesta estadística del puente, aplicando el Método de Concentraciones Puntuales [Ref. 2]. Lo anterior con la finalidad de comparar si la respuesta calculada con valores nominales está dentro de los límites que toleran el considerar las incertidumbres de los mismos parámetros, así como su probabilidad de excedencia.

***Conclusiones y recomendaciones.*** Finalmente se anotan las conclusiones a que se llega en este trabajo, así como las recomendaciones para estudios posteriores.

## 2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

### 2.1 Antecedentes

Históricamente, las estructuras de puentes han demostrado ser vulnerables ante las acciones sísmicas, causando daños permanentes en la subestructura y cimentación, y en algunos casos se ha llegado al colapso total de la estructura [Ref. 3]. En general, las estructuras de puentes resisten los efectos sísmicos, por una combinación de resistencia en su comportamiento elástico, deformabilidad y capacidad de disipación de energía.

Por lo anterior, se deben diseñar puentes que resistan fuerzas sísmicas horizontales, para ello, originalmente se consideraba una fuerza horizontal estática de un décimo de su peso de la estructura [Ref. 3], lo cual funcionó por muchos años. Sin embargo, durante sismos severos, la experiencia mostró 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 energía.

---

El objetivo principal del diseño sísmico fue entonces, construir estructuras con una gran capacidad para deformarse más allá del estado elástico, formándose articulaciones plásticas, de modo que los requerimientos de resistencia pudieran ser reducidos, llevando esto a una reducción en el costo estructural sin disminución de la resistencia sísmica. Actualmente esta hipótesis permanece como una de las más utilizadas para la construcción de puentes, 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 caras y difíciles de realizar después de un sismo.
- ✓ Se producen mayores desplazamientos, lo cual, puede ocasionar un mal funcionamiento de la estructura.

Con el objetivo de resolver estos problemas, se ha desarrollado una tecnología que consiste en la incorporación de mecanismos llamados aisladores sísmicos. Esta estrategia de diseño se basa en los movimientos relativos que se generan, entre la superestructura y la subestructura del puente, durante la aplicación de cargas laterales debidas a sismo.

El principio consiste en introducir flexibilidad a la estructura en el plano horizontal, mientras que al mismo tiempo se adicionan componentes amortiguadores para disminuir los movimientos generados. 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 de aislamiento sísmico no existe todavía normatividad en México, sin embargo sí existen algunos parámetros de diseño que se toman en cuenta en otras partes del mundo, para que los diseñadores profesionales los empleen.

## 2.2 Objetivo

### 2.2.1 Planteamiento del problema

La ausencia de una normatividad nacional de diseño que permita determinar un aislador sísmico adecuado para un caso en particular, hace necesario el estudio de la influencia de los parámetros que definen a estos mecanismos. En este trabajo, se lleva a cabo un análisis de la respuesta sísmica que presenta un puente vehicular típico de pilas de concreto y superestructura con armaduras de acero, para establecer las características con que deben contar los aisladores sísmicos. Este análisis se lleva a cabo variando los parámetros que definen al aislador sísmico, como son: la resistencia elástica máxima, la rigidez efectiva equivalente y el amortiguamiento viscoso.

El puente que se estudia, se describe en el capítulo 7, el cual se ubicará en una zona altamente sísmica de nuestro país.

### 2.2.2 Objetivo general

Determinar la influencia que la variación estadística de los parámetros que definen a un aislador sísmico, tiene sobre la respuesta de un puente de concreto con la superestructura apoyada sobre estos mecanismos.

### 2.2.3 Objetivos particulares

Durante el desarrollo del presente trabajo, en forma parcial se deberán cumplir los siguientes objetivos particulares:

- ✓ Conocer el estado del arte del diseño de los aisladores sísmicos.

- ✓ Conocer las diferentes características generales de los aisladores sísmicos.
- ✓ Conocer la variabilidad de los parámetros que definen el comportamiento estructural de un aislador sísmico.

### **3. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS**

#### **3.1 Sistemas de protección sísmica**

El control estructural ante acciones sísmicas se está planteando como una alternativa del diseño sísmico convencional [Ref. 4], por tal motivo se estudia el comportamiento ante estas solicitaciones, empleando sistemas de protección sísmica, cuyo objetivo es controlar o disminuir los desplazamientos de la estructura, disminuyendo los daños en la misma, usando alguno o varios de los siguientes recursos:

- La modificación de las propiedades dinámicas del edificio, de forma que éste reduzca sus desplazamientos o evite resonancia.
- La disipación de energía sísmica introducida al sistema estructural a partir de dispositivos mecánicos.

- El control de 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 una clasificación que se hace de ellos en las [Referencias. 4 y 5]:

- Sistemas de control pasivo.
- Sistemas de control activo.

### **3.1.1 Sistemas de control pasivo**

Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica, a diferencia del resto de los sistemas, no requieren de 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 en que se encuentren. Son sistemas que intervienen alterando las propiedades dinámicas de la estructura, provocando una reducción de su respuesta estructural. Entre sus ventajas se encuentra que son económicos y de buen comportamiento.

Los sistemas de control pasivo pueden subdividirse en:

- Disipadores de energía.
- Aisladores de base.
- Osciladores resonantes.
- Cables de preesfuerzo.

### 3.1.1.1 Disipadores de energía

Se ubican generalmente en contraventeos y tienen como objetivo disminuir o eliminar la disipación de energía histerética en los elementos estructurales. 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 idealizado es semejante al mostrado en la figura 3.1, la pendiente de la zona inelástica depende de las características de cada dispositivo.

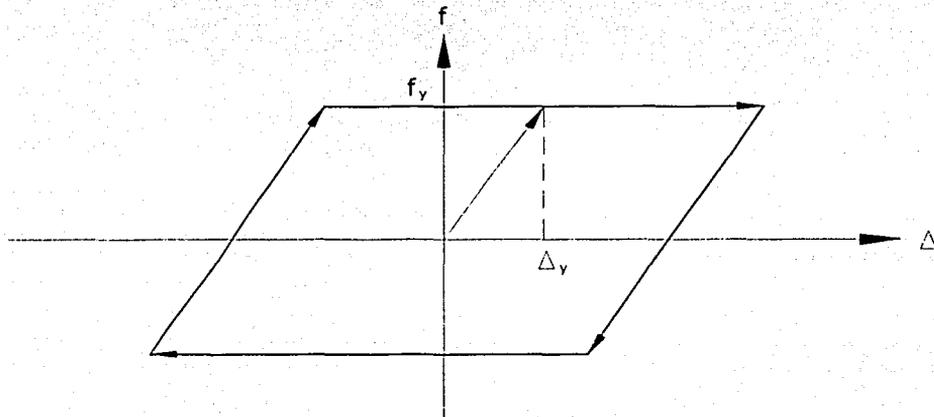


Figura 3.1 Comportamiento elastoplástico

**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 3.2, al deformarse plásticamente el plomo, se disipa energía y al recuperar su sección original, se recristaliza y recupera sus propiedades iniciales.

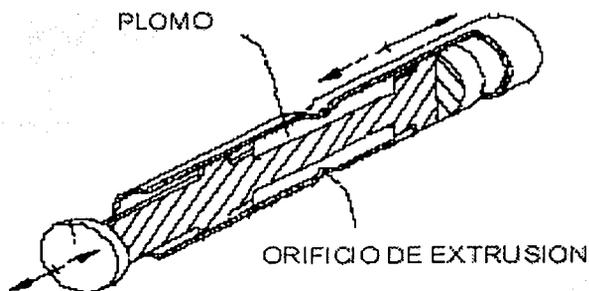


Figura 3.2 Disipador de energía por extrusión

**Por fricción.** Estos se logran al colocar dos placas en la intersección de contraventeos en forma de cruz, de manera que al desplazarse lateralmente la estructura produzca esfuerzos de fricción en el contacto entre las placas, como se puede observar en la figura 3.3

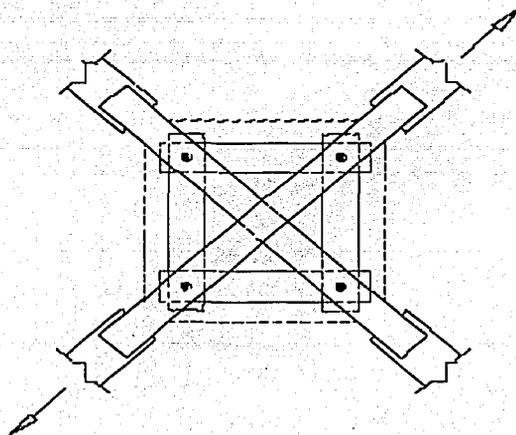


Figura 3.3 Disipador por fricción

**Dispositivos de materiales con comportamiento viscoso y viscoelástico.** Estos disipadores se colocan en forma similar a los de fricción, pero 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 los que fuerzas desarrolladas en ellos suelen contener componentes en fase y componentes fuera de fase de movimiento de la estructura bajo excitación armónica. Un ejemplo de este tipo de dispositivo se muestra en la figura 3.4

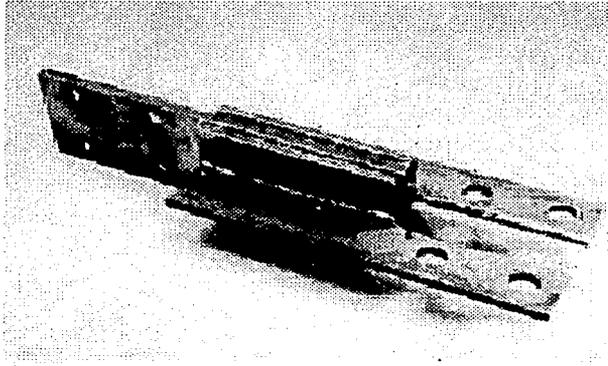


Figura 3.4 Disipador viscoelástico.

#### 3.1.1.2 Aisladores de base

El aislamiento de base es una estrategia de diseño que se fundamenta en el desacoplamiento del movimiento de la estructura del movimiento del suelo, para proteger a ésta del efecto de los sismos. Se consigue a partir de dispositivos flexibles al movimiento horizontal y rígidos al desplazamiento vertical, situados entre los cimientos y la superestructura. Su presencia alarga el periodo fundamental del conjunto, con lo cual

desacopla de forma parcial la superestructura del movimiento del terreno. Es frecuente la introducción de amortiguamiento estructural para limitar los desplazamientos de la superestructura a valores aceptables.

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

Estos sistemas se han aplicado fundamentalmente en lugares donde los principales temblores que ocurren tienen gran contenido de frecuencias altas, así la estructura se aleja de los periodos con amplificaciones importantes en los espectros, en vista de que se modifican sus propiedades dinámicas, aumentando su periodo.

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.

Para el caso de puentes, figura 3.5, se muestra un esquema típico de la localización de aisladores, donde se puede apreciar cómo están colocados entre el cabezal de la pila y los elementos de soporte de la superestructura, en este caso bajo las traveses longitudinales de concreto presforzado.

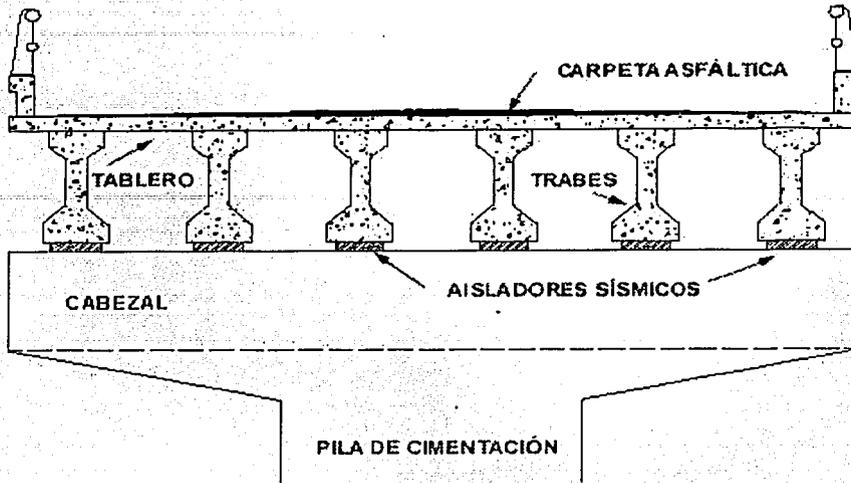


Figura 3.5. Puente vehicular sobre aisladores sísmicos

### 3.1.1.3 Masas resonantes

La inclusión de una o varias masas, sobre un edificio puede modificar considerablemente su respuesta ante eventos sísmicos. Si estas son seleccionadas como pisos adicionales con ciertas propiedades dinámicas, su respuesta puede ser reducida.

En investigaciones relacionadas con estos dispositivos [Ref. 5], 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.

#### 3.1.1.4 Cables de preesfuerzo

Los temblores 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 estos sistemas consistió en reforzar escuelas con la inclusión de cables de preesfuerzo como contravientos de la estructura para incrementar su resistencia y rigidez, lográndose reducciones importantes en sus desplazamientos laterales.

Aunque no es propiamente un sistema de disipación de energía sísmica, el comportamiento de las estructuras que se han estudiado en México, hace posible y atractivo el sistema como una posible solución para la reducción de daños sísmicos. El buen desempeño del sistema se ha comprobado en estudios de edificios de uno y dos niveles [Ref. 5].

#### 3.1.2 Sistemas 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.

Un sistema de control activo consiste básicamente en:

- i) Sensores situados en la estructura, empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa, o variables de la respuesta estructural, o de ambos tipos.

- ii) Sistemas controladores que, basándose en las mediciones de los sensores y a través de un algoritmo de control, calculan la fuerza a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos.
- iii) Actuadores, habitualmente alimentados por fuentes de energía externas, para ejercer las fuerzas necesarias para contrarrestar el movimiento.

En comparación con los sistemas pasivos, los sistemas activos presentan las siguientes ventajas [Ref. 4]:

- i) Mayor efectividad en control de la respuesta estructural.
- ii) Aplicación de un sistema activo que puede ser usado tanto para el control estructural ante vientos fuertes como terremotos.
- iii) 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:

- i) Elevado costo en mantenimiento.
- ii) Dependencia respecto a fuentes de alimentación de información externa.
- iii) La respuesta dinámica de edificios con 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.

### 3.2 Aplicaciones de sistemas aisladores en edificios

En la ingeniería estructural se había pensado en muchas formas de disminuir los efectos de los sismos en las estructuras, principalmente para conservar las vidas humanas. En 1909, el doctor en medicina Calantarients [Ref. 6] logró su propio método, el cual consistía en que los edificios fueran construidos sobre una capa de arena fina o talco, que permitiera al edificio deslizarse en caso de un sismo, lo cual reduciría las fuerzas transmitidas al edificio mismo. Este fue un primer ejemplo de una estrategia de diseño sísmico, conocido como una base aisladora o aislamiento sísmico.

En México D.F., a mediados de los años sesentas, el Ing. González Flores desarrolló un sistema de aislamiento de base con placas de acero y balines de acero de 8 mm de diámetro [Ref. 5]. Este sistema fue incorporado en dos edificios de cinco niveles que hasta la fecha han demostrado un buen comportamiento ante acciones sísmicas. En la figura 3.6 se puede apreciar este sistema.

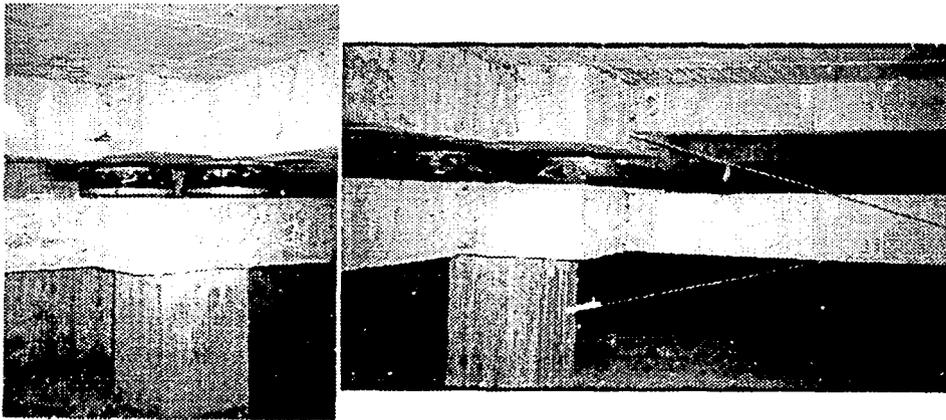


Figura 3.6 Aisladores a base de placas y balines de acero en el D.F., México.

El primer edificio con un sistema de aislamiento de caucho, fue una escuela primaria en Skopje, Yugoslavia en 1969 [Ref. 7]. Este edificio es una estructura de concreto de tres niveles, diseñada y construida por ingenieros suizos, cuyo sistema fue conocido como

"Sistema de base aisladora 3D completamente suizo (FBI-3D)". Los cojines de caucho no tenían refuerzo.

Posteriormente, en otros edificios aislados se usaron apoyos de caucho con varias capas o láminas reforzadas con capas de acero, que proporcionaban una alta rigidez en la dirección vertical, pero son muy flexibles en la dirección horizontal, lo que finalmente proporciona el efecto de aislador sísmico. Estos sistemas no tienen partes móviles, son fáciles de construir, además de ser muy resistentes a los efectos del medio ambiente.

Algunos sistemas aisladores, usados en particular en Nueva Zelanda y Japón, combinan soportes de caucho natural de bajo amortiguamiento con mecanismos de amortiguación, como: amortiguadores hidráulicos, barras de acero o cilindros de plomo. Un ejemplo de esto se puede apreciar en la figura 3.7.

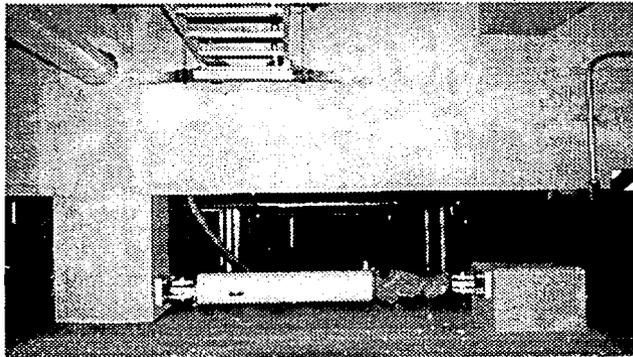


Figura 3.7 Mecanismo de amortiguador

En los Estados Unidos de América, EUA, [Ref. 7] el primer edificio con un sistema aislador se construyó en 1985, figura 3.8, en la ciudad de San Bernardino, California. La estructura consta de cuatro niveles y está ubicado a aproximadamente 21 km de la falla de San Andrés, por lo que fue diseñado para un sismo máximo de 8.3 de magnitud, ayudándose de la instalación de 98 apoyos aisladores con caucho natural de alto amortiguamiento.

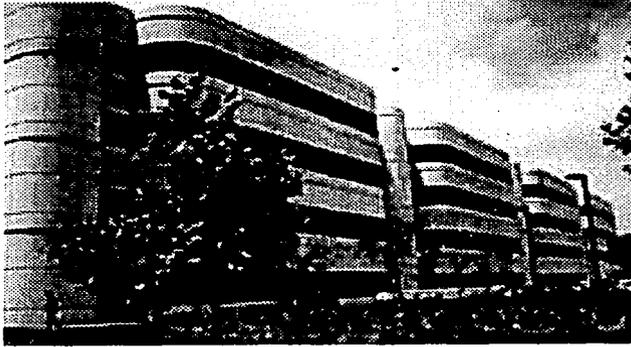


Figura 3.8 Edificio Foothill Communities Law and Justice Center, Primer edificio con sistema aislador en los EUA

Un sistema similar al anterior fue empleado en un edificio de Los Ángeles, figura 3.9, cuya importancia por sus servicios de emergencia es primordial, por lo que se diseñó para un sismo similar al caso antes mencionado. Otro edificio en Los Ángeles con características de base aisladora, consta de dos niveles y está construido con marcos de acero con contravientos y 28 apoyos de caucho natural de alto amortiguamiento.

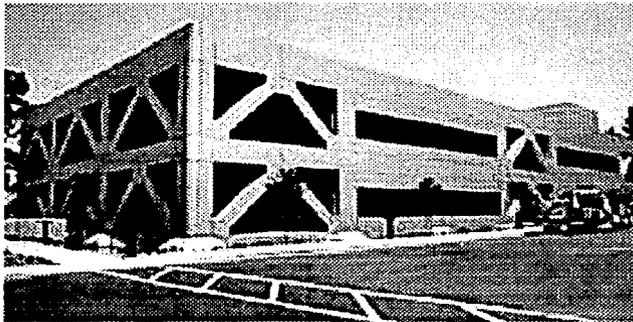


Figura 3.9 Edificio Fire Command and Control Facility, en Los Angeles, EUA

Otro edificio con base de aislamiento en California, consta de cinco niveles y 13,000 m<sup>2</sup> construidos, soportados por la combinación de 70 apoyos de caucho natural de alto amortiguamiento y 12 apoyos deslizantes con placas de bronce sobre una superficie de acero. Los aisladores son de 1 m de diámetro, y en su momento fueron los más grandes

construidos en los EUA. Este edificio está construido a unos 5 km de la falla Newport-Inglewood, la cual ha sido capaz de generar sismos de 7.5 de magnitud.

Cerca de la falla Wastach en Salt Lake City, fue construido en 1988 un edificio de cuatro niveles y 10,800 m<sup>2</sup> construidos. Su estructuración a base de marcos resistentes de acero, soportada por 98 aisladores, 50 apoyos son cuadrados de 46 cm de lado con centros de plomo de 9 cm de diámetro para los marcos resistentes al volteo, y 48 apoyos cuadrados de 38 cm, de apoyos elastoméricos, localizados bajo las columnas que trabajan por gravedad. Se diseñó para permitir desplazamientos del orden de 23 cm, cuando actúa un sismo de periodo natural de 2 s.

No solamente los sistemas de aislamiento sísmico se emplean en la construcción de edificios nuevos, sino que han sido usados en la rehabilitación o reforzamiento de varios edificios afectados por sismo en los EUA. Entre estos se podría mencionar un gran número de casos en ese país [Ref. 7 y 8], por lo que sólo se presentan algunos como el edificio "*Oakland City Hall*", figura 3.10, construido en 1914 y rehabilitado en 1995 con 110 apoyos de caucho con núcleo de plomo, siendo necesario acortar las columnas, previendo un sistema de soporte temporal durante la colocación de aisladores en la posición deseada. En la misma figura, el "*San Francisco City Hall*", en San Francisco California, fue rehabilitado en 1994. Otros edificios fueron reforzados después del sismo de Northridge en 1994.

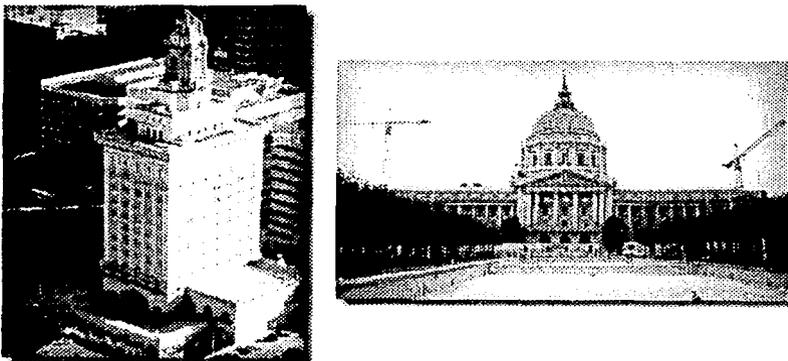


Figura 3.10 Edificios Oakland City Hall y San Francisco City Hall, en California EUA.

Otra forma de reforzamiento fue la inclusión de apoyos en una superficie curva de deslizamiento, llamado sistema de péndulo de fricción, que básicamente es un aislador, donde el peso de la estructura es soportado sobre superficies esféricas. Se empleó por primera vez en 1989 en el reforzamiento de un edificio de departamentos en San Francisco, dañado por el sismo de Loma Prieta en 1989, colocando estos dispositivos bajo las columnas de los marcos de acero del edificio.

En **Japón**, el empleo del diseño sísmico con aisladores, se ha incrementado en los últimos años, lográndose en promedio 10 construcciones por año en 1990 y 1991, posteriormente fue de 5 por año, teniéndose para 1995 alrededor de 80 edificios.

Otros ejemplos donde se ha empleado el sistema de aislamiento de estructuras [Ref. 8], tanto en su construcción inicial como en su reforzamiento, son: el "*Centro de cómputo postal*", localizado en Sanda Japón, de seis niveles y 47,000 m<sup>2</sup> soportó satisfactoriamente el sismo de Kobe en 1995; el "*Instituto de investigación técnica Matsumura-Bumi*", que tuvo un desempeño satisfactorio para el mismo sismo.

Otros casos como en Italia, el "*Centro de Administración de la Compañía Telefónica Nacional*", de cinco niveles, además del edificio del Ministerio de Defensa. En Nueva Zelanda, el primer edificio de base aislada, es el "*William Clayton*", construido en 1981 y fue el primero en el mundo al diseñarse con apoyos de caucho con núcleo de plomo; también "*La casa unión*" de doce niveles a base de marcos de concreto, y el "*Museo Nacional*" en Wellington. La "*Casa del parlamento*", fue rehabilitada con aisladores.

### **3.3 Aplicaciones de sistemas aisladores a estructuras de puentes**

En diversas partes del mundo se han construido o rehabilitado puentes vehiculares con algún sistema de reducción de fuerzas sísmicas [Ref. 8]. A continuación se describen algunos casos.

En Nueva Zelanda, el puente "Tē Teko" que cruza el río Rangitaiki, emplea el sistema de aislamiento sísmico a base de apoyos de caucho con núcleo de plomo. Este fue sujeto en marzo de 1987, a un sismo de magnitud de 6.3, cuyo epicentro fue localizado a 9 km al norte del puente, provocándole aceleraciones horizontales en el suelo de 0.33g, pero aún así, su comportamiento fue bueno, a pesar de que uno de sus apoyos no se deformó adecuadamente, por lo que tuvo que ser restituido.

En ese país, desde 1973, más de 48 puentes carreteros han sido construidos o rehabilitados con algún sistema de aislamiento sísmico. El sistema más comúnmente empleado es a base de apoyos de caucho con plomo, usualmente instalados entre la superestructura y las pilas de soporte y otros cimientos. Este sistema combina la función de aislar y disipar energía en un elemento simple, así como soportar el peso de la superestructura. El núcleo de plomo en el centro del apoyo elastomérico está sujeto a deformaciones de cortante bajo fuerzas horizontales.

El primer puente con sistema de aislamiento es el *Motu*, fue construido en 1973 con un claro de 170 m de longitud y está aislado con apoyos deslizantes sobre columnas de acero. Otro puente construido con este sistema es el *Moonshine*, de 168 m de longitud. Está hecho a base de concreto presforzado y describe en planta una curva.

En 1981 fue inaugurado un puente ferroviario de 315 m de longitud con seis claros de concreto presforzado, en su construcción se emplearon 24 disipadores de energía [Ref. 8].

En Japón, el primer puente aislado sísmicamente fue el On-netoh en Hokkaido, construido en 1990, de 4 claros a base de vigas de acero de 102 m de longitud, colocado sobre apoyos de caucho con núcleo de plomo [Ref. 8].

Otro es el puente Miyagawa, de tres claros continuos y 110 m de longitud. Está construido a base de vigas de acero, soportados por apoyos de caucho con núcleo de plomo, colocados en sus pilas. Fue restringido a desplazamientos transversales, no así en el sentido longitudinal con desplazamientos aproximados de 15 cm. Su periodo natural de

vibración calculado sin aislamiento sísmico es 0.3 s, con el sistema de aislamiento fue de 0.8 s. En la figura 3.11 se presenta un puente ubicado en Japón, con aislamiento sísmico.

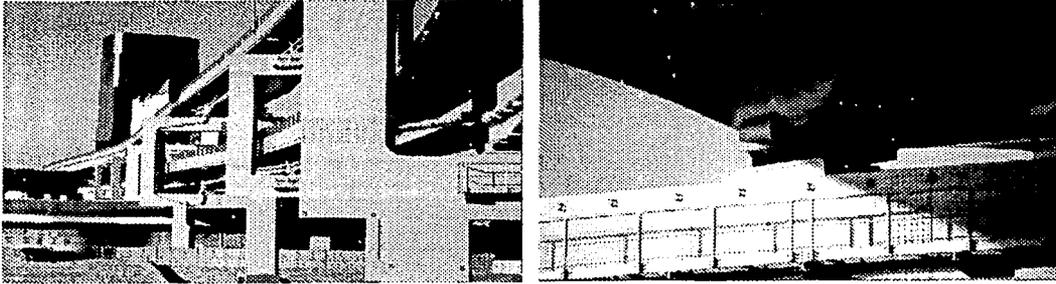


Figura 3.11 Puente vehicular con aisladores sísmicos.

En los EUA, el puente "*Sierra Point*" fue el primero en ser rehabilitado usando aislamiento sísmico en 1992. Construido en 1956, de 200 m de longitud y 40 m de ancho sobre una curvatura horizontal. Se emplearon apoyos de caucho con núcleo de plomo en sustitución de agujas esféricas de acero. Se diseñó para soportar un sismo de 8.3 de magnitud, está localizado a 7 km de la falla de San Andrés. En la figura 3.12 se presenta un puente de varios claros apoyado sobre aisladores sísmicos.

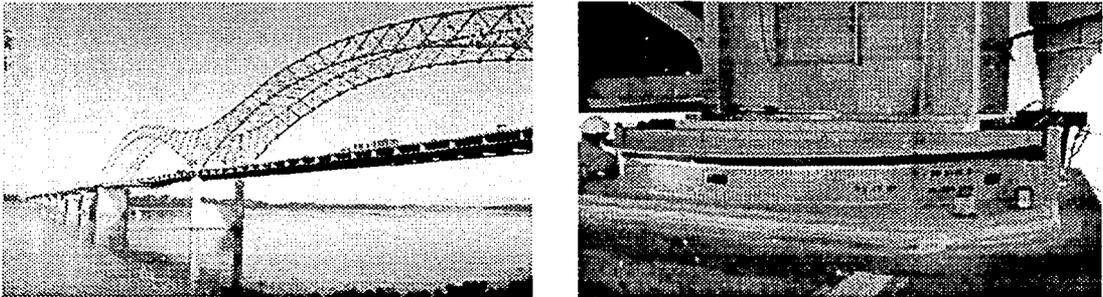


Figura 3.12 Puente con aisladores sísmicos en Mississippi, EUA

El puente "*Sexton Creek*", de vigas de acero continuas para 120 m de longitud en tres claros, fue construido en 1990. Es el primer puente construido con aisladores sísmicos

sobre pilas de 13 m de ancho y 1.4 m de espesor. Se emplearon 20 apoyos elastoméricos en 20 apoyos de caucho con núcleo de plomo.

En Italia, desde 1974 se ha incorporado moderna tecnología de aislamiento sísmico, en más de 150 puentes [Ref. 8]. Generalmente se emplean sistemas elásticos-plásticos basados en deformaciones por flexión de elementos de acero de varios perfiles, lográndose más de 100 km de puentes que han sido aislados sísmicamente de alguna forma. Por ejemplo el puente "*Mortaiolo*", de 9,600 m de longitud, fue construido en 1992 a base de losas de concreto presforzado con claros de 45 m, sobre apoyos elasto-plásticos en todas sus pilas. Este puente fue diseñado para soportar aceleraciones del suelo de 0.25g y un desplazamiento del sistema aislado de aproximadamente 8 cm.

En la figura 3.13, se presentan algunos detalles de apoyos con aislamiento en puentes, colocados entre la subestructura y la superestructura.



Figura 3.13 Detalles de aisladores sísmicos entre el cabezal y la superestructura.

## 4. CARACTERÍSTICAS DE LOS AISLADORES SÍSMICOS

### 4.1 Principios básicos de la disipación de la energía sísmica

Los principios básicos para disipar energía sísmica y sus componentes que lo logran son:

- ✓ **Cambio del periodo fundamental de vibración.** Se logra con aislamiento flexible, incrementando el periodo de la estructura y de esta forma reducir su respuesta.
- ✓ **Disipación de la energía.** Con la finalidad de disipar energía sísmica, se emplea un amortiguador, para que los desplazamientos relativos a través del elemento flexible sean controlados.

En el modelo que se muestra en la figura 4.1 [Ref. 3], se indican los componentes antes descritos: apoyo de aislamiento flexible y un amortiguador, Cb. El peso de la estructura es

$W$ , y el peso del cabezal es  $w$ , y parte de la subestructura. De sus rigideces,  $K_b$  es la rigidez transversal del apoyo elastomérico y  $K$  es la rigidez de la pila de un puente.

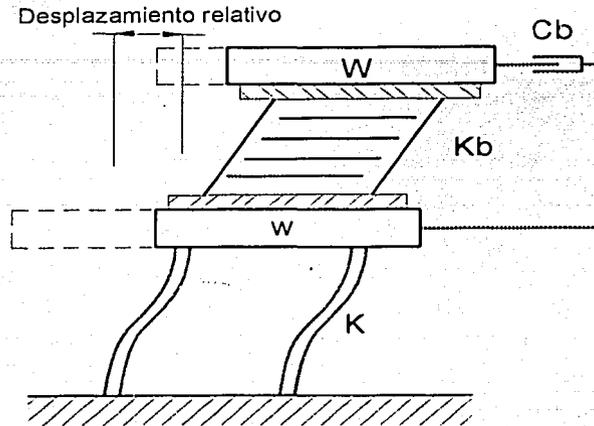


Figura 4.1 Componentes de un mecanismo de aislamiento sísmico

El aislamiento sísmico logra el desacoplamiento de los desplazamientos de la estructura con respecto al suelo, y las aceleraciones de respuesta estructural, son usualmente menores que las aceleraciones del suelo, disminuyendo en la estructura los efectos de un sismo.

Otro de los medios efectivos de proveer un sustancial nivel de amortiguamiento, mayor a un 20% de amortiguamiento viscoso equivalente, es la disipación de energía por histéresis. En la figura 4.2 se muestra una curva idealizada fuerza-desplazamiento, donde el área encerrada es una medida de la energía disipada durante un ciclo de carga. Para estructuras de puentes se han desarrollado varios dispositivos mecánicos para disipar energía, de acero suave o plomo, los cuales pueden lograr este tipo de comportamiento.

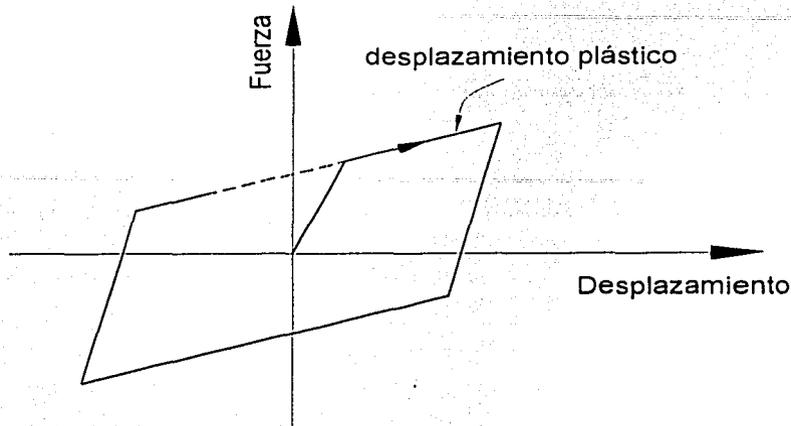


Figura 4.2 Curva fuerza-desplazamiento de histéresis idealizada

#### 4.1.1 Cambio de periodo fundamental de vibración

Como resultado del aislamiento flexible, se tiene un cambio en el periodo de vibración del sistema estructural, como se puede apreciar en la figura 4.3. Se muestra esquemáticamente la respuesta idealizada de la estructura, en una gráfica aceleración-periodo, mediante un espectro de respuesta de aceleraciones. Se observa que cuando el periodo de vibración aumenta, se reduce el nivel de aceleración.

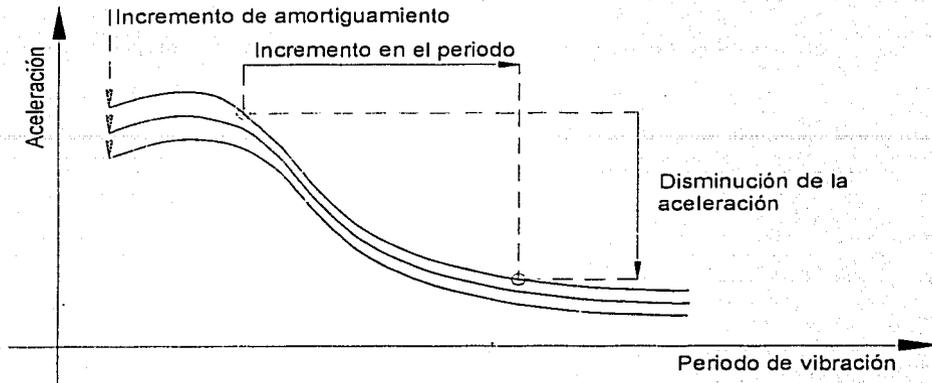


Figura 4.3 Curva idealizada del espectro de respuesta de aceleraciones

Sin embargo, como se puede notar, la flexibilidad proporcional adicional que se necesitó para incrementar el periodo da origen a mayores desplazamientos, como se puede apreciar en la figura 4.4, los cuales deberán de cuidarse en el diseño y estados límite de servicio del puente.

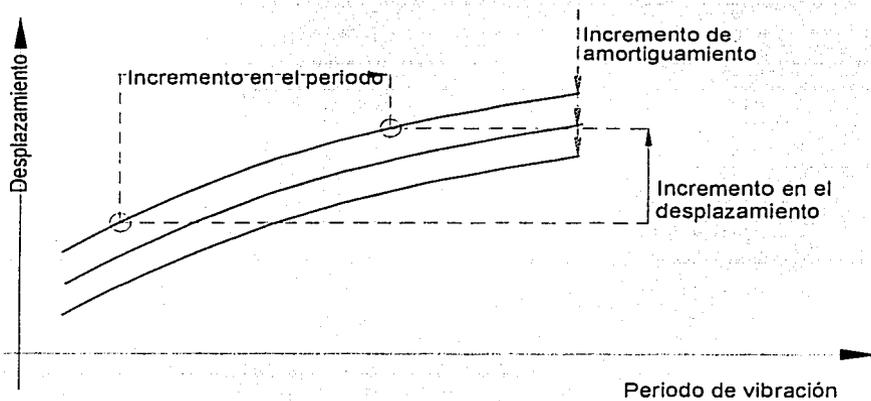


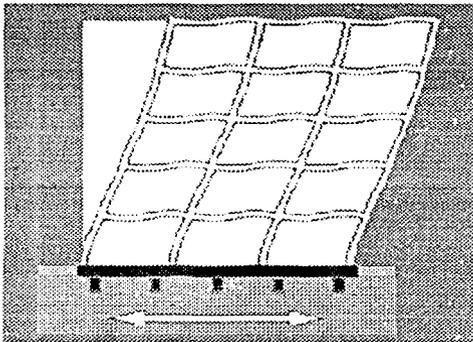
Figura 4.4 Curva idealizada del espectro de respuesta de desplazamientos

Con estos principios, se busca acercarse a un diseño sísmico que lleve a una estructura con suficiente resistencia, deformabilidad y capacidad de disipación de energía para resistir fuerzas generadas por sismos.

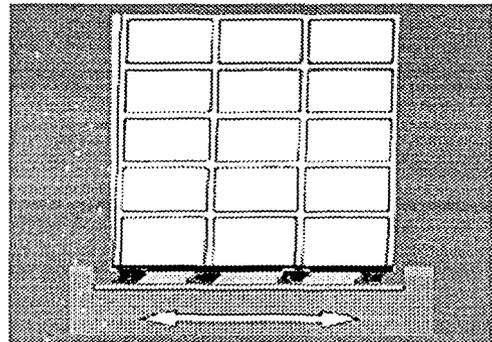
Las fuerzas transmitidas a la estructura aislada son además reducidas por amortiguamiento, lo cual disipa energía de los movimientos inducidos por el sismo.

En la figura 4.5, se ilustra el comportamiento de dos edificios, el de la izquierda tiene una estructuración convencional y el de la derecha soporta el sismo sobre un sistema de aislamiento sísmico.

En el caso del esquema del edificio anteriormente mostrado, donde se tiene un diseño convencional no aislado y que sus fuerzas sísmicas son mayores, se producen mayores deformaciones de entrepiso, lo que a su vez puede provocar fallas en la estructura. En el caso del edificio aislado sísmicamente, las fuerzas son menores a las del caso anterior y mayores los desplazamientos que ocurren en el sistema aislado, pero con pequeñas deformaciones de entrepiso, por lo que se mueve como si fuera un cuerpo rígido.



a) Sin aisladores



b) Con aisladores

Figura 4.5 Desplazamientos relativos de entrepiso de un edificio

De forma similar se puede esquematizar en la figura 4.6 este comportamiento para estructuras de puentes.

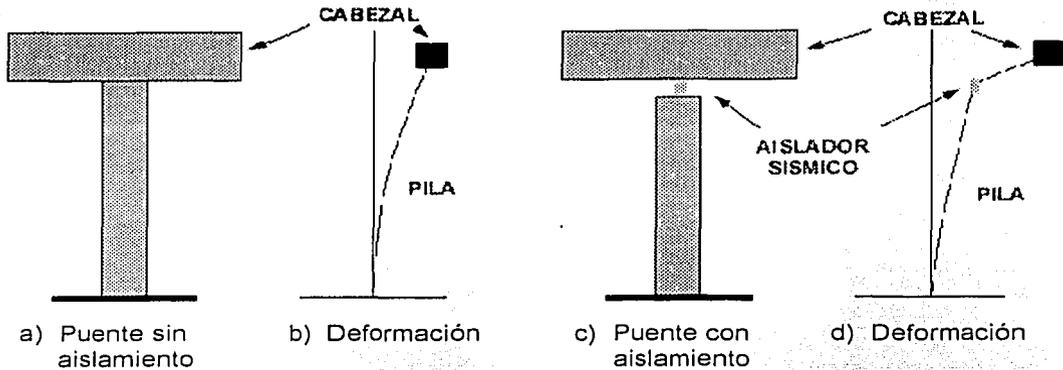


Figura 4.6 Esquema de un puente sin y con aisladores sísmicos

En la figura 4.7 se puede observar que la reducción de la fuerza cortante inducida por sismo se logra con el aislamiento sísmico [Ref. 8], donde la máxima respuesta en estructuras aisladas, como una función del periodo fundamental de vibración, se muestra con línea continua y de las estructuras no aisladas se muestra con línea punteada.

Los resultados se muestran para tres valores del sismo de El Centro de 1940. Se consideró una estructura de una masa [Ref. 8]. En todos los casos, para estructuras aisladas, se logra la reducción de la fuerza cortante basal, aún cuando se escaló tres veces los registros sísmicos.

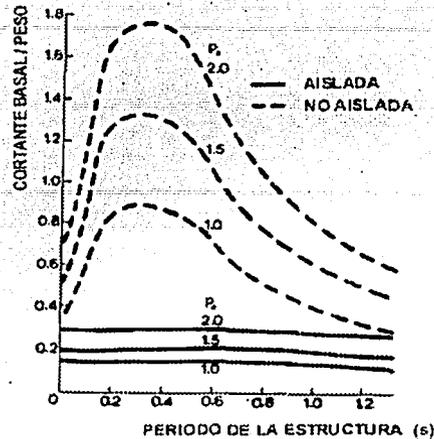


Figura 4.7 Periodos de vibración de un edificio y su cortante basal

#### 4.1.2 Disipación de la energía

Los desplazamientos relativos en la estructura, generados por sismos intensos, pueden ser disminuidos si se introduce un amortiguamiento adicional a la misma estructura. En la figura 4.3, se puede observar el efecto de suavización de la curva de aceleración para un mayor amortiguamiento.

Para el caso de estructuras no aisladas, la energía de disipación resulta principalmente de los daños estructurales que se generan, sin embargo, el diseño con aislamiento sísmico difiere del diseño sísmico convencional por el método por el cual el periodo y los mecanismos histeréticos de disipación de energía son considerados, así como de su filosofía de comportamiento sísmico.

### **4.1.3 Rigidez elástica para resistir cargas laterales pequeñas**

Mientras que en las estructuras sometidas a cargas sísmicas intensas es deseable una flexibilidad lateral, es oportuno aclarar que no es recomendable tener un sistema estructural que vibre perceptiblemente bajo cargas que ocurren frecuentemente, tales como las producidas por sismos pequeños, cargas de viento, frenado e impacto de vehículos. Los mecanismos disipadores de energía deben proveer una rigidez y amortiguamiento aceptables para resistir estas cargas de servicio, de manera que tengan una alta rigidez elástica y una capacidad adecuada y estable para disipar energía.

## **4.2 Generalidades de los aisladores sísmicos**

Un sistema de aislamiento sísmico para estructuras de puentes, se diseña en forma especial conforme a la normatividad que indica la AASHTO [Ref. 1]. Así los aisladores se instalan generalmente en la base de la superestructura, comúnmente entre el cabezal y la superestructura.

Los amortiguadores viscosos de los aisladores y las propiedades histeréticas de los mismos, pueden seleccionarse para mantener todos los otros componentes de la superestructura dentro del intervalo de comportamiento elástico.

En los últimos años se ha desarrollado una gran variedad de aisladores sísmicos y disipadores de energía en el mundo. Todos ellos con diferentes características y formas de disipar energía, con el propósito de disminuir los efectos de un sismo a una estructura.

### **4.2.1 Sistemas basados en elastómeros**

Los apoyos de caucho natural fueron los primeros aisladores en ser usados para protección sísmica de estructuras. Para reducir la deformación lateral de este material

[Ref. 6], fue necesario incrementar su amortiguamiento, lo cual se ha logrado de varias formas, por ejemplo añadiendo: placas extrafinas de carbono, aceites o resinas y otros materiales con propiedades tal que proporcionen amortiguamiento, que ha sido del orden de un 10% a un 20%. Un esquema de este tipo de apoyo se observa en la figura 4.8

El caucho es no lineal y sus deformaciones por cortante son menores al 20%, además se caracterizan por una alta rigidez y amortiguamiento, lo cual tiende a minimizar su respuesta bajo cargas de viento o sismos de menor intensidad [Ref. 6]. Cuando las deformaciones por cortante, están en el intervalo del 20% al 120%, su módulo de cortante es bajo y constante. A mayores deformaciones su módulo de cortante se incrementa debido a un proceso de cristalización en el caucho, aumentando su capacidad de disipación de energía.

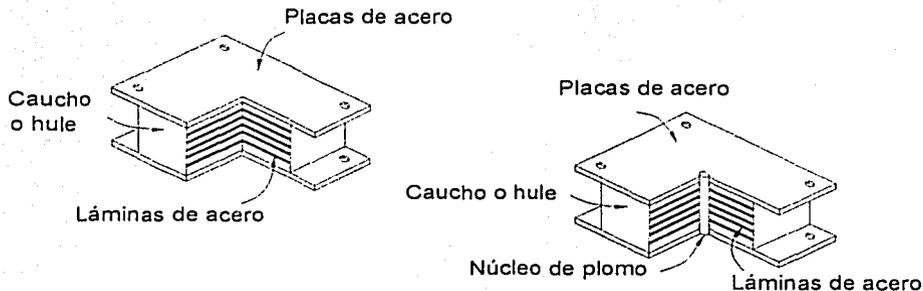


Figura 4.8 Apoyo elastomérico sin y con núcleo de plomo

#### 4.2.2 Sistemas basados en deslizadores

Este sistema fue la forma más simple de aislamiento. Consiste básicamente en colocar sobre la cimentación una capa de algún material granular (arena fina, talco, etc.), con el fin

de separar a la estructura de la subestructura, reduciendo las aceleraciones en la estructura ante un sismo, en otras palabras, desacopló la estructura de la cimentación.

#### 4.2.3 Sistemas basados en fricción-elástica

Los apoyos de base aisladora de fricción-elástica ayudan a reducir las fuerzas sísmicas, con un alto coeficiente de fricción de teflón sobre acero inoxidable a altas velocidades, usando muchas interfases de deslizamiento en apoyos sencillos. Así la velocidad entre los extremos superior e inferior del apoyo se reparte entre el número de capas, logrando que la velocidad de movimiento entre ellas sea menor, manteniendo un bajo coeficiente de fricción. Este sistema se ilustra en la figura 4.9

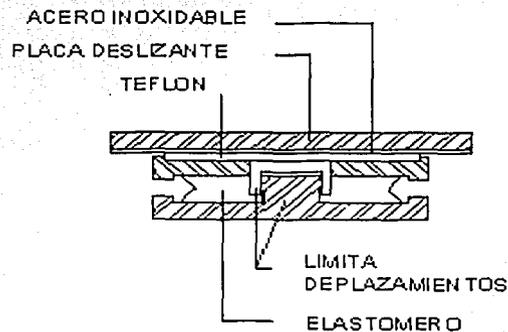


Figura 4.9 Aislador de base de fricción.

### 4.3 Normatividad

#### 4.3.1 Filosofía del diseño sísmico de puentes con aisladores sísmicos

Los criterios de diseño usados para diseñar puentes con apoyos con núcleo de plomo [Ref. 3]:

- **Guía de diseño del Ministerio de Trabajo y Desarrollo de Nueva Zelanda (MWD, 1983).** El procedimiento MWD supone que la superestructura es infinitamente rígida y que la rigidez del sistema equivalente de un grado de libertad es la suma de las rigideces de todas las pilas y los estribos, suponiendo además que la masa del sistema equivalente es igual a la masa total del tablero de la superestructura. Con este método la respuesta se puede obtener de dos formas: directamente de unas tablas o ayudas de diseño, son muy pocas las que se presentan y no se puede apreciar qué parámetros se consideraron, o la forma en que se hizo, además son para un peso supuesto de la pila. Otra forma consiste en determinar la respuesta directamente del espectro inelástico, el cual se obtiene calculando la máxima de aceleración y desplazamiento de varios sistemas de un grado de libertad con diferentes periodos fundamentales de vibración y resistencia a la fluencia.
- **Procedimiento de Sistemas de Aislamiento Dinámico de California (DIS, 1984).** Con el procedimiento DIS, los apoyos en las pilas y estribos se consideran independientes de la superestructura y la respuesta se basa en el esfuerzo de compresión o la carga vertical en los estribos o pilas individuales. En este método se hacen suposiciones que limitan su aplicación, como el que solamente se considera un tipo de disipador con una resistencia característica de 5% del peso de la superestructura.

En ninguno de los dos procedimientos descritos se toman en cuenta los efectos de la inercia rotacional de la masa de la superestructura, por lo que se hace la siguiente propuesta [Ref. 9]:

La respuesta sísmica inelástica de superestructuras de puentes sobre apoyos elastoméricos con centro de plomo se representa por una estructura elástica de un grado de libertad. La respuesta se estima directamente del espectro de respuesta elástico utilizando un periodo y un amortiguamiento efectivo calculado con el procedimiento propuesto [Ref. 10]. El periodo efectivo es el periodo inicial fundamental de la estructura más un cambio de periodo, resultado de la deformación inelástica de los apoyos con

centro de plomo. El amortiguamiento efectivo se supone igual al 5% asociado con el modo fundamental, más un amortiguamiento adicional histerético debido a la deformación inelástica de los apoyos con centro de plomo, estos dos parámetros se determinan directamente de gráficas de diseño para tal fin.

De acuerdo al artículo publicado por Gómez y Tena [Ref. 12], en cuanto al reglamento Uniform Building Code de 1994, UBC [Ref. 11], señala que para el diseño estático de estructuras aisladas sísmicamente hay que considerar las características del sitio donde estará la estructura, su sistema estructural y su altura [Ref. 12]. Cuando el desplazamiento lateral debido al sismo sea igual al desplazamiento máximo total permitido para el aislamiento, la estabilidad del sistema aislador ante la carga vertical debe comprobarse mediante estudios analíticos y ensayos experimentales, ante la posibilidad de falla por volteo del aislador. El análisis del sistema de aislamiento con un método estático es posible siempre y cuando se cumpla con los siguientes puntos:

1. La estructura se ubique aproximadamente a 15 km de una falla geológica activa.
2. El tipo de terreno donde se desplante la estructura debe ser firme.
3. La altura total del edificio no debe ser mayor a cuatro niveles o 19.8 m
4. El periodo natural de vibración de la estructura aislada sea menor o igual a tres segundos.
5. El periodo natural de vibración de la estructura aislada es mayor a tres veces el periodo natural de vibración de la estructura con base rígida.
6. La planta de la estructura aislada debe ser regular.
7. El sistema de aislamiento no limita al desplazamiento máximo total a menos de 1.5 veces el desplazamiento total de diseño.

**8. El sistema de aislamiento debe tener las siguientes características:**

- i) La rigidez efectiva del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño es mayor que un tercio de la rigidez efectiva al 20% del desplazamiento de diseño.
- ii) El sistema de aislamiento debe ser capaz de proporcionar una fuerza restitutiva.
- iii) La curva carga-deformación del sistema de aislamiento es independiente de las cargas verticales y de las cargas laterales en ambas direcciones, así como de la velocidad de la carga.

**4.3.2 Normas AASHTO**

Las especificaciones establecidas por las normas AASHTO [Ref. 1] establecen que para el análisis de un puente con disipadores de energía, se debe considerar un amortiguamiento viscoso equivalente para simplificar las consideraciones que se tendrían con el amortiguamiento histerético.

No obstante, usar amortiguamiento viscoso equivalente como sustituto de disipadores de energía puede dar lugar a resultados equivocados, por lo tanto, se recomienda tener especial cuidado en el diseño cuando se utilizan métodos simplificados, en los que se utilice un amortiguamiento equivalente, ya que se puede llegar a resultados poco confiables y alejados de la realidad.

En las normas AASHTO [Ref. 1], se establece que las hipótesis básicas del diseño con aislamiento sísmico son las siguientes:

- La capacidad de disipación de energía del sistema de aislamiento se puede expresar en términos de un amortiguamiento viscoso equivalente.

- La rigidez del sistema de aislamiento se puede expresar en términos de una rigidez efectiva.

Se debe mencionar que para puentes con sistemas deslizantes de aislamiento sin un mecanismo central con comportamiento elasto-plástico, no se permite utilizar la premisa del amortiguamiento viscoso equivalente. En todos los casos se deberá realizar un análisis no lineal.

#### 4.3.3 Criterios de diseño

Criterio de diseño de aisladores sísmicos [Ref. 3].

- a) El comportamiento del mecanismo a utilizar debe ser respaldado por ensayos experimentales.
- b) Se deben realizar estudios apropiados con el fin de seleccionar el sismo de diseño más apropiado para la estructura y el sitio. En general deben considerarse tres diferentes niveles:
  - i) **Sismo moderado.** Puede ocurrir dos o tres veces durante la vida útil de la estructura, la energía de disipación debe ser confinada a los mecanismos y no debe existir daño en los miembros estructurales.
  - ii) **Sismo de diseño.** Sismos con periodo de retorno de 150 años, el diseñador puede ajustar los niveles de resistencia en los miembros estructurales para lograr una solución óptima entre el costo de construcción y el daño inducido por el sismo.
  - iii) **Sismo extremo.** Para este sismo, debe permitirse un grado de daño apropiado de los miembros estructurales y la cimentación, que preceda a

un colapso frágil. Esto puede lograrse detallando la estructura para deformarse en una manera controlada.

- c) El grado de protección a los miembros estructurales debe ser al menos tan grande como el que implica un diseño sísmico convencional sin mecanismos disipadores de energía.
- d) Debe realizarse un análisis dinámico a fin de determinar los elementos mecánicos en los elementos estructurales y verificar su capacidad contra la respuesta.
- e) Debe realizarse un diseño detallado del mecanismo disipador. En virtud de la falta de reglamentación nacional pueden emplearse las normas AASHTO [Ref. 1]. En general debe cuidarse el siguiente procedimiento.
  - i) Determinar la localización de los apoyos, a fin de lograr una configuración que provea de suficiente capacidad para carga vertical, además de permitir libres movimientos y acceso para la inspección de los mismos.
  - ii) Determinar las dimensiones de cada uno de los apoyos con base en los requerimientos de carga vertical.
  - iii) Determinar la rigidez lateral requerida (espesor total) para la carga máxima de sismo.
  - iv) Con base en la altura de apoyos, determinar el número y espesor de las capas de neopreno.
  - v) Con base en la resistencia característica adoptada, determinar el tamaño del núcleo del plomo.

## 5. SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO EQS

### 5.1 CARACTERÍSTICAS DEL AISLADOR EQS

La empresa norteamericana RJ Watson Inc. [Ref. 13], ha desarrollado un sistema de aislamiento, diseñado especialmente para mejorar el comportamiento sísmico de puentes. Este sistema fue denominado EradiQuake Isolation System, EQS, figura 5.1

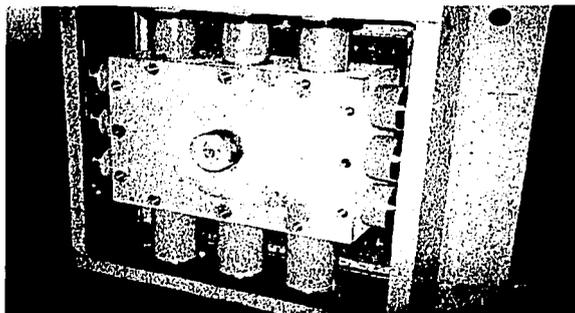


Figura 5.1 Sistema de aislamiento sísmico EQS

Para su fabricante, este tipo de aislador representa el estado del arte de estos sistemas. Los componentes básicos de los apoyos EQS consisten en: una placa deslizante con rotación múltiple, ensamblada y montada en un dispositivo de amortiguadores libres, llamado regulador de energía de masas, MER, figura 5.2.

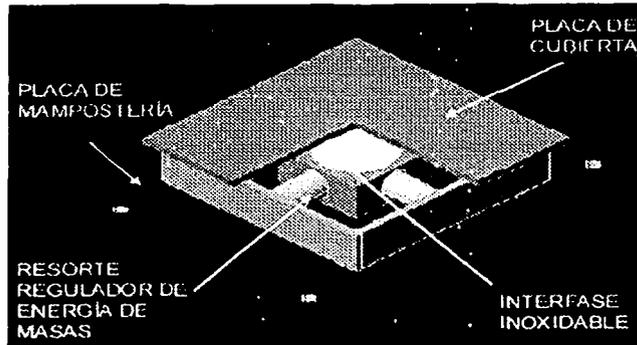


Figura 5.2 Componentes del sistema de aislamiento sísmico EQS

Este sistema fue desarrollado a partir de investigaciones que llevaron a cabo en el Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, MCEER [Ref. 13] en la Universidad Estatal de Nueva York en Búfalo, EUA. Sus investigaciones revelaron que el sistema EQS es un sistema efectivo para una significativa reducción de fuerzas y desplazamientos causados por fuertes aceleraciones del movimiento del suelo.

El sistema EQS transforma la energía de una masa (energía cinética), tal como el tablero de un puente durante un sismo, en calor en un resorte (energía potencial), esto se logra debido al sistema de regulación de masas de energía, MER, que conecta a la superestructura a la subestructura.

El sistema EQS para disipar energía a través de fricción, puede ser ajustado en la dirección de diseño, lo cual se logra variando los niveles de disipación de energía.

Ajustando los niveles de fricción, la cantidad de amortiguamiento puede ser controlada. Esta ventaja, permite al ingeniero optimizar el diseño estructural.

## 5.2 Ventajas del sistema EQS

Este tipo de aislamiento sísmico para estructuras como el puente vehicular en estudio, presenta la ventaja de ser un sistema multidireccional y multirotacional, protegiendo a la estructura de sismos, no importando la dirección u orientación de las fuerzas sísmicas, así como puede ser ajustado al nivel de rigidez y amortiguamiento que se desee. El sistema puede ser afinado para una respuesta ideal para cualquier excitación de diseño.

Adicionalmente, los aisladores EQS son pequeños y fáciles de instalar en sus puntos de apoyo, sin requerir ningún aditamento especial, libres de mantenimiento durante su vida útil. En su caso, de sencilla rehabilitación, como se puede observar en la figura 5.3

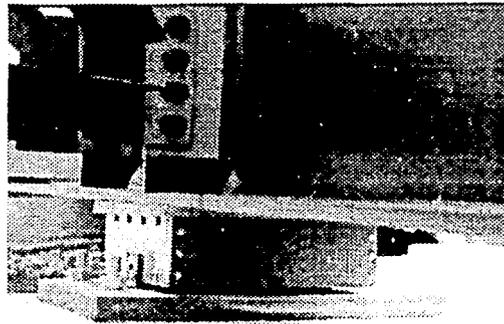


Figura 5.3 Sistema de aislamiento sísmico EQS como soporte en un puente.

### 5.3 Ensayes de Laboratorio

El sistema EQS se ha probado en diversos ensayos en la mesa vibradora en el MCEER, [Ref. 13]. Los estudios incluyen ensayos de componentes individuales, a escala natural, de acuerdo con las normas AASHTO [Ref. 1]. Además los apoyos EQS han sido sujetos a un "Programa de Ensayes Técnicos de Evaluación" del HITEC [Ref. 13].

El fabricante tiene una máquina de ensayos de apoyos sísmicos, figura 5.4, capaz de simular ciclos de cargas verticales y rotacionales, así como horizontales.

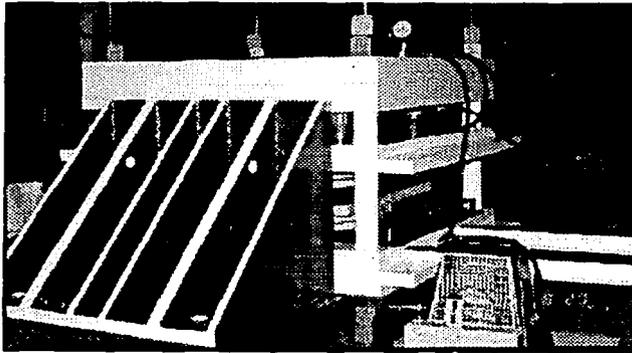


Figura 5.4 Equipo de ensayos para los apoyos tipo EQS.

### 5.4 Especificaciones de diseño

De acuerdo con su fabricante, en el diseño de una estructura con sistemas de aisladores sísmicos EQS, se deberá tomar en cuenta los siguientes aspectos:

#### 5.4.1 Diseño

- ✓ Se debe satisfacer las normas AASHTO [Ref. 1] en lo referente a las cargas de diseño, comportamiento y ensayos.

- ✓ Se deberá contar con los resultados analíticos de las fuerzas sísmicas y desplazamientos máximos en los puntos que indique el ingeniero estructurista. El análisis sísmico deberá incluir un análisis no lineal.
- ✓ El proveedor deberá mostrar un informe del diseño y fabricación de los apoyos aisladores.
- ✓ El sistema EQS deberá ser probado, mediante ensayos en mesa vibradora.
- ✓ Se deberán seguir las especificaciones del fabricante en el desarrollo del proyecto.
- ✓ La disipación de energía no deberá ser almacenada por medio de degradación del material de un elemento estructural.
- ✓ Los elementos estructurales deberán ser diseñados de tal forma que sean capaces de resistir las cargas de servicio (viento, fuerzas de frenado, etc.). Así como cargas laterales de diseño estático, por un periodo de 12 hrs. sin agrietamiento o desplazamientos excesivos.
- ✓ Los apoyos aisladores, deben ser libres de mantenimiento para las condiciones de trabajo, sísmicas y no sísmicas.
- ✓ Los fabricantes de apoyos aisladores, deberán satisfacer el programa de pruebas del programa HITEC.
- ✓ La subestructura debe diseñarse considerando el comportamiento de la estructura con aisladores sísmicos.
- ✓ Se debe considerar dilataciones en el apoyo, debido a efectos de temperatura. No deben excederse a 1/8 de pulgada.

- ✓ En caso de usar apoyos alternos, estos se deberán diseñar y construir de acuerdo a las normas AASHTO [Ref. 1], en su División I, Sección 14 y en la División II, Sección 18 para condiciones de carga no sísmicas.

#### 5.4.2 Construcción

Cuando el proyecto se encuentre en etapa de construcción, deberán tomarse en cuenta los siguientes aspectos, importantes para un buen desempeño de los aisladores sísmicos.

- ✓ Todos los materiales deben ser nuevos, sin defectos.
- ✓ Todo el acero, excepto los componentes de acero inoxidable de los apoyos, deberán cumplir con las especificaciones que se establezcan en los planos de proyecto.
- ✓ El acero inoxidable, deberá cumplir con los requisitos de las normas ASTM A240, tipo 304 [Ref. 14]. Se permite usar acero inoxidable con grados superiores.
- ✓ El espesor mínimo del acero inoxidable será de 0.05 de pulgada.
- ✓ Todas las superficies de acero expuestas al medio ambiente, deberán ser soldadas y pintadas, excepto las de acero inoxidable. Antes de pintar las superficies de acero expuestas se deberán limpiar. En el caso de las superficies a soldar, se les deberá aplicar previamente un revestimiento de protección contra la oxidación. Ninguna pintura se aplicará sin haber terminado de soldar.
- ✓ Todas las soldaduras y los soldadores, serán calificados, según lo establecido por el reglamento americano American Welding Society (AWS) [Ref. 15].
- ✓ Todas sus dimensiones gruesas, tendrán una tolerancia de más menos 1/8 de pulgada.

- ✓ Cada apoyo tendrá un número de identificación de proyecto, número de lote y un número individual de apoyo, cuya marca deberá ser visible aún después del montaje.
- ✓ Se deberá dar protección a los apoyos EQS contra humedad y polvo durante el embarque y almacenamiento.
- ✓ Todas las pruebas de control de calidad, serán de acuerdo a las normas AASHTO-GSSID.
- ✓ Cada apoyo será examinado visualmente durante y después de los ensayos. Cualquier falla resultante o defecto provocará el rechazo de la pieza.

#### 5.4.3 Instalación

Durante la instalación de estos dispositivos, se deberá cuidar lo siguiente:

- ✓ Los apoyos aisladores, deberán ser cuidadosamente protegidos de cualquier agente externo, como es el polvo, suciedad, aceites, humedades, o cualquier sustancia externa.
- ✓ Los dispositivos de apoyo, no serán desmontados a menos que sea autorizado por el ingeniero en la obra.
- ✓ El ingeniero de la obra y el fabricante, deberán supervisar que los apoyos sean colocados en el nivel sugerido de proyecto, de lo contrario deberá ser corregido.

#### 5.5 Aplicaciones

La aplicación del sistema de aislamiento EQS, se realiza tanto para proyectos de puentes nuevos, como para la rehabilitación de puentes que no cumplen con las actuales normas

AASHTO [Ref. 1], o que mediante estudios experimentales en campo demuestran alguna deficiencia en su comportamiento sísmico [Ref. 13], como los puentes de la figura 5.5.

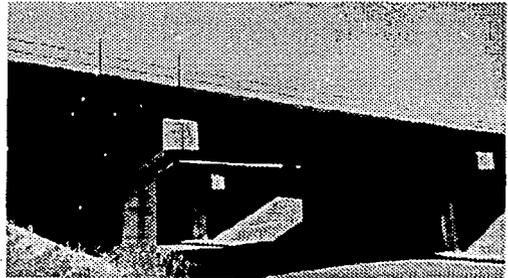
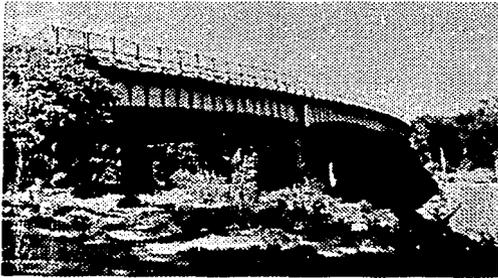


Figura 5.5 Puentes rehabilitados Connecticut DOT y Turnpike Massachussets

En la figura 5.6 se ilustran la instalación de estos aisladores EQS entre la subestructura y los elementos de la superestructura.

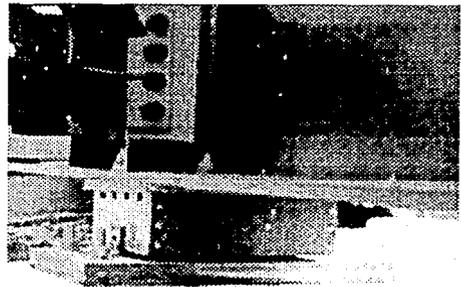
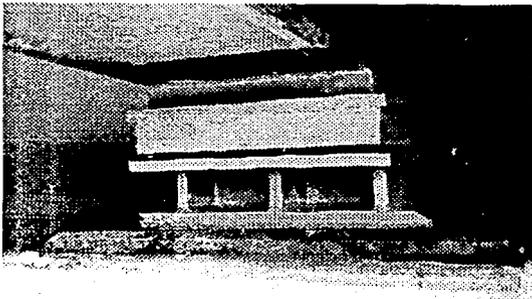


Figura 5.6 Colocación de aisladores sísmicos EQS en puentes vehiculares

## 6. PARÁMETROS QUE DEFINEN EL COMPORTAMIENTO DE UN AISLADOR

### 6.1 Modelo de un apoyo aislador

En la práctica, todos los aisladores 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 6.1, se muestra un ciclo de histéresis de un modelo bilineal típico.

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 y apoyos de péndulo de fricción.

La resistencia característica  $Q_d$ , se estima de un ciclo histerético para apoyos elastoméricos. En el caso de apoyos con núcleo de plomo,  $Q_d$  se obtiene del esfuerzo de fluencia en el plomo y el área del mismo. Para apoyos de péndulo de fricción,  $Q_d$  se obtiene de un coeficiente de fricción de la superficie de deslizamiento y la carga soportada por el apoyo. La rigidez a la postfluencia  $K_d$ , puede ser aproximadamente estimada mediante ensayos experimentales para los tres tipos de apoyos.

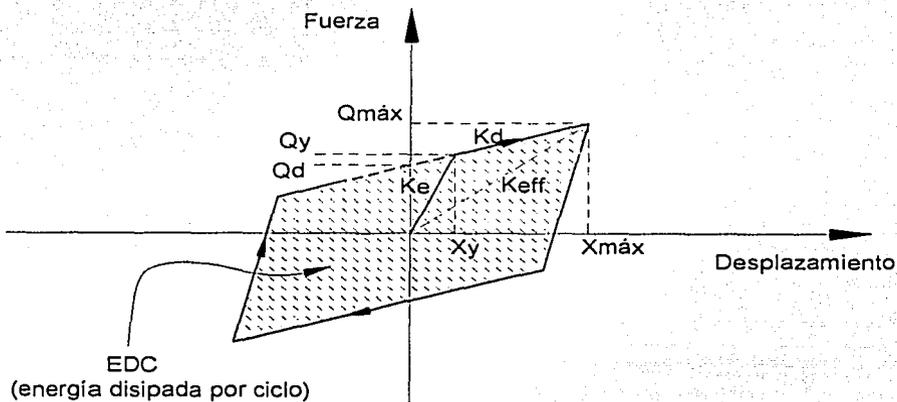


Figura 6.1 Modelo bilineal de histéresis de una aislador sísmico

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 este desplazamiento en el aislador.

En la figura 6.1, se define:  $Q_y$ , es la fuerza de fluencia,  $Q_{max}$  es la fuerza máxima,  $X_y$  es el desplazamiento en la fluencia y  $X_{max}$  es el desplazamiento máximo.

## 6.2 Parámetros que definen el comportamiento de un aislador EQS

De la figura 6.1, aplicando conocimientos básicos de la Mecánica de Materiales, se podrán conocer qué propiedades mecánicas definen el comportamiento de un aislador sísmico EQS [Ref. 6]. Por lo que la fuerza de fluencia aplicada en el aislador está dada por:

$$Q_y = K_e X_y \quad (6.1)$$

y la fuerza máxima  $Q_{\max}$ , será:

$$Q_{\max} = Q_d + K_d X_{\max} \quad (6.2)$$

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

De la ecuación 6.1 se tiene:

$$X_y = \frac{Q_y}{K_e} \quad (6.3)$$

y su rigidez a la postfluencia  $K_d$  es:

$$K_d = \frac{Q_y - Q_d}{X_y} \quad (6.4)$$

despejando  $Q_y$  de la ecuación (6.4):

$$Q_y = K_d X_y + Q_d \quad (6.5)$$

sustituyendo la ecuación (6.5) en la ecuación (6.3):

$$X_y = \frac{K_d X_y + Q_d}{K_e} \quad (6.6)$$

de esta ecuación:

$$K_e X_y = K_d X_y + Q_d \quad (6.7)$$

$$X_y (K_e - K_d) = Q_d \quad (6.8)$$

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

$$X_y = \frac{Q_d}{K_e - K_d} \quad (6.9)$$

### 6.3 Rigidez lineal efectiva y amortiguamiento viscoso equivalente

Según las normas AASHTO [Ref. 1], el modelo bilineal de histéresis puede reemplazarse por dos parámetros que definen al disipador linealmente, pero hacen necesario un análisis dinámico no lineal para determinar una respuesta adecuada del puente.

Estos dos parámetros son la rigidez lineal efectiva,  $K_{eff}$  y el amortiguamiento viscoso equivalente,  $\varepsilon_h$ , se calculan como sigue [Ref. 6]:

De la figura 6.1, la rigidez efectiva  $K_{eff}$  se calcula como:

$$K_{eff} = \frac{Q_{max}}{X_{max}} \quad (6.10)$$

sustituyendo la ecuación (6.2) en la ecuación anterior:

$$K_{eff} = \frac{Qd + KdX_{max}}{X_{max}} \quad (6.11)$$

finalmente se tiene:

$$K_{eff} = Kd + \frac{Qd}{X_{max}} \quad (6.12)$$

En esta ecuación se puede observar que  $K_{eff}$  no depende del parámetro  $K_e$ .

Por otro lado, el amortiguamiento viscoso equivalente,  $\epsilon h$ , se determina como [Ref. 6]:

$$\epsilon h = \frac{\text{Área de histéresis del aislador}}{2\pi K_{eff} X_{max}^2} \quad (6.13)$$

de la figura 6.1, se tiene:

$$\epsilon h = \frac{2Qd(X_{max} - X_y)}{\pi K_{eff} X_{max}^2} \quad (6.14)$$

sustituyendo las ecuaciones (6.9) y (6.12) en la ecuación (6.14) se tiene:

$$\epsilon h = \frac{2Qd\left(X_{max} - \frac{Qd}{K_e - Kd}\right)}{\pi\left(Kd + \frac{Qd}{X_{max}}\right)X_{max}^2} \quad (6.15)$$

finalmente:

$$\epsilon h = \frac{2}{\pi} \frac{QdX_{max} - \frac{Qd^2}{K_e - Kd}}{KdX_{max}^2 + QdX_{max}} \quad (6.16)$$

Cuando se realizan ensayos de laboratorio a los aisladores sísmicos, para obtener la forma de trabajo del aislador a través de una gráfica fuerza-deformación, se puede conocer el área que encierra el ciclo histerético del aislador, según las normas AASHTO [Ref. 1], entonces el amortiguamiento viscoso equivalente se puede calcular como:

$$c_h = \frac{EDC}{2\pi K_{eff} X_{max}^2} \quad (6.17)$$

donde  $EDC$  es la energía disipada por ciclo, o área de histéresis del aislador, figura 6.1, que se puede calcular como:

$$EDC = 4X_{max} Qd \quad (6.18)$$

## 7. MÉTODO DE CONCENTRACIONES PUNTUALES

### 7.1 Métodos de análisis probabilístico

Con el fin de conocer el efecto de las incertidumbres en los parámetros que definen a este tipo de aislador sísmico, es necesario usar un método de análisis probabilista que permita considerar este aspecto.

En las estructuras las variables que intervienen en su respuesta bajo acciones sísmicas, son: calidad de los materiales en la estructura, dimensionamiento de los elementos estructurales, magnitud de las cargas muertas, vivas y accidentales, etc. Para este caso, únicamente se considera los parámetros que influyen en el comportamiento del aislador, para observar como influyen en la respuesta de la estructura.

Cuando se diseña un sistema estructural se trabaja con valores nominales de cargas, de propiedades de material y de dimensionamiento, pero surge la pregunta ¿qué pasa

cuando se considera que estas variables pueden tomar un valor diferente al especificado?, claro, dentro de cierto intervalo de confianza respecto a su desviación estándar o las que señalen los fabricantes.

Cuando se quiere conocer el valor medio y desviación estándar de los parámetros estructurales que definen el comportamiento de los aisladores sísmicos, se puede hacer ensayos de laboratorio que simulen las condiciones de trabajo a que estarán sujetos, o bien si fuera el caso utilizar técnicas de muestreo [Ref. 16]. Pero la extracción física de la muestra puede ser imposible o muy cara. En estas situaciones a menudo es posible obtener información útil mediante simulación. Los métodos de simulación típicos involucran el reemplazo de la población real por un universo teórico descrito por alguna distribución de probabilidad supuesta.

Para el estudio de los aisladores, hay que realizar varias simulaciones con los parámetros que definan su comportamiento sísmico, para estudiar como impactan en la respuesta de la estructura procurando cubrir todas las incertidumbres.

Algunos de los métodos para análisis probabilístico, para obtener los parámetros estadísticos de una función  $f(x)$  dependiente de  $n$  variables aleatorias  $X$  son:

**Método de Monte Carlo**, en el cual hay que realizar un gran número de simulaciones con el fin de obtener un mínimo margen de error, conociendo los parámetros estadísticos y las funciones de distribución de probabilidades de cada variable aleatoria que se tomen en cuenta, lo que hace a este método muy laborioso [Ref. 16], aún más cuando en este trabajo se hará un análisis no lineal de la estructura, en la historia del tiempo durante la acción de un sismo, por lo que no es recomendable la aplicación de este método.

**Método de las Incertidumbres de Primer Orden**, es un método en el que se deben definir las funciones lineales y continuas que describen la respuesta a evaluar que tomen en cuenta las variables, principalmente en las que participan las variables aleatorias  $X$  que se consideren, además, en este trabajo se hará un análisis dinámico no lineal de la

estructura en estudio, dificultando obtener una función que directamente evalúe la respuesta, por lo que no es recomendable su aplicación [Ref. 17].

**Método de Estimaciones Bipuntuales**, consiste en sustituir la función de probabilidad hipotética de la variable aleatoria  $X$  por una distribución arbitraria, con la única condición de presentar los mismos parámetros estadísticos de la función hipotética, además considera una distribución particularmente sencilla, que consiste en tomar dos puntos o concentraciones de probabilidad en la función de probabilidad. Para su aplicación, se requiere de  $2^n$  simulaciones, donde " $n$ " es el número de variables aleatorias (v.a.) que se consideran en estudio [Ref. 17].

**Método de Concentraciones Puntuales**, similar al método anterior, pero sólo se hacen  $2n$  simulaciones, siendo un método estudiado y probado de gran confiabilidad [Ref. 2], será este el que se usará para definir los parámetros a emplear en las simulaciones de la estructura en estudio.

## 7.2 Método de Concentraciones Puntuales

Este método consiste en lo siguiente:

Sea  $Z$  una función de  $n$  v.a.  $X_k$ :

$$Z = h(X) = h(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (7.1)$$

para  $k = 1, 2, \dots, n$

Además,  $\mu_k$ ,  $\sigma_k$  y  $\nu_k$  son la media, desviación estándar y el coeficiente de variación de cada variable  $X_k$

Adicionalmente  $\rho_{k,i}$  son las concentraciones o pesos para cada variable localizada en  $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ , donde:

$$x_{k,i} = \mu_k + \xi_{k,i} \sigma_k \quad (7.2)$$

para:  $i = 1, 2, \dots, m$  (número de concentraciones), y  $k = 1, 2, \dots, n$  (número de v.a.) y  $\xi_{k,i}$  es una constante por determinar.

En este método en cada simulación de la respuesta de un sistema estructural, se incluyen los valores medios de todas las variables que se consideren, excepto una, que tomará un valor afectado por su desviación estándar y la constante  $\xi_{k,i}$ .

Por otro lado, la función  $Z = h(X)$  se puede expandir en una serie de Taylor alrededor de los valores medios de  $X$  y establecer  $2m - 1$  ecuaciones para cada una de las variables aleatorias  $X_k$ , manteniendo los primeros  $2m - 1$  momentos de la función de densidad de probabilidad, fdp, de  $X_k$ , así se tiene [Ref. 2]:

$$\sum_{i=1}^m \rho_{k,i} (\xi_{k,i})^j = \lambda_{k,j} \quad (7.3)$$

para toda:  $j = 1, 2, \dots, 2m - 1$  donde:  $\rho_{k,i}$  son las concentraciones o pesos,  $\xi_{k,i}$  es una constante y  $\lambda_{k,j}$  es la relación de los  $j$ -ésimos momentos alrededor de la media de  $X_k$  hasta  $(\sigma_k)^j$ .

Debido a que la suma de las concentraciones es la unidad, se tiene:

$$\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m \rho_{k,i} = 1 \quad (7.4)$$

Además, la suma de las concentraciones debe satisfacer [Ref. 2]:

$$\sum_{i=1}^m p_{k,i} = \frac{1}{n} \quad (7.5)$$

Se establece un sistema de  $2m$  ecuaciones (7.3) y (7.5) con  $2m$  incógnitas para cada v.a.  $X_k$ . Si  $m = 2$  la solución del sistema de ecuaciones se obtiene por [Ref. 2]:

$$\xi_{k,i} = \frac{\lambda_{k,3}}{2} + (-1)^{3-i} \sqrt{n + \left(\frac{\lambda_{k,3}}{2}\right)^2} \quad (7.6)$$

para toda:  $i = 1, 2$

además:

$$p_{k,i} = \frac{1}{n} (-1)^i \frac{\xi_{k,3-i}}{\zeta_k} \quad (7.7)$$

donde:

$$\zeta_k = 2 \sqrt{n + \left(\frac{\lambda_{k,3}}{2}\right)^2} \quad (7.8)$$

Para el caso de 3 concentraciones de probabilidades para cada v.a.,  $m = 3$ , los  $j$ -ésimos momentos de  $Z$  se calculan como [Ref. 2]:

$$E(Z^j) \equiv p_0 (h(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_1, \dots, \mu_{n-1}, \mu_n))^j + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m p_{k,i} (h(\mu_1, \mu_2, \dots, x_{k,i}, \dots, \mu_{n-1}, \mu_n))^j \quad (7.9)$$

Para el caso de  $m$  mayor a 3, la solución del sistema de ecuaciones (7.3) y (7.5) se puede obtener considerando la suma de concentraciones de probabilidades satisfaciendo la ecuación 7.5, así los  $j$ -ésimos momentos de  $E(Z)^j$  son aproximados por [Ref. 2]:

$$E(Z^j) \cong \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m p_{k,i} x(Z(\mu_1, \mu_2, \dots, x_{k,i}, \dots, \mu_{n-1}, \mu_n))^j \quad (7.10)$$

Así mismo, para el caso del cálculo de la desviación estándar, se calcula la varianza de las funciones con la siguiente expresión:

$$\sigma_z^2 = E(Z^2) - [E(Z)]^2 \quad (7.11)$$

donde:  $\sigma_z^2$  es la varianza de la función calculada,  $E(Z^2)$  es la esperanza de los cuadrados de las simulaciones de la función para los valores medios simulados y  $[E(Z)]^2$  es el cuadrado de la esperanza de la función de valores medios.

Finalmente:

$$\sigma_z = \sqrt{E(Z^2) - [E(Z)]^2} \quad (7.12)$$

donde  $\sigma_z$  es la desviación estándar de la función calculada.

### 7.3 Aplicación del Método de Concentraciones Puntuales

#### 7.3.1 Variables aleatorias que participan en la definición de un aislador

Para obtener la respuesta de interés, tomando en cuenta que se hará un análisis no lineal paso a paso del puente, se usará un programa de análisis estructural llamado SAP2000 [Ref. 18], que permite considerar los dispositivos de aislamiento sísmico en estructuras. Se debe conocer que propiedades estructurales definen a este elemento (**N-link**), en el programa de cómputo.

Básicamente, el modelo no lineal que utiliza el programa de cómputo SAP2000 [Ref. 18], requiere las siguientes propiedades:

- Keff: Rigidez efectiva.
- $\varepsilon$ : Amortiguamiento viscoso equivalente.
- Ke: Rigidez elástica.
- Qy: Fuerza elástica.
- Kd / Ke: Relación de rigidez a la postfluencia respecto a la rigidez elástica

Con base en estudios experimentales realizados por la empresa R.J. Watson [Ref. 19], se argumenta que la rigidez elástica, Ke, tiene un coeficiente de variación casi nulo, por lo que su valor se considera constante.

El factor de relación de rigidez a la postfluencia Kd y de la rigidez elástica Ke, no es un parámetro a considerar, pero que si está en función del parámetro Qd.

Finalmente, se tienen 3 parámetros a considerar como incertidumbres: la rigidez efectiva Keff, el amortiguamiento viscoso equivalente  $\varepsilon$ , y la fuerza de fluencia Qy, por lo que se aplicará el Método de Concentraciones Puntuales para  $n = 3$  variables aleatorias.

### 7.3.2 Obtención de los parámetros estadísticos

De acuerdo al reporte de los estudios experimentales realizados por el fabricante [Ref. 20], se emplearán aisladores sísmicos tipo EQS1125 para el puente en estudio, diseñados conforme a las normas AASHTO [Ref. 1].

Se realizaron 4 ensayos de 5 ciclos en cada uno, manteniéndose como constantes su rigidez elástica Ke, y trabajando para un desplazamiento máximo permisible  $X_{max}$ , de 85 mm (3.38 in). Los resultados de los ensayos se muestran en tablas 7.1 a 7.4:

Tabla 7.1 Resultados de ensaye No. 1

ciclo	EDC kips - in	Keff kips / in	Xmax in
1	935.6	41.80	3.38
2	826.1	38.30	3.38
3	761.2	37.00	3.38
4	753.1	36.10	3.38
5	736.2	35.60	3.38
Media, $\mu$	802.4	37.76	
Desv Est, $\sigma$	81.8	2.48	
Coef Var (c.v.)	0.102	0.0657	

Tabla 7.2 Resultados de ensaye No. 2

ciclo	EDC kips - in	Keff kips / in	Xmax in
1	1026.2	44.90	3.38
2	874.1	39.90	3.38
3	809.4	38.00	3.38
4	789.6	36.20	3.38
5	760.5	36.10	3.38
Media, $\mu$	851.9	39.02	
Desv Est, $\sigma$	105.9	3.64	
Coef Var (c.v.)	0.124	0.0932	

Tabla 7.3 Resultados de ensaye No. 3

ciclo	EDC kips - in	Keff kips / in	Xmax in
1	1108.0	44.80	3.38
2	996.4	42.30	3.38
3	946.4	41.30	3.38
4	922.1	40.60	3.38
5	899.1	40.20	3.38
Media, $\mu$	974.4	41.84	
Desv Est, $\sigma$	82.9	1.84	
Coef Var (c.v.)	0.085	0.0439	

Tabla 7.4 Resultados de ensaye No. 4

ciclo	EDC kips - in	Keff kips / in	Xmax in
1	1012.60	48.30	3.38
2	842.30	44.40	3.38
3	782.80	42.80	3.38
4	751.70	41.90	3.38
5	735.50	41.20	3.38
Media, $\mu$	824.98	43.72	
Desv Est, $\sigma$	112.54	2.83	
Coef Var (c.v.)	0.1364	0.0646	

Con esta información aplicando las ecuaciones (6.2), (6.10), (6.17) y (6.18) se obtienen los siguientes resultados, tabla 7.5:

Tabla 7.5 Valores nominales y medios de los parámetros del aislador sísmico

PARÁMETROS	VALORES NOMINALES	VALORES MEDIOS		DESVIACIÓN ESTÁNDAR	
Rigidez efectiva (Keff)	42.0415	40.5850	Kips / in	$\sigma_{Keff}$	3.4950
Amortiguamiento viscoso equivalente (c)	0.2959	0.2962		$\sigma_c$	0.0259
Fuerza de fluencia (Qy)	66.7595	64.5252	Kips	$\sigma_{Qy}$	8.3675
Rigidez lineal (Ke)	2118.0	2118.0	Kips / in		
Desp. Máx. (Xmax)	3.38	3.38	in		

### 7.3.3 Obtención de las constantes y concentraciones

Aplicando las ecuaciones (7.6), (7.7) y (7.8), para  $n=3$ ,  $m=2$ ,  $i=1,2$  y  $k=1,2,3$  se obtiene:

$$\xi_{1,1} = (-1)^{3-1} \sqrt{3} = \sqrt{3} \quad ; \quad \xi_{1,2} = (-1)^{3-2} \sqrt{3} = -\sqrt{3}$$

$$\xi_{2,1} = (-1)^{3-1} \sqrt{3} = \sqrt{3} \quad ; \quad \xi_{2,2} = (-1)^{3-2} \sqrt{3} = -\sqrt{3}$$

$$\xi_{3,1} = (-1)^{3-1} \sqrt{3} = \sqrt{3} \quad ; \quad \xi_{3,2} = (-1)^{3-2} \sqrt{3} = -\sqrt{3}$$

además:

$$\zeta_1 = 2\sqrt{3} \quad ; \quad \zeta_2 = 2\sqrt{3} \quad ; \quad \zeta_3 = 2\sqrt{3}$$

finalmente, sus concentraciones:

$$P_{1,1} = \frac{1}{3}(-1)^1 \frac{-\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{6} \quad ; \quad P_{1,2} = \frac{1}{3}(-1)^2 \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{6}$$

$$P_{2,1} = \frac{1}{3}(-1)^1 \frac{-\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{6} \quad ; \quad P_{2,2} = \frac{1}{3}(-1)^2 \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{6}$$

$$P_{3,1} = \frac{1}{3}(-1)^1 \frac{-\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{6} \quad ; \quad P_{3,2} = \frac{1}{3}(-1)^2 \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{6}$$

Con las constantes, aplicando la ecuación (7.2) y con los parámetros de la tabla 7.5, se calculan los valores correspondientes de las v.a.:

$$K_{eff\ 1,1} = 46.6385 \text{ kips / in} \quad ; \quad K_{eff\ 1,2} = 34.5315 \text{ kips / in}$$

$$\epsilon_{2,1} = 0.3412 \quad ; \quad \epsilon_{2,2} = 0.2513$$

$$Q_{y3,1} = 79.9183 \text{ kips} \quad ; \quad Q_{y3,2} = 50.0322 \text{ kips}$$

De la ecuación (7.10), se calculan los parámetros estadísticos de la respuesta,  $R$ , que se quiere evaluar. Como se indicará en el capítulo 8, por lo que desarrollando la expresión antes referida, se calcula la respuesta con:

$$E[R] = P_{1,1} [R(\overline{K_{eff,1,1}}, \bar{\varepsilon}, \overline{Q_y})] + P_{1,2} [R(\overline{K_{eff,1,2}}, \bar{\varepsilon}, \overline{Q_y})] + P_{2,1} [R(\overline{K_{eff}}, \varepsilon_{2,1}, \overline{Q_y})] + P_{2,2} [R(\overline{K_{eff}}, \varepsilon_{2,2}, \overline{Q_y})] + P_{3,1} [R(\overline{K_{eff}}, \bar{\varepsilon}, \overline{Q_{y,3,1}})] + P_{3,2} [R(\overline{K_{eff}}, \bar{\varepsilon}, \overline{Q_{y,3,2}})]$$

De acuerdo a los datos solicitados por el programa SAP2000 [Ref. 18], en la tabla 7.6, se preparan los parámetros necesarios del aislador sísmico para cada simulación que se analizará de la estructura en estudio.

Tabla 7.6 Parámetros del aislador sísmico para cada simulación.  
En negritas se indica el parámetro simulado

PARÁMETROS	NÚMERO DE SIMULACIÓN					
	1	2	3	4	5	6
<b>K eff</b> (kips)	<b>46.6385</b>	<b>34.5315</b>	40.5850	40.5850	40.5850	40.5850
<b>c</b>	0.2962	0.2962	<b>0.3412</b>	<b>0.2513</b>	0.2962	0.2962
<b>K e</b> (kips / in)	2118	2118	2118	2118	2118	2118
<b>Q y</b> (kips)	64.5252	64.5252	64.5252	64.5252	<b>79.0183</b>	<b>50.0322</b>
<b>Kd / K e</b>	0.0118	0.0087	0.0089	0.0116	0.0102	0.0102

Se hará un análisis del puente con los parámetros medios obtenidos del laboratorio [Ref. 20], con el fin de comparar su respuesta con la estructura que considera incertidumbres en las propiedades de los aisladores, así como también para el caso en que la estructura no incluya aislamiento sísmico.

## **8. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PUENTE VEHICULAR**

### **8.1 Descripción geométrica del puente vehicular**

Este puente se ubicará en el Edo. de Michoacán, que es una zona de alta sismicidad, con la finalidad de cruzar el río Balsas, entre los estados de Michoacán y Guerrero. Este puente se ubica a menos de 100 km de la costa del Pacífico, por lo que es muy probable que durante su vida útil ocurran en zonas cercanas importantes eventos sísmicos de gran magnitud [Ref. 21].

Por esta razón, y por 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, como se ilustra en la figura 8.1:

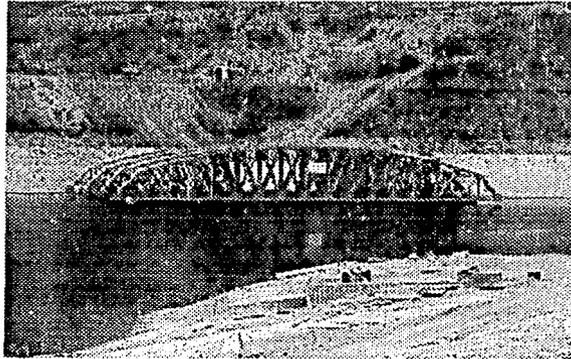


Figura 8.1 Armaduras de acero de paso inferior del puente vehicular

A su vez, la superestructura se apoyará en pilas de concreto reforzado, de longitud variable de aproximadamente: 54, 74, 73 y 47 m, figura 8.2:

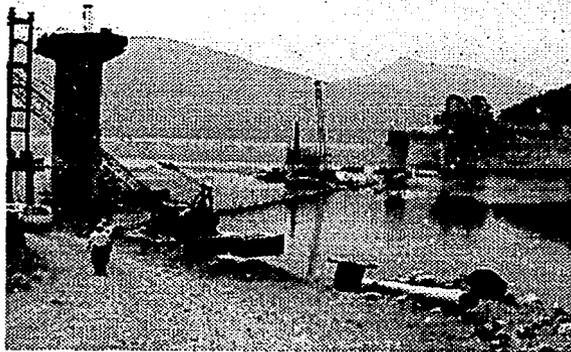


Figura 8.2 Construcción de pilas del puente vehicular

Es necesario señalar que estas pilas son de sección circular hueca en su parte inferior en sus primeros 16 m, las intermedias son de 10 m de diámetro exterior, con pared de 1.2 m de espesor, con aproximadamente 2,385 t de peso, mientras que las exteriores tienen un diámetro exterior de 8.5 m, con una pared de 1 m de espesor, con 2,015 t de peso total [Ref. 21].

Posteriormente cambian a sección rectangular hueca, cuyas dimensiones son de 8.5 m en el sentido transversal al puente y 3.5 m en el sentido longitudinal del mismo, con pared de espesor de 0.4 m, igual en las cuatro pilas, como se puede apreciar en la figura 8.3:

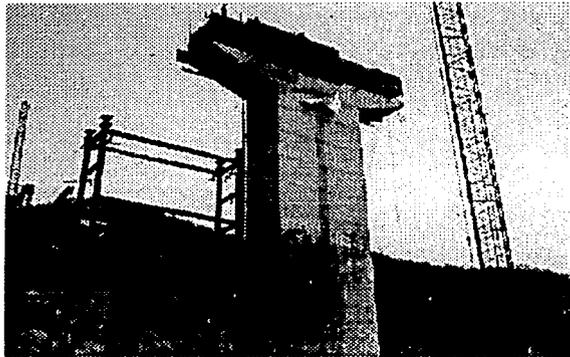


Figura 8.3 Pilas de sección variable

Las pilas descansan sobre cilindros de cimentación, que se mantienen empotrados en su base, debido a la colocación de pilotes inclinados, con la finalidad de crear este tipo de apoyo, por lo que en sus análisis no se tomará en cuenta la interacción suelo-estructura.

En el extremo superior de cada cabezal, se colocaron 4 aisladores sísmicos tipo EQS1125, figura 8.4, los que soportaran a las armaduras que salvan los claros.



Figura 8.4 Los aisladores sísmicos se colocan entre el cabezal y la superestructura

## 8.2 Acciones sísmicas

El puente se ubica en la Zona D de acuerdo a las Normas para sismo de la CFE [Ref. 22]. Como se van a realizar análisis dinámicos en el dominio del tiempo, se requieren registros sísmicos con características ideales para el lugar donde se ubica al puente. El acelerograma debe ser compatible con el espectro de diseño de la zona D, con el fin de que se represente lo mejor posible las condiciones geológicas y tectónicas del sitio.

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. 21]. Este modelo se define mediante un conjunto de funciones que describen la evolución de la amplitud y el contenido de frecuencias durante un temblor.

La forma de estas funciones y sus parámetros se determinaron con base en la información contenida en 112 registros reales (acelerogramas) obtenidos durante la ocurrencia de 6 temblores en la zona de subducción adyacente a la costa sureste de México. Se utilizaron varios periodos de recurrencia de 50, 100 y 200 años [Ref. 21].

Para este estudio se utilizaron los correspondientes a un periodo de retorno de 200 años, en virtud de que generan mayores aceleraciones respecto a los sismos con periodo de retorno de 100 años, con el fin de proporcionar mayor seguridad a la estructura en ese periodo de tiempo. Las características de estos sismos se presentan en la tabla 8.1.

Tabla 8.1: Características más importantes de los sismos simulados

IDENTIFICACIÓN	DURACIÓN (s)	ACELERACIÓN MÁXIMA (gals)	TIEMPO DE ACELERACIÓN MÁXIMA (s)
RS-1	29.00	436	7.72
RS-2	34.10	367	3.12
RS-3	32.32	497	4.97

Las gráficas, tiempo-aceleración de los sismos se presentan en las figuras 8.5 a 8.7:

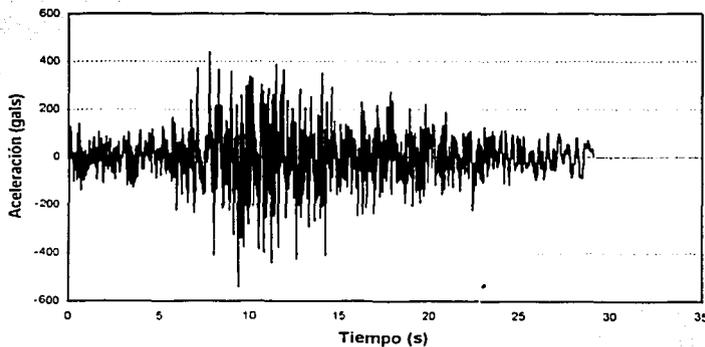


Figura 8.5 Registro sísmico simulado RS-1.

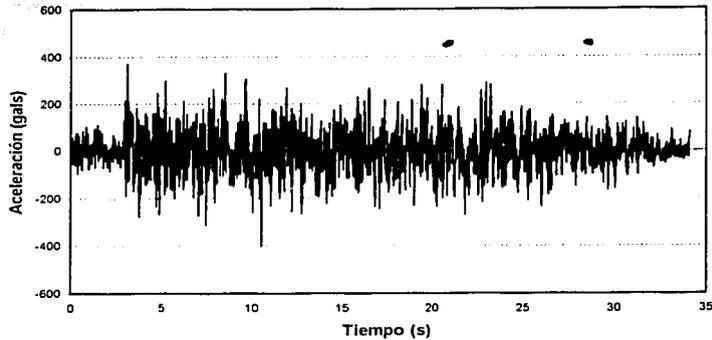


Figura 8.6 Registro sísmico simulado RS-2

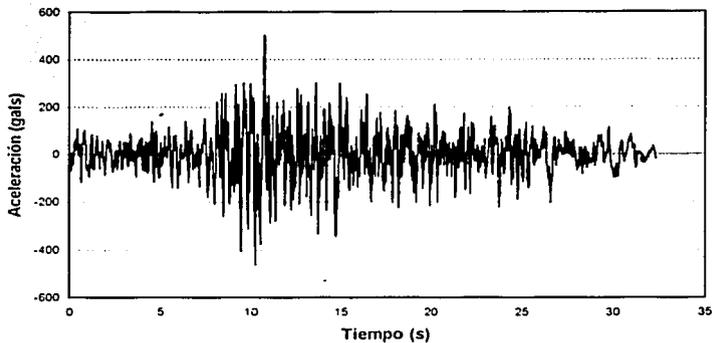


Figura 8.7 Registro sísmico simulado RS-3

Para los análisis dinámicos en la historia del tiempo, se utilizaron como excitaciones los registros sísmicos descritos. Estos sismos se aplicaron al modelo del puente vehicular para obtener su respuesta durante su historia del tiempo [Ref. 23].

En la figura 8.8, se presentan los espectros de respuesta para cada registro sísmico, considerando un amortiguamiento del 5%.

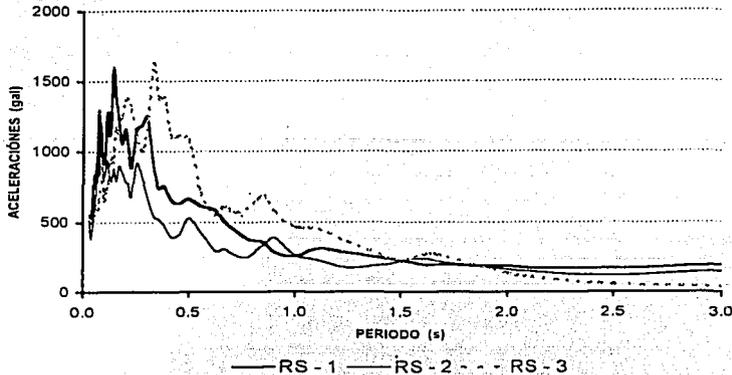


Figura 8.8 Espectros de respuesta

Para cada registro se combinó el efecto sísmico, 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 [Ref. 18].

De acuerdo a la normatividad correspondiente [Ref. 22], se considera para cada registro sísmico, dos combinaciones de acción:

- ✓ 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).

### 8.3 Modelo del puente

El modelo del puente se ilustra en la figura 8.9, donde se aprecian los cinco claros de aproximadamente 104 m, sus cuatro pilas intermedias y como estribos, los apoyos fijos a la izquierda y libres a la derecha. Se observa también cómo en el extremo superior de cada pila, se colocaron los aisladores.

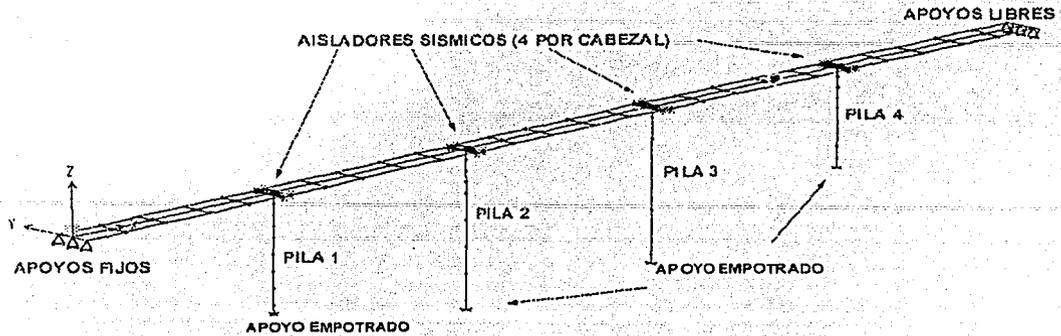


Figura 8.9 Vista general del modelo del puente estudiado

En la figura 8.10, 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 placa, con peso equivalente al de la superestructura.

En los estribos no se colocaron dispositivos de aislamiento sísmico.

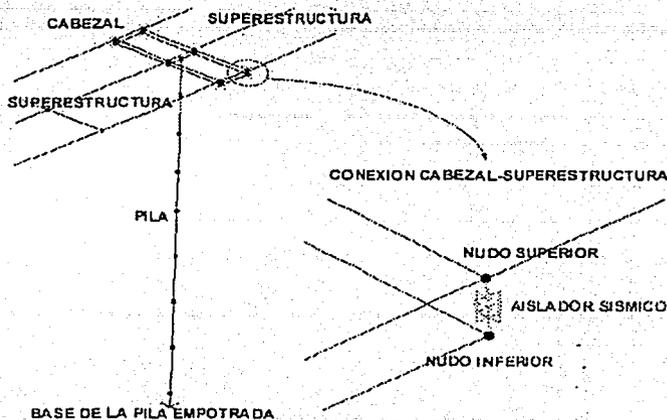


Figura 8.10 Detalle de conexión cabezal con la superestructura

Con el fin de hacer participar todas las acciones a que estará expuesto el puente, a lo largo de cada pila, se concentraron las masas del agua adherida en su perímetro.

El modelado de las pilas huecas en sus secciones cilíndricas y rectangulares, fue mediante elementos finitos tipo placa, figura 8.11

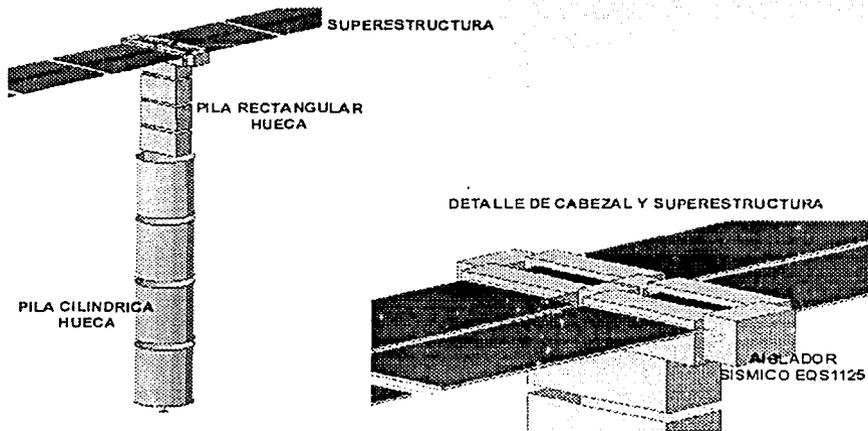


Figura 8.11 Detalle de conexión cabezal con superestructura.

## 9. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA

### 9.1 Identificación de la respuesta

Para verificar si el puente en estudio, cumple con los requisitos de diseño (desplazamientos máximos y capacidad de carga en las pilas) ante las acciones de sismos severos, se ha identificado como respuesta: los elementos mecánicos en las bases de dos pilas, una de mayor longitud y otra de las cortas, así como desplazamientos relativos de un aislador.

En la figura 9.1, se muestran los puntos en los que se obtendrá la respuesta que se requiere estudiar.

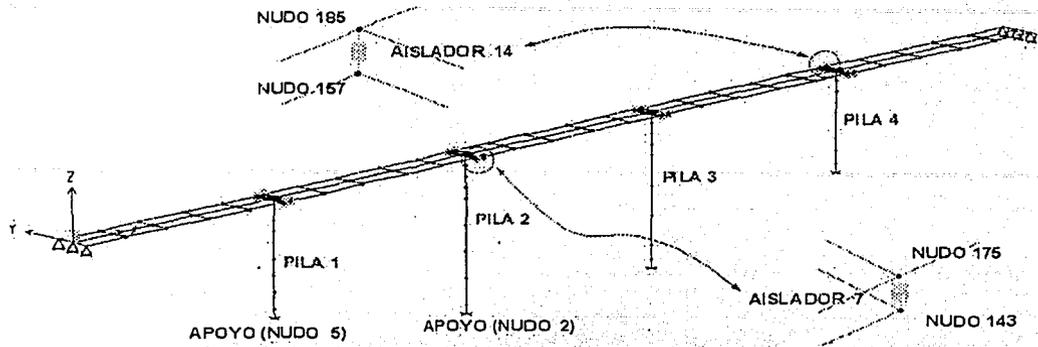


Figura 9.1 Identificación de los puntos de interés donde se obtendrá la respuesta del puente

Se evaluará la fuerza cortante y el momento flexionante en los apoyos de las pilas 1 y 2, para las combinaciones de acciones sísmicas A y B.

Por otra parte, es de interés observar los desplazamientos en el extremo superior de los cabezales, respecto a sus respectivos desplazamientos de la superestructura, con la finalidad de verificar los desplazamientos relativos de sus aisladores.

Para identificar la respuesta en estudio, se establece la siguiente nomenclatura:

**RESPUESTA # DE NUDO (COMBINACIÓN) <sup>NR</sup>**

Donde: RESPUESTA se refiere al elemento mecánico o desplazamiento en estudio, # DE NUDO, respecto a que punto se estudia la respuesta, (COMBINACIÓN) es la combinación de acción sísmica y NR es el registro sísmico que se aplica.

Por ejemplo, del registro sísmico 1, los elementos mecánicos del nudo 5 son:

$$\begin{array}{l} V_x 5 (A)^1 \\ V_y 5 (B)^1 \end{array} ; \begin{array}{l} M_y 5 (A)^1 \\ M_x 5 (B)^1 \end{array}$$

De igual forma se hace para los desplazamientos ( $\delta$ ) de los nudos y los desplazamientos relativos en un aislador ( $\delta_{REL}$ ).

## 9.2 Análisis de la respuesta

En las siguientes tablas 9.1 a 9.4, se presentan los resultados deterministas al aplicar el Método de Concentraciones Puntuales [Ref. 2], usando las ecuaciones (7.10) a (7.12). Se presentan los resultados de la respuesta considerando los valores nominales de los parámetros del aislador sísmico, así como sus correspondientes valores medios y desviación estándar de la respuesta considerando las incertidumbres en las propiedades estructurales.

Con respecto al periodo fundamental de vibración de la estructura, en la tabla 9.1, se presentan estos resultados considerando: incertidumbres en los parámetros, con valores nominales de los parámetros, así como el puente sin aisladores sísmicos, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 9.1 Periodos fundamentales de vibración del puente

TIPO DE ANÁLISIS	PERIODO DE LA ESTRUCTURA (s)
SIN AISLADORES SÍSMICOS	0.7759
CON VALORES NOMINALES	2.1183
CON VALORES MEDIOS	2.1240

En cuanto a la respuesta calculada con el Método de Concentraciones Puntuales [Ref. 2], se obtuvo un valor de 2.1240 s, con una desviación estándar de 0.0845 s.

Los desplazamientos y elementos mecánicos en los apoyos, se presenta a continuación, para cada registro sísmico.

Del registro sísmico RS-1, se tiene la tabla 9.2:

Tabla 9.2 Respuesta calculada aplicando el registro sísmico RS-1

RESPUESTA	RESPUESTA CALCULADA CON VALORES NOMINALES	RESPUESTA CALCULADA CON INCERTIDUMBRES			INTERVALO DE CONFIANZA (99.73 %)	
		Resp Med $R_m$	Desv Est $\sigma$		$R_m - 3\sigma$	$R_m + 3\sigma$
$\delta_x$ 143 (100x30y) <sup>1</sup>	(cm)	7.11	7.15	0.08	6.91	7.40
$\delta_y$ 143 (30x100y) <sup>1</sup>	(cm)	4.34	4.34	0.26	3.56	5.12
$\delta_x$ 175 (100x30y) <sup>1</sup>	(cm)	14.12	14.16	1.04	11.03	17.29
$\delta_y$ 175 (30x100y) <sup>1</sup>	(cm)	16.44	16.40	0.99	13.43	19.37
$\delta_{RELx}$ 7 (100x30y) <sup>1</sup>	(cm)	7.01	7.01	0.96	4.12	9.89
$\delta_{RELy}$ 7 (30x100y) <sup>1</sup>	(cm)	12.10	12.06	0.73	9.87	14.26
$\delta_x$ 157 (100x30y) <sup>1</sup>	(cm)	2.14	2.15	0.25	1.40	2.89
$\delta_y$ 157 (30x100y) <sup>1</sup>	(cm)	0.80	0.80	0.08	0.57	1.02
$\delta_x$ 185 (100x30y) <sup>1</sup>	(cm)	16.30	16.34	1.49	11.87	20.80
$\delta_y$ 185 (30x100y) <sup>1</sup>	(cm)	0.54	0.54	0.06	0.36	0.73
$\delta_{RELx}$ 14 (100x30y) <sup>1</sup>	(cm)	14.16	14.19	1.24	10.48	17.91
$\delta_{RELy}$ 14 (30x100y) <sup>1</sup>	(cm)	-0.26	-0.26	-0.01	-0.21	-0.30
$V_x$ 5 (100x30y) <sup>1</sup>	(t)	113.03	113.83	13.16	74.36	153.30
$M_y$ 5 (100x30y) <sup>1</sup>	(t-m)	4,313.60	4,341.00	473.79	2,919.63	5,762.37
$V_y$ 5 (30x100y) <sup>1</sup>	(t)	100.28	101.76	11.33	67.77	135.75
$M_x$ 5 (30x100y) <sup>1</sup>	(t-m)	6,152.22	6,102.98	663.86	4,111.39	8,094.57
$V_x$ 2 (100x30y) <sup>1</sup>	(t)	1,082.52	1,080.74	12.71	1,042.60	1,118.88
$M_y$ 2 (100x30y) <sup>1</sup>	(t-m)	47,534.50	47,468.43	413.25	46,228.68	48,708.18
$V_y$ 2 (30x100y) <sup>1</sup>	(t)	456.83	463.18	17.40	410.98	515.39
$M_x$ 2 (30x100y) <sup>1</sup>	(t-m)	27,049.28	27,110.18	1,385.48	22,953.72	31,266.63

Del registro sísmico RS-2, se tiene la tabla 9.3:

Tabla 9.3 Respuesta calculada aplicando el registro sísmico RS-2

RESPUESTA	RESPUESTA CALCULADA CON VALORES NOMINALES	RESPUESTA CALCULADA CON INCERTIDUMBRES		INTERVALO DE CONFIANZA (99.73 %)	
		Resp Med R <sub>m</sub>	Desv Est σ	R <sub>m</sub> - 3σ	R <sub>m</sub> + 3σ
$\delta_x$ 143 (100x30y) <sup>2</sup> (cm)	5.69	5.71	0.12	5.34	6.08
$\delta_y$ 143 (30x100y) <sup>2</sup> (cm)	2.70	2.75	0.08	2.51	2.98
$\delta_x$ 175 (100x30y) <sup>2</sup> (cm)	9.25	9.20	0.28	8.37	10.04
$\delta_y$ 175 (30x100y) <sup>2</sup> (cm)	8.23	8.21	0.67	6.21	10.21
$\delta_{RELx}$ 7 (100x30y) <sup>2</sup> (cm)	3.56	3.49	0.15	3.03	3.95
$\delta_{RELy}$ 7 (30x100y) <sup>2</sup> (cm)	5.53	5.46	0.59	3.69	7.23
$\delta_x$ 157 (100x30y) <sup>2</sup> (cm)	1.12	1.13	0.12	0.77	1.49
$\delta_y$ 157 (30x100y) <sup>2</sup> (cm)	0.36	0.36	0.05	0.21	0.52
$\delta_x$ 185 (100x30y) <sup>2</sup> (cm)	8.44	8.61	0.82	6.14	11.08
$\delta_y$ 185 (30x100y) <sup>2</sup> (cm)	0.26	0.26	0.04	0.14	0.38
$\delta_{RELx}$ 14 (100x30y) <sup>2</sup> (cm)	7.32	7.48	0.70	5.38	9.59
$\delta_{RELy}$ 14 (30x100y) <sup>2</sup> (cm)	-0.10	-0.11	-0.01	-0.07	-0.14
$V_x$ 5 (100x30y) <sup>2</sup> (t)	62.85	65.73	5.75	48.46	82.99
$M_y$ 5 (100x30y) <sup>2</sup> (t-m)	2,445.12	2,523.76	214.61	1,879.95	3,167.58
$V_y$ 5 (30x100y) <sup>2</sup> (t)	60.01	62.17	12.58	24.42	99.92
$M_x$ 5 (30x100y) <sup>2</sup> (t-m)	2,571.71	2,592.47	392.27	1,415.67	3,769.28
$V_x$ 2 (100x30y) <sup>2</sup> (t)	873.40	878.85	16.24	830.14	927.56
$M_y$ 2 (100x30y) <sup>2</sup> (t-m)	37,472.71	37,808.88	766.29	35,510.00	40,107.76
$V_y$ 2 (30x100y) <sup>2</sup> (t)	366.70	375.73	12.16	339.25	412.21
$M_x$ 2 (30x100y) <sup>2</sup> (t-m)	17,483.44	17,792.91	396.06	16,604.73	18,981.08

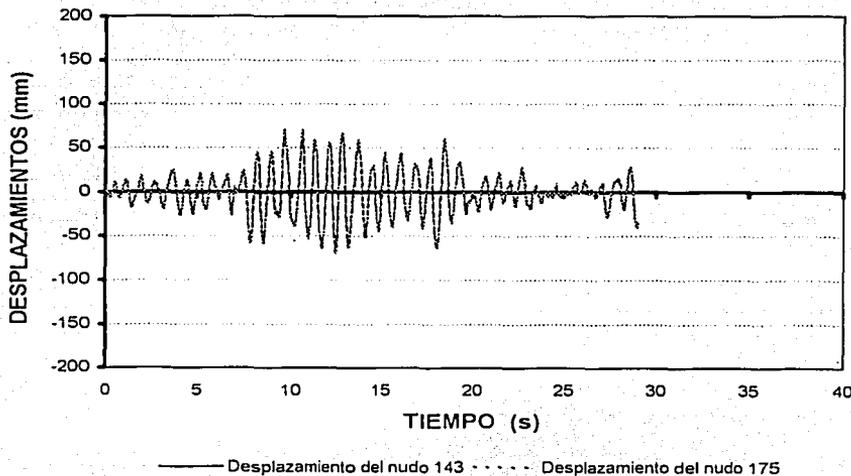
Del registro sísmico RS-3, se tiene la tabla 9.4:

Tabla 9.4 Respuesta calculada aplicando el registro sísmico RS-3

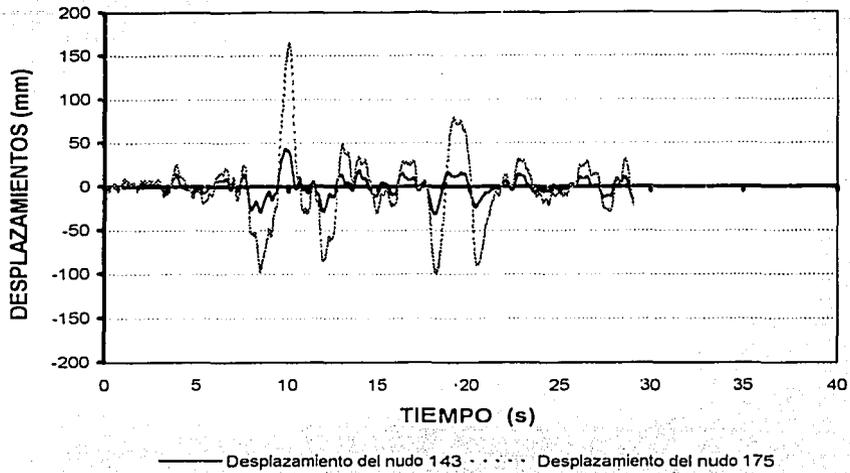
RESPUESTA	RESPUESTA CALCULADA CON VALORES NOMINALES	RESPUESTA CALCULADA CON INCERTIDUMBRES		INTERVALO DE CONFIANZA (99.73 %)	
		Resp Med $R_m$	Desv Est $\sigma$	$R_m - 3\sigma$	$R_m + 3\sigma$
$\delta_x$ 143 (100x30y) <sup>3</sup> (cm)	10.83	11.03	0.45	9.67	12.38
$\delta_y$ 143 (30x100y) <sup>3</sup> (cm)	3.65	3.71	0.21	3.07	4.34
$\delta_x$ 175 (100x30y) <sup>3</sup> (cm)	10.95	11.00	0.14	10.59	11.40
$\delta_y$ 175 (30x100y) <sup>3</sup> (cm)	7.95	8.19	0.54	6.58	9.79
$\delta_{RELx}$ 7 (100x30y) <sup>3</sup> (cm)	0.12	-0.03	-0.32	0.92	-0.98
$\delta_{RELy}$ 7 (30x100y) <sup>3</sup> (cm)	4.30	4.48	0.32	3.51	5.45
$\delta_x$ 157 (100x30y) <sup>3</sup> (cm)	1.13	1.15	0.12	0.79	1.51
$\delta_y$ 157 (30x100y) <sup>3</sup> (cm)	0.39	0.39	0.06	0.21	0.57
$\delta_x$ 185 (100x30y) <sup>3</sup> (cm)	7.18	7.21	0.67	5.19	9.22
$\delta_y$ 185 (30x100y) <sup>3</sup> (cm)	0.28	0.29	0.04	0.17	0.41
$\delta_{RELx}$ 14 (100x30y) <sup>3</sup> (cm)	6.05	6.06	0.55	4.41	7.71
$\delta_{RELy}$ 14 (30x100y) <sup>3</sup> (cm)	-0.10	-0.10	-0.02	-0.04	-0.17
$V_x$ 5 (100x30y) <sup>3</sup> (t)	103.92	103.85	11.68	68.82	138.88
$M_y$ 5 (100x30y) <sup>3</sup> (t-m)	3,992.61	3,988.84	436.13	2,680.46	5,297.22
$V_y$ 5 (30x100y) <sup>3</sup> (t)	89.96	90.46	9.68	61.41	119.51
$M_x$ 5 (30x100y) <sup>3</sup> (t-m)	3,616.58	3,615.37	414.21	2,372.73	4,858.01
$V_x$ 2 (100x30y) <sup>3</sup> (t)	1,887.45	1,883.59	60.30	1,702.69	2,064.49
$M_y$ 2 (100x30y) <sup>3</sup> (t-m)	75,689.59	75,683.20	3,038.13	66,568.80	84,797.60
$V_y$ 2 (30x100y) <sup>3</sup> (t)	453.67	470.63	65.50	274.12	667.15
$M_x$ 2 (30x100y) <sup>3</sup> (t-m)	24,486.09	24,811.47	1,718.08	19,657.23	29,965.71

De las tablas 9.2 a 9.4, la respuesta se observa que prácticamente todos los desplazamientos y reacciones de interés, calculadas con valores nominales, se encuentran dentro del intervalo de confianza del 99.73%, por lo que surge la inquietud de conocer la probabilidad de que la respuesta nominal se exceda el referido intervalo, y de ser así en que magnitud, para que en su caso se tomen las medidas pertinentes.

En las figuras 9.2 y 9.3 se muestran las historias de desplazamientos en función del tiempo, para los nudos 143 y 175, que definen al aislador sísmico 7, para dos registros sísmicos diferentes, considerando la misma combinación de análisis (B). Para ambos registros se muestran los desplazamientos lineales cuando: (a) la estructura no cuenta con aislamiento sísmico, y (b) cuando se ha incluido este dispositivo. En estos análisis se consideraron valores nominales en los parámetros estructurales que intervienen en su comportamiento estructural.

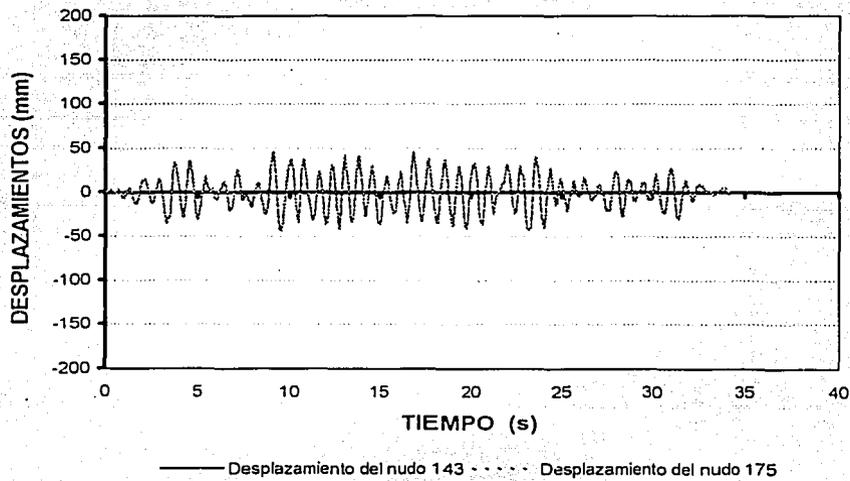


a) Respuesta del puente sin aislamiento sísmico

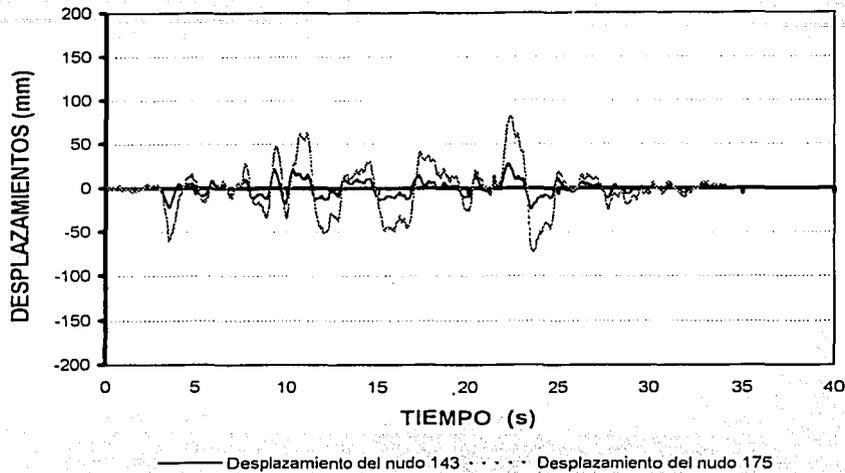


b) Respuesta del puente con aislamiento sísmico

Figura 9.2 Desplazamientos en Y de los nudos 143 y 175 (combinación B) con RS-1



a) Respuesta del puente sin aislamiento sísmico



b) Respuesta del puente con aislamiento sísmico

Figura 9.3 Desplazamiento en Y de los nudos 143 y 175 (combinación B) con RS-2

De las dos figuras anteriores, con línea continua se presenta la respuesta del nudo del aislador que se encuentra adherido al cabezal, mientras que la línea punteada está asociada al nudo del aislador que se encuentra adherido a la armadura.

Como era de esperarse, en el modelo de la estructura sin aislamiento sísmico, los desplazamientos de los nudos en la superestructura y en el cabezal, son prácticamente iguales.

Cuando se considera el aislamiento sísmico en el puente, los desplazamientos del nudo en la armadura son mayores que los del nudo del cabezal, ya que una de las funciones del aislador sísmico, es la de desacoplar a estos elementos.

De la tabla 9.2, cuando se aplica el registro sísmico RS-1, se obtiene un desplazamiento relativo de 12.1 cm, que excede el permisible, por lo que se deberá prever esta situación diseñando topes sísmicos, de lo contrario podría fallar el aislador sísmico y tal vez la

superestructura ante un evento sísmico similar al RS-1. Cuando se aplican los sismos RS-2 y RS-3, los desplazamientos relativos no exceden el permisible de 8.5 cm.

En las figuras 9.4 y 9.5 se muestran el comportamiento bilineal del aislador número 7, para dos registros sísmicos diferentes respectivamente, considerando la misma combinación de análisis (A). Para ambos casos, se consideraron valores nominales en los parámetros estructurales del aislador.

En estas figuras, con línea continua se indica el comportamiento histerético del aislador, ante la acción del registro sísmico y con línea punteada, se grafica el comportamiento obtenido en laboratorio para este tipo de aislador.

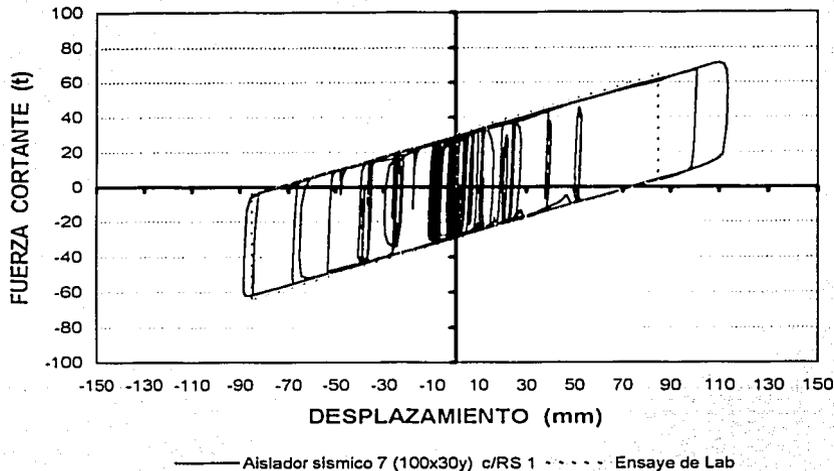


Figura 9.4 Comportamiento bilineal del aislador número 7 (A) con RS-1

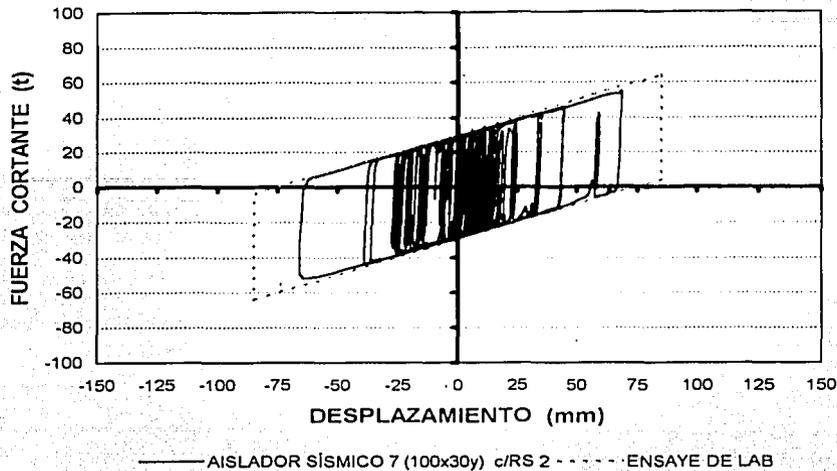


Figura 9.5 Comportamiento bilineal del aislador número 7 (A) con RS-2

De la figura 9.4, se observa como el ciclo histerético del aislador excede los límites de desplazamiento relativo del mismo, por lo que se deberá considerar este aspecto en la etapa de diseño del puente.

### 9.3 Probabilidad de excedencia de la respuesta

#### 9.3.1 Generalidades del diseño

En forma general, se debe procurar que las estructuras cumplan con cierto nivel de seguridad, cumpliendo los estados límite, como son de falla (llegar a la capacidad de carga de la estructura) y los de servicio (desplazamientos, vibraciones agrietamientos, etc.), por lo que se debe cuidar que no excedamos estos límites, para lograr un buen funcionamiento estructural de las construcciones.

Con el fin de lograr un buen comportamiento de las estructuras, se debe estudiar qué factores intervienen, como son las cargas, dimensiones, materiales a emplear, etc., para

que finalmente se revise la seguridad de la misma y la ocurrencia de exceder algunos estados límite, por lo que habrá de evaluar la respuesta de la estructura.

Sin embargo, los factores que afectan el comportamiento de la estructura, no son del todo exactos, comúnmente usamos valores nominales para su diseño, por lo que es importante considerar las incertidumbres que existen en sus valores, que finalmente afectan directamente en su resistencia.

Sea cual sea la filosofía de diseño y factores de seguridad que se empleen, siempre existirá la probabilidad de que la respuesta exceda a la capacidad, dicho de otra forma, se debe cuidar que el diseño no sobre pase los estados límite, por lo que es importante determinar las distribuciones de probabilidades de las variables que intervienen en la confiabilidad de una estructura.

Si bien es cierto que en los reglamentos de diseño no se usa un factor de seguridad global de toda la estructura, si se hace en forma parcial para el diseño de elementos estructurales, para lo cual se proponen factores de carga (que incrementan las acciones) y factores de resistencia (que reducen la capacidad), los cuales ayudan a cubrir las incertidumbres que se presentan en el cálculo de los parámetros nominales, como son propiedades de material, geometrías, acciones, etc, los cuales se suponen tienen una baja probabilidad de excederse en su valor.

En general en las estructuras, la revisión de la seguridad se establece con la expresión [Ref. 24]:

$$F_c \sum S_d \leq F_R R_d \quad (9.1)$$

donde hay que revisar que para cada combinación de carga que afecte a la estructura, la suma de los efectos de todas las cargas nominales,  $\sum S_d$ , multiplicada por su factor de carga,  $F_c$ , no debe exceder la resistencia nominal,  $R_d$ , multiplicada por un factor reductivo de resistencia,  $F_R$ .

En el caso de las cargas de diseño (muertas, vivas, de sismo y viento) se proponen valores nominales en los reglamentos de diseño. Para casos poco comunes los valores nominales deberán fijarse con el criterio de que la probabilidad de que sean excedidos sea de un 2 por ciento [Ref. 24].

Cuando se emplean materiales especiales, o de nueva manufactura, el fabricante deberá indicar los parámetros nominales que definen a su producto, respaldados por ensayos de laboratorio, como es el caso de los aisladores sísmicos que se emplean en este estudio.

### 9.3.2 Confiabilidad de la estructura

Para un buen diseño, se debería definir la distribución de probabilidades de las variables que intervienen [Ref. 24], como se puede apreciar en la figura 9.6, donde se puede observar que su centroide (o primer momento) es la media y su momento de inercia centroidal (segundo momento) es la varianza. Con estos dos parámetros se proporciona una medida de la tendencia central y de la dispersión de la variable, los cuales ayudan a llegar a aseveraciones probabilistas aproximadas.

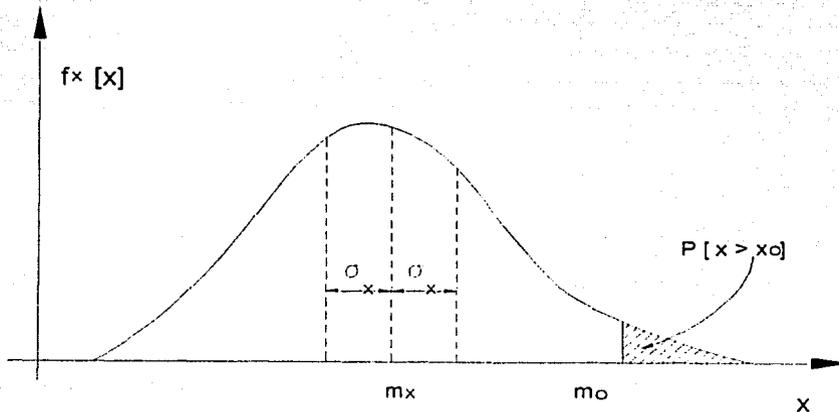


Figura 9.6 Función de densidad de probabilidades

La probabilidad de que un determinado valor del parámetro sea excedido, o no sea alcanzado, puede plantearse en función de la media,  $m_X$ , y la desviación estándar,  $\sigma_X$ , o coeficiente de variación,  $C_X$ , los cuales se pueden calcular de la siguiente forma [Ref. 24]:

$$m_X = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx \quad (9.2)$$

$$\sigma_X^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_X)^2 f_X(x) dx \quad (9.3)$$

$$C_X = \frac{\sigma_X}{m_X} \quad (9.4)$$

Si la v.a. tiene una distribución aproximadamente normal, el valor,  $X_M^*$ , de que tenga un 2 por ciento de probabilidad de ser excedido, se calcula con la expresión [Ref. 24]:

$$X_M^* = m_X + 2\sigma = m_X (1 + 2C_X) \quad (9.5)$$

lo cual define un intervalo de confianza más amplio con respecto a considerar una vez la desviación estándar, lo que llevaría a una probabilidad del 16 por ciento.

El conocer la distribución de los parámetros con incertidumbres y su influencia en la respuesta, ayudará a obtener la confiabilidad de la estructura, es decir, la probabilidad de que ésta no llegue a la falla o a un estado límite. La confiabilidad queda definida por los valores relativos de la fuerza actuante, S, y de la resistencia, R. Si  $S > R$ , se presenta la falla [Ref 24].

### 9.3.3 Probabilidad de ocurrencia de la respuesta

En las tablas 9.2 a 9.4, se presenta el valor de los elementos mecánicos, desplazamientos absolutos de los nudos y relativos de los aisladores, calculados con propiedades nominales y con incertidumbres en los valores de los parámetros de los aisladores. Con estos datos se determina la probabilidad de que se presente una respuesta igual o mayor que la nominal y en qué porcentaje se incrementaría ésta.

En la figura 9.7 se presenta la variación de la fuerza cortante en el apoyo 2 del puente en estudio, cuando se aplica el registro sísmico RS-1 bajo la combinación de carga A. Con línea continua, se presenta la probabilidad (eje vertical) de que el cortante calculado en el apoyo 2 del puente, sea igual o mayor al valor que se muestra en el eje horizontal ( $V_s$ ). El valor inicial de este eje es igual al de la capacidad nominal del apoyo ( $V_{nom} = 1,083$  t) y el final es el del límite superior correspondiente a un intervalo de confianza del 99.73% (1,119 t). Adicionalmente, con línea discontinua se muestra el porcentaje de excedencia con respecto al cortante nominal, que presentan los valores del cortante  $V_s$  mostrados en el eje horizontal (en el eje vertical derecho se anota este porcentaje).

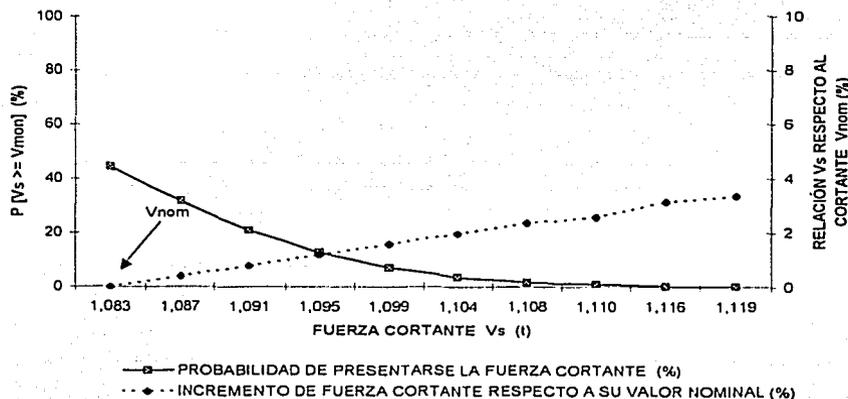


Figura 9.7 Probabilidad de excedencia del cortante en el apoyo 2, para la combinación de carga A y con el registro RS-1

En esta figura se puede observar que, como era de esperarse, al incrementarse el valor de  $V_s$ , la probabilidad de que en el puente se presente un valor igual o mayor a este

disminuye. Por ejemplo, para el caso de una fuerza cortante de 1095 t (aproximadamente 1% mayor que el  $V_{nom}$ ), la probabilidad de que se presente es de 13%.

De los cálculos numéricos para obtener la figura 9.7, se obtiene que para probabilidades mayores al  $1 \times 10^{-3}$  de presentarse el valor de  $V_s$  (límite superior del intervalo de confianza: valor medio más  $3\sigma$ ), su excedencia respecto al  $V_{nom}$  es inferior al 3%, por lo que, considerando únicamente este elemento mecánico, se tendría un incremento de carga igual a 1.03 veces la carga de diseño del apoyo. Si este incremento se considerara como un factor de carga en el diseño elástico, se puede observar que su valor queda cubierto con el incremento del 33% que se establece en las normas AASHTO [Ref. 1] para diseño por esfuerzos permisibles.

Se debe puntualizar que este incremento de carga sería únicamente para el diseño por fuerza cortante del apoyo 2 del puente en estudio, y se debe a las incertidumbres en las propiedades estructurales de los apoyos EQS1125. Si se desea tomar en cuenta este aspecto en el diseño del puente, se deberá hacer un estudio similar al aquí presentado para otras condiciones de carga. Así, en las figuras 9.8 y 9.9 se presentan los resultados para los registros sísmicos RS-2 y RS-3.

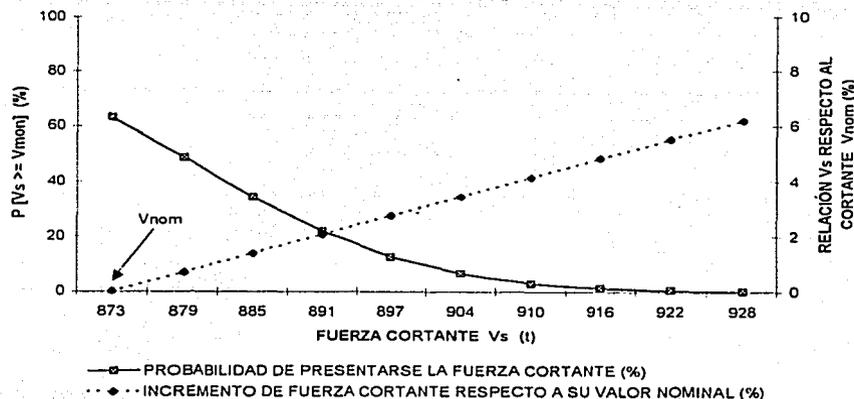


Figura 9.8 Probabilidad de excedencia del cortante en el apoyo 2, para la combinación de carga A y con el registro RS-2

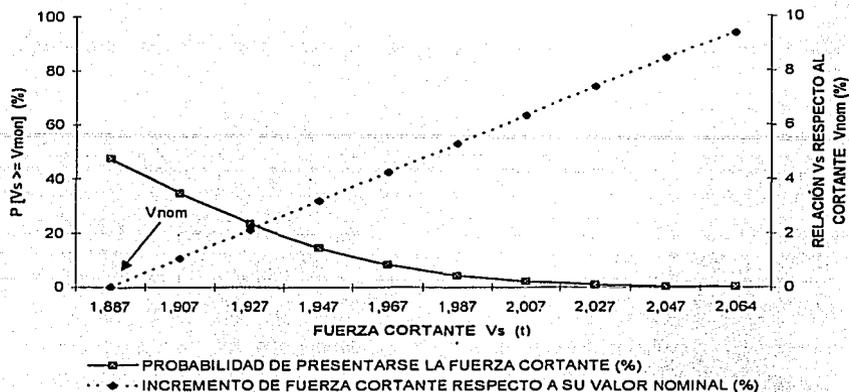


Figura 9.9 Probabilidad de excedencia del cortante en el apoyo 2, para la combinación de carga A y con el registro RS-3

En las figuras 9.7 a 9.9, se observa que los valores de incrementos de carga en la respuesta del puente debido a las incertidumbres en los parámetros estructurales que rigen el comportamiento de los aisladores cambian. En la tabla 9.5 se observa que el valor más desfavorable es para el registro sísmico RS-3 que es el que presenta las mayores aceleraciones. En este caso corresponderá tomar la decisión al diseñador sobre cuál valor de incremento de carga se requiere usar, de acuerdo al nivel de seguridad que se pretenda tener.

Tabla 9.5 Incrementos de carga del apoyo 2, para diseño por fuerza cortante, para la combinación de carga A

IDENTIFICACIÓN	ACELERACIÓN MÁXIMA (gals)	INCREMENTO DE CARGA, IC (%)
RS-1	436	3
RS-2	367	5
RS-3	497	7

El hecho de que las incertidumbres en las propiedades estructurales de los aisladores produzcan incrementos de carga, sugiere pensar que su uso no representa ventaja con respecto al caso en que no se incluyeran. En la figura 9.10 se presentan los valores de fuerza cortante en porcentaje, para los casos en los que no se incluyan los aisladores, se incluyan con propiedades nominales, y al considerar incertidumbres. Es posible observar la ventaja de su utilización en el puente a través de una importante reducción de este elemento mecánico, permitiendo colocar secciones transversales de menor tamaño y por lo mismo más económicas y de menor peso.

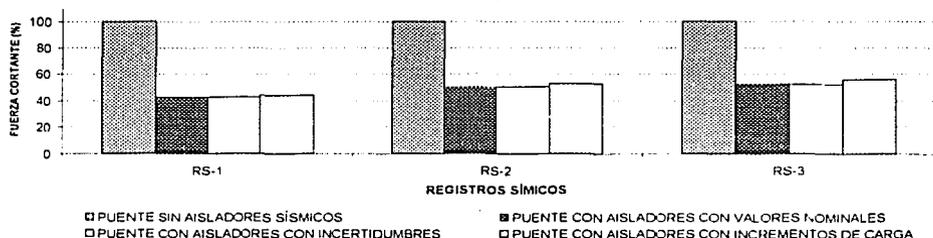


Figura 9.10 Porcentaje de la fuerza cortante en el apoyo 2, debido a los tres registros sísmicos, para la combinación de carga A

En la figura 9.10 se observa cómo el diseño del apoyo 2 por fuerza cortante en la dirección X de análisis sísmico, se hace para valores que representan alrededor del 44 al 56 por ciento de la respuesta que se presentaría si el puente no tuviera aisladores, logrando menores secciones geométricas en su correspondiente pila.

En forma similar al caso de la fuerza cortante, se estudia el momento flexionante en el apoyo 5 del puente, aplicando los registros sísmicos RS-1, RS-2 y RS-3, para la combinación de carga B. Los resultados se presentan en las figuras 9.11 a 9.13 respectivamente.

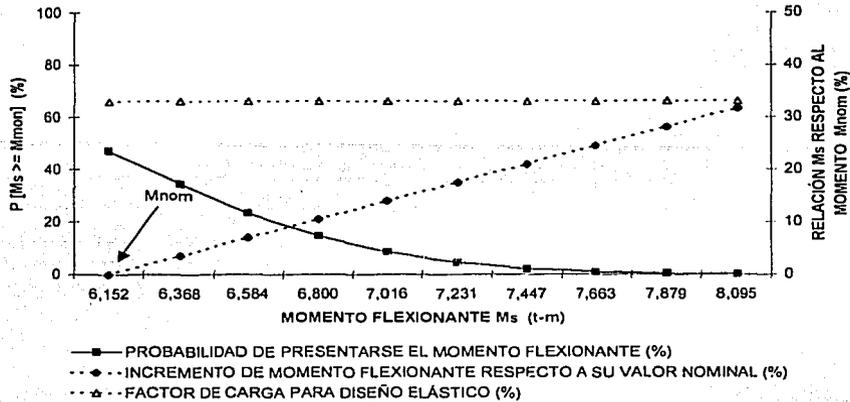


Figura 9.11 Probabilidad de excedencia del momento flexionante en el apoyo 5, para la combinación de carga B y con el registro sísmico RS-1

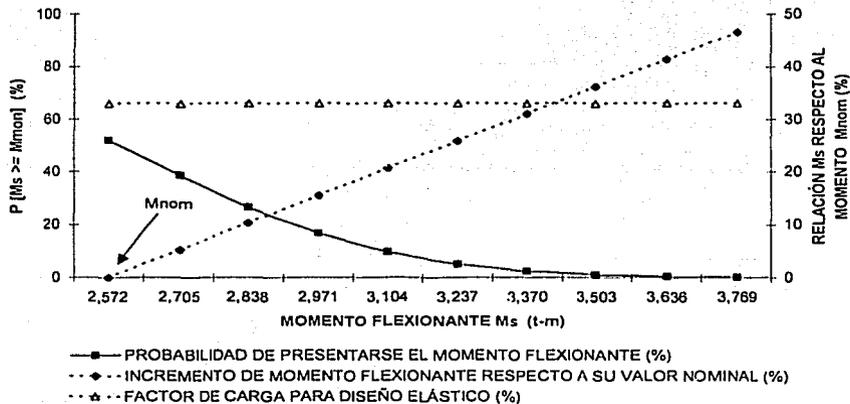


Figura 9.12 Probabilidad de excedencia del momento flexionante en el apoyo 5, para la combinación de carga B y con el registro sísmico RS-2

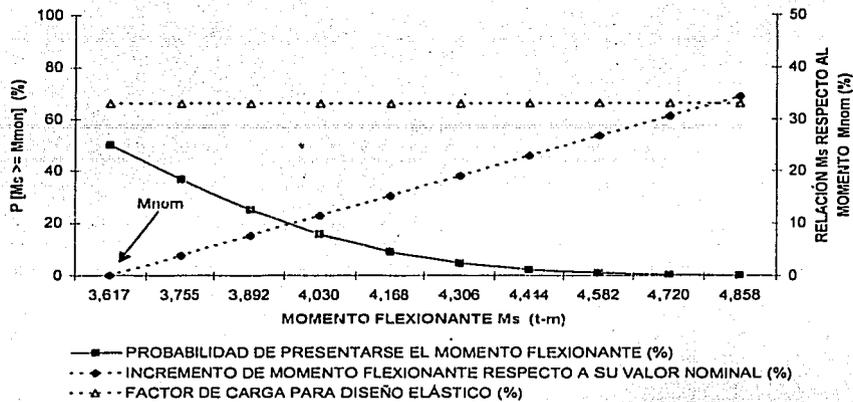


Figura 9.13 Probabilidad de excedencia del momento flexionante en el apoyo 5, para la combinación de carga B y con el registro sísmico RS-3

En las figuras 9.11 a 9.13, se observa que a mayores valores de momento flexionante su probabilidad de presentarse disminuye notablemente. En la tabla 9.6, se observa cómo los valores de los incrementos de carga son mayores respecto a los que se presentan para la fuerza cortante. Inclusive estos valores exceden al que se emplearía en el diseño elástico, cuyo factor se representa con línea discontinua horizontal, correspondiente al 33% [Ref. 1] al utilizar el criterio de diseño por esfuerzos permisibles.

Se podrían considerar valores de incremento de carga para diseño por momento flexionante para este apoyo, mayores a los establecidos por las normas AASHTO [Ref. 1] para el diseño por esfuerzos permisibles, obteniendo una sección geométrica que satisfaga un cierto nivel de probabilidad de presentarse dicho incremento, en el elemento mecánico con incertidumbres desfavorables, lo cual dependerá del ingeniero diseñador.

Tabla 9.6 Incrementos de carga del apoyo 5, para diseño por momento flexionante, para la combinación de carga B

IDENTIFICACIÓN	ACELERACIÓN MÁXIMA (gals)	INCREMENTO DE CARGA, IC (%)
RS-1	436	25
RS-2	367	36
RS-3	497	27

En la figura 9.14, se presenta el porcentaje de variación del momento flexionante en el apoyo 5 para la combinación de carga B. Se observa la ventaja que representa emplear aisladores sísmicos, ya que con ellos, este apoyo se diseñaría para valores entre el 9 y el 23 % de los que se obtienen si no se emplean aisladores.

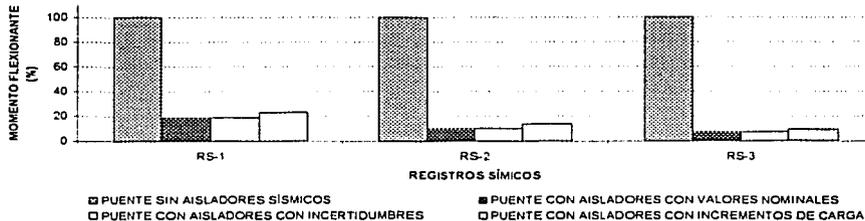


Figura 9.14 Porcentaje de variación del momento flexionante en el apoyo 5, para la combinación de carga B

En la tabla 9.7, se presentan los incrementos de carga para los elementos mecánicos que se indican en los apoyos 2 y 5. Se puede observar que estos valores son muy diferentes para cada registro sísmico y para cada combinación de carga. Estos resultados sugieren estudiar en forma similar a todos los apoyos del puente, así como a los elementos estructurales que lo forman, para lograr un diseño más racional dentro de límites de seguridad que determine el diseñador.

Tabla 9.7 Porcentaje de incrementos de cargas debidos a incertidumbres en los aisladores sísmicos en los apoyos 2 y 5 del puente, para diseño por fuerza cortante y momento flexionante

REGISTRO SÍSMICO	APOYO 2				APOYO 5			
	COMBINACIÓN A		COMBINACIÓN B		COMBINACIÓN A		COMBINACIÓN B	
	Vs	Ms	Vs	Ms	Vs	Ms	Vs	Ms
RS-1	3	2	11	12	27	26	27	25
RS-2	5	6	10	7	26	23	52	36
RS-3	7	9	35	17	26	25	25	27

Con relación a los desplazamientos relativos que se presentan en un aislador sísmico, se estudian los desplazamientos lineales de los nudos que lo definen. Para este caso, se estudia la respuesta correspondiente al nudo 143 del cabezal y al nudo 175 de la superestructura, que forman parte del aislador número 7 del puente, como se observa en la figura 9.1, ubicado en el cabezal de la pila número 2.

Con la finalidad de obtener el desplazamiento relativo más desfavorable en el aislador sísmico, se mantendrá fijo uno de los nudos del aislador (el de la superestructura o el del cabezal), en una posición que corresponda a su valor medio sumando o restando tres veces su correspondiente desviación estándar, para colocarlo en una posición que lleve a un desplazamiento relativo más desfavorable.

El segundo nudo se desplazará desde su valor medio hasta una posición desfavorable que corresponda al restarle o sumarle tres veces su desviación estándar, logrando así el mayor desplazamiento relativo en el aislador sísmico, sin dejar de calcular la probabilidad de que se presente este desplazamiento, para ser comparado con el permisible que defina el diseñador, que para este caso es de 8.5 cm.

Un esquema para los desplazamientos de los nudos de un aislador, se observa en la figura 9.15

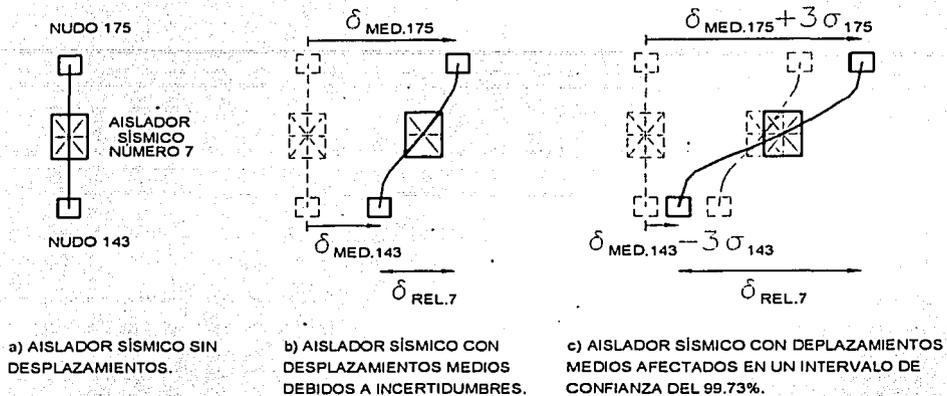


Figura 9.15 Esquema de desplazamientos relativos en un aislador sísmico

En la figura 9.16, con línea continua se presenta la probabilidad (eje vertical) de que el desplazamiento del nudo 143 sea igual o mayor al valor que se muestra en el eje horizontal ( $\delta_s$ ). El valor inicial de este eje es igual al valor medio menos tres veces su desviación estándar, correspondiente a un intervalo de confianza del 99.73% (6.91 cm) y el final es el desplazamiento medio (7.15 cm).

Con línea discontinua se muestra, en porcentaje, el valor del desplazamiento relativo del aislador con respecto al permisible del diseñador (8.5 cm), que considera la holgura permisible que se ha dejado entre las armaduras del puente, para disminuir cualquier posibilidad de colapso entre sí en un evento sísmico. Para este cálculo se consideró un desplazamiento máximo del nudo 175, correspondiente a su respuesta media más tres veces su desviación estándar (17.28 cm), con el fin de inducir el mayor desplazamiento relativo en el aislador sísmico. Con línea discontinua horizontal se representa en porcentaje el desplazamiento relativo máximo permisible (100%), con la finalidad de

observar si el desplazamiento calculado se excede o no de dicho valor, lo cual no se presenta para este caso.

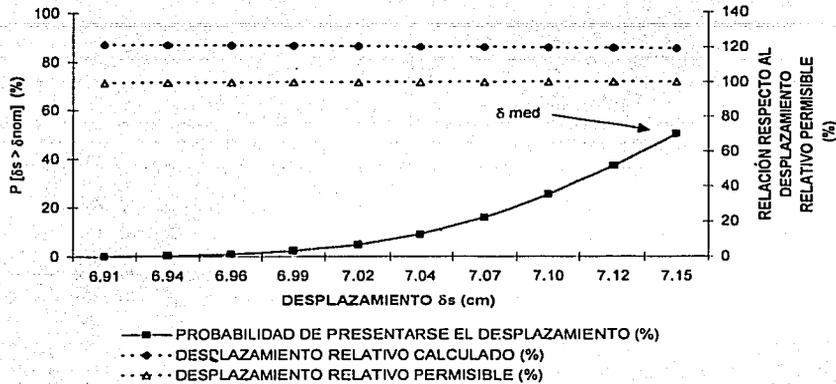


Figura 9.16 Probabilidad de excedencia del desplazamiento relativo del aislador sísmico 7, en su nudo 143 respecto al nudo 175, para la combinación de carga A y con el registro RS-1

En la figura 9.17, se presenta ahora el movimiento del nudo 175 del mismo aislador número 7, iniciando en una posición con valor igual al desplazamiento medio (14.16 cm) y al final con un valor correspondiente a su respuesta media más tres veces su desviación estándar (17.28 cm). Se observa con línea discontinua el porcentaje de excedencia con respecto al desplazamiento permisible, considerando un desplazamiento máximo del nudo 143 cuando su probabilidad de presentarse es del 0.13% (6.91 cm), correspondiente a un intervalo de confianza del 99.73%. Como se presentan valores mayores al permisible, se sugiere tomar las medidas pertinentes en su diseño.

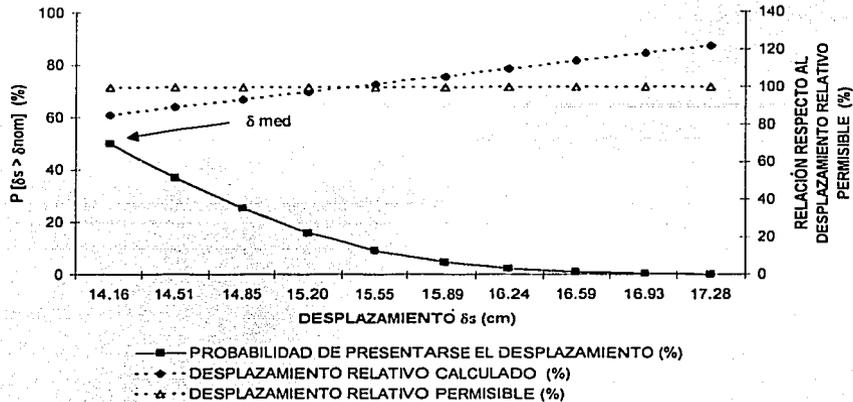


Figura 9.17 Probabilidad de excedencia del desplazamiento relativo del aislador sísmico 7, en su nudo 175 respecto al nudo 143, para la combinación de carga A y con el registro RS-1

Como se observa en las dos figuras anteriores, existe la probabilidad (0.13%) de que el valor permisible se exceda del orden del 22%, por lo que se podría considerar en el diseño del puente topes sísmicos que limiten este valor.

Cuando se aplican los registros sísmicos RS-2 y RS-3 al puente, en las figuras 9.18 a 9.21 se observa que el desplazamiento relativo en el aislador 7, es del orden del 55 y del 20% del desplazamiento permisible respectivamente, por lo que se cumple con el requisito del diseñador.

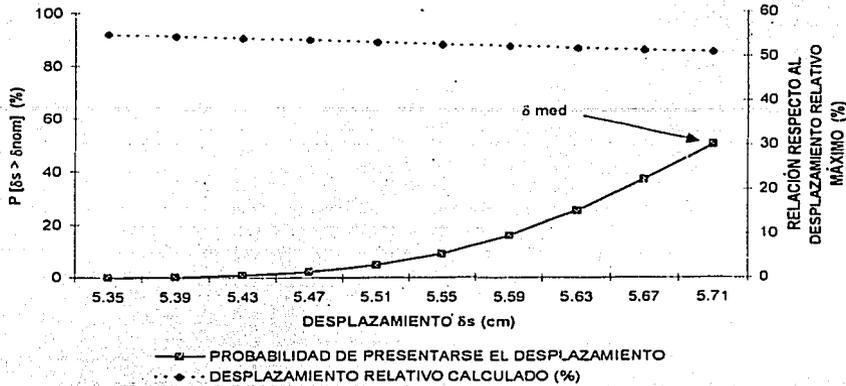


Figura 9.18 Probabilidad de excedencia del desplazamiento relativo del aislador símico 7, en su nudo 143 respecto al nudo 175, para la combinación de carga A y con el registro RS-2

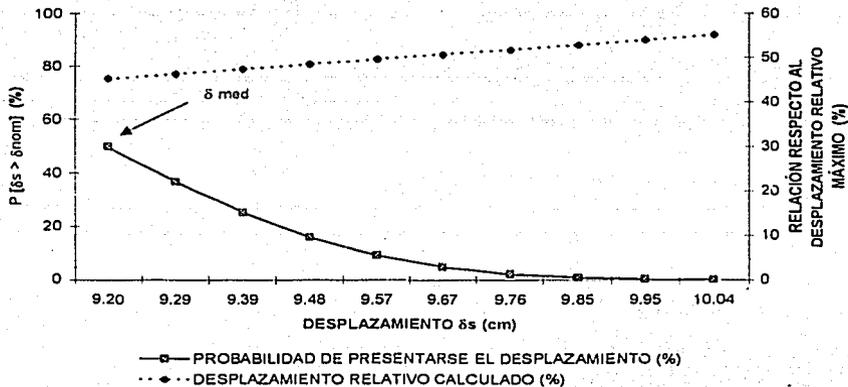


Figura 9.19 Probabilidad de excedencia del desplazamiento relativo del aislador símico 7, en su nudo 175 respecto al nudo 143, para la combinación de carga A y con el registro RS-2

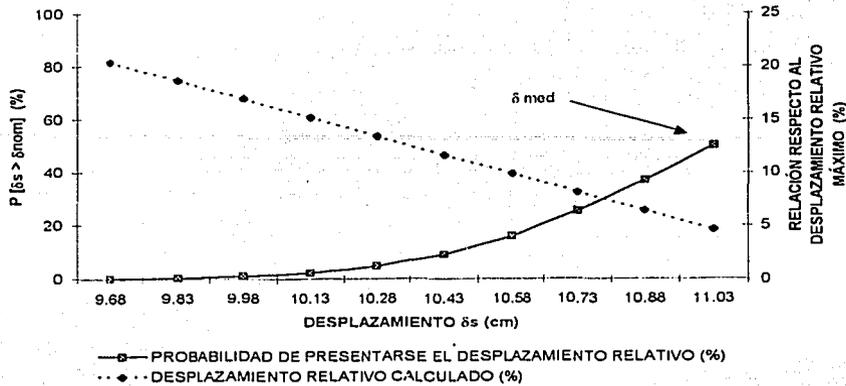


Figura 9.20 Probabilidad de excedencia del desplazamiento relativo del aislador sísmico 7, en su nudo 143 respecto al nudo 175, para la combinación de carga A y con el registro RS-3

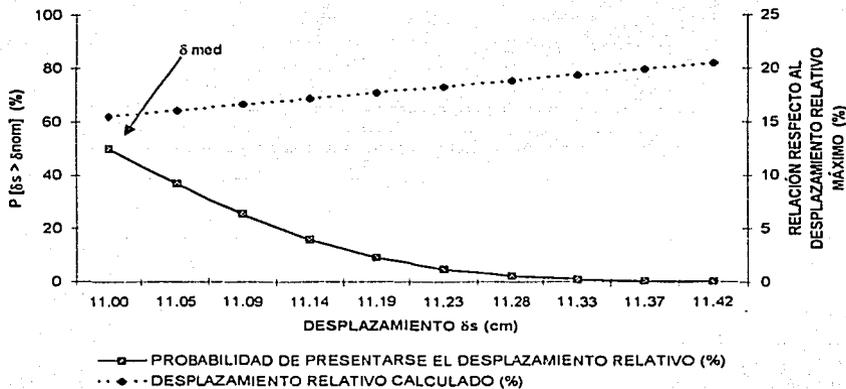


Figura 9.21 Probabilidad de excedencia del desplazamiento relativo del aislador sísmico 7, en su nudo 175 respecto al nudo 143, para la combinación de carga A y con el registro RS-3

Otro efecto de las incertidumbres es el periodo fundamental de vibración del puente. En la figura 9.22 se muestra el espectro de diseño del puente, considerando su ubicación en la zona sísmica D, con terreno tipo II [Ref. 22]. Con línea continua se presenta el espectro de diseño del puente, en el cual se consideran las reducciones que señala la normatividad para puentes [Ref. 1], como son las debidas al factor de comportamiento sísmico ( $Q = 2$ ) y el amortiguamiento provisto por el sistema de aislamiento (en 40%). En esta figura se señala, como era de esperarse, un incremento del periodo del puente, así como su disminución en las aceleraciones, como beneficio del uso de aisladores sísmicos.

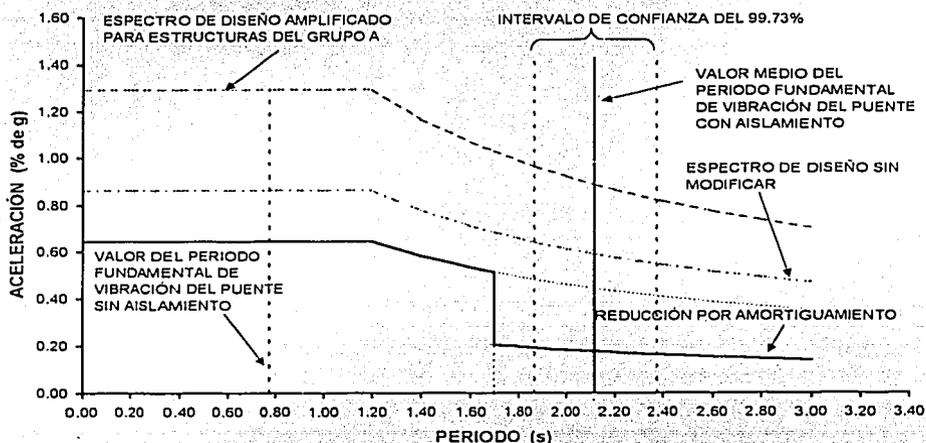


Figura 9.22 Espectro de diseño del puente en zona sísmica D y terreno tipo II

Considerando incertidumbres en los aisladores, el valor medio del periodo fundamental de vibrar del puente es 2.12 s (para aceleraciones de 0.18g), como se observa en la figura anterior, además en un intervalo de confianza del 99.73%, se muestran sus valores del periodo (1.88 s y 2.38 s), empleando su correspondiente desviación estándar (0.08 s) del valor medio.

Así, al considerar las incertidumbres en las propiedades que definen el comportamiento estructural de los aisladores, se puede observar que las aceleraciones espectrales del puente se podrían disminuir un 11% (de 0.18g a 0.16g), o en el aspecto más desfavorable, incrementarse un 5% (de 0.18g a 0.19g) para el intervalo de confianza antes señalado.

La probabilidad de que se presente este incremento en las aceleraciones es del 0.13%, lo que a su vez se reflejaría en un aumento en las fuerzas sísmicas en el puente (5%), las cuales quedan cubiertas por los factores que se sugieren en las normas AASHTO [Ref. 1] para diseño por esfuerzos permisibles (33%).

## 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se estudió un puente vehicular de importancia, ubicado en una zona altamente sísmica de la República Mexicana, siendo el primero que se diseña desde su proyecto original con dispositivos de aislamiento para lograr un mejor comportamiento estructural durante un sismo.

En su análisis dinámico, se consideró la variabilidad estadística de los parámetros que definen las propiedades estructurales de los aisladores sísmicos. Para ello se aplicó el Método de Concentraciones Puntuales, con la finalidad de comparar si la respuesta calculada con valores nominales está dentro de los límites que toleran el considerar las incertidumbres de los mismos parámetros, así como su probabilidad de excedencia. Se analizaron: desplazamientos, elementos mecánicos y periodo fundamental de vibración.

Para los elementos mecánicos, se obtuvieron valores de incrementos de carga diferentes para cada apoyo, ante la acción de diferentes registros sísmicos, lo que conduce a un diseño más racional dentro de los límites de seguridad que defina el diseñador.

Se observaron los beneficios del sistema de aislamiento sísmico que se añadió al puente, principalmente en la disminución de elementos mecánicos y cambio favorable de su periodo fundamental de vibración, cuidando los estado límite de servicio.

De este estudio, se puede concluir lo siguiente:

- ✓ El Método de Concentraciones Puntuales para análisis no determinista, en su aplicación reduce el trabajo numérico de las simulaciones que se deben hacer en función al número de parámetros que definan el comportamiento estructural de los aisladores sísmicos en el puente. Tiene la virtud de permitir auxiliarse de una herramienta para el cálculo de la respuesta, como lo es un programa de cómputo para análisis estructural.
- ✓ El análisis estadístico de la respuesta sísmica del puente produce resultados muy parecidos a su respuesta con valores nominales en los parámetros que definen el comportamiento estructural de los aisladores, en un intervalo de confianza del 99.73%, lo cual originó la obtención de diferentes incrementos de carga para cada tipo de respuesta, los que en su mayoría están cubiertos por la normatividad correspondiente al diseño.
- ✓ Las incertidumbres que se presentan en los valores nominales de los parámetros que definen el comportamiento de los aisladores, puede producir incrementos de carga, así como en los elementos mecánicos, que sugieren un diseño más racional de los elementos estructurales del puente, dentro de la seguridad que determine el ingeniero diseñador y la normatividad correspondiente.
- ✓ Aún cuando se consideren estos incrementos de carga en el diseño de elementos estructurales, los elementos mecánicos son menores a los obtenidos cuando la estructura no cuenta con aisladores sísmicos, logrando un diseño más económico, transmitiendo menor peso a la cimentación.

Para estudios posteriores, que tomen en cuenta las incertidumbres de los parámetros que intervienen en la respuesta de un puente con aisladores sísmicos, se recomiendan los siguientes aspectos:

- ✓ Los resultados obtenidos sugieren hacer un estudio similar al aquí presentado a todos los apoyos del puente, para lograr un diseño más racional dentro de los límites de seguridad que determine el diseñador, así como de todos los elementos estructurales que forman al puente.
- ✓ Calcular más incrementos de carga, para más puntos de la estructura, y observar cómo varían estos valores en la respuesta que pretenda estudiar, cuando se consideren incertidumbres en los parámetros estructurales.
- ✓ Tomar en cuenta las incertidumbres de otros parámetros nominales que intervienen en la obtención de la respuesta de interés, como sería en las acciones en la estructura, geometrías de elementos estructurales y propiedades de los materiales.
- ✓ Para los análisis dinámicos, contemplar otros registros sísmicos simulados, con periodos de recurrencia que contemplen su vida útil de la estructura, o mejor aún, con algún registro sísmico que se obtenga durante un evento de esta naturaleza, si se instrumentara el puente.
- ✓ Debe considerarse el tema de aislamiento sísmico en futuras normas de diseño para puentes, procurando: recomendaciones de modelado, análisis, diseño, comportamiento y mantenimiento de estos dispositivos.

## REFERENCIAS

1. American Association of State Highway and Transportation Officials, ***Guide Specifications for Seismic Isolation Design***, AASHTO, U.S.A.,2000.
2. Hong, H.P., ***An Efficient Point Estimate Method for Probabilistic Analysis***, Publication to Reliability Engineering and System Safety.
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. 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.

5. Jara J. M., ***Comportamiento de Estructuras con Masas Resonantes y Disipadores de Energía***, Tesis Doctoral, División de Estudios de Posgrado, FI-UNAM, 1998.
6. Farzad N. y Kelly, J. M., ***Design of Seismic Isolated Structures (from theory to practice)***, John Wiley and Sons, Inc., EUA 1999.
7. Kelly, J. M., ***Earthquake Resistant Design with Rubber***, Springer-Verlag London Limited 1993.
8. Skinner R., Robinson W. y McVerry G., ***An introduction to Seismic Isolation***, John Wiley and Sons, Great Britain, 1993.
9. Turkington D.H., Carr A.J., Cooke y Moss P., ***Seismic Design of Bridges on lead rubber bearings***, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 12, EUA, 1989.
10. Turkington D.H., Carr A.J., Cooke y Moss P., ***Design Method for Bridges on Lead Rubber Bearings***, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 12, EUA, 1989.
11. International conference of building officials, ***Uniform Building Code***, International conference of building officials, 1994, EUA.
12. Gómez S. y Tena A., ***Aislamiento Sísmico de Escuelas Existentes Utilizando Criterios de Diseño Sísmo Resistente Estáticos***, XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México, 1999.
13. R.J. Watson Inc., ***Isolation Bearing Devices for Bridges and Other Civil Engineering Structures***, R.J Watson, Inc., EUA, 2002.

- 
14. American Society for Testing and Materials, ***American Society for Testing and Materials***, EUA.
  15. American Welding Society, ***American Welding Society***, EUA.
  16. Moreno, A., ***Elementos de Probabilidad y Estadística***, Representaciones y Servicios de Ingeniería, 1976.
  17. Padilla, A., ***Evaluación de un requisito complementario a los criterios de diseño por torsión del RCDF en sus ediciones 1995 y 2001***, Tesis de maestría, Programa de Posgrado en Ingeniería, UNAM, 2002.
  18. Computers and Structures Inc., ***SAP2000 Analysis Reference***, Berkeley Cal., EUA., 1996.
  19. Watson, R.J., ***Park Hill Prototype Testing Report***, Bridge and Structural Engineered Systems, 1995.
  20. Watson, R.J., ***Seismic Isolation Bearing Test Report***, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research Structural Engineering and Earthquake Simulation Laboratory, Buffalo, 2002.
  21. 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.
  22. Comisión Federal de Electricidad, ***Manual de Diseño de Obras Civiles, Capítulo: Diseño por Sismo***, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, 1993.
  23. Wilson, E., ***Three Dimensional Dynamic Analysis of Structures, with Emphasis on Earthquake Engineering***, Berkeley, Cal., EUA, 1997.
-

- 
24. Meli, R., *Bases para los Criterios de Diseño Estructural del Proyecto del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, Instituto de Ingeniería, 1976.