

Universidad Autónoma de Querétaro

FACULTAD DE INGENIERIA

EVALUACION DE LA UTILIZACION DE DISPOSITIVOS DE PROTECCION SISMICA EN PUENTES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA
ANGEL VICTOR ZARATE GALVAN

QUERETARO, QRO.

ABRIL 13 DE 1997

No Adq. 456262

No. Título _____

Clas. 624.25

236e



ACUERDO/36496/97
MARZO/18/97

C. ANGEL VICTOR ZARATE GALVAN,
P R E S E N T E .

En relación a su atenta solicitud relativa a la selección de Te
sis con el Título "EVALUACION DE LA UTILIZACION DE DISPOSITIVOS DE -
PROTECCION SISMICA EN LA RESPUESTA DE PUENTES ANTES SISMOS".

El contenido aceptado por el H. Consejo Académico es el siguien
te:

1. INTRODUCCION
2. DISPOSITIVOS DISIPADORES DE PROTECCION ACTIVA
 - 2.1 Dispositivos Disipadores de Protección Activa
 - 2.1.1 Masa Activa
 - 2.1.2 Tendones Activos
 - 2.1.3 Dispositivos de Fricción
 - 2.1.4 Apéndices aerodinámicos
 - 2.2 Dispositivos Disipadores de Protección Pasiva
 - 2.2.1 Osciladores Resonantes
 - 2.2.2 Dispositivos aisladores de Base
 - 2.2.2.1 Características Generales de los Aisladores de Base
 - 2.2.2.2 Tipos de Dispositivos aisladores de Base
 - a) Dispositivo elástico
 - b) Dispositivo Hule-laminado
 - 2.2.2.3 Función de los Dispositivos aisladores
 - 2.2.3 Dispositivos Disipadores de Energía
 - 2.2.3.1 Tipos de Dispositivos Disipadores y su Función
 - 2.2.3.2 Amortiguadores de Acero
 - 2.2.3.3 Vida a la Fatiga de Amortiguadores de Acero
 - 2.2.3.4 Amortiguadores de Extrusión de Plomo
3. DISPOSITIVOS DISIPADORES ACTUALES
 - 3.1 Dispositivos elásticos
 - 3.1.1 Dispositivo Tipo Disco
 - 3.1.2 Dispositivo Tipo Sleeve



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería



- 3.2 Dispositivos Amortiguadores
 - 3.2.1 Amortiguador Hidráulico
 - 3.2.2 Dispositivo Transmisor de Impacto
- 4. ANALISIS NUMERICO
 - 4.1 Generalidades
 - 4.2 Marco Teórico
 - 4.3 Descripción de la Estructura
 - 4.4 Estimación de la Fuerza Sísmica
 - 4.5 Creación del Modelo
 - 4.6 Criterios de Simulación
 - 4.7 Resultados
- 5. CONCLUSIONES
- 6. BIBLIOGRAFIA:

- Manual de Obras Civiles CFE
- American Association of State Highway and Transportation -
Officials Standard Especifications for Highway Bridges, fif
teen edition, 1994.
- Join Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures.-
Crarles W Roeder
- Diseño Estructural. Dr. Roberto Meli P.
- Comportamiento Sísmico en puentes sobre Apoyos Elastomeri-
cos. UNAM
- Seismic Isolation and Energy Dissipation Devices for Higway
Bridges. Dr. Ing. Giorgio
Macchi. Seminario Internacional de Puentes

También hago de su conocimiento las disposiciones de nuestra Fa-
cultad, en el sentido de que antes de su Examen Profesional deberá cum
plir los requisitos de nuestra Legislación y que el presente oficio se
imprima en todos los ejemplares de su Tesis.

ATENTAMENTE,

M.I. JOSE JESUS HERNANDEZ ESPINO,
DIRECTOR.

c.c.p. Archivo

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
QUERÉTARO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE DISPOSITIVOS DE
PROTECCION SÍSMICA EN PUENTES.**

ÁNGEL VÍCTOR ZÁRATE GALVÁN

DEDICATORIA.

Principalmente, agradezco a Dios por todo lo que me ha brindado, al igual que a mis padres y hermanos por el apoyo y la confianza que siempre han tenido en mí. Así como a todos mis familiares y amigos que me ayudaron o apoyaron de cualquier manera para finalizar el presente trabajo.

De manera especial, agradezco al Ing. Miguel Barousse Moreno e Ing. Gabriel Ventura Suarez, así como al Director de mí Facultad Ing. José Jesús Hernandez Espino, por la ayuda y confianza que me dieron para concluir el mismo, puesto que como todos sabemos, detrás de todo proyecto existen Grandes Personas. De igual manera a todo el personal que me auxilió del Instituto Mexicano del Transporte y la Universidad Autónoma de Querétaro.

Es por ello que la presente tesis esta dedicada a todas las personas mencionadas anteriormente.

Gracias.

Ángel Víctor Zárete Galván.

INDICE

1.- INTRODUCCIÓN	3
2.- DISPOSITIVOS DISIPADORES DE PROTECCIÓN SÍSMICA	5
2.1.- DISPOSITIVOS DISIPADORES DE PROTECCIÓN ACTIVA.	5
a) Masa activa.	
b) Tendones activos.	
c) Dispositivos de fricción.	
d) Apéndices aerodinámicos.	
2.2.- DISPOSITIVOS DISIPADORES DE PROTECCIÓN PASIVA.	6
2.2.1 Osciladores resonantes.	6
2.2.2 Dispositivos aisladores de base.	6
2.2.2.1 Características generales de los aisladores de base.	7
2.2.2.2 Tipos de dispositivos aisladores de base.	8
a) Dispositivo elastomérico.	9
b) Dispositivo hule-láminado.	11
c) Dispositivo hule-plomo	13
2.2.2.3 Función de los dispositivos aisladores.	14
2.2.3. Dispositivos disipadores de energía.	15
2.2.3.1. Tipos de dispositivos disipadores y su función.	15
2.2.3.2. Amortiguadores de acero.	16
2.2.3.3. Vida a la fatiga de amortiguadores de acero.	18
2.2.3.4. Amortiguadores de extrusión de plomo.	19

3.- DISPOSITIVOS DISIPADORES ACTUALES.	22
3.1. DISPOSITIVOS ELÁSTICOS.	23
3.1.1. Dispositivo tipo disco.	23
3.1.2. Dispositivo tipo Sleeve.	26
3.2. DISPOSITIVOS AMORTIGUADORES.	28
3.2.1. Amortiguador Hidráulico.	28
3.2.2. Dispositivo transmisor de impacto.	31
4.- ANÁLISIS NUMÉRICO.	33
4.1 Generalidades.	33
4.2 Marco teórico	33
4.3 Descripción de la estructura.	34
4.4 Estimación de la fuerza sísmica.	35
4.5 Creación del modelo.	39
4.6 Criterios de simulación.	40
4.7 Resultados.	43
5.- CONCLUSIONES.	58
6.- REFERENCIAS.	60
7.- ANEXOS.	61

I.- INTRODUCCIÓN.

El uso de dispositivos disipadores de protección sísmica, se inicia desde el siglo pasado, pero sus aplicaciones son relativamente recientes probablemente debido a la falta del equipo necesario, tanto para analizar y diseñar, como para construir, e incluso instrumentar. Se tienen indicios que la primera utilización de estos dispositivos fue en Italia en 1974 en la estructura de un puente carretero, donde se observó un comportamiento satisfactorio durante una excitación sísmica. Como se puede observar, la utilización de estos dispositivos es relativamente reciente.

En el diseño de puentes en zonas sísmicas, donde la fuerza inducidas por tal excitación es un factor importante a considerar, la resistencia ante sismos se puede obtener con base en las siguientes filosofías de diseño:

- Diseñar la estructura contra un sismo probablemente esperado, donde se busca que el comportamiento de la estructura se mantenga dentro del rango elástico por efecto de dicha excitación.
- Concebir la estructura de tal manera que cuando se presente un sismo intenso, algunas zonas del puente alcancen un comportamiento plástico, y por medio de procesos de ductilidad se disipe alguna cantidad de la energía producida por la fuerza sísmica, impidiendo así el colapso de la misma.
- Considerar en el análisis, diseño y construcción, dispositivos disipadores de la energía sísmica en la estructura, de tal manera que cuando se produzca una excitación, se disminuyan los esfuerzos internos que se generarán en el sistema debido a tal fenómeno.

En el primer criterio se obtienen estructuras de dimensiones relativamente mayores, las cuales arrojan un incremento considerable en el costo de la estructura.

Con respecto al segundo criterio, se observa una desventaja desde el punto de vista estructural cuando se presente un sismo intenso, ya que el puente disipará la energía mediante grandes deformaciones, provocando así un incremento considerable en las fuerzas inducidas en los apoyos lo cual debe ser considerado en el diseño. Por otro lado, cuando el puente tiene grandes deformaciones e incluso la aparición de articulaciones plásticas, será necesario dar al puente un mantenimiento mayor lo cual puede resultar muy costoso.

El tercer criterio, aunque con un incremento relativo en el costo inicial de la estructura, arrojará una estructura estable y con un comportamiento estructural más seguro a lo largo de la vida útil de la estructura.

Es necesario tener en cuenta que el ingeniero dedicado al proyecto de puentes, no conoce la fuerza sísmica que ocurrirá en determinado momento, por lo cual requiere de la ayuda de diferentes herramientas para estimar la magnitud de tal excitación, sin embargo, las lecciones de la historia nos hacen ver lo difícil que resulta predecir las fuerzas sísmicas, por ejemplo el temblor de septiembre de 1995 ocurrido en la ciudad de México, donde se tuvo que las fuerzas sísmicas triplicaron su valor esperado. Ante tal escenario, el ingeniero tiene que construir estructuras que sean capaces de comportarse adecuadamente, ante la posible ocurrencia de sismos intensos, buscando elementos tecnológicos como es el caso de disipadores y aisladores, los cuales constituyen un elemento importante para mejorar el comportamiento de estructuras ante sismos.

El objetivo de esta tesis es hacer una descripción de algunos de los dispositivos existentes en el mundo, y realizar un modelo numérico para evaluar la efectividad de dichos dispositivos en la respuesta sísmica de los puentes.

2.- DISPOSITIVOS DISIPADORES DE PROTECCIÓN SÍSMICA.

La elección del tipo de dispositivo se basa en el comportamiento que se pretende obtener en la estructura, es decir:

a) Limitar las aceleraciones que se transmiten a la estructura, reduciendo así las fuerzas internas (dispositivos aisladores).

b) Tender o hacer que los miembros de la estructura trabajen juntos con la finalidad de disipar energía acorde a las propiedades de cada elemento (dispositivos disipadores de energía), los cuales se comentan más a detalle en páginas posteriores.

Los sistemas de protección sísmica se clasifican, en función de su comportamiento, de la siguiente manera:

- Dispositivos de protección activa.
- Dispositivos de protección pasiva.

2.1.- DISPOSITIVOS DISIPADORES DE PROTECCIÓN ACTIVA.

Este tipo de dispositivos reducen la respuesta sísmica de la estructura, mediante la aplicación de reacciones externas, ésto se logra por medio de sensores que se colocan en la estructura los cuales registran las excitaciones sísmicas y mandan una señal a equipo computarizado, el cual envía información para inducir reacciones externas a la estructura por medio de elementos mecánicos externos, contrarrestando así la excitación sísmica. Los principales sistemas activos son:

- Masa activa
- Tendones Activos
- Dispositivos de fricción activo
- Apéndices aerodinámicos.

Los dispositivos de protección activa se utilizan en edificios, lo cual cae fuera de los alcances de éste estudio.

2.2. DISPOSITIVOS DE PROTECCION PASIVA.

Este tipo de dispositivos se caracterizan por tener la capacidad de reducir las respuestas sísmicas en las estructuras. Acorde a su función se denominan:

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

2.2.1. Oscilador resonante.

Es una masa adicional que se coloca en la estructura, generalmente sobre el último nivel o parte más alta, con ciertas propiedades dinámicas para reducir la respuesta de la misma.

2.2.2. Dispositivos aisladores de base.

Son elementos que se colocan habitualmente entre la cimentación y la estructura, para aislar los movimientos de ambos sistemas. Algunos de estos sistemas son apoyos elastoméricos; laminados, simples o de corazón de plomo. El uso de estos dispositivos se muestra en la figura 1.

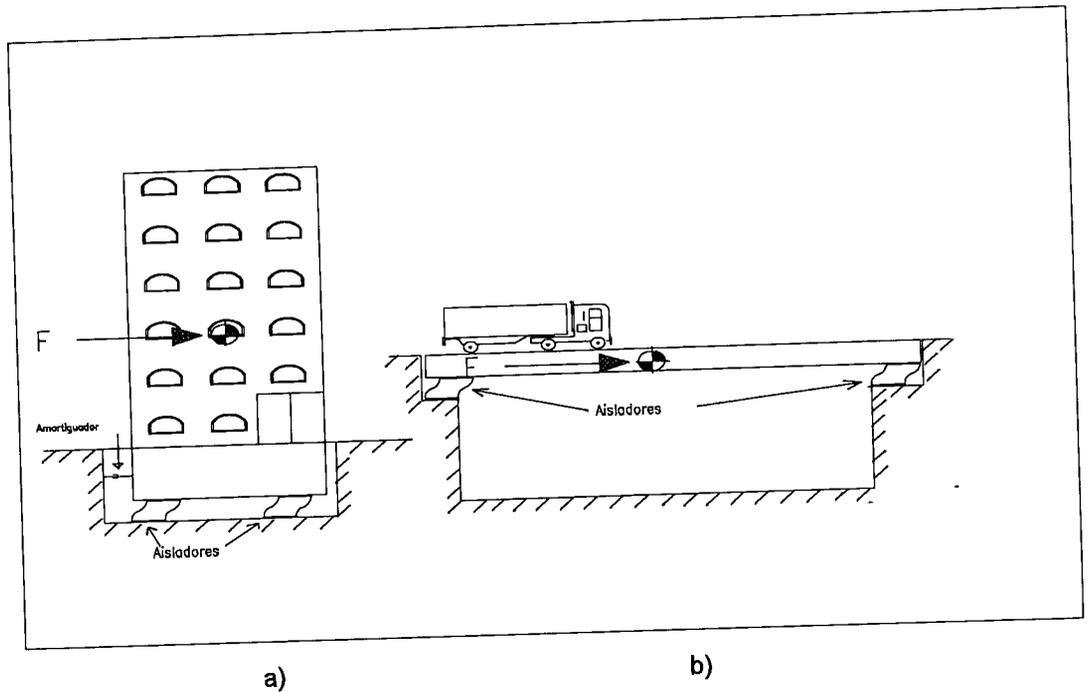


Fig. 1 Dispositivos aisladores para diferentes tipos de estructuras.

2.2.2.1. Características generales de un aislador.

La respuesta de la estructura dependerá del tipo y colocación del aislador. El uso de éstos incrementa la flexibilidad de la estructura, ocasionando aumento en los desplazamientos, lo cual frecuentemente es indeseable, teniendo con esto la necesidad de colocar dispositivos que disminuyan los desplazamientos (amortiguadores), reduciendo la efectividad de los dispositivos aisladores, tal como se observa en la figura 1 a.

La flexibilidad de la estructura esta íntimamente asociada al grado de amortiguamiento, así para una bajo amortiguamiento, los desplazamientos en la estructura pueden ser considerables, reduciéndolos al aumentar el amortiguamiento y logrando así disminuir la utilización de dispositivos secundarios para el control de los desplazamientos.

La vida útil esperada de un aislador se encuentra en un rango de 30 a 80 años, en el cual deberá ser capaz de soportar excitaciones producidas por diferentes fenómenos (cargas vivas, viento, sismo, etc.), así como intemperismo, corrosión, etc.

En algunas estructuras, dependiendo de los tipos de dispositivos aisladores utilizados, podemos obtener comportamientos lineales o bilineales, la cual está en función de la rigidez y amortiguamiento de los dispositivos utilizados o considerados en el análisis de la estructura, es decir, algunas estructuras utilizarán un sólo tipo de dispositivo el cual a su vez proporcionará un nivel de amortiguamiento acoplado, obteniendo así un sistema de amortiguamiento lineal. Mientras que otro tipo de estructuras, además de utilizar el amortiguamiento de los dispositivos, entrará en función el de los apoyos, creando así otro tipo de dispositivo y por tanto teniendo un sistema de amortiguamiento bilineal. Tal como se observa en la figura 2.

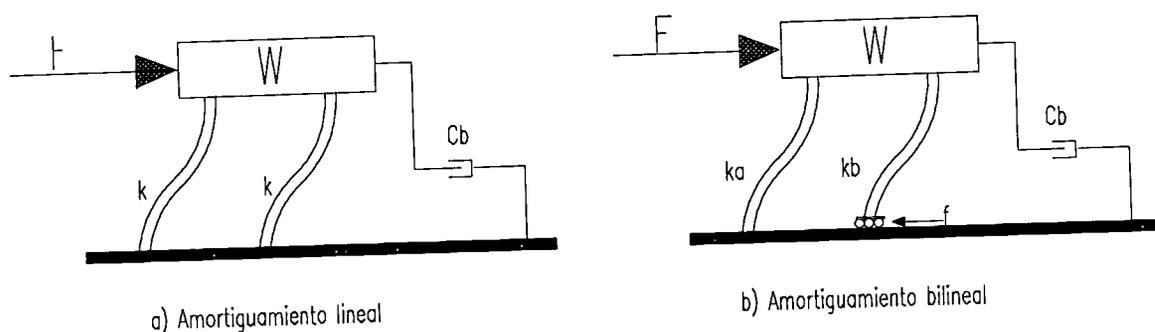


Fig. 2 Tipos de sistemas de amortiguamiento.

2.2.2.2. Tipos de dispositivos aisladores.

Dependiendo del comportamiento del dispositivo aislador lineal o bilineal, se tendrá una respuesta diferente de la estructura ante excitación sísmica. A continuación se describirán algunos de los diferentes tipos de apoyos que existen.

Dispositivo elastomérico.

Los dispositivos elastoméricos; son utilizados en construcciones como apoyos de asiento, los cuales proveen de una superficie uniforme, para los elementos estructurales, así como aislamiento sísmico y control de vibraciones, tal como se observa en la figura 3.

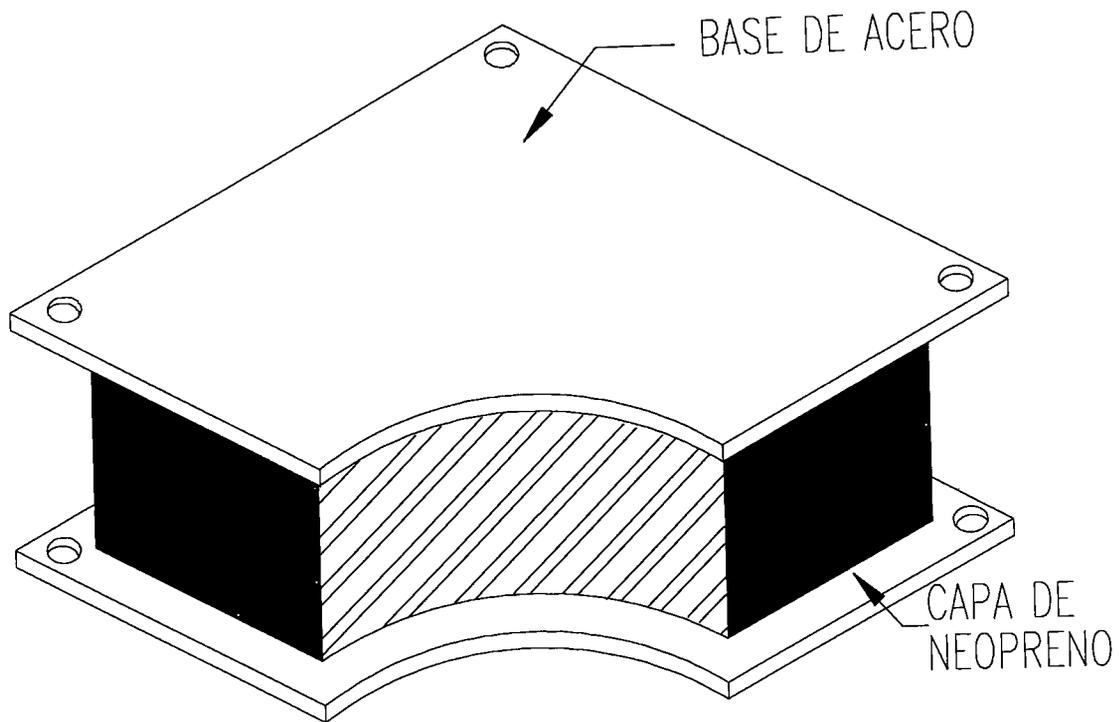


Fig. 3 dispositivos aislador (Elastómeros)

Estos tipos de dispositivos están constituidos de hule natural o hule sintético (cloropleno), los cuales proveen un comportamiento satisfactorio a la estructura bajo grandes deformaciones (propios en un dispositivo de aislamiento sísmico).

Ambos tipos de materiales proveen un similar comportamiento, excepto que el cloropleno se rigidiza a temperaturas mayores que el hule natural y es menos

susceptible bajo condiciones ambientales. Este tipo de elastómeros presentan un comportamiento no lineal alto y una relación esfuerzo-deformación, dependiente de la temperatura.

Aunque los elastómeros son materiales altamente no lineales, algunos diseños idealizan los apoyos elásticamente. Cabe mencionar que es una suposición errónea, pero su uso es fácil y proporciona una aproximación adecuada para un amplio rango de aplicaciones (lo cual es una de las principales hipótesis en el análisis numérico del presente trabajo). Para el diseño de los apoyos, es necesario conocer ciertas características de los dispositivos, tales como:

- Módulo de elasticidad E
- Módulo de cortante G
- Relación de poisson ν

Los cuales se pueden obtener de la literatura, observando comúnmente los siguientes valores:

$$\nu = 0.50$$

$$G = E / 4$$

Estos valores varían, debido a que las relaciones son empíricas y además dependen de las condiciones de fabricación. En aplicaciones ingenieriles, el elastómero se especifica acorde a su dureza, debido a que es fácil de medir y además se correlaciona nominalmente con un número importante de propiedades físicas de los elastómeros como:

- Módulo de cortante
- Módulo de compresión

La dureza es la medida de la recuperación elástica a la penetración de una aguja de acero, por lo que existe una relación entre la dureza y el módulo elástico. La dureza se mide en grados IRHD (International Rubber Hardness), acorde a estándares británicos, la escala IRHD tiene valores que van de 0 (muy suave) a 100 (muy duro); por ejemplo una goma esta clasificada alrededor de 30 de dureza, mientras que una llanta de automóvil se clasifica alrededor de 60 de dureza. Como es de esperar el módulo de elasticidad se incrementa en función de la dureza, tal como se puede observar en la siguiente tabla:

Dureza IRHD	Módulo de Elasticidad E	Módulo de Cortante G	K
50	23.5	6.1	0.75
60	37.7	10.2	0.60
70	63.2	14.3	0.55

El módulo de confinamiento de un elastómero es alrededor de 10000 Kg/cm², por lo cual para fines prácticos, el elastómero se puede considerar incompresible, mientras que el esfuerzo a tensión del elastómero excede de 100 Kg/cm², admitiendo grandes deformaciones a tensión, tal como es de esperar.

Dispositivo Hule - Laminado.

Los dispositivos de hule-laminado (elastoméricos), son los únicos dispositivos de aislamiento que combinan rigidez lineal y amortiguamiento lineal, los cuales están compuestos por capas de hule vulcanizado con placas de acero, tal como se observa en la fig. 4.

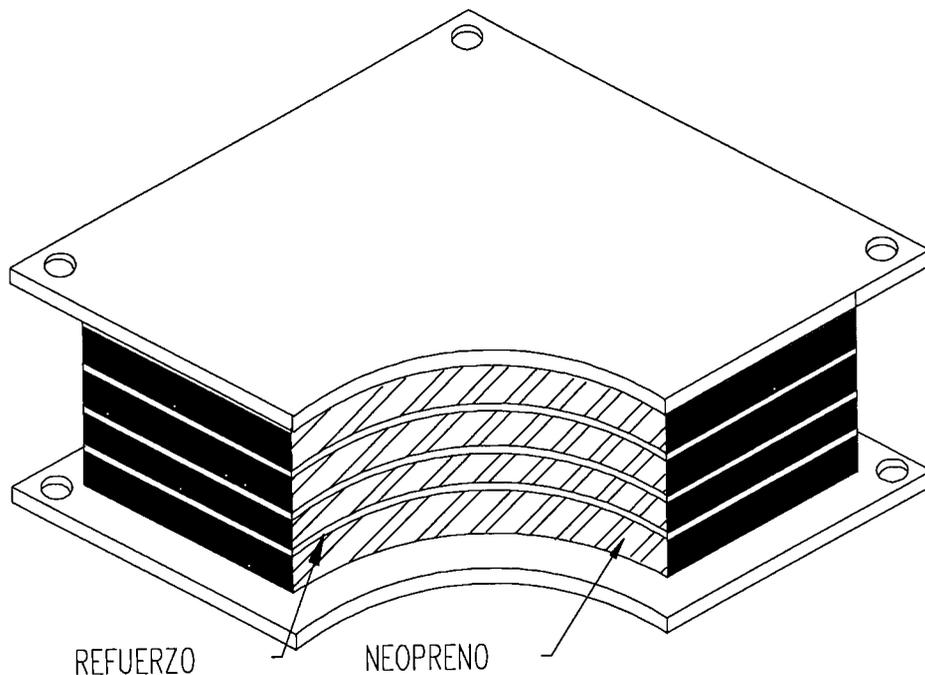


Fig. 4 Dispositivo aislador (Hule-laminado).

El amortiguamiento calculado en los dispositivos elastoméricos es aproximadamente el 5% del crítico, con ayuda de otro tipo de materiales se ha alcanzado hasta un 25%.

Este tipo de apoyos son diseñados para soportar grandes cargas verticales y proveer de una resistencia moderada a desplazamientos horizontales, debido al incremento de rigidez horizontal.

Cuando se aumenta el área del dispositivo, y se reduce el espesor de la capa, se incrementa la capacidad de carga del dispositivo, mientras que al aumentar el espesor del hule, se reduce la resistencia para movimientos horizontales. Este tipo de dispositivos son diseñados para resistir los esfuerzos a los que estará sometido, así como para proporcionar la flexibilidad horizontal requeridas por el aislamiento sísmico, la cual determina el valor máximo factible para el periodo de la estructura rígida T . Además las características del dispositivo determinan el desplazamiento horizontal

aceptable cualquiera. El amortiguamiento del aislador puede ser incrementado adoptando dispositivos secundarios, como la utilización de corazones de plomo, generando así apoyos hule-plomo, logrando una disipación de energía por medio de comportamiento de histéresis alto.

Dispositivo Hule -Plomo.

Los dispositivos hule-plomo, están compuestos de dispositivos elastoméricos con un corazón central de plomo, el cual proporciona en un principio una rigidez alta, y rigidez menor después de la fluencia del plomo, ésto es un dispositivo con amortiguamiento bilineal, presentándose en la figura 5.

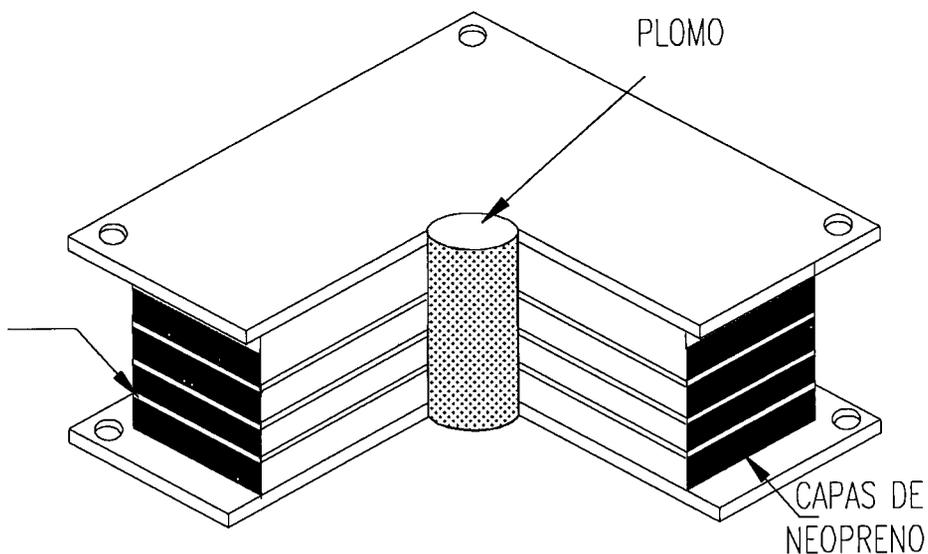


Fig. 5 Dispositivo aislador "Hule - plomo".

Al incrementar la capacidad de deformación plástica, se incrementa el amortiguamiento.

Cabe mencionar que las razones de la elección del plomo como material de adaptación en el aislador; es que fluye a esfuerzos relativamente cercanos a 155 Kg./cm², su comportamiento se aproxima a un sólido plástico lineal, aprovechando así las características mencionadas anteriormente, que permiten definirlo como el sólido ideal para tales dispositivos, y logrando así aumentar el amortiguamiento.

2.2.2.3. Función de los dispositivos aisladores.

Las función principal del elastómero cuando se presenta la excitación sísmica, es desacoplar el movimiento de la estructura y la cimentación, incrementando el periodo fundamental y reduciendo la respuesta de la estructura.

Al existir reducción de fuerzas inducidas por el sismo, (como se observará en el análisis numérico), permite reducir el daño a la estructura así como el riesgo a sus ocupantes.

Como se ha mencionado, un apoyo elastomérico presenta varios grados de rigidez, dependiendo de la magnitud y orientación de las cargas aplicadas, así como de su geometría es decir:

Una rigidez vertical alta nos permite controlar las cargas estáticas en función de la deflexión vertical esperada en el dispositivo, mientras que una rigidez horizontal alta, nos permite manejar los desplazamientos en tal sentido; en contraste una baja rigidez horizontal, permite que el dispositivo realice las funciones como aislador sísmico.

Para lograr los requerimientos de rigidez, es necesario que el apoyo sea estable, debido a que el dispositivo es un elemento esbelto, además la relación entre la rigidez axial contra la lateral es muy alta, provocando que el apoyo este sujeto a

pandeo debido al efecto de la fuerza cortante que inducirá el sismo, por lo tanto la posibilidad de inestabilidad en un dispositivo sísmico se incrementa comparado con los dispositivos no sísmicos (apoyos), lo anterior se debe al incremento de la altura necesaria del elastómero para permitir la disipación de la energía por medio del desplazamientos, como acontece en los dispositivos sísmicos.

2.2.3. Dispositivos disipadores de energía.

En tales dispositivos, su función es rigidizar la estructura y busca además concentrar en ellos la mayor parte de la energía. La disipación de la energía se logra por medio de:

- Comportamiento elastoplástico.
- Extrusión.
- Fricción.
- Comportamiento viscoelástico.

2.2.3.1. Tipos de dispositivos disipadores y su función.

Resortes. La utilización de resortes es adecuada para tener una fuerza restauradora lineal, pero la desventaja es la poca rigidez que se obtiene en tales dispositivos, por ello es necesario adicionar otro tipo de dispositivos tales como amortiguadores, logrando así, incrementar el amortiguamiento y disminuir los desplazamientos.

Amortiguadores histeréticos. Los amortiguadores histeréticos de alta capacidad, se basan en general en la capacidad de deformaciones plásticas de sólidos, generalmente plomo o acero. Estos deberán ser diseñados sin olvidar, que la

fuerza excitadora no deba ser capaz de producir la fatiga de los amortiguadores de acero, en las partes donde existe mayor concentración de esfuerzos, ó en las secciones soldadas debido a deformaciones excesivas. Las deformaciones cíclicas provocados por otro tipo de excitación como el viento, deberán ser controlados para evitar la fatiga prematura.

Amortiguadores de extrusión de plomo. Los amortiguadores de extrusión de plomo, se comportan como sistemas plásticos que operan a una fuerza cortante. Este tipo de sistema fluye bajo cargas pequeñas por lo que las expansiones térmicas se acomodan en el mismo sistema (lo cual se definirá más detalladamente en páginas posteriores).

Dispositivos de fricción. Los dispositivos de fricción, se comportan similarmente a los de extrusión, pero la desventaja es el cambio de coeficiente de fricción después de cierto periodo de tiempo, o la pérdida de su capacidad de desplazamiento debido a la carga constante a la que estará sometido.

En la actualidad los dispositivos de aislamiento más empleados son los amortiguadores histeréticos de acero, amortiguadores de extrusión de plomo, apoyos de hule laminado y apoyos de hule-plomo (apoyos elastoméricos). Es por ello que resulta de interés conocer las características de estos sistemas.

2.2.3.2. Amortiguadores de acero.

Este tipo de amortiguadores se construyen utilizando diferentes placas o secciones de acero, la cuales se unen con soldadura en lugares alejados de áreas donde exista deformación plástica, obteniendo así diferentes configuraciones de tales dispositivos. Un ejemplo de ellas, son las que se muestran en la figura 6.

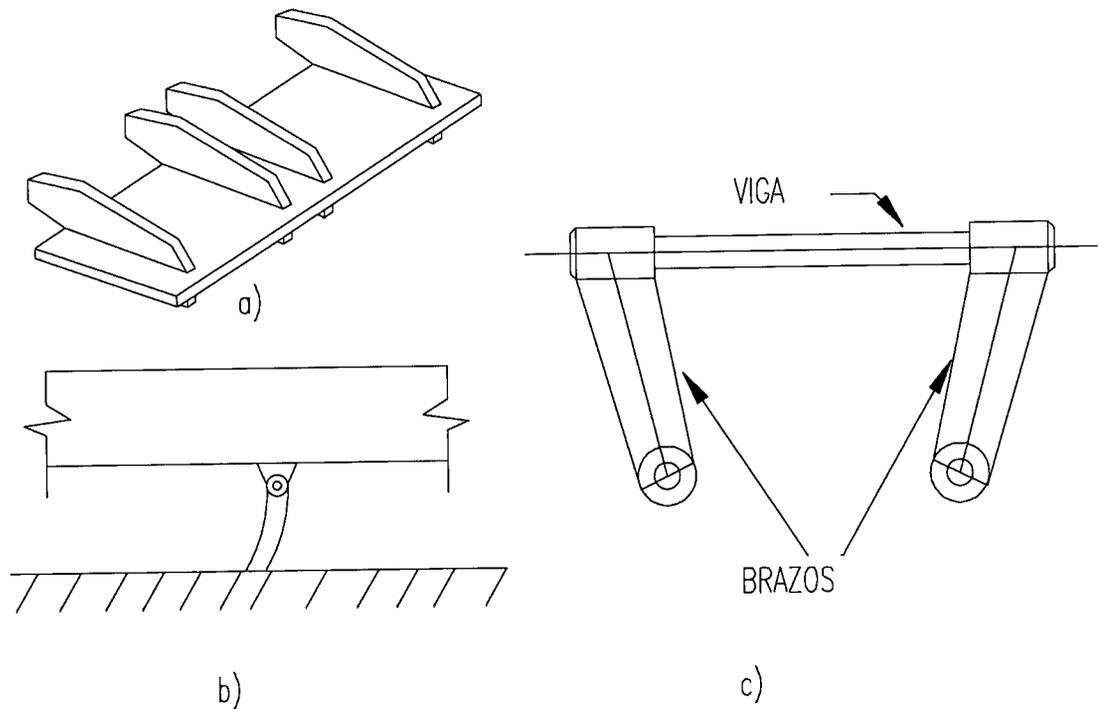


Fig. 6 Amortiguadores de acero.

Como se puede observar, acorde a su forma, tales dispositivos se clasifican en:

- Amortiguadores de momento uniforme fig. 6a.
- Amortiguadores de viga cónica fig. 6b.
- Amortiguadores de viga curva fig. 6c.

En este tipo de dispositivos se han obtenido buenos resultados en el comportamiento de diferentes estructuras cuando se presenta la excitación sísmica, con la ventaja principal de aprovechar el amortiguamiento propio del acero del acero.

Los amortiguadores de momento uniforme, fig. 6a, tienen un comportamiento sísmico similar al observado en estructuras de armaduras de acero de alta ductilidad, debido a que estos sistemas son diseñados para obtener una mayor resistencia a la

fatiga y operan en rangos más altos de deformación plástica, lo cual se logra através de la utilización de aceros de alta ductilidad, o formas de amortiguadores con rangos de deformación iguales, en cada sección transversal, que integran una viga plástica (amortiguamiento lineal), evitando así la concentración local de esfuerzos particularmente en la soldadura. Otro factor importante es considerar la fatiga de tales dispositivos, lo cual es una de las limitantes de las deformaciones permitidas durante un sismo, y considerar la fatiga se puede estimar la vida útil, logrando evitar la falla prematura ocasionada por cargas de viento, vibraciones, etc.

2.2.3.3. Vida a la fatiga de amortiguadores de acero.

Como se mencionó anteriormente, el cálculo de la vida a la fatiga de éste tipo de amortiguadores es un punto importante, por lo tanto es de interés conocer la vida a la fatiga del amortiguador.

La vida a la fatiga puede ser estimada de pruebas cíclicas en especímenes simples y de deformaciones cíclicas máximas nominales, obteniendo una curva esfuerzos-ciclos, como la que se observa en la figura. 7.

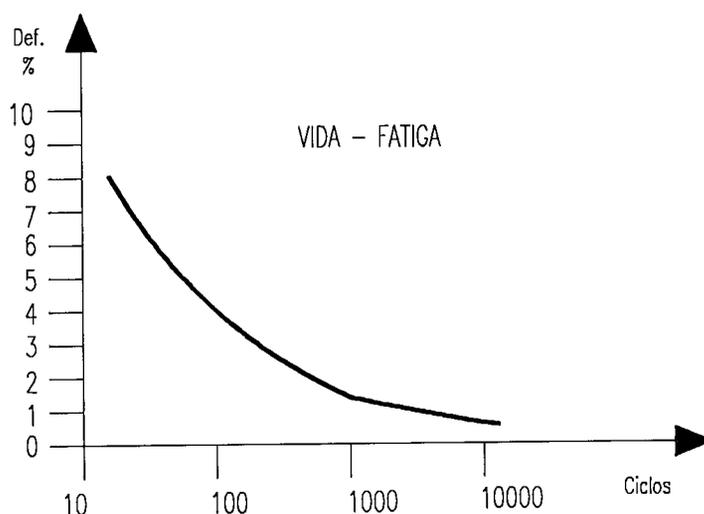


Fig. 7 Curva vida-fatiga de un amortiguador de acero.

Donde la amplitud del esfuerzo cíclico, se gráfica contra el número de ciclos a la falla, obteniendo así la gráfica correspondiente. Apoyados de esta gráfica, podremos calcular la capacidad por fatiga total de un amortiguador viga-acero para cualquier rango de deformación restringida.

Los esfuerzos que un material puede soportar bajo cargas cíclicas, son mucho menores que para cargas estáticas. Cuando la amplitud de los esfuerzos se incrementa, el número de ciclos a la falla se reduce rápidamente, la cual es un factor importante a considerar en el estudio de éste tipo de materiales.

Los amortiguadores de momento uniforme, fig. 6a, con vigas de fluencia prismática, produce grandes deformaciones, reduciendo con ello los desplazamientos en los extremos de los amortiguadores.

2.2.3.4 Amortiguadores de extrusión de plomo.

Las ventajas de utilizar un sólido como el plomo se debe:

- Que tal sólido no se fatiga de manera importante al operar a temperaturas normales, debido a que el punto de fusión del plomo es muy bajo.
- Durante y después de la deformación, el plomo deformado sufre un proceso interrelacionado de recuperación, recristalización y formación de partículas. Este comportamiento es similar al que ocurre en el acero a temperaturas mayores a los 400°C.

El amortiguador de extrusión de plomo, utiliza la propiedad de disipación de la energía histerética de los metales, es por ello que se denomina: Dispositivo LED. El proceso de extrusión consiste en forzar o extraer un material através de un orificio, cambiando con esto su forma, fig. 8.

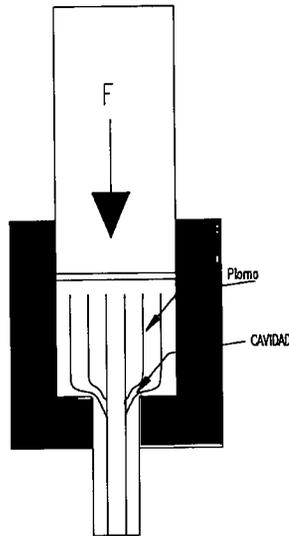


Fig. 8 Amortiguador de extrusión de plomo.

La deformación de un material policristalino, como el plomo o acero suave, ocasionan el crecimiento de partículas y causa problemas como dislocación y vacíos entre éstas. Después de algún tiempo el material puede, sí la temperatura es suficiente alta, regresar a un estado libre de los efectos de deformación plástica, por los tres procesos interrelacionados, los cuales que son:

- Recuperación.
- Recristalización.
- Crecimiento de las partículas.

Durante el proceso de recuperación, la energía almacenada de las partículas deformadas se reduce por el movimiento de dislocación, para formar configuraciones de energía inferiores, tales como fronteras de las partículas y por eliminación de vacíos en la superficie externa e interna.

La recristalización ocurre cuando las partículas pequeñas no deformadas se concentran entre las partículas deformadas para crecer, aprovechándose de ellas. Las fuerzas transmitidas para la recristalización, es la energía almacenada de deformaciones en las partículas extraídas, mientras la disminución de la energía superficial de las partículas recristalizadas, causan el crecimiento de partículas. La temperatura suficiente para causar el 50% de recristalización durante una hora, es llamada "Temperatura de recristalización". Para el plomo esta temperatura se encuentra por debajo de los 20°C, mientras que para el aluminio, cobre y acero es de 150°C, 200°C y 400°C respectivamente. La relación a la cual la recristalización ocurre también se incrementa con la cantidad de deformación.

Como la temperatura de recristalización del plomo esta por debajo de la temperatura ambiente, cualquier deformación del plomo arriba de tal temperatura produce calor, ya que el proceso de recuperación, recristalización y crecimiento de las partículas ocurre simultáneamente, por lo tanto, el trabajar el plomo a temperatura ambiente equivale a trabajar el acero a una temperatura mayor de 400°C.

Como se mencionó anteriormente, el plomo es el único metal que no necesariamente sufre una fatiga progresiva cuando se plastifica cíclicamente a temperatura ambiente.

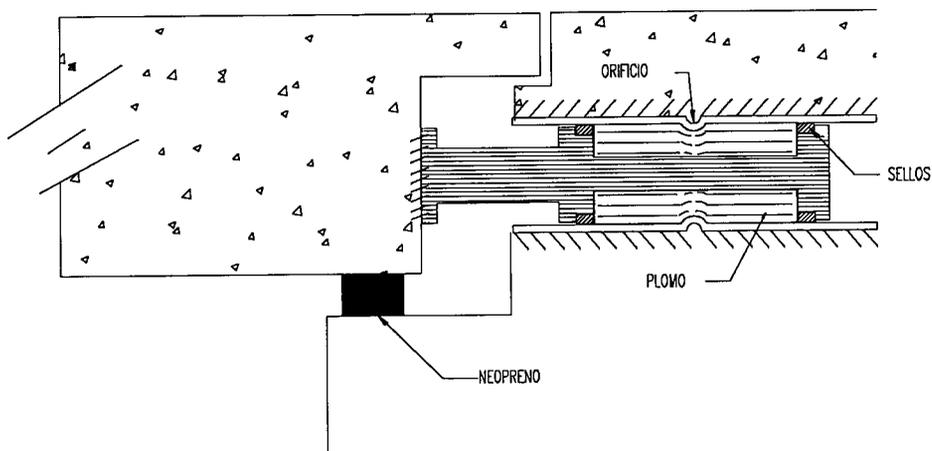


Fig. 9 Amortiguadores de extrusión de plomo.

En la figura 9, se muestra un dispositivo que actúa como amortiguador histérico utilizando las propiedades del plomo antes mencionadas. El dispositivo, como se observa, es un tubo de pared delgada con una flecha por donde corren dos pistones, existe una contracción en el tubo, entre los pistones y el tubo; se observa un espacio libre, el cual es ocupado por el plomo. El plomo se separa del tubo por una capa delgada de lubricante, por lo cual es necesario la utilización de un sello hidráulico en los extremos; a veces no soporta las presiones inducidas creando la necesidad de proveer mantenimiento a tales dispositivos. Cuando se produce la excitación sísmica, el pistón al encontrarse adherido a la estructura tiende a moverse axialmente en el tubo (adherido al apoyo), provocando así que el plomo se estruja hacia atrás y hacia adelante a través de la contracción del tubo, limitando así la amplitud de oscilaciones no deseadas a la estructura.

3.- DISPOSITIVOS DISIPADORES ACTUALES.

Como se mencionó, la elección del tipo de dispositivo a utilizar se basa principalmente en el comportamiento que se pretende obtener de la estructura ante una excitación sísmica, para ello es necesario tener presente los siguientes criterios de comportamiento en la estructura, los cuales a continuación mencionaremos:

a) Esperar o hacer que los miembros de la estructura trabajen juntos (dispositivos elastoméricos).

b) Limitar las aceleraciones que se transmitan a la estructura, reduciendo así las fuerzas internas en la superestructura (amortiguadores).

Lo anterior se ha logrado a través de los dispositivos antes mencionados, y que hoy en día, debido a la evolución que se tienen en nuestras estructuras, así como las

necesidades del tráfico vehicular, se ha llegado a la creación de dispositivos que satisfagan los requerimientos que la red de carreteras demanda, así como los criterios de comportamiento antes mencionados, los cuales se describen a continuación:

- Dispositivos elastoplásticos.
- Transmisores de impacto.

Entre los más recientes utilizados en grandes estructuras de Ingeniería Civil tenemos los que se mencionan a continuación.

3.1 DISPOSITIVOS ELÁSTICOS.

Como se observará en el cálculo numérico, este tipo de dispositivos generan incremento del periodo fundamental de la estructura.

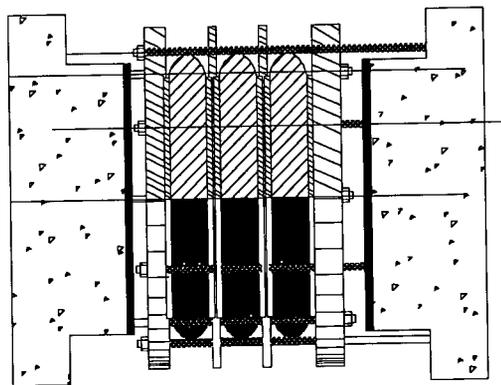
Tales dispositivos muestran un comportamiento similar al descrito en capítulos anteriores. En la actualidad con base en la necesidad que se ha presentado debido a los avances tecnológicos, dimensionamiento de las estructuras y al incremento de las condiciones del flujo vehicular, se desarrollaron dispositivos que permitieron un mejor comportamiento de la superestructura ante tales cambios, apoyándose en los principios de comportamiento de los dispositivos elastómeros (mencionados en incisos anteriores), los cuales son:

- Dispositivo tipo disco.
- Dispositivo Sleev.

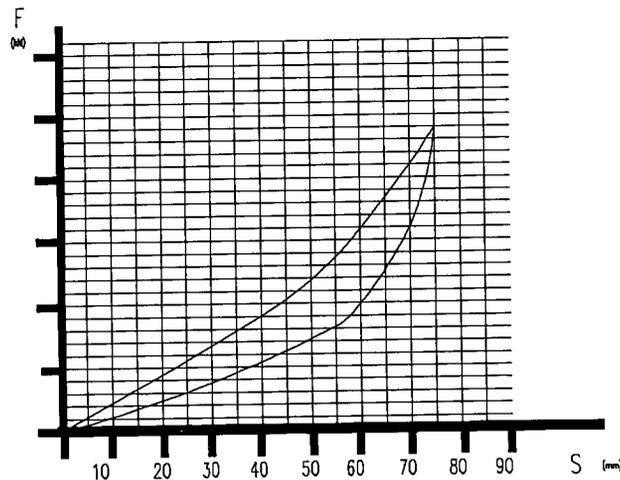
3.1.1. Dispositivos Tipo Disco.

Fue en Italia donde por primera vez se utilizaron este tipo de dispositivos, específicamente en el viaducto Somplango, los cuales fueron diseñados para disipar la energía en sentido horizontal.

El dispositivo tipo disco, consisten en tres capas de neopreno confinado en ambos extremos por discos de acero. El neopreno, se unen a placas de acero, las cuales cuentan con ejes perpendiculares a su plano, por donde se desplazarán axialmente. La unión entre los discos y el neopreno se realiza por medio de un proceso de vulcanizado, en los extremos el neopreno se encuentra adherido a las placas base que se encuentran empotradas en la superestructura, logrando así una sólida unión entre el dispositivo y la superestructura. Lo anterior se observa en la figura 10.



a)



b)

Fig. 10 Dispositivo elástico tipo "disco".

Estos dispositivos presentan un doble efecto de resistencia, es decir los discos

tienen gran resistencia a compresión y además la capacidad de absorción del neopreno, logrando así que el dispositivo en general incremente su rigidez a compresión, presentando un comportamiento de dispositivo sísmico debido a que permite la disipación por medio de los desplazamientos por efecto de las fuerzas axiales, al disminuir el espesor del elastómero se incrementa la rigidez lateral del mismo, lo anterior se establece acorde al funcionamiento esperado de la estructura. Los discos no trabajan a compresión durante la fase de separación entre la estructura y el apoyo, logrando que el elastómero absorba cierta energía debido al efecto de tensión, al igual que su disipación durante el estado de compresión. En la figura 10 se presenta la gráfica (carga-deformación), en la cual se observa primeramente un comportamiento lineal, seguido de un comportamiento no lineal bajo, observando además la gran resistencia que se obtiene al utilizar los discos de acero, lo cual es una característica particular de este tipo de dispositivos gracias a la combinación de el acero y el neopreno.

La utilización de estos dispositivos, primeramente fue en Italia, específicamente en el viaducto Somplago, por lo cual se define como el primer ejemplo internacional en la utilización de este tipo de dispositivos en la estructura de un puente, además, se ha observado un comportamiento satisfactorio durante su vida útil. En el puente fueron instalados en la unión de las losas 4 dispositivos elásticos, la longitud de ambas losas fue de 1.2 Km.

En 1976 se presentó un temblor en la región de Italia, manifestándose con una magnitud de 6.4 y una aceleración de 0.3g. Gracias a tal excitación se comprobó que los dispositivos verdaderamente trabajaron como se esperaba debido a que el puente no presentó daño alguno, concluyendo que la estructura se comportó satisfactoriamente.

3.1.2. Dispositivo Elástico Tipo Sleeve.

Posteriormente se desarrollo otro tipo de dispositivos denominados "Dispositivo tipo Sleeve". Por primera vez se utilizaron en estructuras de la misma vía de comunicación. Este tipo de dispositivos se muestran en la figura 11, así como la gráfica carga-deformación del dispositivo.

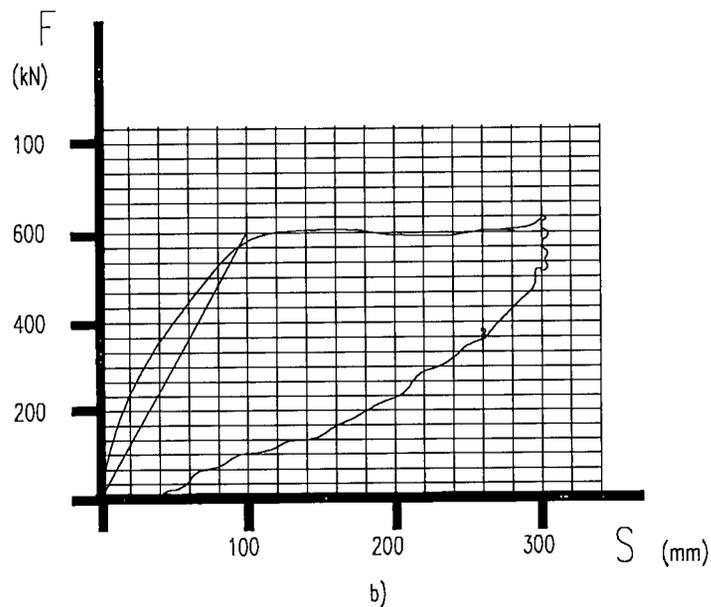
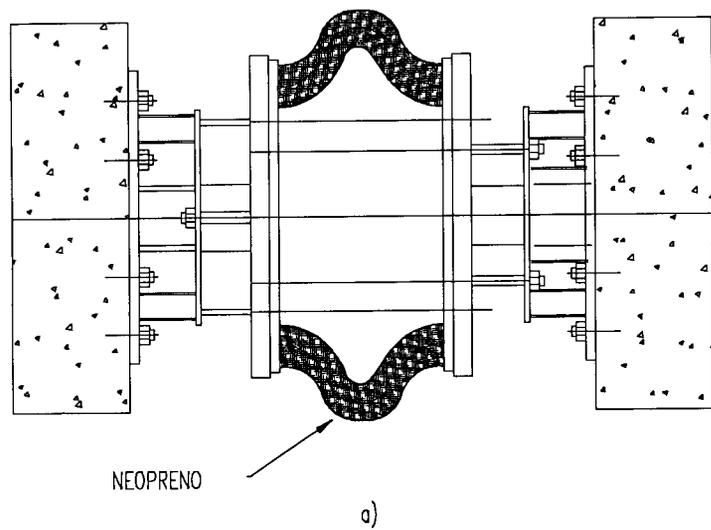


Fig. 11 Dispositivo elástico tipo Sleeve.

El comportamiento de este tipo de dispositivos se observa en la gráfica anterior, donde se manifiesta una fase de proporcionalidad entre la fuerza y el desplazamiento (denominándola como fase elástica), seguida de una segunda fase, que observa un comportamiento diferente donde a una fuerza se mantiene constante y los desplazamientos siguen presentándose (comportamiento plástico), lo cual hace que exista primeramente disipación en un proceso elástico, y posteriormente se disipe por medio de desplazamientos. A la máxima fuerza elástica que resiste el dispositivo, se le denomina como "Máxima carga elástica". Cuando se presente una carga mayor que la carga elástica, la diferencia entre ambas se disipa en el dispositivo por medio de desplazamientos tal como se mencionó anteriormente, es por ello que se conocen como "dispositivos elásticos de carga limitada". Una de las ventajas de este tipo de dispositivos es el conocimiento de la carga a la cual el dispositivo trabajara elásticamente. Para aplicaciones ingenieriles es muy útil debido a que podemos estimar la cantidad de dispositivos necesarios para poder disipar la energía, cuando se presente la excitación sísmica sobre la estructura.

Como se observa en la gráfica de la figura 11, el dispositivo presenta diferentes fases. En la primera fase el cilindro elastomérico trabaja a compresión, creando el comportamiento elástico antes mencionado, posteriormente al 15 - 20% de deformación general, se observan deformaciones locales en el sentido perpendicular al de la aplicación de la carga, generalmente en la vecindad de los bordes del cilindro de neopreno, en ese momento se presenta la una curva en el neopreno debido a la deformación, la cual es muy pequeña ante tal deformación, mostrándose negativa y como función de los parámetros geométricos; en este periodo es donde se inicia el fenómeno de inestabilidad elástica del dispositivo en la dirección radial a su simetría, lo que ocasionará que a una fuerza constante se presenten grandes deformaciones. En tal gráfica, se puede observar, cuándo se presenta la carga elástica máxima.

Otra de las ventajas que presenta este tipo de dispositivos es una reducción de su dimensión axial con respecto a los dispositivos antes mencionados, lo cual es

adecuado para la unión entre las losas ó la losa y el apoyo, así como para el mantenimiento e inspección de los mismos. Cabe mencionar que este tipo de dispositivos son diseñados para excitaciones en el sentido horizontal.

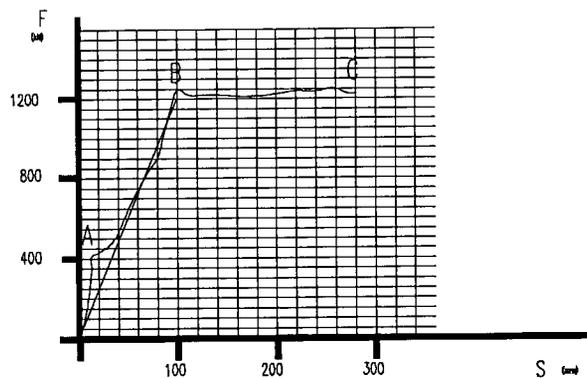
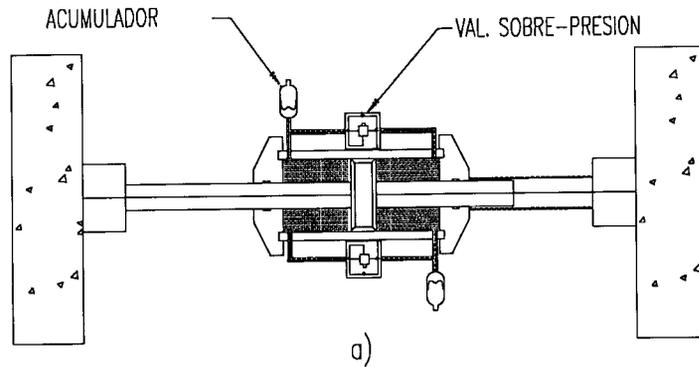
Debido al comportamiento de estos dispositivos, son considerados como intermedios entre los de comportamiento de los dispositivos elastoméricos y el de los amortiguadores.

3.2. DISPOSITIVOS AMORTIGUADORES.

3.2.1. Amortiguador Hidráulico.

Como se menciona anteriormente, ha existido la necesidad de investigar sobre diferentes dispositivos que disipen un máximo de energía, recientes estudios, con el fin de satisfacer nuevas especificaciones, han llegado al desarrollo de dispositivos hidráulicos observando que se incrementa la función de disipación, los cuales satisfacen hoy en día las características de los códigos y reglamentos en Italia.

Este tipo de dispositivos constan de un cilindro de acero, el cual en su interior se encuentra una barra que lo atraviesa longitudinalmente, a su vez, ésta barra tiene unido un pistón, el cual crea en el cilindro dos cámaras, este dispositivo tiene integrado un sistema de válvulas así como acumuladores, tal como se observa en la figura 12, los cuales se describirán posteriormente.



b)

Fig. 12. Amortiguador Hidráulico.

El funcionamiento de los dispositivos hidráulicos es el siguiente; en la figura 12. esquemáticamente se puede observar la doble acción hidráulica del cilindro, en la cual ambas cámaras se encuentran conectadas y a su vez comunicadas por una membrana, tipo acumulador hidroneumático, precargadas con gas.

Ambos extremos del dispositivo son equipados con especiales juntas que permiten una rotación de $\pm 5^\circ$, con la finalidad de absorber las irregularidades de la conexiones en el apoyo y la estructura. Este tipo de dispositivos operan de la siguiente manera:

Cuando actúa cierta fuerza, hace que reaccione la presión de precarga de los acumuladores, limitando los desplazamientos en la superestructura. Esto se logra debido a la elasticidad del sistema y a la compresibilidad del aceite hidráulico (parte O-A de la gráfica fig. 12).

Cuando se excede la presión de precarga, el gas en el depósito del acumulador reduce su volumen en relación al aumento de la presión (haciendo que exista una reacción sobre el pistón), de acuerdo al cambio que se refleja en el proceso adiabático (parte AB).

Cuando la presión llega a ser mayor que el permitido por la válvula, se manifiesta la sobrepresión, que hace que el fluido se transfiera de una cámara a la otra. Es decir las diferentes presiones se comportan como una sola fuerza, casi constante, independiente de la razón de movimiento de el pistón (fase B-C).

Este tipo de dispositivos permiten ser ajustados a las características carga-deformación que son necesarias, obteniéndose al modificar el volumen en el acumulador, con lo cual se cambia la presión, aumentando así la precarga y variando la sobre presión de la válvula.

Algunas de las ventajas en la utilización de este tipo de dispositivos son las siguientes:

Capacidad para adaptarse a las condiciones necesarias, y obtención de constantes características en tiempo (fuerzas constantes), las cuales son independientes de temperatura y velocidad, comparado con el comportamiento de los elastómeros.

- Resistencia a numerosos ciclos de trabajo.
- Gran eficiencia para disipar energía.

Comportamiento elástico en determinada zona la cual se puede incrementar o disminuir según se necesite (fase O-A). Así las cargas de servicio (viento, nieve, impacto, etc.), no producen grandes desplazamientos debido a dicha fase.

Este tipo de dispositivos son verdaderamente prometedores, debido a la bondad para modificar las características carga-deformación y poder obtener un comportamiento aceptable, tal como lo mencionan los reglamentos y códigos. A principios de los 90s, se utilizaron este tipo de dispositivos (amortiguadores hidráulicos), especialmente en grandes proyectos. Un ejemplo de la utilización, es el puente Golden Gate el cual se encuentra en los Estados Unidos, en el cual se observa un comportamiento satisfactorio de la superestructura.

3.2.2. Transmisores de impacto.

Cuando se presenta la excitación sísmica, este tipo de dispositivos reducen los desplazamientos en la superestructura y además eliminan los impactos súbitos a la misma, debido a las fuerzas excitadoras. El comportamiento es similar a el de los amortiguadores.

Este tipo de dispositivos crean en la superestructura durante su uso normal un comportamiento isostático, el cual es modificado al presentarse la excitación sísmica, ya que crean un comportamiento en la superestructura similar a las hiperestáticas, logrando así reducir los desplazamientos en apoyos y juntas, en los cuales como se mencionó, existe una concentración grande de esfuerzos durante la excitación sísmica, ocasionando en muchos casos grandes daños a dichos elementos.

El primer transmisor de impacto fue utilizado en Savio Viaduct, Italia. Este tipo de dispositivo consiste en un cilindro, el cual tiene integrada una barra que atraviesa longitudinalmente al cilindro, formando una cámara entre la cilindro y la barra.

La barra tiene unido un pistón, el cual se desliza longitudinalmente a través de la cámara, de la misma manera que la barra creando así dos cámaras divididas por el pistón, éstas se encuentran llenas de aceite y conectadas a través de un orificio calibrado que tiene el pistón, tal como se observa en la figura 13.

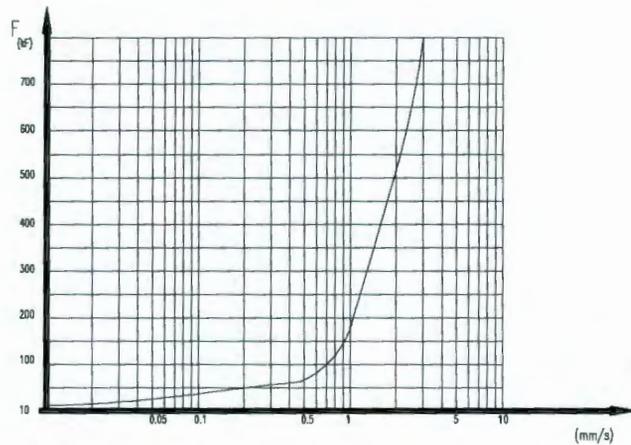
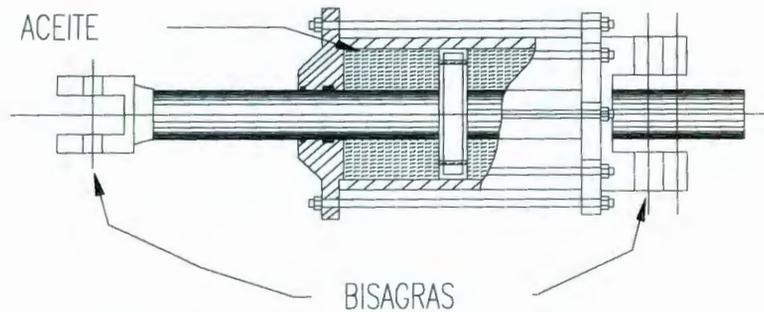


fig. 13 Dispositivo transmisor de impacto.

Este tipo de dispositivo se conecta a la estructura y al apoyo por medio de un sistema de bisagras que se encuentran integradas en el dispositivo, tal como se observa en la anterior figura 13.

La fig. 13 presenta una gráfica, en la cual se puede observar claramente el comportamiento del transmisor de impacto, deduciendo que al incrementar la fuerza se reduce la velocidad de reacción en el dispositivo, disminuyendo así los desplazamientos de la estructura, lo cual es una característica de los amortiguadores.

4.- ANÁLISIS NUMÉRICO.

4.1. GENERALIDADES.

Con base en la experiencia obtenida en muchos temblores ocurridos en distintas partes del mundo, se ha tenido la necesidad de estudiar diferentes dispositivos o elementos que ayuden a contrarrestar los efectos ocasionados por tales excitaciones, es por ello que se considera fundamental un estudio eficiente del comportamiento de dispositivos disipadores, los cuales en conjunto con todos los elementos estructurales, determinarán el comportamiento de la estructura.

4.2. MARCO TEÓRICO.

El presente análisis se enfoca en la simulación de un puente carretero, cuyas características geométricas son hipotéticas, pero acorde a las utilizadas en la red de carreteras. Para el análisis de la estructura, se parte de las siguientes hipótesis:

1. Se realiza un análisis de comportamiento lineal de la estructura.
2. Se considera un comportamiento lineal de los dispositivos.
3. Se desprecian los efectos de temperatura de los dispositivos
4. Se establece que el puente no presentará asentamientos en las pilas, durante la excitación sísmica.
5. Existe un empotramiento en la parte inferior de las pilas, restringiendo sus grados de libertad en todas direcciones.
6. Solo se analizará los efectos producidos por la componente horizontal de la fuerza horizontal, para ello se aplicará un 100% del total de la fuerza horizontal en la

dirección longitudinal del puente y 30% en la dirección perpendicular a ésta (según ASSHTO). Ésto se debe a que la magnitud de la fuerza sísmica vertical se considera despreciable, comparada con la de la fuerza horizontal.

4.3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.

La superestructura del puente en estudio consta de una sección transversal tipo cajón, de concreto reforzado, con un ancho transversal de 8.00m y pasos peatonales en los extremos de 0.80. El puente se encuentra apoyado en los extremos por medio de estribos, mientras que intermedio se encuentra apoyado por tres pilas huecas de concreto reforzado, las cuales tienen una separación de ejes de 40m y cuentan con una altura de 30m, el espesor de la sección hueca de las pilas es de 0.50m, apoyadas sobre candeladros con la finalidad de disminuir los desplazamientos debido a consolidación del suelo e incrementar su empotramiento en la parte inferior de el apoyo, mientras que en la parte superior de las pilas se consideró una placa de concreto reforzado con el objeto de apoyar los dispositivos. La separación de los estribos a las pilas en los extremos del puente son de 30m, dando como resultado una longitud total de 140m. En la fig. 14 se muestra las características del puente.

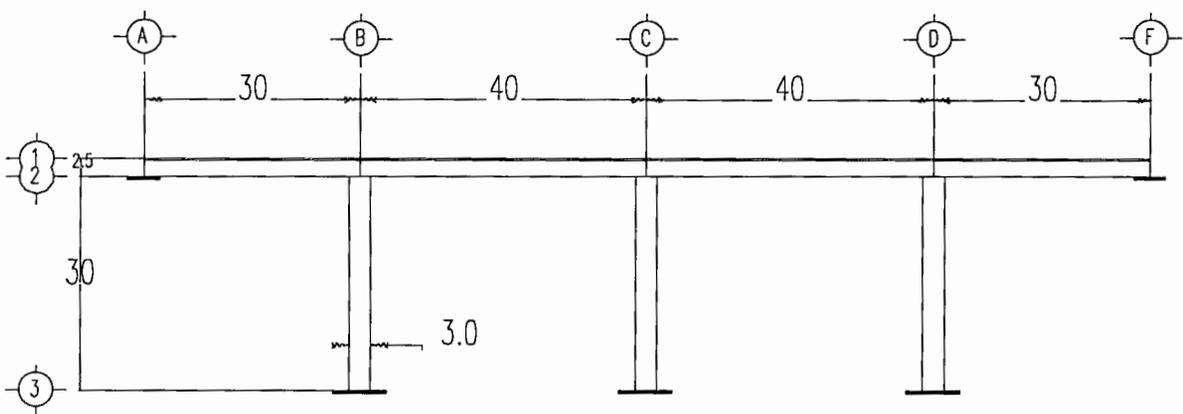


fig. 14 a Puente en estudio (sección longitudinal).

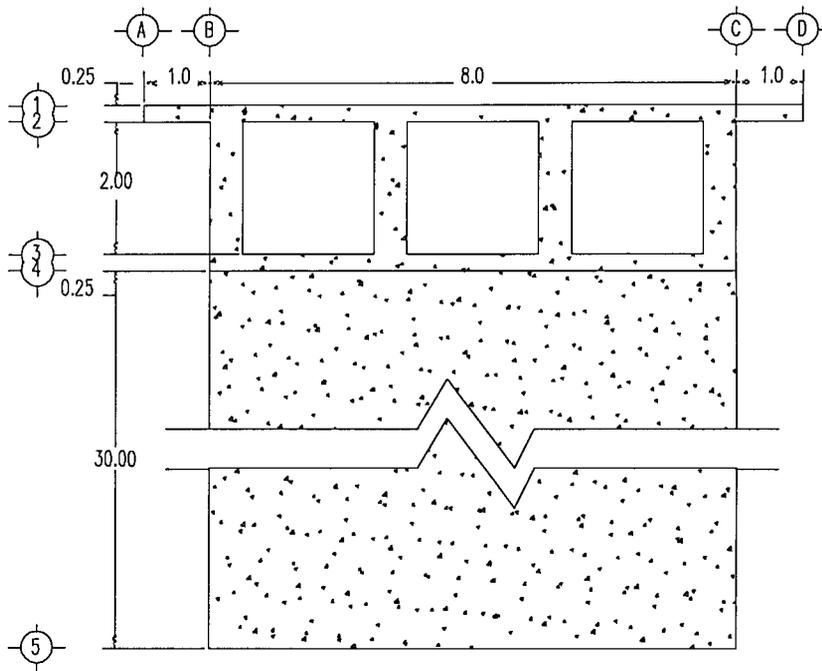


fig. 14 b Puente en estudio (sección transversal).

4.4 ESTIMACION DE LA FUERZA SÍSMICA.

La acción que genera la excitación sísmica en el puente está en función de diferentes efectos verdaderamente independientes a otras acciones, debido a que sus efectos no dependen básicamente de la acción dinámica, es decir son función de una interacción compleja entre el movimiento sísmico, las propiedades del suelo subyacente y de la estructura misma. Estos aspectos son los contemplados en la estimación del coeficiente sísmico.

La estimación del coeficiente sísmico se realizó con base en la regionalización sísmica de la República Mexicana, localizando la estructura en la zona C. Tal zona se describe en la figura 15.



fig. 15 Regionalización sísmica de México (Manual de Diseño de Obras Civiles, CFE).

Así mismo, la estructura se encuentra clasificada dentro del grupo A, y apoyada sobre terreno de transición. Acorde a los datos anteriores, y apoyados en el Manual de Diseño de Obras Civiles se obtuvieron los siguientes valores, para determinar el espectro de diseño sísmico.

Zona Sísmica	C
Tipo de suelo	II
C	0.39
a _o	0.104
T1	0.450

T2

1.60

r

2/3

Posteriormente se elaboró el espectro de diseño, con la finalidad de comprobar gráficamente el valor del coeficiente "c", obteniendo así figura 16.

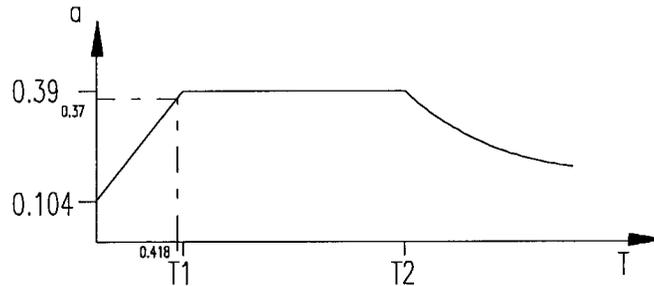


Fig.16 Espectro de diseño sísmico.

Con la ayuda de el programa NISA, se realizó un análisis dinámico de la estructura sin considerar los dispositivos elastoméricos, obteniendo el primer modo de vibrar con una frecuencia de 2.3874Hz. (Ver anexo I). Una vez estimado el periodo natural de la estructura, y apoyados del Espectro sísmico, se obtuvo el coeficiente "c" con un valor de 0.3701. Debido a que la estructura es de concreto presforzado y constará con dispositivos elastoméricos, se estimó un Factor de Comportamiento sísmico $Q = 2$. De lo anterior se tomó el coeficiente "C".

$$C = .3701 / 2 = 0.18508.$$

$$\mathbf{C = 0.18508}$$

Para la obtención de la carga viva en el puente, se recurrió a las cargas especificadas por las normas AASHTO 1994. El cual considera una carga por carril de el vehículo estándar, que ocupa un ancho de 3.05m. Se especifica que se colocarán

en bandas de 3.6m distribuidas a lo ancho de la calzada del puente; puesto que el puente en estudio tiene un ancho de 6.5m, se establecieron 2 bandas con una carga uniformemente distribuida de 0.952 Ton/m más una carga de acuerdo al vehículo HS20 de 8.17 Ton. (por cada banda).

De lo anterior el cálculo de la carga viva es la siguiente:

$$W_v = (0.952 \times 140 \times 2) + (2 \times 8.17) = 266.56 + 16.34 = 283 \text{ Ton.}$$

$$\underline{W_v = 283 \text{ Ton.}}$$

La carga muerta se estimó como sigue:

$$W_1 = 7.6 \times 140 \times 2.4 = 2553.6 \text{ Ton.}$$

$$W_2 = (8 \times 3 \times 0.3 \times 2.4) \times 3 = 51.84 \text{ Ton.}$$

$$W_3 = (10 \times 29.7 \times 2.4) \times 3 = 2138 \text{ Ton.}$$

$$\underline{W_m = 4743.84 \text{ Ton.}}$$

donde:

W1 = Peso de la super-estructura.

W2 = Peso de las placas.

W3 = Peso de las pilas.

Wm = Carga muerta de la estructura.

$$W_{\text{total}} = W_v + W_m = 5026.84 \text{ Ton.}$$

$$\underline{W = 5026.84 \text{ Ton.}}$$

Determinado la carga total y el coeficiente sísmico, posteriormente se estimó la fuerza sísmica con base en la fórmula $F=C \times W$, teniendo:

$$\underline{F = 930.36 \text{ Ton.}}$$

4.5. CREACIÓN DEL MODELO.

Apoyados en el software NISA, se idealizó el modelo utilizando elementos paralelepípedos, con dimensiones dependientes de la exactitud que se deseé obtener, de la geometría de toda la estructura y de su localización, puesto que debe existir compatibilidad entre la superestructura, pilas y dispositivos. Una vez realizado el modelo con elemento finito, lo siguiente fue definir las condiciones de frontera, es decir el tipo de apoyo que tiene cada elemento y sus restricciones ante desplazamientos y giros. Posteriormente se definieron las propiedades de cada elemento en particular como son:

- Módulo de elasticidad.
- Módulo de poisson
- Módulo cortante
- Masa.

Las cuales dependían del tipo de elemento y de sus ubicación. En el caso de la masa, se obtuvieron tres tipos de masas; superestructura, pilas y dispositivos.

En la masa de la superestructura, se integró la masa que ocasiona la carga viva, puesto que como se mencionó anteriormente se consideran líneas de carga así como la carga concentrada que especifica ASSHTO.

Después se determinaron las aceleraciones en los ejes X, Y, Z. Obteniendo así los datos siguientes:

Eje	Aceleración
X	0.5444504
Y	1.815014
Z	9.80665

La aceleración en el eje X corresponde a la obtenida del coeficiente sísmico en el 100%, la aceleración en el eje Y corresponde al 30%, mientras que en eje Z corresponde a la aceleración de la gravedad.

4.6. CRITERIOS DE SIMULACION.

Puesto que el objeto principal de el presente proyecto es, el estudio del comportamiento de la estructura de un puente con apoyos elastoméricos ante una excitación sísmica, se realizaron varios análisis del puente en estudio, en los cuales se hizo variar las propiedades mecánicas de los dispositivos, con la finalidad de observar ventajas y desventajas que se presentan en la superestructura y pilas, al considerar la influencia debida al cambio de rigidez de cada apoyo de la superestructura. Para ello se optó por tres tipos de dispositivos los cuales tienen un espesor de 0.10 m, sección transversal de 0.16 m². Las propiedades mecánicas son las que se mencionan a continuación:

Disp.	Dureza IRHD	Módulo de Elasticidad E [Kg/cm ²]	Módulo de Cortante [Kg/cm ²]
1	50	23.5	6.1
2	60	37.7	10.2
3	70	63.2	14.3

En el puente se consideraron 3 tipos de dispositivos, obteniendo así seis simulaciones con diferentes condiciones de apoyo, en los cuales se modificó la rigidez, lo cual se logró cambiando el tipo de dispositivo (modificando las propiedades mecánicas del dispositivo). En la fig. 17 se muestra la consideración general utilizada para identificar el tipo de dispositivo.

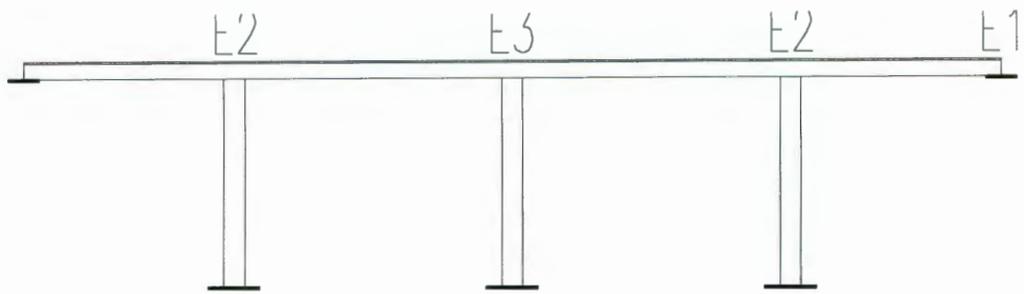


Fig. 17. Consideraciones generales de los apoyos.

Inicialmente acorde a las necesidades, económicas y de funcionamiento de la vía carretera de nuestro país, seleccionamos un tipo de dispositivo el cual es un aislador denominado "APOYO SLIDE" (Mexicana de Presfuerzo), el cual se puede observar en la figura 18.

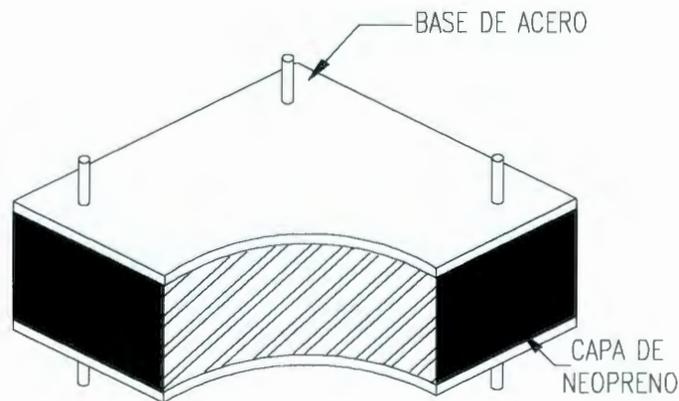


fig. 18 Dispositivo (aislador) tipo SLIDE.

Posteriormente se denominó un apoyo con rigidez mínima, como aquel que permita un desplazamiento de 10 cm cuando se le aplique la carga sísmica. Puesto que si se considera un apoyo que produzca mayor desplazamiento, creará una

estructura insegura debido al los grandes movimientos que se tendrán en la superestructura. De igual manera, se definió un apoyo sin dispositivo, como aquel que cuente con las propiedades mecánicas de la estructura invariables. Obteniendo así los casos siguientes:

CASO	E1 (T/m ²)	E2 (T/m ²)	E3 (T/m ²)
1	2.00E+07	2.00E+07	2.00E+07
2	235	235	235
3	632	632	632
4	2.00E+07	235	235
5	2.00E+07	632	235
6	632	377	235

Tabla 1. Consideraciones generales de los apoyos.

Definiendo las propiedades de cada modelo, se procedió a realizar un análisis sísmico estático determinando los desplazamientos de las pilas, así como los esfuerzos que se producen en todos los elementos estructurales para cada caso. La comparación de los esfuerzos, se realizó acorde al criterio de falla de Von Mises y a los esfuerzos en los planos XZ y YZ (SXX y SYY). De lo anterior se obtuvo lo siguiente:

4.7. RESULTADOS.

Apoyo	Des. Apoyo cm.	Caso 1	
		E [T/m2]	Des. Super est. cm.
1	0	2 E+07	0.0041
2	0.59	2 E+07	0.6
3	0.993	2 E+07	1
4	0.635	2 E+07	0.64
5	0	2 E+07	0.0031

Tabla 2. Desplazamientos para el caso I.

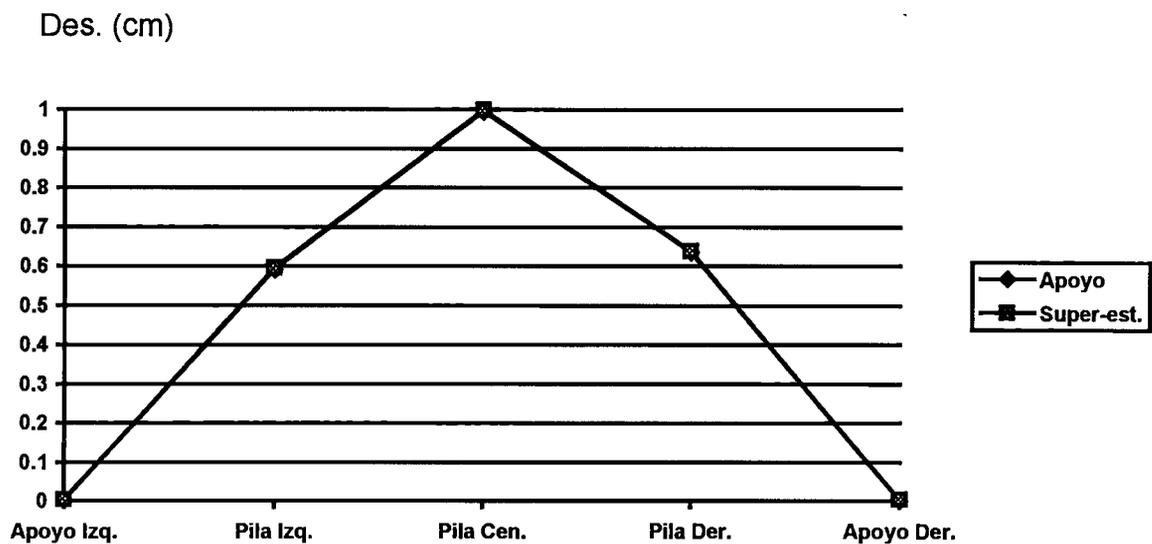


Fig. 19 Desplazamientos de los apoyos y la superestructura (caso I).

		Desplazamientos.	
		<u>Caso 2</u>	
Apoyo	Des. Apoyo cm.	E [T/m ²]	Des. Super est. cm.
1	0	235	7.45
2	1.6	235	8.32
3	1.65	235	8.86
4	1.64	235	8.38
5	0	235	7.52

Tabla 3. Desplazamientos para caso 2.

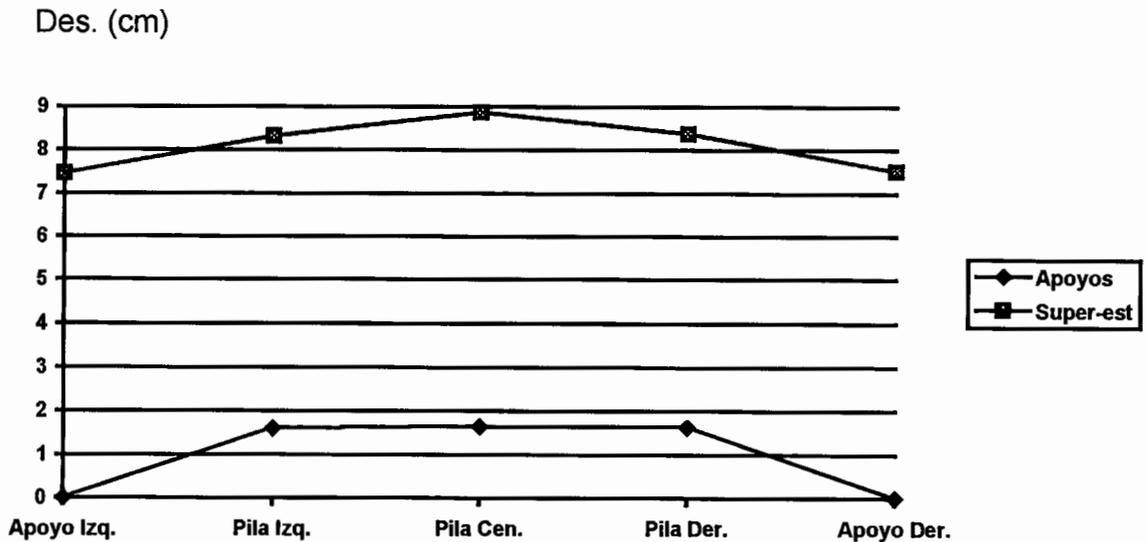


Fig. 20 Desplazamientos de los apoyos y la superestructura (caso 2).

		Desplazamientos.	
		Caso 3	
Apoyo	Des. Apoyo cm.	E [T/m2]	Des. Super est. cm.
1	0	632	2.98
2	1.43	632	3.75
3	1.49	632	4.2
4	1.44	632	3.77
5	0	632	3

Tabla 4. Desplazamientos para caso 3.

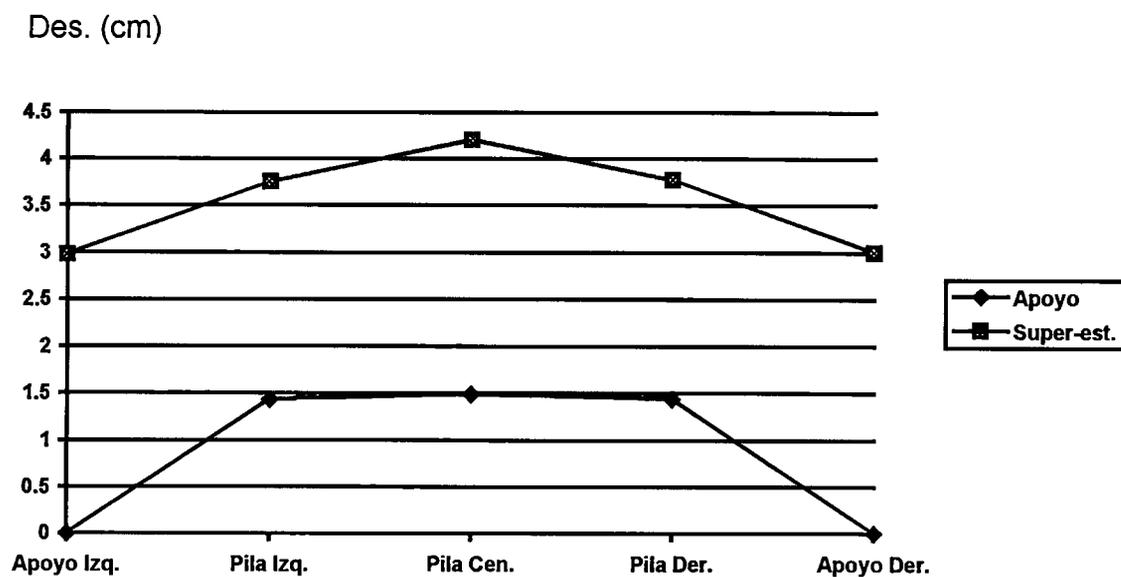


Fig. 21. Desplazamientos de los apoyos y la superestructura (caso 3).

		Desplazamientos.	
		Caso 4	
Apoyo	Des. Apoyo cm.	E [T/m2]	Des. Super est. cm.
1	0	2 E+07	0.0013
2	0.508	235	1.66
3	0.657	235	3.21
4	0.528	235	1.85
5	0	2 E+07	0.00127

Tabla 5. Desplazamientos para caso 4.

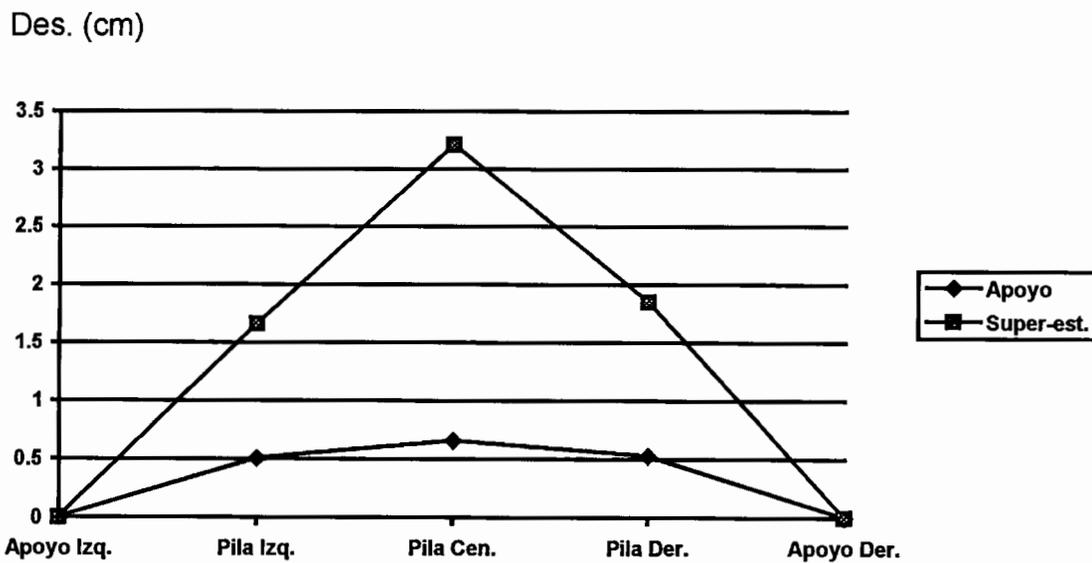


Fig. 22. Desplazamientos de los apoyos y la superestructura (caso 4).

		Desplazamientos.	
		Caso 5	
Apoyo	Des. Apoyo cm.	E [T/m2]	Des. Super est. cm.
1	0	2 E+07	0.00013
2	0.567	632	1.48
3	0.608	235	2.96
4	0.581	632	1.65
5	0	2 E+07	0.00579

Tabla 6. Desplazamientos para caso 5.

Des. (cm)

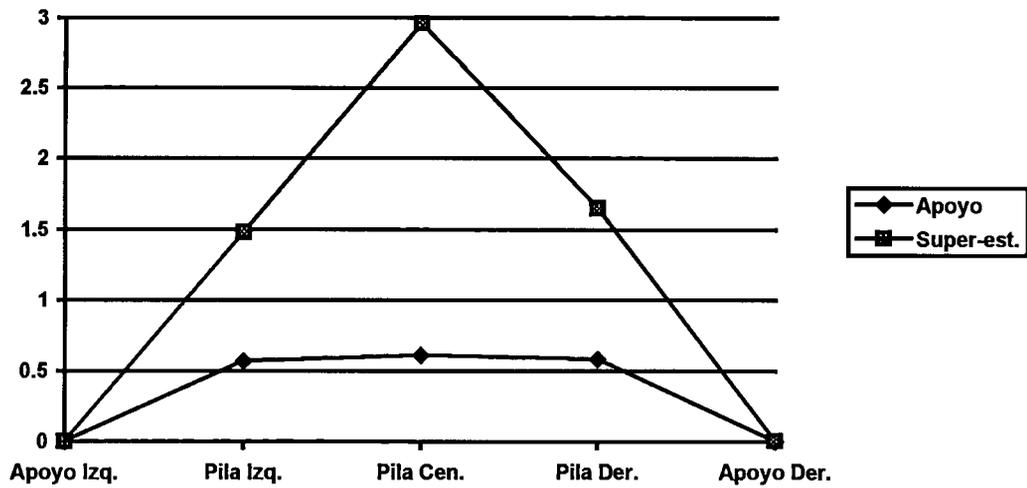


Fig. 23. Desplazamientos de los apoyos y la superestructura (caso 5).

		Desplazamientos.	
		<u>Caso 6</u>	
Apoyo	Des. Apoyo cm.	E [T/m2]	Des. Super est. cm.
1	0	632	3.76
2	1.39	377	5.41
3	1.22	235	6.56
4	1.44	377	5.5
5	0	632	3.71

Tabla 7. Desplazamientos para caso 6.

Des. (cm)

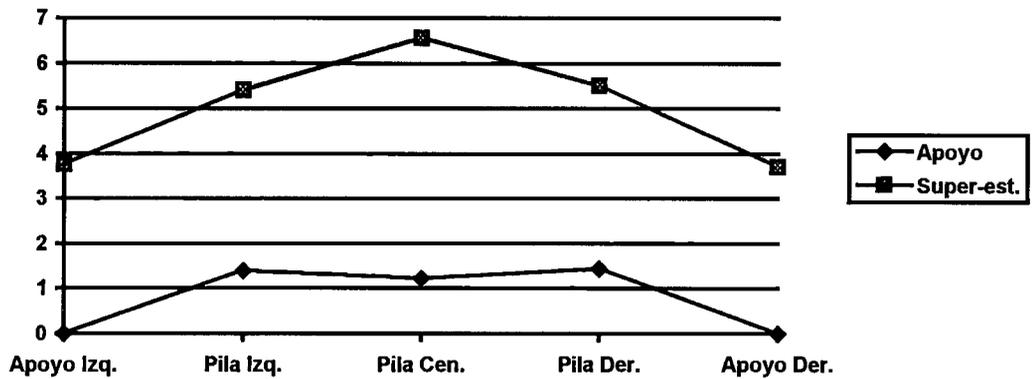


Fig. 24. Desplazamientos de los apoyos y la superestructura (caso 6).

De las gráficas anteriores se puede observar; que la tendencia al mejor comportamiento tanto de la superestructura, pilas y dispositivos, son las del caso II, donde el dispositivo utilizado es el que presenta un desplazamiento máximo de 8 cm (como se puede observar en la gráfica), y que cuenta con un módulo de elasticidad de 235 T/m². La distribución de tales dispositivos es la siguiente:

Se encuentran ubicados 8 dispositivos en el apoyo izquierdo, distribuidos transversalmente en el ancho del puente, de la misma manera que en el apoyo derecho. En cada pila se encuentra el doble de dispositivos, es decir 16 dispositivos distribuidos en dos líneas de ocho a lo largo de la sección transversal del puente, debido a que el peso que soportara cada pila es aproximadamente el doble del soportado por los apoyos. De la misma manera se encuentran distribuidos en la dos pilas siguientes.

Al observar lo anterior, se realizó el análisis de el caso I (cuando el dispositivo cuenta con la misma rigidez que la estructura), para posteriormente comparar los resultados con respecto al caso mas eficiente, es decir, el caso II. Primeramente del análisis del caso I, los esfuerzos en la superestructura y en las pilas son los siguientes (como recordaremos, el caso I es aquel en el cual los dispositivos presentan la mayor rigidez, tratando de simular cuando en el puente no existen dispositivos).

	<u>Caso I</u>	
Apoyo		Von Mises [Kg/cm²]
Apoyo Izq.		422.4
Pila Izq.		94.2
Pila Cen.		47.3
Pila Der.		94.2
Apoyo Der.		328.6

Tabla 8. Esfuerzos Von mises, en el puente cuando no se consideran dispositivos (rigidez máxima, caso I).

	<u>Caso I</u>	
Apoyo	SXX Compresión [Kg/cm2]	SXX Tension [Kg/cm2]
Apoyo Izq.	-110.9	45.79
Pila Izq.	-76.07	0
Pila Cen.	-76.07	0
Pila Der.	-76.07	0
Apoyo Der.	-110.9	45.79

Tabla 9. Esfuerzos SXX (perpendiculares al eje de la superestructura).

	<u>Caso I</u>	
Apoyo	SYX Compresión [Kg/cm2]	SYX Tension [Kg/cm2]
Apoyo Izq.	-76.51	76.48
Pila Izq.	-25.51	0
Pila Cen.	-25.51	0
Pila Der.	-25.51	0
Apoyo Der.	-76.51	76.48

Tabla 10. Esfuerzos SYX .

Del mismo modo, se realizó un análisis de el puente, considerando los apoyos elastoméricos, con la distribución antes mencionada, encontrando así los siguientes resultados:

	<u>Caso II</u>	
Apoyo		Von Mises [Kg/cm2]
Apoyo Izq.	super-estructura	33.65
Pila Izq.	super-estructura	25.53
Pila Cen.	super-estructura	41.77
Pila Der.	super-estructura	25.53
Apoyo Der.	super-estructura	25.53

Tabla 11. Esfuerzos Von Mises (casoII).

		<u>Caso II</u>	
Apoyo	super-estructura	SXX Compresión [Kg/cm2]	SXX Tension [Kg/cm2]
Apoyo Izq.	super-estructura	-4.06	0
Pila Izq.	super-estructura	-36.92	0
Pila Cen.	super-estructura	-47.87	0
Pila Der.	super-estructura	-36.92	0
Apoyo Der.	super-estructura	-15.01	0

Tabla 12. Esfuerzos SXX (perpendiculares al eje de la superestructura casoll).

		<u>Caso II</u>	
Apoyo	super-estructura	SYX Compresión [Kg/cm2]	SYX Tension [Kg/cm2]
Apoyo Izq.	super-estructura	-21.51	12.3
Pila Izq.	super-estructura	-14	1.03
Pila Cen.	super-estructura	-14	1.03
Pila Der.	super-estructura	-14	1.03
Apoyo Der.	super-estructura	-21.51	76.48

Tabla 13. Esfuerzos SYX (caso II).

	<u>Caso II</u>	
Apoyo		Von Mises [Kg/cm2]
Apoyo Izq.	Apoyos	9.28
Pila Izq.	Apoyos	58.02
Pila Cen.	Apoyos	74.26
Pila Der.	Apoyos	58.02
Apoyo Der.	Apoyos	17.41

Tabla 14. Esfuerzos Von Mises en los apoyos (casoll).

	-	Caso II	
Apoyo	Apoyos	SXX Compresión [Kg/cm2]	SXX Tension [Kg/cm2]
Apoyo Izq.	Apoyos	-25.96	0
Pila Izq.	Apoyos	-25.96	0
Pila Cen.	Apoyos	-25.96	0
Pila Der.	Apoyos	-25.96	0
Apoyo Der.	Apoyos	-15.01	0

Tabla 15. Esfuerzos en los apoyos SXX (perpendiculares al eje de la superestructura caso II).

	-	Caso II	
Apoyo	Apoyos	SYX Compresión [Kg/cm2]	SYX Tension [Kg/cm2]
Apoyo Izq.	Apoyos	-21.51	0
Pila Izq.	Apoyos	-17.75	1.03
Pila Cen.	Apoyos	-17.75	1.03
Pila Der.	Apoyos	-17.75	1.03
Apoyo Der.	Apoyos	-21.51	0

Tabla 16. Esfuerzos en los apoyos SYX (caso II).

	-	Caso II	
Apoyo		SYX Compresión [Kg/cm2]	SYX Tension [Kg/cm2]
Apoyo Izq.	super-estructura	-21.5	12.3
Pila Izq.	super-estructura	-14	1.03
Pila Cen.	super-estructura	-14	1.03
Pila Der.	super-estructura	-14	1.03
Apoyo Der.	super-estructura	-21.5	12.3

Tabla 17. Esfuerzos en la superestructura SYX (caso II).

De los resultados obtenidos anteriormente, se realizaron las diferentes gráficas para poder comparar el comportamiento, tanto de la superestructura, como el de las pilas, con y sin dispositivos.

Esf. (Kg/cm²)

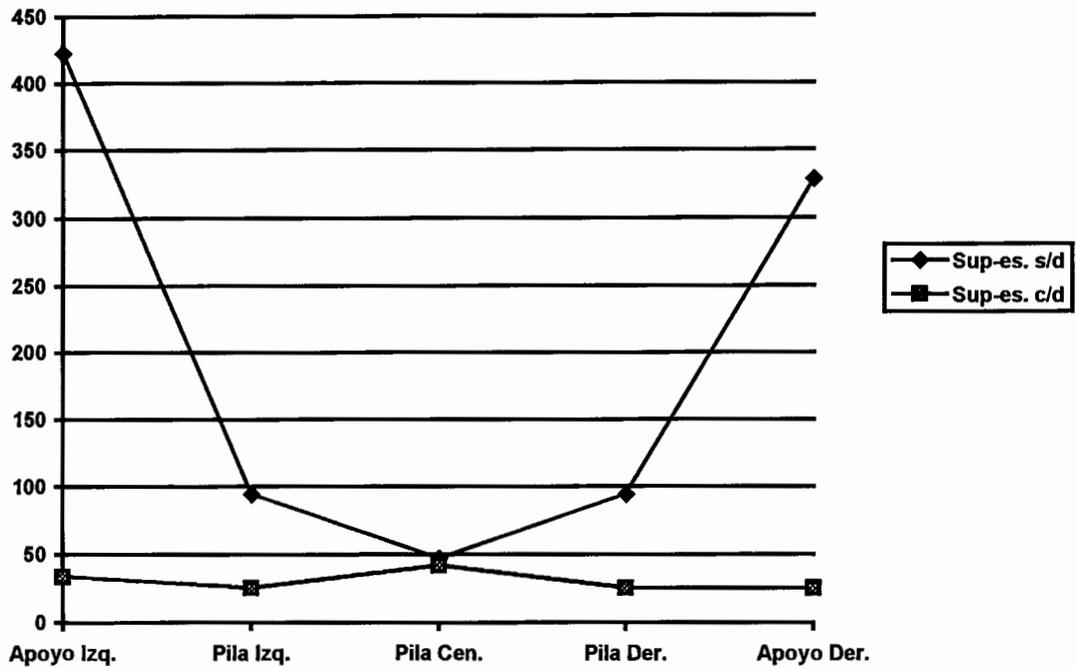


Fig. 25. Gráfica de esfuerzos Von Mises en la superestructura.

Como se observa en la gráfica el uso de los dispositivos presenta una gran disminución de los esfuerzos en la superestructura, tal como se observará posteriormente, cuando se comparan otro tipo de esfuerzos.

Esf. (Kg/cm²)

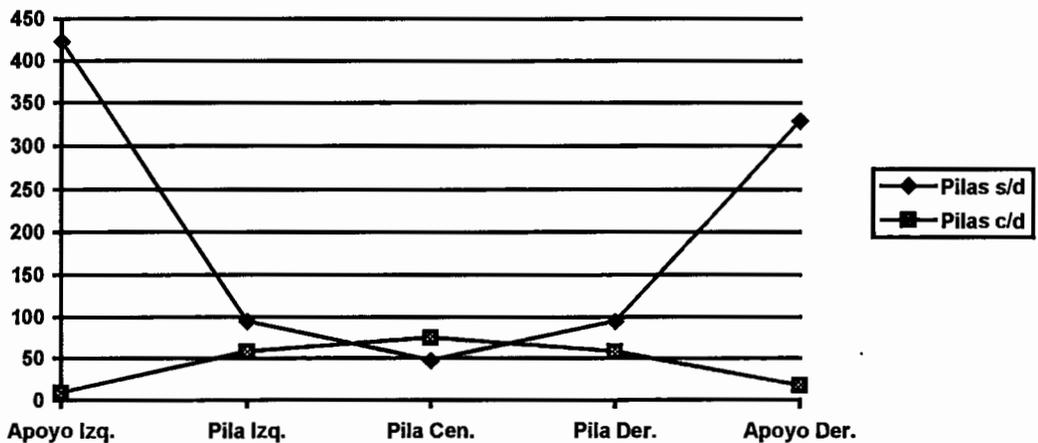


Fig. 26. Gráfica donde se observa los esfuerzos Von Mises en los apoyos c/s dispositivos.

De la misma manera que en la gráfica de la superestructura, las pilas tienden a disminuir sus esfuerzos producidos por la fuerza sísmica, pero como se observa, la pila central presenta un incremento en los esfuerzos debido a que se pierde la condición de empotramiento de la superestructura en los extremos, la cual lograba un comportamiento como marco rígido entre la superestructura y las pilas.

De la misma manera, se determinaron los esfuerzos SXX y SYY, para cada estructura, obteniendo los siguientes resultados;

Esf. (Kg/cm²)

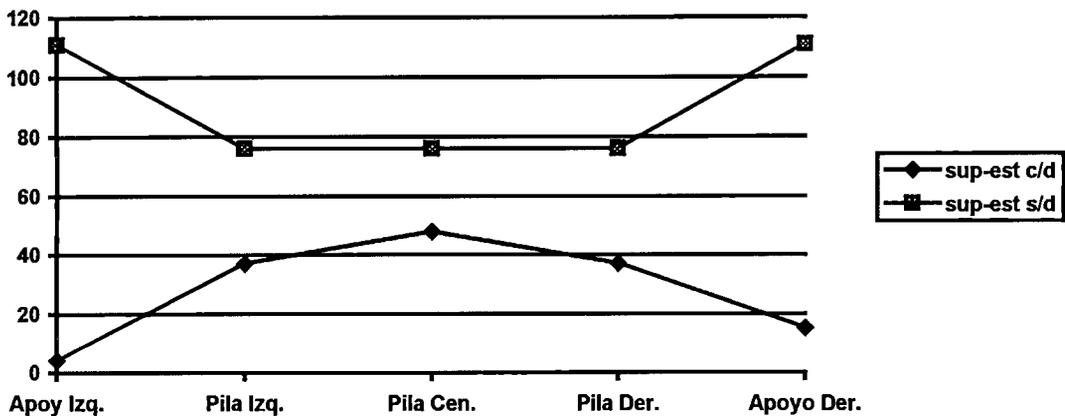


fig. 27. Esfuerzos SXX a compresión en la superestructura.

Esf. (Kg/cm²)

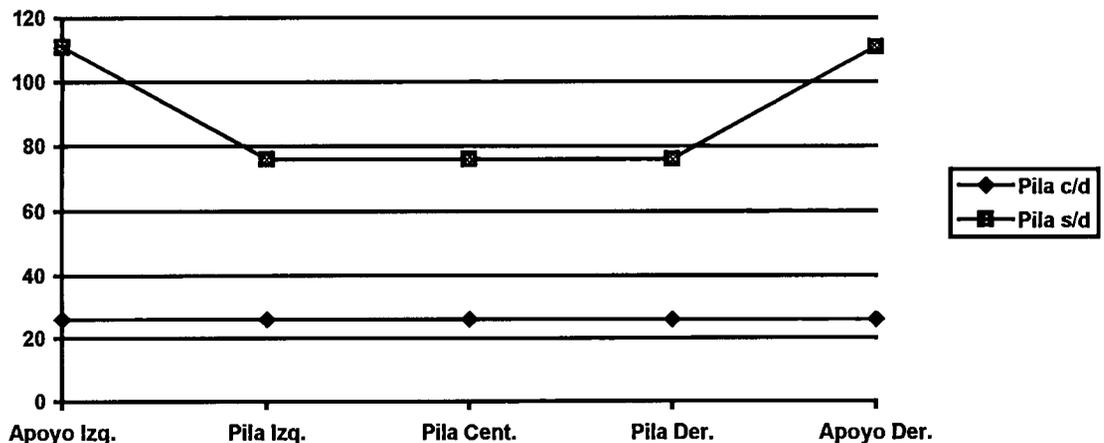


Fig. 28. Esfuerzos SXX a compresión en los apoyos.

Cuando se colocan los dispositivos, se eliminan los esfuerzos SXX a tensión, que se presentaron en ausencia de dispositivos, tal como se muestra en tablas anteriores.

Esf. (Kg/cm²)

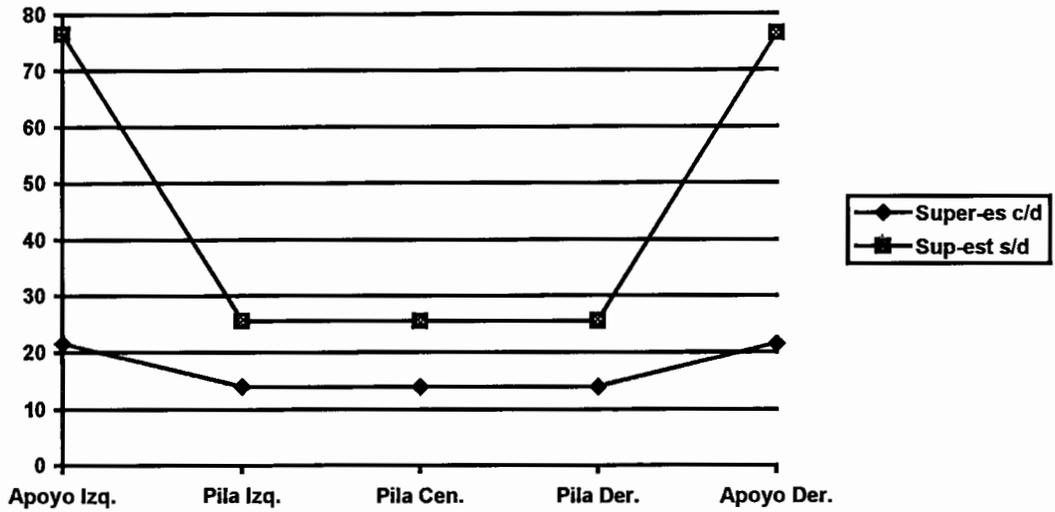


fig. 29. Esfuerzos SYY a compresión en la superestructura.

Esf. (Kg/cm²)

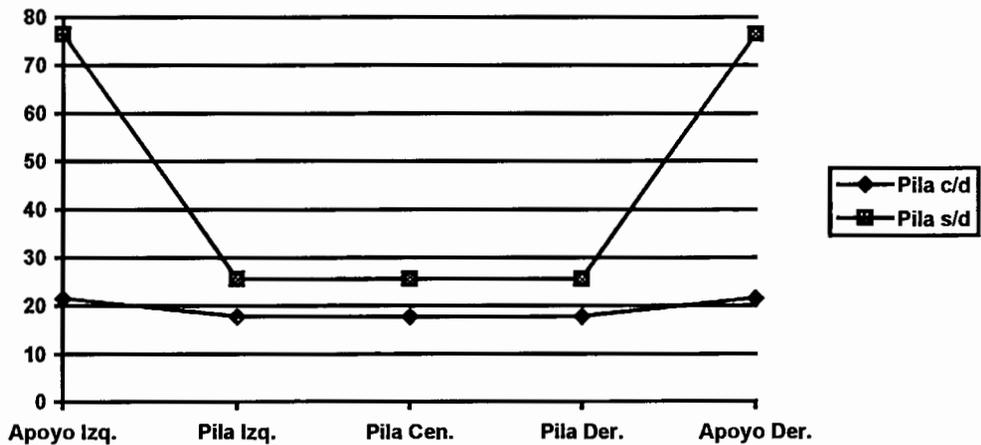
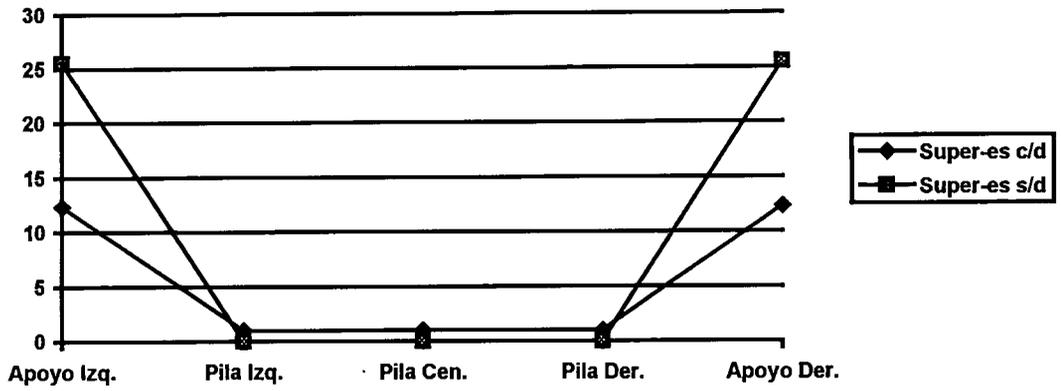


Fig. 30. Esfuerzos SYY a compresión en los apoyos.



Esf. (Kg/cm²)

Fig. 31. Esfuerzos SYY a tensión en la superestructura.

Esf. (Kg/cm²)

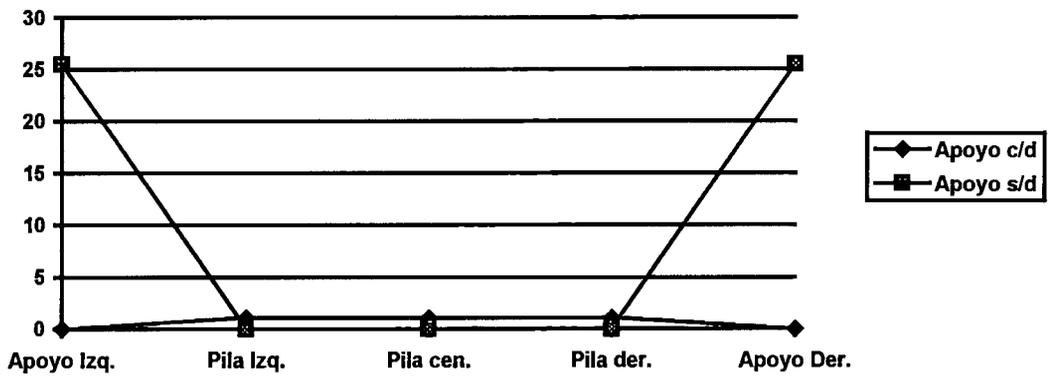


Fig. 32. Esfuerzos SYY a tensión en las pilas.

superestructur	apoyo izq.	pila izquierda	pila central	pila derecha	poyo derech	Promedio
Von mises	7.96%	27.10%	88.29%	27.10%	7.77%	31.64%
SXX compre.	3.66%	48.53%	62.93%	48.53%	13.53%	35.44%
SYX compre.	28.10%	54.88%	54.88%	54.88%	28.10%	44.17%
SYX tension	48.25%	incremento	incremento	incremento	48.25%	48.25%
APOYOS						
Von mises	2.19%	61.58%	156.96%	61.58%	5.30%	57.52%
SXX comp	23.40%	34.12%	34.12%	34.12%	23.40%	29.83%
SYX comp	28.11%	69.58%	69.58%	69.58%	28.11%	52.99%
SYX tension	0%	incremento	incremento	incremento	0%	0%

Tabla 18. Resumen de la reducción en los diferentes esfuerzos en pilas y superestructura.

En la tabla 18, donde menciona incremento, se debe a que en la estructura existe un esfuerzo de 1.03 kg/cm², el cual no existe cuando la estructura cuenta con dispositivos de rigidez máxima (caso1).

Como se puede observar en la tabla 18, la reducción de los esfuerzos en la estructura cuando se utilizan dispositivos de neopreno, es muy favorable puesto que los elementos mecánicos tienden a disminuir significativamente

5. - CONCLUSIONES.

La utilización de los dispositivos de neopreno en estructuras como puentes, donde existe riesgo sísmico, es necesario, puesto que mejora el comportamiento estructural de los diferentes elementos que componen la estructura cuando se presenta la excitación sísmica, (tal como se observó en las gráficas y tablas anteriores). Al utilizar los dispositivos, existe disminución de los elementos mecánicos considerablemente, lo cual depende de la rigidez de tales dispositivos, pero aunque algunos elementos tienden a incrementar los esfuerzos en cierta dirección (en el presente caso en particular), no es muy considerable, ya que el incremento es pequeño comparado con la resistencia que tienen los elementos, es decir el comportamiento ante este incremento de esfuerzos se encuentra dentro del rango elástico del material.

Este tipo de dispositivos logran un incremento entre los desplazamientos de la superestructura y los apoyos, lo cual crea un sistema estructural más eficiente ante la excitación sísmica, por que reduce la respuesta sísmica en la superestructura debido a que le proporciona mayor flexibilidad, haciendo que tienda a comportarse como cuerpo rígido, tal como se observa en el anexo II.

Otra de las ventajas en la utilización de los dispositivos, es el incremento del periodo natural de la estructura, puesto que basados en el análisis dinámico, se obtuvo un periodo natural de 0.4 segundos al considerar la estructura sin dispositivos (caso I, máxima rigidez), mientras al colocar los dispositivos (caso 2), el periodo se incremento a 1.43 segundos (ver anexo III). Es decir; se modifica el periodo natural de la estructura al colocar dispositivos, logrando así, poder estimar la respuesta dinámica de la estructura ante cierta excitación, lo cual depende de la rigidez de los dispositivos.

Como se mencionó, es necesario conocer los tipos de dispositivos existentes y su comportamiento, para que con base en las características del puente y dependiendo de la zona sísmica se elija el más eficiente, acorde a el comportamiento esperado de la estructura durante cierta excitación sísmica, el cual depende de el tipo de dispositivo a utilizar.

En el anexo IV se observa como los dispositivos logran la disminución de los esfuerzos transmitidos de la superestructura hacia las pilas.

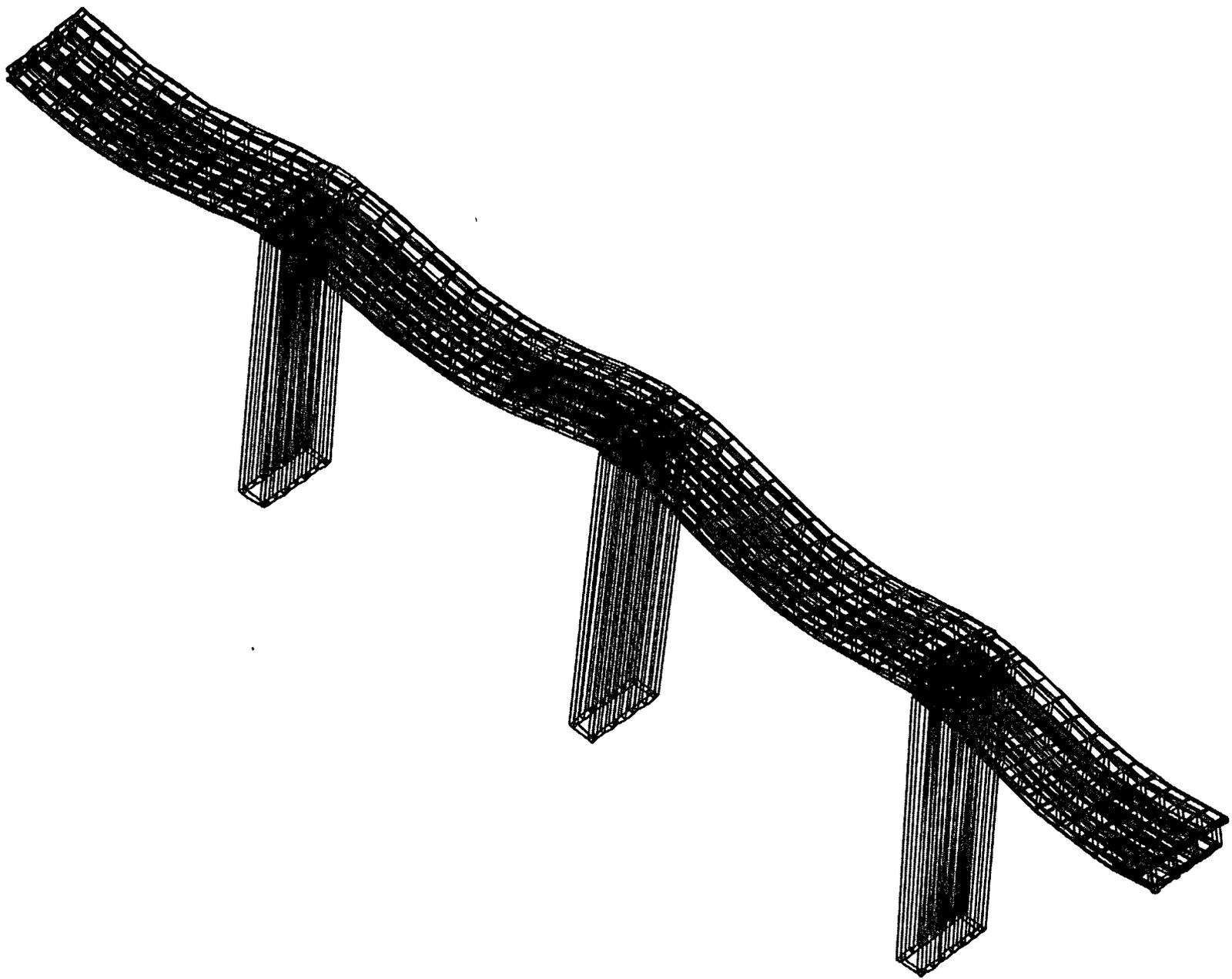
Finalmente, es necesario que el ingeniero encargado del diseño de puentes en zonas sísmicas, tenga entendido claramente el comportamiento de los diferentes dispositivos y sus efectos que ocasiona a los todos los elementos estructurales, con la finalidad de utilizar el más óptimo, para obtener así una mejor respuesta de la estructura ante una excitación sísmica.

6.- REFERENCIAS .

- Manual de Obras Civiles CFE.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard Specifications for Highway Bridges, Fifteen Edition, 1992.
- Join Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures. Charles W. Roeder.
- Diseño Estructural. Dr. R. Meli P. Editorial Limusa.
- Comportamiento sísmico en Puentes sobre apoyos elastomericos. UNAM.
- Seismic isolation and energy dissipation devices for highway bridges. Dr. Ing. Giorgio Macchi. Seminario Internacional de Puentes (Instituto Mexicano del Transporte) 1991.

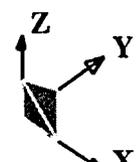
ANEXO I

DISPLACED-SHAPE
MX DEF= 1.76E-02
NODE NO.= 2478
SCALE = 1.0
(MAPPED SCALING)

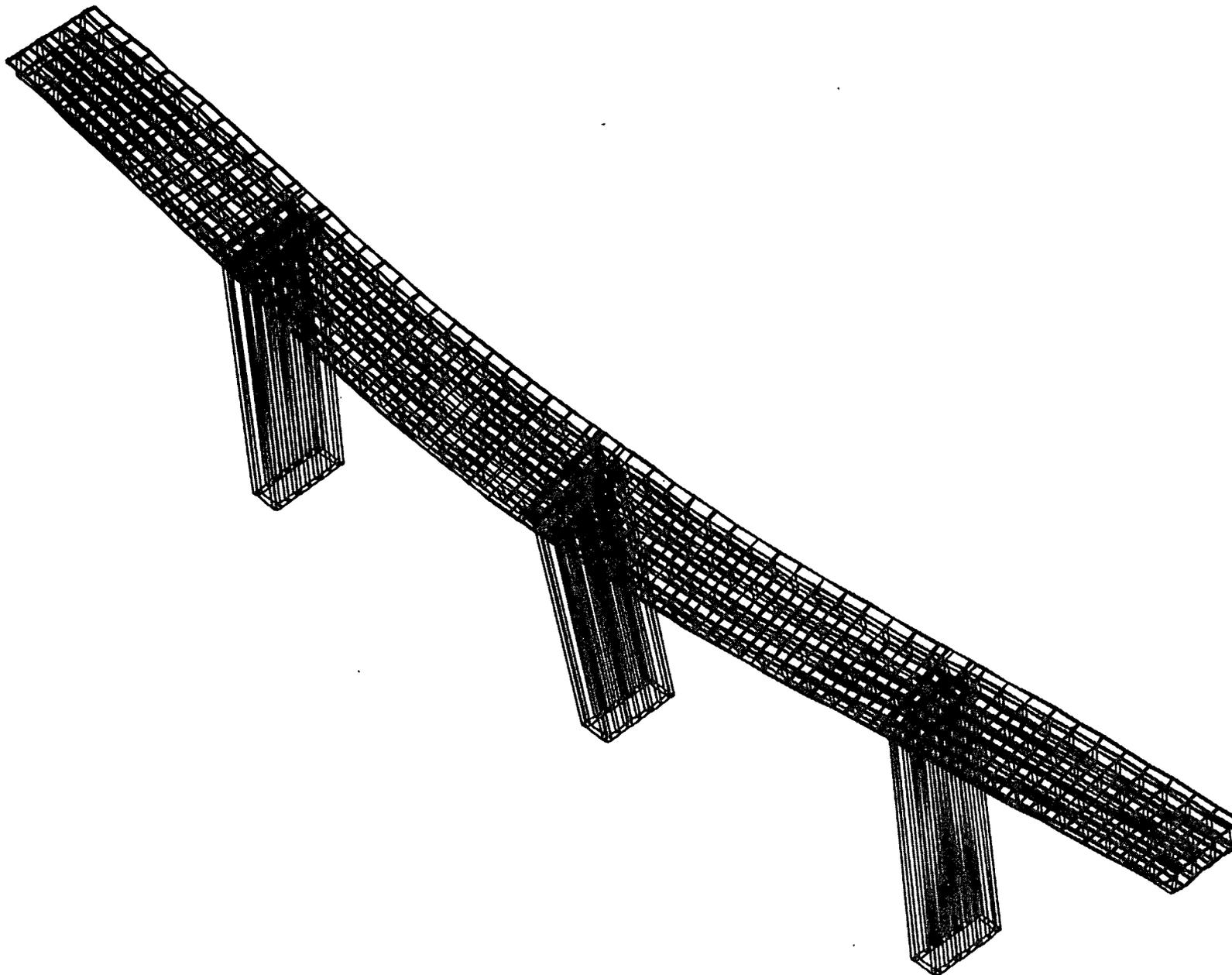


EMRC-NISA/DISA

FEB/24/97 11:05:30

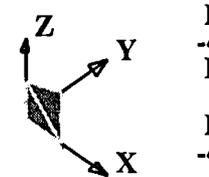


MODE SHAPE PLO
MX DEF= 8.42E-02
NODE NO.= 3058
SCALE = 1.0
(MAPPED SCALING)



EMRC-NISA/DISPL

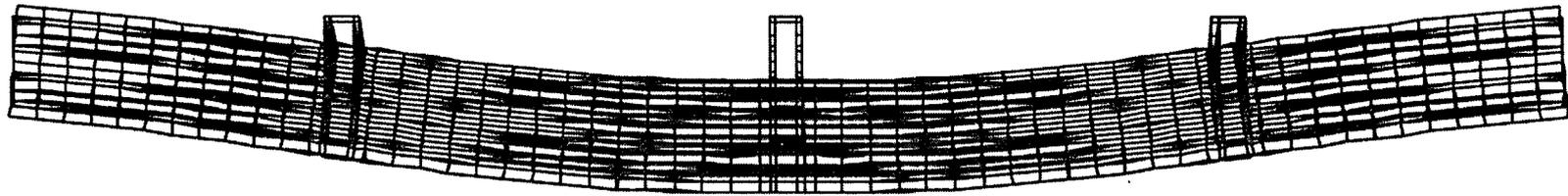
FEB/24/97 09:45:33



MODE NO. = 1 FREQUENCY = 2.48622E+00 Hz



MODE SHAPE PLO
MX DEF= 8.42E-02
NODE NO.= 3058
SCALE = 1.0
(MAPPED SCALIN



EMRC-NISA/DISA

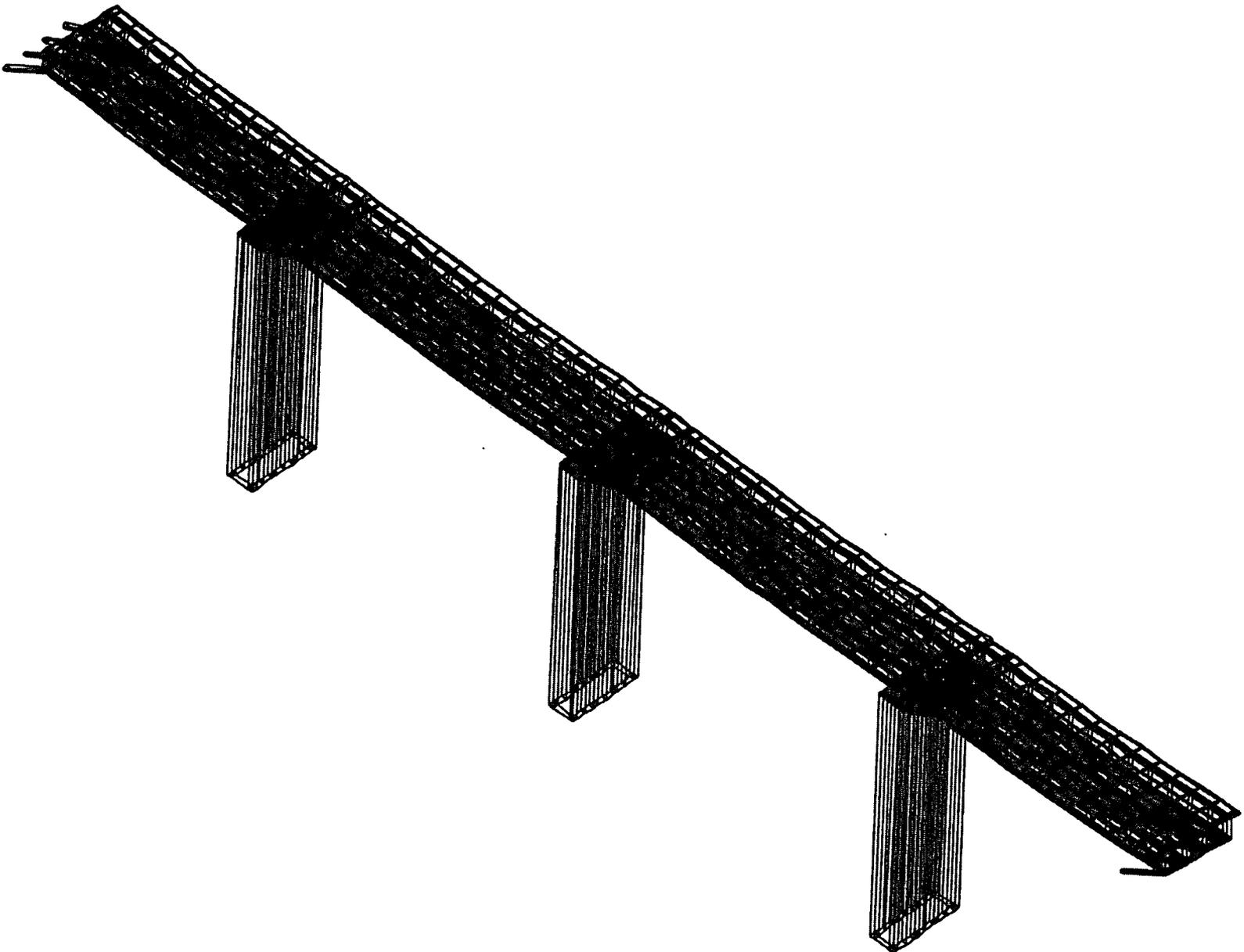
FEB/24/97 09:46:36



MODE NO. = 1 FREQUENCY = 2.48622E+00 Hz

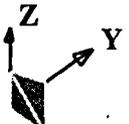
ANAEXO II

DISPLACED-SHA
MX DEF= 1.36E-01
NODE NO.= 2477
SCALE = 1.0
(MAPPED SCALIN



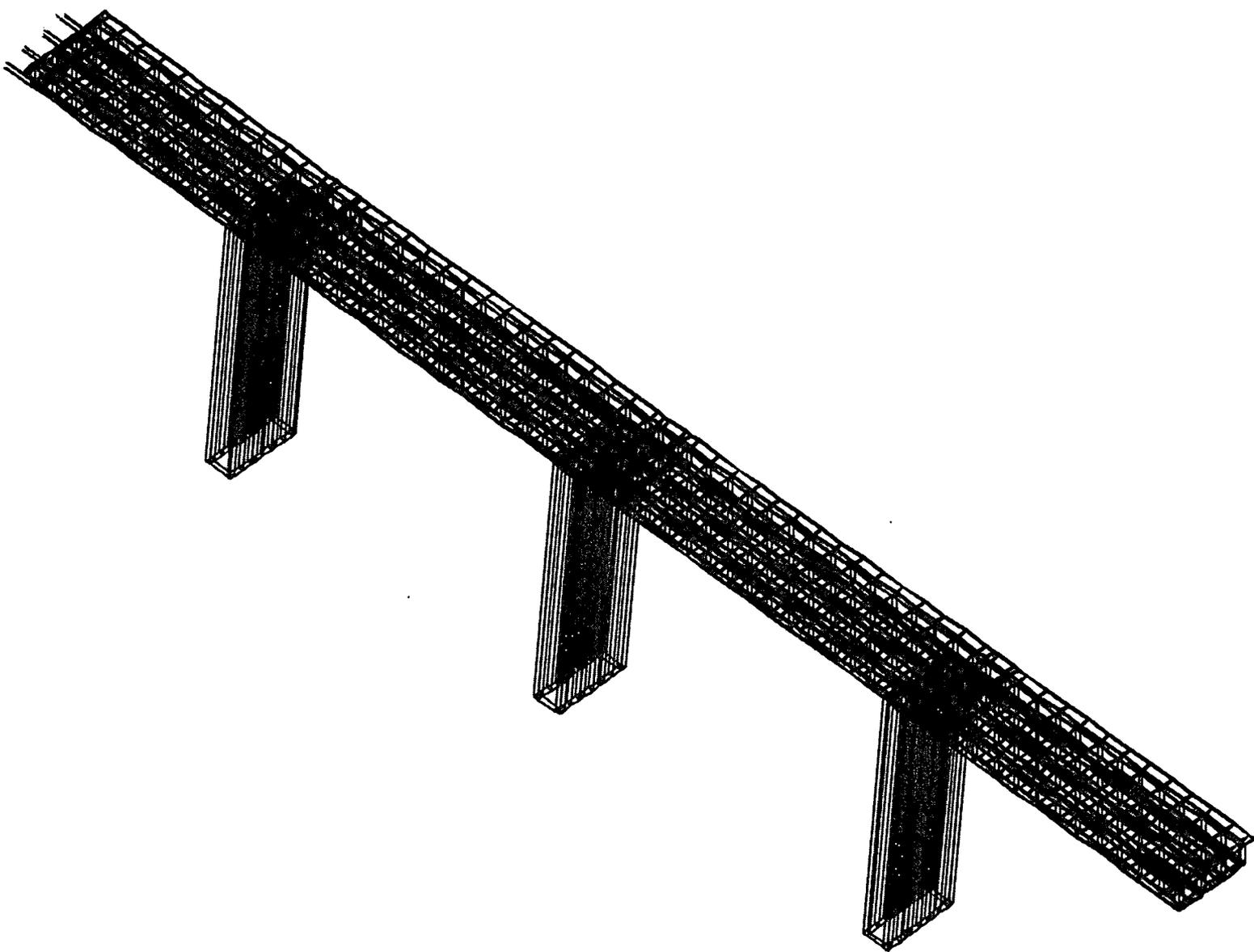
EMRC-NISA/DISI

FEB/24/97 10:57:55



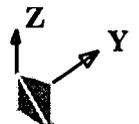
ANAEXO III

MODE SHAPE PL
MX DEF= 5.52E-02
NODE NO.= 1444
SCALE = 1.0
(MAPPED SCALIN



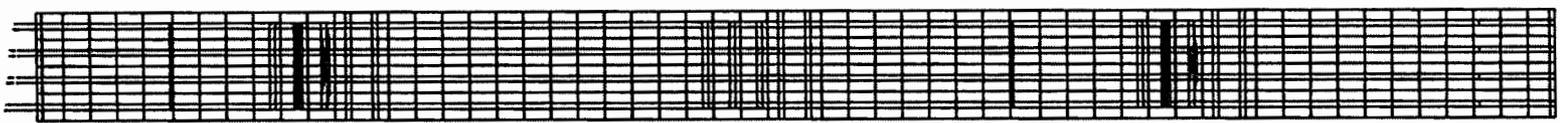
EMRC-NISA/DIS

FEB/24/97 10:42:38



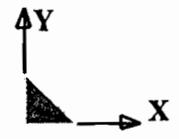
MODE NO. = 1 FREQUENCY = 6.99154E-01 Hz

MODE SHAPE PLO
MX DEF= 5.52E-02
NODE NO.= 1444
SCALE = 1.0
(MAPPED SCALIN



EMRC-NISA/DIS

FEB/24/97 10:43:4

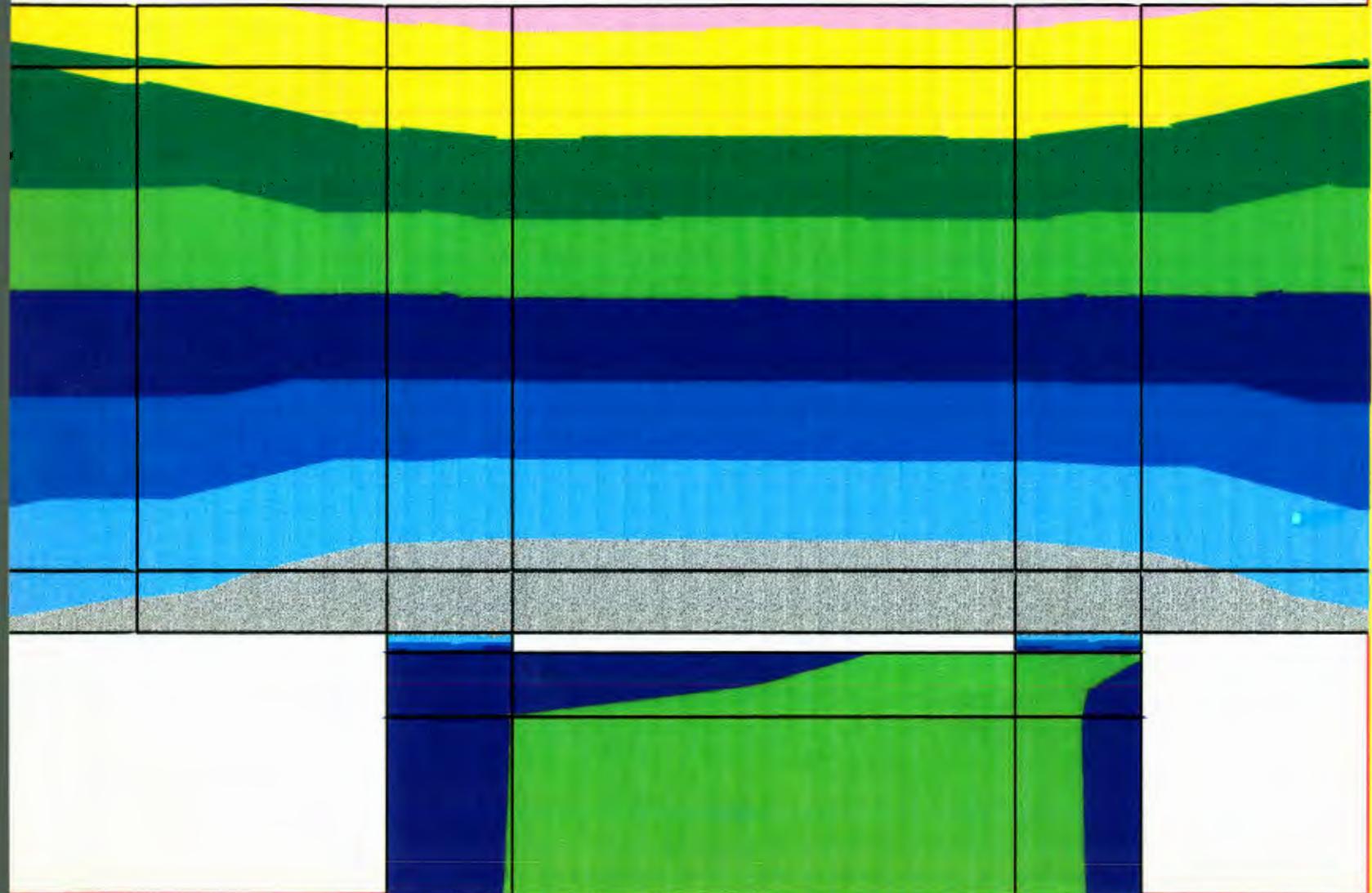


MODE NO. = 1 FREOUENCY = 6.99154E-01 Hz

ANAEXO IV

SXX - STRESSES

VIEW : -478.6645
RANGE: 387.0914



EMRC-NISA/DISPI

FEB/24/97 16:19:30

