



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

49
24

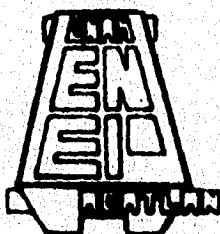
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ACATLAN"



"EFECTO DEL AISLAMIENTO DE BASE EN LA
RESPUESTA NO LINEAL DE ESTRUCTURAS"

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
NORMA VERONICA ZAVALA CUEVA

ASESOR DE TESIS: Dr. en I. RICARDO GONZALEZ ALCORTA



ACATLAN, ESTADO DE MEXICO

1998

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mis padres por apoyarme en todos momentos y de quienes aprendí a fijarme una meta y luchar por alcanzarla.

A mis hermanas por su confianza y por ser ellas un ejemplo a seguir.

Un Agradecimiento muy especial al Dr. en Ing. Ricardo González Alente por su apoyo como asesor y como Amigo, por su confianza y su ayuda para la elaboración del presente trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Escuela Nacional de Estudios Profesionales "Acatlán" por permitirme aprender y darme una formación como Ingeniero, al M. en Ing. Carlos Chce León por su ayuda y sus tan acertados comentarios.

CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1. Aislamiento de Base	5
1.1 Antecedentes históricos del aislamiento de base	5
1.2 Tipos de aislamiento sísmico	8
1.3 Códigos y reglamentos	13
Capítulo 2. Descripción de los edificios en estudio	16
2.1 Ubicación	16
2.2 Descripción de los edificios en estudio	16
2.3 Sistema de aislamiento propuesto	18
Capítulo 3. Modelaje matemático	20
3.1 Análisis dinámico experimental	20
3.2 Descripción de los programas de análisis	21
3.3 Modelaje matemático de la superestructura	28
3.4 Modelaje de la superestructura tridimensional y del sistema de aislamiento	37
Capítulo 4. Análisis de la respuesta lineal	39
4.1 Acelerogramas seleccionados	39
4.2 Respuesta de las estructuras empotradas	40
4.3 Respuesta de las estructuras aisladas	41
4.4 Comparaciones y comentarios	44
Capítulo 5. Análisis de la respuesta no lineal	46
5.1 Respuesta del modelo bidimensional	46
5.2 Respuesta del modelo tridimensional	50
5.3 Comparaciones y comentarios	53

Capítulo 6. Identificación de Sistemas	54
6.1 Descripción del método de identificación de sistemas	54
6.2 Modelo matemático propuesto	55
6.3 Estimación de parámetros	56
6.4 Comparaciones y comentarios	59

Capítulo 7. Conclusiones	60
---------------------------------	-----------

Referencias

Tablas y Figuras

Apéndice

Introducción

Las grandes pérdidas tanto humanas como económicas, debidas a catástrofes naturales, particularmente las de carácter sísmico, han impulsado a que se desarrolle un especial interés en los problemas asociados con el diseño de estructuras sismo-resistentes. Una gran dificultad que se ha presentado, (evitando que se realice un método de diseño completamente satisfactorio) recae en la problemática de la predicción de las características e intensidades de los sismos a los cuales las estructuras estarán sujetas.

Los movimientos del suelo durante un sismo son poco definidos, así como los picos de aceleraciones positivas o negativas, tienen variadas amplitudes y ocurren en intervalos de tiempo variados, éstos pueden presentarse en todas las direcciones, pero los daños más acentuados se restringen al plano horizontal. Los registros con los que se cuenta hoy en día sobre sismos de alta intensidad son pocos, por lo que son escasas las bases para la predicción de un sismo en el futuro, de cualquier forma en ningún evento se es capaz de predecir su naturaleza exacta; sin embargo, se pueden diseñar las estructuras de forma tal que puedan soportar los movimientos intensos sin llegar al colapso.

Otra dificultad estriba en el hecho de que si se desea hacer un análisis realista para que una estructura soporte las fuerzas severas ocasionadas por un sismo debe tomarse en cuenta el comportamiento inelástico que puede presentarse debido a que muy pocas estructuras resisten los sismos sin presentar alguna deformación plástica, es decir, manteniéndose todo el tiempo en el rango elástico (esta restricción se debe principalmente al costo elevado que esto implicaría), por lo tanto se debe diseñar a la estructura para que, permitiendo que incurra en el rango plástico libere parte de la energía inducida por el sismo en forma de pequeñas deformaciones que no afecten severamente a la estructura.

El advenimiento de edificios más altos, que por razones económicas son más esbeltos, el período de las estructuras tiende a caer en la región donde el sismo tiene su energía dominante, esto hace necesario el considerar a la estructura como un sistema dinámico, en el cual el amortiguamiento interno es un parámetro importante para disminuir su respuesta. Sin embargo, este amortiguamiento es pequeño para algunas estructuras y cuando son sometidas a sismos intensos, es insuficiente para prevenir las aceleraciones que se generan, llevando a la estructura más allá del límite elástico.

Esto ha motivado a buscar una opción racional que atenue los daños ocasionados por los sismos en las estructuras. Por lo cual, en la presente década se ha intensificado el estudio de mecanismos especiales que sirvan para reducir la respuesta sísmica de las estructuras; dentro de estos los que más desarrollo han tenido son los aisladores de base.

El sistema de aislamiento es la colección de elementos estructurales, los cuales incluyen todas las unidades individuales de aisladores, que tienen como finalidad minimizar las fuerzas ocasionadas por el sismo y disiparlas siguiendo un comportamiento histerético. En un principio se pensó en un sistema que aislara a la edificación de las fuerzas generadas en el suelo evitando con esto daños en las estructuras; varios intentos se realizaron en la antigüedad para lograr tal objetivo.

En la actualidad se conocen gran diversidad de sistemas de aislamiento, entre los cuales se encuentran los sistemas de aislamiento deslizante, sistemas de aislamiento con cojinetes elastoméricos, sistema de aislamiento re-centrante y los sistemas de aislamiento combinados con elastómeros y sistemas aislados deslizantes, a éste último grupo pertenecen los elastómeros laminados con corazón de plomo, mecanismos que consisten en cubos o cilindros compuestos de placas de hule y acero alternadas y un cilindro de plomo en su centro. La función del hule es la de generar una fuerza restitutiva que permita reubicar a la estructura en su posición original después de ser movida por el sismo. El plomo en su parte central representa un incremento en el amortiguamiento del sistema y en su capacidad para disipar la energía contenida en este.

Debido a estas características este sistema ha sido empleado en la presente tesis, para analizar el comportamiento que tendrán las estructuras al ser sometidas a la acción sísmica cuando son aisladas y cuando no lo son.

El aislamiento de base permite reducir los daños en las estructuras cuando estas son sometidas al efecto de los sismos, por tal motivo ha tenido gran aplicación en Japón, Estados Unidos, Francia, Nueva Zelanda, Italia y en menor escala en otros países.

Alcances de la investigación

La presente tesis trata del análisis del comportamiento dinámico no-lineal de estructuras considerando aislamiento en su base, como a continuación se presenta:

- a) **Respuesta sísmica de estructuras bidimensionales (base empotrada vs base aislada) sometiéndola a dos excitaciones de carácter sísmico, tomando en cuenta únicamente sus efectos unidireccionales.**
- b) **Respuesta sísmica de estructuras tridimensionales (base empotrada vs base aislada) sometiéndola a dos excitaciones de carácter sísmico, considerando sus efectos uni y bidireccionales.**

Organización de los capítulos

La organización y el sumario de los capítulos que se encuentran en el presente trabajo están dados como:

Capítulo 1. Muestra un panorama general de los sistemas de aislamiento.

Capítulo 2. Muestra la descripción y ubicación de los edificios estudiados, así como, el análisis de las características de las estructuras.

Capítulo 3. Presenta una visión comprensiva de los modelos matemáticos empleados. Se describen las capacidades del modelaje de los componentes del sistema aislado, y los modelos analíticos usados para las estructuras tanto aisladas como empotradas.

Capítulo 4. Analiza la respuesta en el rango únicamente lineal, que presentarán las estructuras aisladas y empotradas considerando una representación bidimensional cuando son excitadas con los sismos de análisis.

Capítulo 5. Realiza el análisis de la respuesta de los modelos tridimensionales considerando un comportamiento unidireccional y bidireccional del sistema de aislamiento. Los efectos bidireccionales en los cojinetes de aislamiento son propuestos para un modelo con

características no lineales. Se presenta además una verificación de los resultados con los obtenidos en el capítulo anterior para sus efectos unidireccionales.

Capítulo 6. Se realizó una identificación de sistemas; en la cual se idealizó a las estructuras como un modelo matemático de un sistema de un grado de libertad y se procedió a estimar sus parámetros globales equivalentes empleando una técnica de estimación paramétrica con iteraciones.

Capítulo 7. Se presentan las conclusiones.

Capítulo 1

Aislamiento de base

Los aisladores de base tal como se les conoce hoy día, tuvieron sus inicios en Japón y Nueva Zelanda durante la década de los años sesentas. La aplicación más extensa se encuentra en la construcción de puentes.

El sistema de aislamiento colocado en los puentes, reduce su respuesta y así mismo, impide que los efectos de resonancia se presenten, cuidando que los desplazamientos permanezcan dentro de un límite aceptable. Recientemente se han aplicado también a otro tipo de estructuras, tales como edificios para diferentes usos.

Los aisladores son dispositivos especialmente diseñados para reducir la respuesta en la estructura, tratando de mantenerla en el rango elástico, evitando con esto que los elementos estructurales lleguen a dañarse severamente; pero debido a la intensidad de las fuerzas generadas por el sismo pueden desarrollarse articulaciones plásticas, que por razones económicas no son sugeridas en el diseño; tales articulaciones permiten incrementar la flexibilidad y tienen la capacidad de absorber energía, ambas cualidades permiten limitar las fuerzas generadas por el sismo. Estas deformaciones requieren grandes desplazamientos y son la causa progresiva del deterioro de los elementos estructurales, así como de severos y costosos daños secundarios (ejemplo; fracturas de paredes, ventanas, etc.). En muchos casos la fuerza limitada de la acción inelástica de los elementos estructurales puede no presentarse sino hasta después de que los daños secundarios hallan ocurrido. Por otra parte, la capacidad de la estructura para formar el número y estilos de articulaciones plásticas requeridas no es bien definido. Por lo cual el sistema de aislamiento en la base es una alternativa viable, ya que este tiene la capacidad de disipar energía que le transmite el sismo mediante deformaciones inelásticas formando ciclos de histéresis, evitando con esto que la energía acumulada se traduzca en grandes desplazamientos en la base.

1.1 Antecedentes históricos del aislamiento de base

A principios de 1920 en Nueva Zelanda apareció un boletín de la Sociedad Sismológica de América, el cual trataba el efecto de los sismos, pero poco interés causó en ese momento. Sin embargo, y debido al sismo del 16 de junio de 1929 (sismo Murchison), donde perdieron

la vida 17 personas alteró radicalmente el interés que sobre éste tema se tenía. En este mismo año Martel (1929) publicó un artículo llamado " El efecto de los sismos en edificios con un primer piso suave". Martel consideraba la respuesta de un nivel simple sin amortiguamiento de una armadura, sujeta a una fuerza senoidal. Él encontró que cuando el periodo del movimiento del suelo era mayor que el de la armadura, ésta incrementaba su flexibilidad y las aceleraciones en la azotea eran mayores. Este artículo es el primero que trata el concepto de que una estructura sea especialmente diseñada para resistir sismos por medio del cambio del periodo fundamental, sacándolo de la región donde el sismo tiene su energía dominante, reduciendo así las fuerzas actuantes en la estructura.

Green (1935) investigó el efecto que tenía el aplicar una aceleración lineal sobre un oscilador no amortiguado, por medio de una integración directa de la ecuación de movimiento en cada intervalo de tiempo, donde la aceleración del suelo era linealmente definida. Green reenfaticó la importancia de la necesidad de separar el periodo fundamental de la estructura de los periodos dominantes de los movimientos de la aceleración. El periodo de entrada de la aceleración significó un parámetro importante así como la amplitud de la aceleración misma. Además, una entrada de aceleraciones irregulares inducirían mayores aceleraciones y desplazamientos en la estructura, que una entrada regular de aceleraciones. De acuerdo con el artículo de Green, Johnson (1934) puntualizó que la máxima deflexión producida en una estructura, proporcionándole un movimiento en el suelo, debería ser relativamente independiente del periodo de la estructura solo si el rango del periodo de la estructura era suficientemente más grande que el periodo del movimiento del suelo, así que los efectos de resonancia no eran significativos. Otras contribuciones a la misma discusión puntualizaron que grandes incrementos podrían ocurrir en los desplazamientos calculados por Green, cuando las estructuras consideradas eran sujetas a diferentes tipos de aceleraciones.

Fintel y Khan (1969) criticaron la práctica del diseño de estructuras que permitía desarrollar articulaciones plásticas en los componentes estructurales como un mecanismo para absorber la energía del sismo. Ellos propusieron un sistema de piso suave en donde la estructura era soportada en su base sobre almohadillas elásticas y flexibles ancladas a su cimentación con columnas especialmente diseñadas para fluir en sus extremos durante un sismo moderado. Se esperaba, entonces que en un sismo moderado la estructura se comporte como un cuerpo rígido con una cimentación bilineal histerética, confinando todos los daños a esa cimentación especialmente diseñada.

* El sistema de piso suave consiste en diseñar una estructura con un primer piso (columnas) muy flexible lateralmente, mientras que la rigidez de las columnas restantes de la estructura se mantienen en un nivel de diseño más conservador que el usual.

Caspe (1970) propuso un sistema de aislamiento en el cual la estructura era montada sobre cilindros fijos a cojinetes ensamblados, pero fijos a esta cimentación por almohadillas de goma de neopreno montadas horizontalmente, éstos dispositivos limitan el movimiento a la base de la estructura durante una fuerza.

William (1973) en una investigación experimental sobre el trabajo de Green (1935) concluyó que el aplicar el concepto de un primer piso suave dependería en gran parte de las dificultades encontradas en la práctica. Y después, debido principalmente a la dificultad de implementar ese sistema a las estructuras ese concepto fue postergado durante 30 años.

Williams (1974) en su artículo "estado del arte" sintetizó los problemas de los sismos y sus efectos sobre las estructuras. Consideró que el sistema propuesto por Fintel y Khan (1969) tendría una dudosa estabilidad bajo una fuerte carga sísmica y propuso un método de aislamiento donde la estructura era montada sobre almohadillas deslizantes, así que la fuerza transmitida a la estructura era absolutamente controlada. Así mismo, sugirió el uso de resortes restauradores para limitar el deslizamiento de tal sistema. Husid y Sánchez (1974) investigaron el efecto del amortiguador viscoso; este consistía en un mecanismo de soporte elastoplástico, el cual disipaba la energía teniendo un comportamiento histerético bilineal para la reducción de los desplazamientos de los niveles intermedios. Estos pocos resultados eran similares a los obtenidos por Wirsching (1973).

Skinner et al. (1975) pensando en combinar las mejores características de diferentes mecanismos protectores, propusieron una técnica llamada aislamiento de base, en la cual una estructura era apoyada sobre almohadillas de goma laminada flexible, estas eran colocadas en la interfase cimentación-estructura.

Eidinger y Kelly (1986) encontraron que el uso de cojinetes friccionantes reducían la respuesta de aceleraciones del edificio en la dirección horizontal dejando la respuesta vertical virtualmente inalterada.

Delfosse (1986) desarrolló una prueba experimental y analizó para tal efecto un edificio de 20 niveles, el cual sometió a una excitación sísmica del sismo Taft acaecido en California en 1954; utilizando un sistema ideado por él llamado GAPEC (G.S), sometió al edificio con y sin su sistema. Este sistema consiste en montar a la estructura sobre una base flexible horizontalmente y rígida verticalmente, las almohadillas laminadas tienen un comportamiento no lineal, pero sus características de rigidez son elásticas, reduciendo el cortante máximo. El periodo natural del modelo considerado con su sistema era incrementado de 0.86 a 3.1 s.

Efectividad de los sistemas de aislamiento. Wirshing, (1973) intentó ilustrar la relativa efectividad de diferentes técnicas de proteger a las estructuras del ataque de los sismos. Cinco diferentes sistemas fueron examinados para reducir las vibraciones transmitidas dentro de la estructura desde el suelo:

- a) Un amortiguamiento viscoso entre el suelo y el primer piso.
- b) Una vibración absorbida colocando en la azotea un oscilador auxiliar diseñado para mover fuera de la base a la estructura y así limitar este movimiento.
- c) Incisos a y b juntos.
- d) Un sistema aislador en la base donde la estructura era separada de la cimentación por soportes de resortes y amortiguadores viscosos actuando en la dirección horizontal. El resorte debería ser plástico y elástico con endurecimiento.
- e) Incisos b y d juntos.

Para probar estos sistemas se utilizaron 2 estructuras de 5 y 10 niveles con periodos de 0.5 y 1.0 s respectivamente, excitados por un sismo artificial con densidad espectral característica, y de la misma intensidad que el sismo El Centro (N-S 1940).

La efectividad de los 5 sistemas en la reducción de las vibraciones transmitidas a la estructura y en orden decreciente quedaron numeradas como sigue:

1.- d); 2.- e); 3.- c); 4.- b); 5.- a)

Concluyó que el sistema aislado (d) proporciona suficiente protección para prevenir deformaciones en el rango plástico durante el sismo El Centro.

1.2 Tipos de aislamiento sísmico

El objetivo fundamental de proveer a una estructura con un sistema de aislamiento es el de restringir todas las deformaciones plásticas a mecanismos (especialmente diseñados) que sean fácilmente reemplazables, tratando en lo posible, de mantener a la estructura en el rango elástico durante un sismo. Esos mecanismos deben caracterizarse por su rigidez y su alto

amortiguamiento, características que proporcionan protección a la estructura. El sistema de base aislada tiene la ventaja de no requerir de un mecanismo de control delicado o complejo por que trabaja directamente con las propiedades del material de este componente (Lee .D. M., Medland I. C., 1978).

Los sistemas de aislamiento han sido diseñados esencialmente para limitar el comportamiento no lineal al nivel aislado, imposibilitando una demanda de ductilidad excesiva sobre la estructura. Se idearon para atenuar en gran medida el daño que se podría provocar en la estructura. Las componentes esenciales de un sistema aislado son aquellos elementos que proveen flexibilidad horizontal, capacidad para disipar energía acumulada en la estructura, rigidez bajo niveles menores de carga lateral debida al viento o a sismos moderados.

La flexibilidad es proporcionada por los componentes del sistema aislado tales como bloques friccionantes, cojinetes elastoméricos, sistemas de suspensión de cables o cojinetes neumáticos. Sin embargo, la flexibilidad en la base ocasiona que los desplazamientos sean más largos, por lo que para limitar éstos a niveles de diseño aceptables se debe incrementar el amortiguamiento o colocar aparatos que absorban esa energía, características que son sintetizadas en los sistemas de aislamiento.

La rigidez bajo niveles menores de carga lateral se provee para evitar que las vibraciones perceptibles bajo cargas frecuentemente ocurridas tales como sismos moderados o cargas de viento, ocasionen daño a la estructura. Tal rigidez es provista por un alto módulo de cortante a bajas cargas en alto amortiguamiento de cojinetes elastoméricos o a aparatos diseñados para fallar si esos niveles bajos de carga lateral son excesivos. Actualmente estos mecanismos están diseñados para prevenir que los desplazamientos sean permanentes, como podrían ocurrir en un sistema que fuera deslizante. Esos mecanismos deben tener resortes helicoidales, bloques friccionantes o cojinetes elastoméricos especialmente diseñados que aprovechan el peso de la estructura para recentrarla.

1.2.1 Sistemas de aislamiento de cojinetes elastoméricos

Los cojinetes elastoméricos están elaborados por cojinetes de fricción ligados a delgados platos de acero reforzado. Los cojinetes son muy rígidos en la dirección vertical y muy flexibles en la horizontal.

El alto amortiguamiento es inherente en los cojinetes de goma (Kelly, 1986), sin embargo no así en el neopreno, usado en los cojinetes con elastómero, por tal motivo en Nueva Zelanda se han desarrollado diversos disipadores de energía que pueden ser usados para realzar el amortiguamiento en sistemas de conexiones elastoméricas (Buckle, 1990). De esos sistemas el más altamente desarrollado y extensivamente usado es el de cojinetes de plomo-goma (Buckle, 1990). Este consta de un centro de plomo en un orificio cilíndrico al centro de un cojinete elastomérico. El centro de plomo produce un incremento sustancial en el amortiguamiento, incrementando también la resistencia ante cargas de viento proporcionando alta rigidez inicial a los cojinetes.

El alto amortiguamiento en los cojinetes de goma (Kelly 1986) fue usado en el primer edificio de base aislada en los Estados Unidos, en el Centro de Justicia y Leyes de la comunidad de Foothill, San Bernardino, California. La rigidez al cortante de la goma del cojinete es alta para pequeñas fuerzas, pero tiene un decremento de un factor de cerca de cuatro o cinco como la fuerza incrementada, alcanzando un valor mínimo del cincuenta por ciento de la fuerza cortante. Así, para fuerzas pequeñas ocasionadas por sismos moderados o por viento el sistema presenta una alta rigidez y periodos cortos, pero cuando la carga lateral se incrementa la rigidez vá decreciendo. Para cargas muy altas cerca del máximo sismo creble la rigidez nuevamente se incrementa. El amortiguamiento sigue el mismo patrón, solo que en forma más dramática, incrementándose desde un valor inicial de 20 por ciento a un mínimo del 10 por ciento y después incrementándose nuevamente hasta alcanzar valores muy altos. En suma, la capacidad de disipación de energía permanece inafectada por la variación de la carga lateral que los cojinetes presentan.

Los cojinetes de goma reforzados convencionalmente, han sido usados para la protección contra los sismos en Francia (Delfosse 1986) a pesar del bajo amortiguamiento. El sistema se bautizó con el nombre de GAPEC. Los cilindros de acero suave han sido sumados a este sistema para darle un amortiguamiento adicional. Otro sistema que recibe el nombre de SEISMAFLOAT (Staudacher 1985) consta de cojinetes de goma no reforzados.

El sistema de cojinetes elastoméricos altera la frecuencia fundamental de las estructuras aisladas a valores más bajos que las frecuencias de los sismos predominantes. Este efecto acoplado al incremento de la capacidad de disipación de energía se refleja en las reducciones significativas de las fuerzas sísmicas impartidas al sistema estructural a la parte aislada. La primera consideración para aplicar el sistema de cojinetes elastoméricos es la estabilidad. Además, esos sistemas son sensitivos al contenido de frecuencias del movimiento del suelo.

1.2.2 Sistemas de aislamiento deslizante

La Electricite de Francia (EDF) y la Spie-Batignolles (SBTP) han desarrollado un sistema aislante de elastómeros-deslizantes, para una planta de energía nuclear (Plinchon 1978;1980). Este sistema utiliza cojinetes de neopreno laminados con platos deslizantes de acero inoxidable arriba de cada cojinete. La idea de juntas deslizantes como un sistema de aislamiento resulta atractiva por su bajo costo, ya que no requiere de una complicada tecnología o un experto conocimiento para utilizarlo en los edificios, motivo por lo cual fue desarrollado en la India (Arya, 1984) y en China.

1.2.3 Sistema aislado deslizante re-centrante

El sistema aislado deslizante con un mecanismo re-centrante consta de cojinetes deslizantes (teflón deslizante sobre platos de acero inoxidable) con el mecanismo re-centrante. Los cojinetes deslizantes tienen como función soportar a la estructura desde el suelo. Los cojinetes adicionales proveen un mecanismo de disipación de energía por virtud de ese comportamiento friccionante. Los mecanismos re-centrantes están provistos para prevenir que los grandes desplazamientos sean permanentes, que pueden suscitarse en sistemas libremente deslizantes. Esos mecanismos pueden ser resortes helicoidales, bloques friccionantes o cojinetes especialmente diseñados para usar el peso estructural para recentrar.

Diversos sistemas de aislamiento deslizante con mecanismos recentrantes han sido propuestos. Los más notables son el sistema sismo barrera (Casper y Reinhorn, 1986), el disco cojinete deslizante y el sistema de resorte helicoidal (Constantinau, Mokha y Reinhorn, 1990), el sistema de base aislada de fricción (Mostaghel et al., 1988), el sistema péndulo de fricción (Zayas et al., 1987), el sistema TASS (Hisano et al., 1988).

El sistema sismo barrera usa cojinetes deslizantes de teflón con vigas de acero para recentrar. El sistema de resortes helicoidales y el disco de cojinete deslizante utilizan cojinetes deslizantes de teflón con unidades de resortes helicoidales para recentrar. En los sistemas de base aislada de fricción constan de varias interfaces de teflón y acero colocadas en el núcleo friccionante, el cual provee la capacidad recentrante. En el sistema péndulo de fricción la interface deslizante toma una forma esférica, así que la capacidad recentrante es provista por el peso de la estructura. En el sistema TASS los bloques friccionantes usados en paralelo con elastómeros-TFE, junto con los cojinetes deslizantes proveen la capacidad recentrante.

El sistema aislado deslizante limita las fuerzas generadas por el sismo a la interface aislada y no altera la frecuencia fundamental del sistema a bajos valores (Constantinou et al., 1990). Esos sistemas tienen baja sensibilidad al contenido de frecuencias de excitación y son estables.

1.2.4 Sistemas combinados con elastómeros y sistemas aislados deslizantes

Un modelo de 9 niveles con el sistema combinado de elastómeros y sistema aislado deslizante recientemente ha sido investigado (Chalhoub y Kelly, 1990) en el U.C. Berkeley. Un mecanismo para elevar la resistencia ha sido incorporado a los cojinetes con elastómeros. Esas investigaciones revelan que el sistema combinado es efectivo aislando a la estructura. Cuando los desplazamientos ocurridos son excesivos, los mecanismos para incrementar la resistencia son activados, incrementando así la rigidez horizontal en el sistema aislado, limitando de esta forma, los desplazamientos.

1.2.5 Otros sistemas

Otros sistemas, los cuales se conocen con el nombre de Gerb (Huffman, 1986) constan de resortes helicoidales de acero y un amortiguamiento viscoso. La capacidad de absorción de energía y la flexibilidad son provistas en todas las direcciones. Otro notable sistema usado en Nueva Zelanda es el sistema de pila (Boardman, 1983).

1.3 Códigos y reglamentos

Los aisladores de base son mecanismos que ayudan a disipar la energía alojada en una estructura, debida al ataque de una excitación sísmica, para tal efecto alargan el periodo de la estructura sacándola de la zona crítica de tal movimiento, esto trae consigo en ocasiones grandes desplazamientos, los cuales se reducen por medio de la disipación de la energía contenida en la estructura. La finalidad de éstos dispositivos es la de proteger a la estructura, que en determinadas circunstancias tendrá un comportamiento incierto. Con base en esto, se han creado códigos de diseño que regulan las condiciones y características de los sistemas de aislamiento.

La Asociación Estructural de Ingenieros de California (SEAOC 1990) ha propuesto 4 requerimientos tentativos para el diseño y la construcción de edificios sísmicamente aislados. La filosofía del diseño en general de este documento es:

- a) La estructura de base aislada debe permanecer estable, por requerimientos de diseño de desplazamientos.
- b) El sistema de aislamiento deberá proveer incrementos en la resistencia, cuando se incrementan los desplazamientos.
- c) El sistema deberá ser capaz de soportar repetidas cargas cíclicas sin una degradación significativa en su rigidez.
- d) El sistema aislado deberá tener propiedades cuantificables ingenierilmente, de tal manera que se puedan obtener estimaciones formales de la cantidad de la respuesta de la estructura.

Dos procedimientos de diseño son permitidos bajo ésta propuesta de diseño y son:

- a) El uso de ecuaciones simples que prescribe el diseño de valores de desplazamiento y cortantes basales. Esas ecuaciones son similares para la formulación de la fuerza sísmica lateral hoy en uso para edificios diseñados convencionalmente. Este procedimiento es aplicado en edificios rígidos de configuración regular, los cuales son desplantados en suelo sólido o sitios de rocas.
- b) Se requerirá un análisis dinámico no lineal paso a paso cuando la estructura aislada esté localizada sobre un perfil sólido con un factor de sitio de S_4 y/o cuando el sistema aislado no es capaz de producir una fuerza restauradora como se especifica

en los requerimientos, o cuando las propiedades de fuerza-desplazamiento del sistema aislado son dependientes del porcentaje de carga o de la carga vertical y lateral.

El documento también recomienda que el modelo analítico deberá ser tridimensional y deberá incluir ambos, el sistema aislado y la superestructura. Además, las características fuerza-desplazamiento del sistema aislado usadas en el análisis deberán ser sustancialmente probadas. El documento recomienda que el análisis deberá ser desarrollado con el sismo de entrada en ambas direcciones ortogonales del edificio (análisis bidireccional).

En base a éste código se ha creado un apéndice en el reglamento UBC en 1991, el cual señala claramente que el diseño de estructuras aisladas sísmicamente debe tomar en cuenta las características propias del lugar en donde se va a desplantar y sus características. El reglamento nos indica que las estructuras pueden ser regulares o irregulares, en el segundo caso se debe realizar un análisis dinámico para su diseño. La estabilidad del sistema de aislamiento ante carga vertical debe comprobarse mediante estudios analíticos y pruebas experimentales, cuando el desplazamiento lateral debido al sismo sea igual al desplazamiento máximo total permitido para el sistema de aislamiento.

El método estático puede emplearse en el sistema de aislamiento siempre y cuando cumpla con las siguientes restricciones:

- a) La estructura se localice al menos a 15 km de cualquier falla activa.
- b) La estructura se desplante en terreno firme.
- c) La altura total de la estructura montada sobre el sistema de aislamiento es menor a 19.8 m o cuenta con cuatro pisos o menos.
- d) El periodo natural de vibración de la estructura aislada es menor o igual a tres segundos.
- e) El periodo natural de vibración de la estructura aislada es mayor a tres veces el periodo fundamental de vibración de la estructura en base rígida.
- f) La estructura aislada sea regular.

g) El sistema de aislamiento debe tener las siguientes características:

- La rigidez efectiva del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño es mayor que una tercera parte de la rigidez efectiva al 20 por ciento del desplazamiento de diseño.
- El sistema de aislamiento debe ser capaz de proporcionar una fuerza restitutiva.
- La curva carga-deformación del sistema de aislamiento es independiente de las cargas verticales y de cargas laterales en ambas direcciones.

El sistema de aislamiento sísmico se puede diseñar utilizando análisis modal espectral siempre y cuando cumpla en el punto g. Se deberá realizar un análisis dinámico paso a paso para diseñar cualquier estructura que no cumpla con las limitaciones mencionadas.

Capítulo 2

Descripción de los edificios en estudio

2.1 Ubicación

Para el desarrollo de la presente tesis se analizarán dos estructuras, una destinada a oficinas, (la cual es un proyecto estructural que se pretende construir en el estado de Guerrero, en la zona III de Acapulco) y la otra a departamentos desplantada también en el estado de Guerrero. Esta región geográfica es considerada de alto riesgo sísmico, por este motivo se presupone que los aisladores de base tendrán una aplicación importante para reducir la respuesta de las fuerzas en las estructuras, debidas a las excitaciones a las que serán sometidas.

El periodo correspondiente a este tipo de suelo (firme) se encuentra entre los 0.5 y 1 s.

2.2 Descripción de los edificios en estudio

EDIFICIO DE OFICINAS

Estructuración. El edificio cuenta con 4 niveles; está estructurado a base de marcos rígidos de concreto formados por trabes y columnas, un sistema de piso con base en una losa maciza de concreto de 10 cm de espesor. Se distingue la presencia de una cubierta tridimensional en azotea, la cual cubre un hueco central del edificio. Cuenta con una fachada lateral de concreto ligero no estructural sobre los cuatro costados del edificio. El edificio tiene dimensiones en planta de aproximadamente 42 por 42 m en la planta baja; las dimensiones de las plantas superiores van disminuyendo, formando la estructura una configuración de pirámide truncada (figuras 1a, 1b, 1c, 1d).

Para el diseño del sistema de cimentación se consideró una capacidad de carga del suelo sobre el cual se desplanta la estructura de 3 t/m², la cual fué determinante para que se eligiera una losa de cimentación de concreto de 20 cm de espesor con contratraves como sistema de cimentación, a fin de minimizar los hundimientos diferenciales que se puedan presentar dadas las pobres características del suelo sobre el cual se desplanta la estructura.

Criterios de diseño. La estimación de las cargas de diseño utilizadas para la estructura, están basadas en un uso destinado a oficinas en lo referente a las cargas muertas y vivas. Para la evaluación de las cargas sísmicas se tomó en cuenta el reglamento de construcciones del Estado de Guerrero.

En la azotea se consideró una carga viva de 100 kg/m^2 y una carga muerta de 440 kg/m^2 , mientras que en los pisos intermedios una carga viva de 250 kg/m^2 y una carga muerta de 340 kg/m^2 .

En la cubierta tridimensional de azotea se consideró una estructura con peso propio de 100 kg/m^2 , que incluye el acrílico, peso propio de los elementos estructurales y luminarias. En la fachada lateral se consideró una estructura de concreto ligero con un peso de 150 kg/m^2 , soportado por elementos de acero que se sujetan a la estructura de concreto; estos elementos de soporte no se consideraron como elementos estructurales.

Reglamentos y códigos de diseño. El diseño por sismo se basó en las especificaciones del Reglamento de Construcciones del Estado de Guerrero. Debido a la estructuración irregular, a su importancia y al alto riesgo sísmico de la zona se eligió un factor de comportamiento sísmico de $Q=2$, estructura tipo B, localizada en la zona III. Con base en la localización del edificio se tomó un valor de coeficiente sísmico igual a 0.86.

EDIFICIO DE DEPARTAMENTOS

Estructuración. El edificio presenta una estructura de 14 niveles, con base en muros de mampostería y losa de vigueta y bovedilla, destacándose la presencia de muros de concreto en la zona de elevadores del edificio. En la figura 2 se presenta un isométrico de la estructura, donde se aprecia una significativa irregularidad en elevación. Su sistema de cimentación es con base en una losa de cimentación de concreto de 20 cm de espesor, con contrarabes de concreto.

Criterios de diseño. La estimación de las cargas de diseño utilizadas para la estructura se basó en un uso destinado a departamentos en lo referente a las cargas muertas y vivas. Para

la evaluación de las cargas sísmicas se tomó en cuenta el Reglamento de Construcciones del Edo. de Guerrero.

En la azotea se consideró una carga viva de 100 kg/m^2 y una carga muerta de 440 kg/m^2 , mientras que en los pisos intermedios una carga viva de 250 kg/m^2 y una carga muerta de 340 kg/m^2 .

Reglamentos y códigos de diseño. El diseño por sismo se basó en las especificaciones del Reglamento de Construcciones del Estado de Guerrero. Debido a la estructuración irregular, a su importancia y al alto riesgo sísmico de la zona, se eligió un factor de comportamiento sísmico de $Q=2$, estructura tipo B, localizada en la zona III. Con base en la localización del edificio se tomó un valor de coeficiente sísmico igual a 0.86.

2.3 Sistema de aislamiento propuesto

En ambas estructuras el sistema de aisladores sísmicos se propuso con base en sus características principales y éste fue un sistema con base en elastómeros con corazón de plomo (figura 3).

Características principales. Este sistema de aislamiento tiene sus inicios en 1975 en Nueva Zelanda y fue propuesto por W. H. Robinson (Skinner et al., 1975). Este sistema ha sido empleado mundialmente para aislar las superestructuras de los puentes, y su aplicación se ha extendido en la actualidad a edificios.

La característica primordial de éste aislador está definida por presentar comportamiento bilineal con un rango importante de comportamiento elástico ($Tb1 / Tb2 \geq 1$) y una moderada no-linealidad ($0.20 < \xi < 0.30$).

Este sistema fue empleado en el presente trabajo debido a las siguientes características:

- a) Está diseñado para soportar grandes cargas verticales
- b) Brinda flexibilidad lateral con una adecuada capacidad de carga

- c) Proporciona grandes cantidades de amortiguamiento
- d) Permite alcanzar cortantes basales y desplazamientos del aislador bajos en su diseño
- e) No es excitado por vientos comunes ni sismos moderados.

Disipación de energía. Los elastómeros laminados con corazón de plomo permiten disipar gran cantidad de energía por medio de un comportamiento histerético (debido al corazón de plomo).

Este comportamiento puede idealizarse por medio de un comportamiento bilineal como el mostrado en la figura 4, podemos observar en ésta que las rigideces elástica y post-fluencia pueden ser estimadas como:

$$Kb_1 = 10 Kb$$

$$Kb_2 = Kb$$

Donde Kb es la rigidez propia del elastómero y está dada en función del módulo de cortante del elastómero ($G = 10.2 \text{ kg/cm}^2$), del área y la altura del elastómero, es decir:

$$Kb = G \frac{A}{h}$$

Capítulo 3

Modelaje matemático

Debido al notable desarrollo de la tecnología, así como a la sofisticación de los programas para computadora hoy en día es posible analizar las estructuras con menor margen de error, con mayor precisión y agilidad.

3.1 Análisis dinámico experimental

En la presente tesis se realizaron los cálculos pertinentes para la obtención de las propiedades dinámicas de la estructura, tales como frecuencias naturales y formas modales todo en una forma teórica, para poder idealizar a la estructura, en un modelo más simple contando con las mismas propiedades y características del original. Una manera de comprobar que tal consideración es correcta es por medio de la comparación de los resultados obtenidos teóricamente con los registrados experimentales.

Analizar la estructura destinada a departamentos con el método de vibración ambiental permitió obtener sus propiedades dinámicas. Este método experimental consiste en registrar y analizar las vibraciones que sufren las estructuras provocadas por fuerzas pequeñas como viento, tránsito de vehículos, etc. Tales vibraciones pueden tener un amplio intervalo de frecuencias, por lo que pueden ser excitados varios modos, así que analizando las pequeñas amplitudes generadas se pueden determinar las frecuencias naturales de la estructura, así como las formas modales asociadas.

Existen varias bondades que este método presenta, tales como no interferir en el funcionamiento de la estructura, no necesitar de un gran equipo humano para obtener las respuestas, constar de un material instrumental electrónico pequeño, pero sumamente sensible, ya que las aceleraciones registradas son muy pequeñas, por lo tanto se requieren instrumentos especiales.

Los resultados obtenidos con este procedimiento mostraron características muy similares a las obtenidas con el programa ETABS.

3.2 Descripción de los programas de análisis

El análisis de una estructura con algún programa de computadora nos evita invertir tiempo en cálculos manuales, además de darnos mayor exactitud y más confianza en cuanto a resultados se refiere. Se utilizaron los programas de análisis considerando dos y tres dimensiones, y fueron:

- a) *Etabs* (Wilson E y Habibullah A., 1983)
- b) *Drain-2d* (Kannan A. y Powell G., 1975)
- c) *3D-Basis* (Nagarajah S., Reinhorn A. M., y Constantinou M. C., 1991).

3.2.1 Programa Etabs

El programa Etabs realiza un análisis tridimensional de las estructuras, manteniéndolas en el rango lineal, analizándolas estática y dinámicamente, considerando a los edificios como estructuras de cortante. Una de las ventajas de utilizar este programa es que reconoce las características inherentes a la naturaleza básica del edificio en análisis.

La formalidad de un modelo eficiente y la solución del problema se lleva al cabo en la idealización de la estructura como un sistema de subestructuras con base en marcos tridimensionales y muros de cortante (los que pueden ser interconectados en un mismo nivel de una forma tridimensional para darles continuidad en los momentos producidos en estos), conectados por diafragmas de piso, los que son considerados infinitamente rígidos en su propio plano. Este programa cuenta con la capacidad de desconectar cualquier línea de columna del diafragma de piso en cualquier nivel, permitiéndole movimientos independientes y diferentes cargas a las otras columnas conectadas al diafragma.

Este programa considera en su análisis (ya sea estático y/o dinámico) tres grados de libertad por diafragma, obteniendo de esta forma desplazamientos, giros, cortantes de entrepiso y momentos de volteo acumulados, por nivel; tomando en consideración los efectos P- Δ . En el análisis dinámico, el ETABS toma en consideración los tres grados de libertad por diafragma al calcular los periodos y las formas modales de la estructura, reflejando así la existencia o

no del acoplamiento entre alguno de los grados de libertad con respecto a los otros dos. El programa puede considerar en su análisis los elementos columna, viga, panel y diagonal.

Para los *elementos columna*: se considera que las columnas deberán siempre ser verticales en cualquier nivel. Los extremos de las columnas pueden ser articulados o empotrados. Para su formulación considera las deformaciones axiales, de cortante, de flexión y de torsión. Estos elementos pueden estar conectados o no al diafragma de piso en cada uno de sus extremos. Es necesario conocer el área axial y de cortante, el momento de inercia y la constante torsional. Para reducir la longitud efectiva de las columnas sobre ambos ejes se considera como zona rígida la unión de las vigas con las columnas. Estas características pueden ser calculadas por el programa proporcionándole tan solo el tipo de sección y sus dimensiones, por lo que el programa obtendrá las propiedades geométricas, así como la zona rígida del elemento.

En los *elementos viga*: las vigas serán consideradas horizontales en cualquier nivel en una crujía predeterminada (entre dos líneas de columna). Así mismo, sus extremos pueden estar empotrados o articulados. Tendrán una forma prismática. Para su formulación se incluirán los efectos de las deformaciones por cortante, por flexión y por torsión. Los efectos de deformación por cortante en la dirección no principal, axial y por pandeo serán activados si alguno de los extremos de la viga está unido a un nudo donde la columna está desconectada del diafragma de piso.

Estos elementos también requieren de propiedades tal como el área axial y de cortante y la constante torsional, así también de la longitud de las zonas rígidas en sus extremos.

Los *elementos panel*: Estos elementos están localizados entre dos líneas de columnas cualesquiera siendo estas consecutivas o no, entre dos niveles consecutivos cualesquiera. Los paneles que están ubicados en el nivel del piso serán asumidos como empotrados en su base. Siendo posible ensamblar paneles para formar muros con cualquier forma (C, T u otra forma). El programa calculará todos los elementos mecánicos para el muro en el centro de gravedad de éste. La formulación de éste tipo de elemento permite que podamos conectar a las vigas, columnas y a las diagonales a fin de mantener la continuidad en los momentos, sin la necesidad de modelar cualquier tipo de elemento artificial como vigas rígidas o diagonales equivalentes.

Este elemento requiere sólo de un número de identificación en el que se especifica si se conectará con otro panel en el mismo nivel para formar un muro y del mismo espesor.

Los elementos en diagonal: Estos elementos se encuentran en cualquier plano vertical entre dos líneas de columna cualesquiera siendo éstas consecutivas o no entre dos niveles consecutivos. Los extremos de las diagonales pueden estar empotrados o articulados. Su forma es considerada como prismática. En las diagonales no se consideran zonas rígidas. Para formular estos elementos se incluyen los efectos de deformaciones axiales, de cortante, flexionante y torsional. Requieren de propiedades como el área axial y de cortante, el momento de inercia y la constante de torsión. En caso de que el área de cortante y el momento de inercia tengan un valor nulo, entonces la diagonal carecerá de rigidez al pandeo.

3.2.2 Programa Drain-2d

El programa Drain-2d realiza un análisis dinámico inelástico de estructuras planas sometidas a movimientos sísmicos. Idealiza a las estructuras como el ensamblaje de un conjunto de elementos discretizados en un plano, concentrando sus masas en los nudos; cada nudo posee tres grados de libertad, pudiéndose especificar a cualquier grado de libertad como restringido

El programa realiza el análisis dinámico empleando el método directo de rigideces considerando los desplazamientos nodales como grados de libertad desconocidos, este programa consiste en una serie de subrutinas base mediante las cuales se determina la respuesta dinámica por medio de la integración paso a paso. El paso de integración deberá ser pequeño para que el programa pueda describir con exactitud la historia de aceleraciones usada como excitación. Esta excitación sísmica está definida mediante las historias de tiempo-aceleración. Se pueden aplicar las cargas estáticas antes de las cargas dinámicas, no permitiéndose la cedencia de los elementos bajo las primeras cargas.

Este programa puede analizar los sistemas estructurales, pudiendo éstos estar conformados por elementos tipo armadura; se considera que estos elementos solo tienen cedencia en tensión y pandeo elástico en compresión, elementos tipo viga-columna; estos elementos solo ceden formando articulaciones plásticas en sus extremos, elementos con conexiones semirígidas; en estas se considera una relación bilineal de momento-rotación y elementos con

muro de cortante; son representados como muros de relleno, teniendo rigidez solo a la fuerza cortante, pudiendo fallar de manera frágil .

3.2.3 Programa 3D-Basis

El programa 3D-Basis (Three Dimensional Nonlinear Dynamic Analysis) realiza un análisis dinámico inelástico de estructuras tridimensionales con aislamiento en la base, sometidas a una excitación de carácter sísmico.

Este programa surgió en el Centro Nacional para Investigaciones en Ingeniería Sísmica (NCEER), cuya finalidad es la de expandir y diseminar los conocimientos que acerca de los procedimientos estructurales que ayuden a minimizar la pérdida de vidas y de propiedades ocasionadas por los sismos.

Las ventajas del uso de este programa se pueden enumerar como:

- a) Para las componentes de aislamiento puede considerar un comportamiento tanto unidireccional como bidireccional.

Los aspectos esenciales que se requieren para modelar los componentes del aislamiento en un comportamiento unidireccional son:

- (a) Una apropiada representación de la rigidez al cortante en ambos rangos pre y post fluencia.
- (b) Una representación apropiada del esfuerzo dependiente de la rigidez al cortante.
- (c) Una representación de la pérdida de rigidez al cortante con incrementos en la carga axial (efectos P- Δ).
- (d) Una adecuada representación de la energía disipada o del amortiguamiento histérico, la fuerza dependiente del amortiguamiento histérico y el incremento del amortiguamiento con el incremento de la carga axial (efectos P- Δ).

El programa puede considerar las acciones bidireccionales en el aislador.

b) Toma en cuenta los modelos para los efectos de la carga axial (efectos P- Δ).

Muchos modelos han sido propuestos para considerar los efectos P- Δ en cojinetes con elastómeros, el más notable es el modelo mecánico propuesto por Koh et al (1988;1989). Este modelo toma en consideración la reducción en la rigidez horizontal y en la altura, además del incremento en el amortiguamiento debido a los efectos P- Δ .

Los efectos de la carga axial en los cojinetes elastoméricos y cojinetes deslizantes son de importancia en el programa (3D-Basis); ajustando los parámetros apropiados del modelo considerado.

El estudio del comportamiento tridimensional de las estructuras de base aislada requiere de un comprensivo modelo analítico y una solución algorítmica para el análisis dinámico de las estructuras con aislamiento de base. Este modelo conjuntamente con la solución algorítmica involucran el desarrollo del método de la pseudo-fuerza.

Por medio de el novedoso modelo analítico y la solución algorítmica se es capaz de capturar el alto comportamiento friccionante no lineal de los sistemas aislados deslizantes en el plano del movimiento.

Este programa puede realizar un análisis dinámico no lineal tridimensional de estructuras de base aislada en la forma siguiente:

Respuesta sísmica de estructuras de base aislada: Con sistemas aislados deslizantes; sistemas aislados elastoméricos; sistemas deslizantes combinados y elastómeros incluyendo todos los efectos bidireccionales.

El programa parte de dos consideraciones importantes:

- a) La superestructura se mantiene en el rango elástico
- b) El sistema aislado es considerado como no-lineal (las características no lineales fuerza-desplazamiento son modeladas explícitamente)

Modelaje matemático de la superestructura. Aun cuando el programa modela a la superestructura con la consideración de que se mantiene elástica todo el tiempo (tal consideración es razonable en el contexto de estructuras de base aislada, y ha sido base de diversas hipótesis de los investigadores (Tarics et al. 1984) para reducir el esfuerzo computacional) debemos considerar que en algunos casos también se puede comportar como inelástica.

Los edificios de muchos niveles y un centro excéntrico de masas cuya respuesta de resistencia acoplada a movimientos lateral-torsional para un movimiento sísmico, se considerará solo cuando el movimiento es uniforme bajo la base y no contiene componentes rotacionales (Reinhorn et al. 1977, Khan y Chopra 1977). El análisis de tales estructuras requiere sumar los grados de libertad torsional a los grados de libertad traslacional. Así, un edificio con tres grados de libertad por nivel es asumido para representar adecuadamente que la superestructura es elástica, para tal representación el programa considera dos opciones. En la primera opción, la superestructura elástica es asumida para un edificio tridimensional de cortante, y en la segunda opción, la superestructura elástica es asumida para un edificio completamente tridimensional.

Representación del edificio de cortante. En la primera consideración del edificio de cortante el programa idealiza a la superestructura de n-niveles consistente de una losa de piso rígido soportado sobre masas axialmente inextensibles a columnas y muros.

- a) Se asume que el centro de masa del nivel y de la base caen sobre el eje vertical y los centros de resistencia de los niveles y de la base son arbitrariamente localizados.
- b) Así, la representación del edificio tridimensional de cortante es usada para la superestructura, los diagramas de piso son considerados como rígidos, y los muros y las columnas son considerados como inextensibles.
- c) Se presume que el eje principal de resistencia de todos los niveles es idénticamente orientado.
- d) La matriz de rigidez de la superestructura es explícitamente considerada (tabla 1).

- e) La matriz de masa asociada es diagonal e involucra a las masas y a los momentos rotacionales de inercia de cada nivel. Los aspectos sobresalientes de idealizar el sistema son mostrados en la figura 5.

La matriz de rigidez resultante de la superestructura se presenta en la tabla 1. La respuesta dinámica y los valores del pico de respuesta son computados por el 3D- BASIS.

Representación tridimensional. Para la representación del edificio completamente tridimensional, el programa utiliza, los valores que son obtenidos del ETABS (Wilson et al. 1975), los eigenvalores y los eigenvectores (para la condición de giro en la base), estos valores son usados en el modelo analítico, el cual incluye el sistema aislado no-lineal. Así, la matriz de rigidez de la superestructura no se considera explícitamente. Las siguientes son las consideraciones hechas:

- a) Cada nivel tiene tres grados de libertad, dos traslaciones en el eje X y Y y una rotación alrededor del centro de masas del piso (figura 6).
- b) La existencia de una losa rígida al nivel de la base que conecta todos los elementos aislados. Los tres grados de libertad de la base son tomados al centro de masas de la base.
- c) Así, tres grados de libertad por nivel son requeridos en la representación tridimensional de la superestructura, el número de modos requeridos para la reducción modal es siempre un múltiplo de tres. El número mínimo de modos requeridos es tres.

Modelaje del sistema de aislamiento. Este programa considera que el sistema de aislamiento tiene un comportamiento no-lineal.

En el programa 3D-Basis los sistemas de aislamiento pueden ser cojinetes aislados deslizantes y/o elastómeros, resortes lineales y elementos viscosos.

Los elementos aislados pueden ser modelados para un comportamiento tanto unidireccional y como bidireccional. El modelo para cojinetes deslizantes puede contar con la variación del coeficiente de fricción con velocidad y la presión del cojinete observada en los cojinetes de

teflón deslizantes (Constantinou et al, 1990). El modelo para cojinetes elastoméricos pueden ser de importancia para el cambio en la capacidad de disipación de energía debido a la variación de la fuerza axial observada en los cojinetes de goma y plomo.

Elementos para modelar los componentes de aislamiento. Diversos elementos de aislamiento son considerados, así que cualquier combinación de éstos puede ser usada para modelar el sistema completamente aislado.

Los elementos de aislamiento son:

- a) **Elementos elásticos:** Estos elementos pueden ser usados para simular en forma aproximada el comportamiento de los cojinetes elastoméricos junto con los elementos viscosos.
- b) **Elementos viscosos:** Este elemento puede usarse para modelar el amortiguamiento equivalente en los cojinetes elastoméricos.
- c) **Elementos histeréticos para cojinetes con elastómero:** Este elemento puede ser usado para simular el comportamiento del alto amortiguamiento de los cojinetes de goma, y plomo.
- d) **Elementos histeréticos para cojinetes deslizantes:** Este elemento puede ser utilizado para simular el comportamiento de las interfaces de teflón-acero y otras interfaces friccionantes. Ambos comportamientos, pueden ser modelados en una o dos direcciones.

3.3 Modelaje matemático de la superestructura

Para el modelaje de la superestructura se realizaron análisis tridimensionales y bidimensionales para cada una de las estructuras.

3.3.1 Modelaje tridimensional

El modelaje en tres dimensiones de las estructuras se realizó en el programa Etabs, éste programa nos permite obtener las propiedades dinámicas de las estructuras considerando un análisis elástico.

El modelaje matemático se realizó (en ambas estructuras) siguiendo la metodología propuesta por el ETABS, el cual realiza un análisis lineal de las estructuras que son sometidas a la acción de cargas estáticas y dinámicas, el programa admite 3 grados de libertad por diafragma de piso (el cual se considera infinitamente rígido) asociado a dos desplazamientos horizontales de traslación y una rotación rígida alrededor de un eje vertical que coincide con los centros de masa en cada nivel.

Este programa toma los efectos P- Δ en su análisis, además de los efectos de torsión provocados por las excentricidades de masa y rigidez.

De los planos estructurales y arquitectónicos de los edificios se definió su geometría, masas, elementos, materiales y cargas.

En el edificio destinado a oficinas fueron considerados en su modelaje columnas, trabes, zonas rígidas, así mismo, cargas muertas y cargas vivas.

Para el edificio destinado a departamentos fueron considerados muros de mampostería, y en la zona de elevadores muros de concreto, castillos de concreto para confinar el muro, trabes equivalentes con una porción de losa de acuerdo con lo recomendado en el Reglamento de Construcciones del Edo. de Guerrero.

EDIFICIO DE OFICINAS

Modelo matemático de la estructura empotrada (Etabs). Para el análisis y diseño definitivo de la estructura se consideraron las siguientes combinaciones de carga:

COMBINACIÓN 1 : 1.4 Carga Muerta + 1.4 Carga Viva

COMBINACIÓN 2 : 1.1 (C.M. + C. V. ins + 100% Sismo X + 30% Sismo Y)

COMBINACIÓN 3 : 1.1 (C.M. + C. V._{ins} + 30% Sismo X + 100% Sismo Y

En donde Sismo X y Sismo Y son las cargas sísmicas estáticas asociadas a las direcciones principales del edificio.

Diseño de la estructura. El diseño de los elementos se realizó con el programa de computadora CONKER, que utiliza los resultados del programa ETABS para el diseño estructural.

Con fines de uniformizar las dimensiones de los elementos, así como el detalle del refuerzo de los mismos, se consideraron las siguientes dimensiones de columnas:

C1	40 × 40 cm
C2	45 × 45 cm
C3	50 × 50 cm
C4	50 × 60 cm

El refuerzo longitudinal propuesto contempla varillas del # 8, # 10 y # 12, con arreglos simétricos de 12 varillas por columna.

Se proponen las siguientes dimensiones de las vigas:

T1	25 × 40 cm
T2	35 × 60 cm
T3	25 × 40 cm

En donde el peralte contempla los 10 cm de la losa de piso. Se seleccionó refuerzo longitudinal con base a varillas # 8 y # 6, con estribos # 3. En las losas de los niveles que conforman la estructura se propone un peralte total de 10 cm, el cual se considera satisfactorio dadas las cargas que actúan sobre la losa, el apoyo perimetral que presentan y a que los claros libres tiene una dimensión máxima de 4.00 m.

Propiedades dinámicas de la estructura. Con las dimensiones propuestas de los elementos estructurales y con la masa correspondiente a cada uno de los niveles se determinaron las

propiedades dinámicas de la estructura considerando su base empotrada, por medio del programa ETABS. La estructura presentó periodos fundamentales de traslación prácticamente iguales en sus dos direcciones principales, con un valor muy cercano a 0.5 s, mientras que el periodo de torsión resultó de 0.43 s. Dadas estas características dinámicas, se considera que el aislamiento sísmico puede ser una alternativa viable para este sistema estructural.

Con este análisis también podemos encontrar los periodos y las formas modales asociadas a ésta estructura, las frecuencias de la estructura se muestran en la tabla 2 y en la figura 7 se muestran las configuraciones modales.

EDIFICIO DE DEPARTAMENTOS

Modelo matemático de la estructura empotrada (Etabs). Se realizó el modelo matemático estructural del edificio siguiendo la metodología propuesta por el programa de computadora ETABS. Para el análisis y diseño definitivo de la estructura se consideraron las siguientes combinaciones de carga:

COMBINACIÓN 1 : 1.4 C. M. + 1.4 C.V

COMBINACIÓN 2 : 1.1 (C. M. + C.Vins. + 100% Sismo X + 30% Sismo Y)

COMBINACIÓN 3 : 1.1 (C. M. + C.Vins. + 30% Sismo X + 100% Sismo Y)

En donde Sismo X y Sismo Y son las cargas sísmicas asociadas a las direcciones a las direcciones del edificio.

Diseño de la estructura. El diseño de los elementos se realizó con el programa de computadora WALLER, que utiliza los resultados del programa ETABS para el diseño estructural. Con fines de uniformizar las dimensiones de los elementos, así como el detalle del refuerzo de los mismos, se consideraron muros de mampostería de 14 cm de espesor y castillos de concreto reforzado de 14 por 20 cm.

Propiedades dinámicas de la estructura. Con las dimensiones propuestas de los elementos estructurales y con la masa correspondiente a cada uno de los niveles de la estructura se determinaron las propiedades dinámicas de la misma considerando su base empotrada, por medio del programa ETABS. La estructura presentó periodos fundamentales de traslación de 0.55 s en la dirección más flexible y 0.38 s en la dirección perpendicular, mientras que el periodo de torsión resultó de 0.28 s.

Los periodos y las formas modales asociadas a ésta estructura, son mostradas en la tabla 3 y en la figura 8 se muestran las configuraciones modales.

3.3.2 Modelaje bidimensional

El modelo analítico bidimensional representativo de las estructuras en estudio fue realizado con el programa Drain-2d, el cual hace un análisis dinámico inelástico de estructuras planas; el edificio es idealizado por medio del ensamblaje plano de los elementos.

Las carencias de analizar a las estructuras en éste programa estriban en la exclusión en su análisis de los efectos bidireccionales y la respuesta torsional, motivo por el cual el programa Drain-2d se sugiere aplicarse a estructuras simétricas, (característica de ambos edificios en estudio).

Para analizar ambas estructuras se realizó un modelo que resultara equivalente a las propiedades dinámicas de las estructuras reales, la cantidad de masa asociada al marco es equivalente a la masa total del edificio, la cual es directamente proporcional al porcentaje de rigidez del marco con respecto a la rigidez total de la estructura original.

En los modelos equivalentes se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) La masa de las estructuras se concentra en los nudos del modelo, por lo tanto resulta una matriz de masas diagonal.
- b) Los desplazamientos horizontales son considerados iguales para ambos nudos del mismo nivel.

- c) Los aisladores en el modelo fueron representados como equivalentes a columnas pequeñas, colocadas en la interfase de la cimentación y la superestructura.
- d) Al modelo histérico bilineal se le asignó una pendiente positiva posterior al punto de fluencia igual al 15% de la rigidez inicial
- e) En el análisis dinámico para el sismo Caleta se definieron 4800 pasos de integración y 3100 para el sismo Unión
- f) Se empleó un $\Delta t = 0.02s$ en el sismo Caleta y un $\Delta t = 0.04s$ en el sismo Unión para obtener una descripción detallada de la historia tiempo-aceleración.

Para analizar los beneficios que se tenía en las estructuras cuando estas eran aisladas se procedió a modelar primeramente a las estructuras elásticamente con el programa Drain-2D. Este programa realiza análisis no-lineal, por lo que para poder realizar un análisis de la estructura empotrada fue necesario asignarle una inercia muy grande en sus elementos viga columna.

Una forma de comparar los resultados obtenidos con el programa Drain-2d, y de esta manera verificar los obtenidos fue realizando un análisis también de la estructura empotrada con el programa Newmark (1959), éste programa realiza un análisis paso a paso de la estructura de " n " grados de libertad, el programa se alimenta con los datos obtenidos del ETABS, como son las matrices triangulares superiores de rigidez, masa y amortiguamiento, así mismo de las características propias de la estructura como lo son las alturas de los niveles y el número de grados de libertad de la estructura en cuestión, los resultados que arroja éste programa son desplazamientos, velocidades y aceleración absoluta y relativa de cada nivel.

Modelo equivalente. El modelo representativo en cada una de las estructuras en estudio se procedió a modelar considerando un marco de 4 (figura 9) y otro de 10 niveles (figura 10) y un nivel adicional para representar el sistema de aislamiento, el modelaje únicamente empleó elementos viga-columna.

Este modelo requiere de sus rigideces equivalentes de entrepiso, dado que éstos valores no son proporcionados por el programa Etabs, fue necesario aplicar un cortante basal ficticio y para determinar la fuerza cortante por entrepiso con base en las propiedades de la estructura

conocidas (altura de entrepiso y pesos de cada nivel) aplicamos el método simplificado de análisis estático propuesto en las Normas Técnicas Complementarias para el diseño por sismo del departamento del Distrito Federal, pudiéndose determinar las fuerzas inducidas en cada nivel por medio de la siguiente fórmula:

$$F_i = \frac{w_i h_i}{\sum w_i h_i} V$$

una vez determinadas las fuerzas de entrepiso se analizaron en el programa Etabs para conocer sus desplazamientos.

Sabemos que:

$$V = \frac{\delta_{adm.}}{K_{adm.}}$$

Despejando $K_{adm.}$ y conociendo los otros valores podemos conocer éste.

Para determinar las propiedades geométricas de las columnas se consideró un edificio de cortante cuya rigidez el cortante en una columna empotrada en ambos extremos es definida como:

$$K = \frac{12 EI}{L^3}$$

Se colocaron vigas con alta rigidez en los extremos de éstas columnas para cumplir con la condición de empotramiento requerida.

Conocidos las $K_{adm.}$ y proponiendo un valor de E y una altura de 3m para cada entrepiso (en el edificio de oficinas) y de 2.60 (en el edificio de departamentos) y de 50 cm para el sistema de aislamiento, podemos obtener el valor de la inercia en cada una de las columnas, y de ésta manera poder crear la base de datos en cada estructura para emplear finalmente el programa Drain-2d y obtener los resultados requeridos (velocidad, desplazamiento, aceleración absoluta y aceleración relativa).

En éste programa se modelaron las estructuras considerando:

- a) Estructura con base empotrada.

- b) Estructura con aislamiento considerando un comportamiento lineal.
- c) Estructura con aislamiento considerando un comportamiento no lineal.

Estos análisis fueron posibles variando las características del sistema de aislamiento.

Para la estructura empotrada se consideró una inercia muy grande en la interface de la estructura con el sistema aislado, evitando con esto que tomara los momentos comportándose no linealmente la estructura.

Sistema de aislamiento. Como aisladores sísmicos se utilizó un sistema con base en elastómeros con corazón de plomo. El comportamiento histerético de este tipo de aislador se representó matemáticamente con un comportamiento bilineal, con una rigidez postfluencia de un 15 por ciento de la rigidez inicial. Estudios experimentales y analíticos han mostrado que los valores de la rigidez inicial del conjunto de elastómeros con corazón de plomo (k_1) y el valor de la carga de fluencia (F_y) se ubican en los siguientes intervalos:

$$k_1 = 10 \text{ a } 20 W \quad (\text{en t/m})$$

$$F_y = 0.045 W \quad (\text{en t})$$

donde W es el peso total de la estructura.

Por lo que el desplazamiento de fluencia queda definido como:

$$e_y = F_y/k_1 = 0.0045 \quad (\text{en m})$$

El sistema de aislamiento se representó como columnas cortas con una altura de 50 cm. situadas entre la cimentación y el primer nivel.

Para su análisis fue necesario considerar un valor de F en la interacción de momento vs carga axial y proporcionarles valores al momento y a la carga, en donde ésta tiene siempre valores altos a fin de impedir la posibilidad de que bajo cargas verticales existiera un flujo en

el aislador, el momento se calculó suponiendo que la columna fluye bajo la acción de un par de fuerzas (V_y) que produce un momento total de:

$$M_r = V_r \cdot L$$

donde L es la longitud de la columna, considerada en este caso de 50 cm.

Este momento se usará en la superficie de interacción del elemento que representa a los aisladores.

Amortiguamiento. En la elaboración de los modelos para el programa Drain-2d se utilizó un amortiguamiento proporcional de la estructura, el cual se encuentra en función de la matriz de rigidez y de la matriz de masa. Por lo que fue necesario determinar las variables α y β cuyos valores definen este amortiguamiento.

Este amortiguamiento se define como:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

donde α y β son las incógnitas, éstas se pueden obtener en base a los siguientes sistemas de ecuaciones lineales cuyos valores dependen de los periodos predominantes de las estructuras:

$$\xi_1 = \frac{\alpha T_1}{4\pi} + \frac{\beta \pi}{T_1} \quad (2)$$

$$\xi_2 = \frac{\alpha T_2}{4\pi} + \frac{\beta \pi}{T_2} \quad (3)$$

donde ξ_1 y ξ_2 son los amortiguamientos modales de la estructura expresadas como fracción del amortiguamiento crítico.

Sustituyendo en estas ecuaciones los periodos obtenidos por medio del programa Etabs finalmente podremos formar la matriz de amortiguamiento para cada una de las estructuras mostradas en el apéndice.

3.4 Modelaje de la superestructura tridimensional y del sistema de aislamiento.

El modelaje matemático de la estructura fue realizado en el programa 3D-Basis, el cual realiza un análisis dinámico tridimensional inelástico. En este se considera que las estructuras diseñadas con aisladores se comportan elásticamente y el aislador inelásticamente.

Los sistemas de aislamiento que puede considerar en su análisis el programa 3D-Basis son:

- a) Cojinetes aislados deslizantes y/o elastómeros.
- b) Resortes lineales y elementos viscosos.

Para el presente estudio se emplearon los elastómeros con corazón de plomo, cuyas características mencionadas anteriormente muestran que son más favorables para las estructuras analizadas.

Del programa Etabs obtuvimos los eigenvalores, además de los periodos y las formas modales con cuyos valores se alimentó el programa.

El diseño de la superestructura se modeló empleando la segunda opción que el programa brinda, es decir, como completamente tridimensional.

Las masas de cada nivel fueron concentradas en el centro de masas.

El programa 3D-Basis considera en su análisis tres grados de libertad por nivel, dos traslacionales y uno rotacional.

Para el modelaje de los aisladores se consideró inicialmente que estos se ubican bajo cada línea de columna de las estructuras. Debido a esto fue necesario realizar un croquis de la planta de cada una de las estructuras y así determinar las coordenadas de cada uno de los aisladores con respecto a su centro de masa

- a) En el edificio de oficinas se colocaron un total de 88 aisladores.
- b) En el edificio de departamentos se colocaron un total de 60 aisladores.

Este programa puede realizar análisis uni y bidireccional. Ambos tipos de análisis fueron realizados. El análisis unidireccional se empleó para comprobar los resultados obtenidos en el programa Drain-2D, tales como cortantes basales y comportamiento histerético.

El programa 3D-Basis proporciona en sus resultados:

- a) Comportamiento histerético bilineal de los aisladores con degradación de rigidez de cada uno de los aisladores en esquina (en ambas direcciones).
- b) Aceleraciones absolutas por nivel y grados de libertad.
- c) Historia de cortantes basales.
- d) Desplazamientos por nivel y por grado de libertad en las direcciones X, Y y torsión.

El programa 3D-Basis nos brinda dos ventajas sobre el Drain-2D:

- a) Incluye en su análisis la respuesta torsional.
- b) Puede considerar en su análisis los efectos bidireccionales.

La desventaja estriba en considerar únicamente la no linealidad en los aisladores y considerar a la superestructura como elástica. Esta hipótesis aunque es universalmente aceptada aún no es probada.

Capítulo 4

Análisis de la respuesta lineal

En este capítulo de la tesis se analizará únicamente el comportamiento lineal de las estructuras incluyendo al sistema de aislamiento.

Mantener a una estructura en el rango elástico resultaría ideal, pero costoso, por lo que los códigos de diseño permiten que las estructuras puedan disipar energía formando articulaciones plásticas incursionando en el rango inelástico, por tal motivo estos reglamentos aceptan la posibilidad de daño estructural.

4.1 Acelerogramas seleccionados

Las estructuras fueron sometidas a dos registros sísmicos obtenidos de la Costa del Pacífico, primordialmente de la costa de Guerrero, este sitio proporciona ventajas para la selección de los acelerogramas por su gran potencial sísmico de la zona y el tendido de una serie de acelerógrafos con 30 aparatos instalados.

Para el análisis de las estructuras se utilizaron acelerogramas del sismo del 19 de Septiembre de 1985, la elección de estos acelerogramas se debió a su magnitud de 8.1 y su alto contenido de energía.

Los registros fueron obtenidos de las estaciones CALE y UNION en sus direcciones NS y EW. Los registros de estas estaciones son de amplitudes importantes y tienen una amplia variedad de contenidos de frecuencia. Estos acelerogramas tienen periodos fundamentales (considerados estos como el periodo asociado a la amplitud máxima de cada componente) de 0.6 s para la estación CALE y de 0.5 s para la estación UNION.

Para determinar los periodos con mayor energía de cada registro sísmico se obtuvieron los espectros de fourier de las estaciones mencionadas en sus direcciones NS y EW. Los registros utilizados son mostrados en la figuras 11 y 12 con sus respectivos espectros de fourier.

Estos sismos de análisis sólo fueron empleados en su dirección E-W.

4.2 Respuestas de las estructuras empotradas

Considerando ambas estructuras como empotradas y sometiéndolas a las excitaciones sísmicas Caleta y Unión en los programas de análisis Drain-2D y Newmark, obtuvimos respuestas en cuanto a desplazamientos, velocidades y aceleraciones registradas en la azotea y de los cortantes registrados en su base.

4.2.1 Historia de desplazamientos y cortantes

EDIFICIO DE OFICINAS

Respuesta sismo Caleta. Para obtener la respuesta de la estructura empotrada se empleó el modelo equivalente bidimensional (Capítulo 3).

Las respuestas obtenidas en cuanto a desplazamientos de la estructura son mostrados en la figura 13, en esta se encuentra una comparación entre los resultados de los programas Drain-2D y Newmark, observándose una buena correlación entre ambas respuestas. La finalidad de esta comparación fue la de corroborar los resultados obtenidos en el programa Drain-2D.

En esta figura se observa que el desplazamiento máximo de la azotea fue de 3.5 cm registrándose ésta en la fase intensa del sismo que oscila entre los 35 y 40 segundos con una velocidad máxima de 40 cm/s y una aceleración de 600 cm/s²

Respuesta sismo Union. En la figura 14 podemos observar la gráfica comparativa de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones absolutas de azotea en el dominio del tiempo, entre los programas Newmark y Drain-2d. Podemos observar una buena concordancia entre las respuestas, por lo que podemos deducir que nuestros resultados obtenidos son confiables.

EDIFICIO DE DEPARTAMENTOS

Respuesta sismo Caleta. Siguiendo una metodología similar a la del punto anterior observamos en la figura 15 los resultados obtenidos en ambos programas, observándose una

buena correlación entre ambas respuestas con amplitudes ligeramente mayores en el programa Newmark. Los desplazamientos máximos oscilan entre 2.5 y 3 cm, a una velocidad de 45 cm/s y una aceleración máxima de 900 cm/s².

De las figuras anteriormente mencionadas podemos observar que ambas estructuras empotradas muestran una buena correlación en los dos programas de análisis, por lo que podemos tener confianza en los resultados arrojados por el programa Drain-2d.

Respuesta sismo Unión. Podemos observar de la figura 16 que en la estructura empotrada se puede apreciar una buena correlación entre las respuestas obtenidas con los dos programas. Podemos apreciar, además que la estructura empotrada se desplaza 3 cm. cuando se le somete a la acción sísmica. Estos resultados muestran unas insignificantes diferencias con respecto a las amplitudes.

4.3 Respuesta de las estructuras aisladas

Mediante el programa Drain-2d fue posible analizar el comportamiento elástico del marco plano representativo en cada una de las estructuras considerando sistema de aislamiento.

Se analizó la respuesta lineal de las estructuras aisladas en función de los desplazamientos, velocidades, aceleraciones de azotea, así como cortantes en la base. Con fines meramente comparativos se estudió la respuesta brindada por la estructura empotrada y la estructura aislada.

Sometiendo cada uno de los modelos a dos excitaciones (Sismo Caleta y Sismo Unión) pudimos obtener las respuestas que finalmente fueron trazadas en las gráficas en el dominio del tiempo y la frecuencia.

4.3.1 Historia de desplazamientos y cortantes

EDIFICIO DE OFICINAS

Respuesta sismo Caleta. Considerando el comportamiento lineal del modelo aislado y el modelo empotrado y sometándolo al sismo Caleta obtuvimos los siguientes resultados

mostrados en las siguientes gráficas, en éstas observamos los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de azotea en el dominio del tiempo y la frecuencia.

En la figura 17 se observa que los desplazamientos absolutos en el modelo aislado sufrieron un incremento con respecto al modelo empotrado del orden de 5 cm, en cuanto al espectro de Fourier se muestra que la estructura empotrada registra una frecuencia de 2 Hz. en tanto que el modelo aislado experimenta un corrimiento en el pico de frecuencias con un valor de 1.4 Hz.

En cuanto a aceleraciones también se observa que existe un pequeño incremento en las aceleraciones y velocidades.

La respuesta relativa de la estructura está dada en la figura 18 en la cual se muestra una disminución significativa comparándola con las absolutas, dado que el desplazamiento es del orden de 5 cm, existiendo una diferencia de 2 cm con respecto al modelo empotrado.

Podemos observar también un incremento del 1.3 por ciento en el periodo fundamental de la estructura aislada con respecto a la empotrada.

En la figura 19 se muestra una comparación en la historia de cortantes basales registrados en la estructura para el modelo aislado y el modelo empotrado.

Aquí observamos que el comportamiento lineal del elastómero se traduce en un incremento significativo de los cortantes, dado que el modelo aislado presenta un valor de casi 1000 t en tanto que el modelo empotrado tiene tan solo 500 t.

Estos valores máximos se presentan en la parte más crítica de la excitación que oscila entre los 30 y 40 s.

Respuesta sismo Unión. Graficando las respuestas absolutas de los modelos aislado lineal y empotrado se observa en la figura 20 una comparación entre ambas respuestas.

En ésta gráfica se observa una disminución en los desplazamientos en el modelo aislado del orden de 2 cm con respecto al modelo empotrado. Las velocidades y las aceleraciones registradas en el modelo aislado también son mucho menores a las registradas en el modelo empotrado.

Los resultados obtenidos en la respuesta relativa de azotea de los modelos se presenta en la figura 21, en ésta podemos observar que los desplazamientos son mayores en el modelo aislado del orden de 2 cm con respecto al modelo empotrado. Estos valores máximos se presentan entre los 10 y 35 s.

La frecuencia del modelo empotrado es de 2.0 Hz en tanto que en el modelo aislado se presenta de 1.3 Hz

La historia de cortantes muestra en la figura 22 un análisis comparativo entre el modelo de base empotrada y el de base aislada. Se observa que los cortantes son mayores en el modelo aislado, del orden de 1000 t en tanto que el modelo empotrado son de 700 t. Estos valores máximos se presentan entre los 40 y 70 s.

EDIFICIO DE DEPARTAMENTOS.

Respuesta sismo Caleta. Siguiendo la misma metodología obtuvimos los siguientes resultados.

La respuesta absoluta de ambos modelos se muestra en la figura 23. Los desplazamientos registrados en el modelo aislado lineal son mayores que los del modelo empotrado, éstos se presentan entre los 15 y 65 s y son del orden de 3 cm para el primero y de 1.4 cm para el segundo.

La frecuencia del modelo empotrado se presenta con un valor de 2.7 Hz en tanto que el modelo empotrado tiene 2 Hz.

En la figura 24 se muestra la respuesta relativa de azotea. Se denota un claro incremento en los desplazamientos de azotea registrados en el modelo aislado del orden de 2 cm, en tanto que en el modelo empotrado son tan solo de 1.3 cm.

También se observa un decremento en la frecuencia del modelo aislado.

La comparación de la historia de cortantes se muestra en la figura 25, en la cual se observa un incremento del 8 por ciento en el modelo aislado con respecto al modelo empotrado.

Respuesta sismo Unión. En la figura 26 se muestra las respuestas absolutas comparativas de los modelos.

Los desplazamientos del modelo aislado se ven incrementados significativamente con respecto al modelo empotrado, en un 100 por ciento; éstos valores máximos son registrados entre los 40 y 60 s.

El espectro de Fourier sigue mostrando un corrimiento en el pico de frecuencias hacia la izquierda en el modelo aislado.

Las respuestas relativas de azotea se registran en la figura 27; en ésta se muestra que el incremento de los desplazamientos en el modelo aislado es del 40 por ciento con respecto al modelo empotrado, con unas velocidades similares en ambos modelos y aceleraciones de una misma magnitud 900 cm/s registradas éstas a un diferente tiempo.

En la figura 28 se compara la historia de cortantes para ambos modelos. Los cortantes del modelo aislado son de 160 t en tanto que para el modelo empotrado son de 130 t. Estos valores se registran entre los 40 y 60 s.

4.4 Comparaciones y comentarios

En las gráficas comparativas de la respuesta del modelo empotrado con los programas Newmark y Drain - 2d observamos una buena correlación entre estas, por lo cual podemos concluir que las consideraciones hechas en el programa Drain -2d son correctas, así como sus resultados.

Con base en los resultados obtenidos se puede apreciar que el efecto de aislamiento puede tener diferentes repercusiones en las estructuras, debido a las características propias de la excitación a la que sea sometida y de la misma estructura. Esto lo observamos cuando sometimos ambas estructuras al sismo Caleta; en los espectros de Fourier se muestra un corrimiento en el pico de frecuencias hacia la izquierda del modelo con aislamiento; esto se traduce en un alargamiento en el periodo (condición buscada en el aislamiento) se observan también mayores desplazamientos en la estructura aislada, con respecto al modelo que considera base empotrada. La energía que el sismo induce en la estructura está siendo

acumulada, y el mantenerla en el rango lineal, se traduce en cortantes basales más grandes en el modelo aislado.

Por el contrario, cuando sometimos al edificio de oficinas a la excitación Unión observamos que si existía un alargamiento del periodo pero los desplazamientos que generalmente fueron mayores en el modelo aislado ahora eran menores que en el modelo empotrado, en cuanto a los cortantes éstos mostraron un pequeño incremento con respecto al modelo empotrado.

El sistema de aislamiento propuesto busca incrementar el periodo de la estructura, evitando con esto que coincida con el periodo del terreno (0.5 s), ésta primera condición se observa que se cumple en ambos modelos sometidos a ambas excitaciones, dado que podemos concluir que el periodo de vibrar del modelo empotrado para el edificio de oficinas es de 0.5 s, y del modelo aislado es de 0.77 s; en la estructura destinada a departamentos se registra un periodo de la estructura empotrada de 0.35 s y de la estructura aislada de 0.79 s.

Capítulo 5

Análisis de la respuesta no lineal.

El análisis inelástico de las estructuras se llevó al cabo para determinar los efectos que el sistema de aislamiento tiene en la respuesta dinámica de las mismas. Este análisis se aplicó en modelos bidimensionales y tridimensionales, con ayuda de los programas Drain-2d y 3D-Basis.

En ambos se consideró que en el sistema de aislamiento, los elastómeros laminados tendrían un comportamiento bilineal; con una rigidez post-fluencia del quince por ciento de la rigidez inicial considerada.

Se excitó ambos modelos, empotrado y aislado con los registros sísmicos Caleta y Unión. De los análisis no lineales se obtuvieron las respuestas de desplazamientos absolutos y relativos, el cortante basal y el comportamiento histerético de los elastómeros que se graficaron en forma comparativa con los resultados obtenidos con el modelo empotrado. La idea de trazar gráficas comparativas considerando un comportamiento inelástico fue la de analizar los beneficios que nos brinda el sistema de aislamiento en la respuesta global de las estructuras.

5.1 Respuesta del modelo bidimensional

Auxiliándonos con el programa Drain-2d se analizó la estructura considerando que ésta se comporta inelásticamente. De este análisis bidimensional y empleando los modelos aislados y considerando para tal efecto todas las características del aislador se procedió a calcular sus respuestas en cada estructura excitándolas con los registros mencionados.

5.1.1 Historia de desplazamientos y cortantes

EDIFICIO DE OFICINAS

Respuesta sismo Caleta. En la figura 29 se muestra una comparación en el dominio del tiempo y la frecuencia entre las respuestas registradas en la azotea, considerando base empotrada y base aislada, en la que se aprecia que los desplazamientos absolutos son

menores en la estructura aislada no lineal, también se observa una disminución en la frecuencia en el modelo aislado.

En la figura 30 se observa la respuesta relativa entre ambos modelos, en donde el efecto de aislamiento se traduce en una significativa disminución en su respuesta del modelo aislado; dado que el desplazamiento máximo de la estructura empotrada es de alrededor de 4 cm. contra 1.5 cm en la estructura aislada. Se observa también un cambio importante en el periodo del sistema, ya que mientras la estructura empotrada tiene un periodo fundamental de 0.5 s la estructura aislada tiene un periodo fundamental de alrededor de 1 s.

En la figura 31 se ilustra la historia de cortantes registrados en la base ambas estructuras, en el modelo considerando base aislada se observa el beneficio de que el elastómero tenga un comportamiento no lineal, ya que de esta manera disipa una cantidad significativa de energía; abatiendo así los cortantes basales.

La figura 32 presenta el comportamiento histerético global del sistema de aislamiento, segmentado la respuesta en tramos de 20 s, podemos apreciar que el elastómero se comporta inelásticamente todo el tiempo, con ductilidades máximas de alrededor de 10.

Respuesta sismo Unión. Una comparación en el dominio del tiempo y la frecuencia entre las respuestas absolutas de los desplazamientos en la azotea, considerando base empotrada y base aislada se observa en la figura 33. La magnitud de la respuesta máxima en el modelo de base empotrada es visiblemente menor que en el modelo aislado no lineal, los valores máximos están comprendidos entre los 20 y 30 s, la respuesta absoluta muestra un incremento en los valores obtenidos en el modelo aislado con respecto al empotrado. También podemos observar un corrimiento en el pico de frecuencias, debido esto al incremento en el periodo del modelo aislado.

En la figura 34 se muestra una comparación entre las respuestas relativas de los modelos empotrado y aislado, en donde el efecto de aislamiento se traduce en una significativa disminución en su respuesta del modelo aislado; dado que el desplazamiento máximo de la estructura empotrada es de alrededor de 6 cm. contra 1.8 cm en la estructura aislada. Se muestra también un incremento en el periodo en el modelo aislado, del orden de 0.3 s aproximadamente.

En la figura 35 se grafican las historias de cortantes registrados en la base en ambas estructuras. Los cortantes máximos del modelo aislado son menores que en el modelo empotrado con una diferencia de 100 t aproximadamente, deducimos de lo observado el beneficio que representa que el elastómero tenga un comportamiento no lineal, ya que de esta manera disipe una significativa cantidad de energía abatiendo así los cortantes basales.

El comportamiento histerético global del sistema de aislamiento se registra en la figura 36, en esta se observa la respuesta segmentada en tramos de 30 s, podemos apreciar que el elastómero se comporta inelásticamente todo el tiempo, disipando gran cantidad de energía traduciéndose esto en un cortante máximo de alrededor de 300 t con un desplazamiento máximo de casi 5 cm., estos valores máximos se encuentran comprendidos entre los 20 y 30s

EDIFICIO DE DEPARTAMENTOS

Respuesta sismo Caleta. En la figura 37 se presenta una comparación en el dominio del tiempo y la frecuencia entre las respuestas absoluta de los desplazamientos en la azotea, considerando base empotrada y base aislada. La magnitud de la respuesta máxima en el modelo de base empotrada es visiblemente menor que en el modelo aislado no lineal, los valores máximos están comprendidos entre los 30 y 45 s, con un valor de 3.5 cm. para la estructura aislada y de 1.6 cm para la estructura empotrada.

También podemos observar un corrimiento en el pico de frecuencias, debido esto al incremento en el periodo del modelo aislado.

En la figura 38 se muestra una comparación entre las respuestas relativas de los modelos empotrado y aislado, en donde el efecto de aislamiento se traduce en una significativa disminución en su respuesta del modelo aislado; dado que el desplazamiento máximo de la estructura empotrada es de alrededor de 2.0 cm. contra 1 cm en la estructura aislada.

Se muestra también un cambio importante en la frecuencia del sistema, ya que mientras la estructura empotrada tiene una frecuencia fundamental de 2.86 Hz, en la estructura aislada es de 1.5 Hz.

La historia de cortantes registrados en la base ambas estructuras se ilustra en la figura 39. Los cortantes máximos del modelo aislado son menores que en el modelo empotrado con una diferencia de 200 t aproximadamente, deducimos de lo observado el beneficio que

representa que el elastómero tenga un comportamiento no lineal, ya que de esta manera disipa una significativa cantidad de energía abatiendo así los cortantes basales.

El comportamiento histerético global del sistema de aislamiento se registra en la figura 40, en esta se observa la respuesta segmentada en tramos de 20 s, podemos apreciar que el elastómero se comporta inelásticamente todo el tiempo, con ductilidades máximas de alrededor de 10. En esta gráfica podemos observar también los desplazamientos y los cortantes del aislador.

Respuesta sismo Unión. En la figura 41 se presenta una comparación en el dominio del tiempo y la frecuencia entre las respuestas absolutas de los desplazamientos en la azotea, considerando base empotrada y base aislada. Aquí podemos apreciar un incremento de 90 por ciento en el modelo aislado con respecto al empotrado con valores de 5.7 cm y 3 cm respectivamente. Se observa un corrimiento en el pico de frecuencias, debido esto al incremento en el periodo del modelo aislado.

En la figura 42 se muestra una comparación entre las respuestas relativas de los modelos empotrado y aislado, en donde se aprecia que el efecto de aislamiento se traduce en una significativa disminución en su respuesta del modelo aislado; dado que el desplazamiento máximo de la estructura empotrada es de alrededor de 3.2 cm. contra 2.5 cm en la estructura aislada, éstos valores se encuentran comprendidos entre los 20 y 30 s. En cuanto al periodo se muestra también un incremento en la estructura aislada.

La historia de cortantes registrados en la base en el modelo empotrado y en el modelo aislado en una forma comparativa se registra en la figura 43. Se observa un abatimiento importante en los cortantes basales en el modelo aislado, dado que los cortantes máximos son de alrededor de 55 t en tanto que para el modelo empotrado son de 180 t aproximadamente, estos valores se registran entre los 30 y 60 s.

El comportamiento histerético global del sistema de aislamiento se registra en la figura 44, en esta se observa la respuesta segmentada en tramos de 30 s, podemos apreciar que el elastómero se comporta inelásticamente todo el tiempo, con ductilidades máximas de alrededor de 10. En esta gráfica podemos observar también que el aislador se desplaza 3.5 cm. con un cortante máximo 350 t, estos valores máximos se registran entre los 20 y 30 s.

5.2 Respuesta del modelo tridimensional

El análisis dinámico inelástico tridimensional del modelo aislado se realizó con ayuda del programa 3D-Basis, éste programa considera que la estructura se mantiene todo el tiempo en el rango lineal y que solo los elastómeros incurren en el rango de respuesta no lineal. Por medio de este programa pudimos modelar el sistema de aislamiento considerando los posibles efectos de torsión en la respuesta del sistema aislador-estructura.

El análisis se llevó al cabo excitando ambas estructuras con los sismos mencionados, en el presente estudio se analizaron ambas estructuras considerando a los sismos uni y biadireccional (ver Capítulo 3). El análisis uniaxial se realizó con fines meramente comparativos, debido a que se obtuvieron los cortantes basales para graficarlos contra el programa Drain-2d.

Los resultados de análisis fueron graficados en base a desplazamientos, cortantes y al comportamiento histérico de los elastómeros.

5.2.1 Historia de desplazamientos y cortantes

EDIFICIO DE OFICINAS

Comportamiento unidireccional

Respuesta sismo Caleta. Considerando el comportamiento uniaxial de la respuesta se graficaron los cortantes basales en una gráfica comparativa en el dominio del tiempo entre el programa Drain-2d y el 3D-Basis. Estos valores se trazaron en la figura 45, podemos apreciar aquí que los cortantes obtenidos en el programa Bidimensional son menores que los registrados con el programa Tridimensional; esto puede deberse a que el segundo análisis es más completo y por ende más exacta su respuesta esto debido a que los efectos de torsión son significativos en la respuesta. Podemos apreciar una concordancia en la respuesta entre ambos programas, pero con diferentes amplitudes, del orden de 200 t aproximadamente.

Respuesta sismo Unión. Considerando el comportamiento unidireccional de la respuesta se graficaron los cortantes basales en una gráfica comparativa en el dominio del tiempo entre el programa Drain-2d el 3D-Basis. Estos valores se trazaron en la figura 46, podemos apreciar

aquí que los cortantes obtenidos en el programa bidimensional son menores que los registrados con el programa tridimensional; esto puede deberse a que el segundo análisis es más completa y por ende más exacta su respuesta. Podemos apreciar una concordancia en la respuesta entre ambos programas, pero con diferentes amplitudes, del orden de 200 t aproximadamente.

Comportamiento bidireccional

Respuesta sismo Caleta. La historia de cortantes para sus direcciones X, Y y Torsión se encuentra registrada en la figura 47, en donde podemos apreciar que los cortantes para sus direcciones X y Y son registrados con un valor de 300 t.

En la figura 48 observamos el comportamiento histerético presente en el sistema de aislamiento. En esta gráfica se registran los cuatro aisladores con una respuesta similar, con un cortante máximo de 5.8 t y una visible degradación de rigidez.

Respuesta sismo Unión. La historia de cortantes para sus direcciones X, Y y Torsión se encuentra registrada en la figura 49, en donde podemos apreciar que los cortantes para sus direcciones X y Y son registrados con un valor máximo de 450 t y un momento máximo de 1500 t estos valores se presentan entre los 40 y 60 s.

En la figura 50 observamos el comportamiento histerético presente en el sistema de aislamiento. En esta gráfica se registran los cuatro aisladores con una respuesta similar, con un desplazamiento máximo de cada elastómero de 8 cm. y un cortante máximo de 9 t.

Con una demanda de ductilidad de 8 aproximadamente. Este comportamiento histerético descrito por los elastómeros es bilineal, con una rigidez post-fluencia del 15 por ciento de la rigidez inicial.

EDIFICIO DE DEPARTAMENTOS

Comportamiento Unidireccional

Respuesta sismo Caleta. Considerando el comportamiento uniaxial de la respuesta se graficaron los cortantes basales en una forma comparativa en el dominio del tiempo entre el programa Drain-2d y el 3D-Basis. Estos valores se trazaron en la figura 51, podemos apreciar aquí que los cortantes obtenidos en el programa Bidimensional son menores que los registrados con el programa Tridimensional; esto puede deberse a que el segundo análisis es más completo y por ende más exacta su respuesta. Podemos apreciar una concordancia en la respuesta entre ambos programas, pero con diferentes amplitudes, del orden de 150 t como máximo, estos valores máximos se registran entre los 35 y 40 s.

Respuesta sismo Unión. Con el comportamiento unidireccional de la respuesta se graficaron los cortantes basales en una gráfica comparativa en el dominio del tiempo entre el programa Drain-2d y el 3D-Basis. Estos valores se trazaron en la figura 52, podemos apreciar aquí que los cortantes obtenidos en el programa Bidimensional son menores que los registrados con el programa Tridimensional; esto puede deberse a que el segundo análisis es más completa y por ende más exacta su respuesta. Podemos apreciar una concordancia en la respuesta entre ambos programas, pero con diferentes amplitudes, del orden de 200 t como máximo. Estos cortantes máximos se encuentran en la fase más intensa del sismo que es durante los 40 y 60 s.

Comportamiento Bidireccional

Respuesta sismo Caleta. La historia de cortantes para sus direcciones X, Y y Torsión se encuentra registrada en la figura 53, en donde podemos apreciar que los cortantes para sus direcciones X e Y son registrados con un valor de 400 t.

En cuanto al comportamiento histérico descrito por los elastómeros podemos apreciar en la figura 54 que se tiende a incrementar sus desplazamientos alrededor de 5cm. con una fuerza cortante máxima de 6 t. En esta gráfica se registran los cuatro aisladores con una respuesta similar.

Respuesta sismo Unión. La historia de cortantes para sus direcciones X, Y y Torsión se encuentra registrada en la figura 55, en donde podemos apreciar que los cortantes para sus direcciones X e Y son registrados con un valor de 600 t.

En la figura 56 observamos el comportamiento histerético presente en el sistema de aislamiento. En esta gráfica se registran los cuatro aisladores con una respuesta similar, con un desplazamiento máximo de 7.1 cm. y un cortante máximo de 10 t.

5.3 Comparaciones y comentarios

Cabe mencionar que el análisis unidireccional fué realizado únicamente para corroborar los resultados obtenidos con el programa Drain - 2d, en cuanto a cortantes registrados en su base, y fué realizado de esta manera debido a que el programa en cuestión solamente realiza un análisis en una sola dirección, motivo por el cual se empleó el programa 3D - Basis. En las gráficas comparativas podemos observar que existe una buena correlación en la forma de la respuesta pero con amplitudes diferentes, podemos atribuirlos a que se realizan comparaciones con programas que por sus consideraciones tienen diferentes alcances, ya que el programa 3D-Basis realiza un análisis más exacto al considerar torsión en sus miembros.

En cuanto al comportamiento histerético que siguen los aisladores observable en las gráficas anteriores podemos ver la pérdida de la rigidez, ya que su valor disminuye notablemente sin recuperar su valor inicial deteriorándose esta.

Cuando se graficaron las señales por tramos notamos la incursión en el rango inelástico por parte de los elastómeros se realiza todo el tiempo, debido a que en todos los tramos graficados el valor del desplazamiento de fluencia, es rebazado incursionando de esta manera en el rango inelástico.

También podemos observar que al incluir el sistema de aislamiento y permitiendo que presente un comportamiento inelástico existe una disminución de los desplazamientos y de los cortantes registrados en la base, por medio de la disipación de la energía generada por el sismo en forma de ciclos histeréticos, además de un incremento sustancial en el periodo de la estructura.

Capítulo 6

Identificación de Sistemas

Las estructuras en el presente análisis fueron excitadas por dos eventos sísmicos de altas magnitudes y duraciones; debido a esto sus propiedades dinámicas características cambiaron al aplicar tales movimientos, por lo que para determinar éstos nuevos valores se debe obtener la respuesta experimental o teórica por medio de algún programa que nos proporcione los vectores desplazamiento-velocidad por lo que:

Sometimos ambas estructuras a los movimientos registrados en las estaciones Caleta y Unión, utilizando para tal efecto un modelo representativo (Capítulo 3) y obtuvimos las respuestas de éstos modelos con auxilio del programa Drain-2d (Capítulo 4 y 5), obteniendo de ésta manera los vectores buscados de desplazamiento y velocidades.

6.1 Descripción del método de identificación de sistemas

Una vez obtenidos los vectores de desplazamiento y velocidad (del programa Drain-2d), se procedió a utilizar el método de identificación de sistemas para determinar la variación de las propiedades dinámicas durante las excitaciones a las que fueron sometidos.

El método de identificación de sistemas (González et al., 1993) se puede definir conceptualmente como el proceso de selección de un modelo matemático, utilizando para tal efecto información previamente registrada, en donde realizando un ajuste sistemático de sus parámetros se puede obtener una mejor correlación, en lo posible, entre las respuestas predichas por el modelo matemático y las registradas.

Para la selección del modelo matemático se han desarrollado una serie de modelos de diferentes complejidades matemáticas entre los cuales podemos encontrar los modelos de un grado de libertad, de tres grados de libertad, de tres grados de libertad considerando torsión y los modelos de cinco grados de libertad.

En la presente tesis se optó por representar el comportamiento dinámico de ambas estructuras como modelos de un grado de libertad, en el cual los parámetros a evaluar son los de rigidez y amortiguamiento.

Un modelo de un grado de libertad se obtiene a partir de una representación de varios grados de libertad definiendo masas, rigideces, alturas y amortiguamientos equivalentes a partir del modo fundamental de vibración o de combinaciones modales.

Los procedimientos de Identificación de Sistemas se pueden dividir en técnicas en el dominio del tiempo y técnicas en el dominio de la frecuencia.

Las técnicas empleadas en ésta tesis se basan en el dominio del tiempo y éstas a su vez en la estimación de parámetros utilizando la historia de la respuesta de la estructura.

6.2 Modelo matemático propuesto

El modelo matemático empleado fue el de un grado de libertad, la historia de respuestas de desplazamiento y velocidad fueron obtenidas empleando el programa Drain-2d el cual utiliza para su análisis el método de rigideces. Este programa se basa en las propiedades constitutivas de las estructuras, tales como rigidez, masa y amortiguamiento, y así poder determinar la historia de respuestas.

Los parámetros a evaluar en el modelo fueron los de rigidez y amortiguamiento, para esto se empleó el programa MATLAB; éste programa de análisis dinámico cuenta con la capacidad para resolver problemas de control y de Identificación de Sistemas, se basa en subrutinas y para realizar la minimización emplea el método de Gauss - Newton modificados (González et al, 1993).

El programa MATLAB requiere para su desarrollo el planteamiento de estado de las ecuaciones de equilibrio para un modelo de un grado de libertad.

Dentro del planteamiento de estado, las variables del vector son englobadas físicamente como desplazamientos y velocidades, por lo que éstas informaciones obtenidas ya sea por medios experimentales o teóricos (con ayuda de otros programa) nos sirven para conocer los valores reales de las variables. Estas informaciones consisten en desplazamientos y velocidades del sistema real.

6.3 Estimación de los parámetros

La estimación de los parámetros puede realizarse segmentando la señal u obteniéndola de la señal completa.

La estimación por medio de la señal completa nos permite conocer el orden de las propiedades a identificar en una forma global del sistema y nuestras condiciones iniciales serán cero.

Segmentando la señal se tienen condiciones iniciales para cada tramo; éstas son obtenidas en el tramo anterior.

En la presente tesis se realizó la identificación de sistemas para ambas posibilidades. En la señal completa se analizaron las duraciones completas de los registros, es decir :

- a) *Sismo Caleta con una duración de 96 s.*
- b) *Sismo Unión con una duración de 124 s.*

6.3.1 Estimación de parámetros considerando señal completa

En ambas estructuras se llevó al cabo la Identificación de Parámetros utilizando la señal completa en los registros obtenidos para cada una de las excitaciones, en su comportamiento lineal y no lineal.

Los parámetros a evaluar fueron los de rigidez y amortiguamiento, conociendo las masas de cada estructura, cuyos valores son:

- a) *La masa de cimentación para el edificio de oficinas fue de 161,060 kg- s^2/m*
- b) *La masa de cimentación para el edificio de departamentos fue de 71,427 kg- s^2/m*

Una vez obtenidos éstos parámetros nos es posible evaluar las frecuencias naturales de vibrar, así como la fracción de amortiguamiento en cada intervalo, los valores obtenidos

excitando ambas estructuras con los dos sismos de análisis son mostrados en las tablas 4 y 5 para el edificio de oficinas y 6 y 7 para el edificio de departamentos.

De los resultados registrados en las tablas 4 y 5 podemos observar que en el rango lineal su valor de rigidez es alto, en tanto que el valor de amortiguamiento es bajo, por tal motivo los desplazamientos y los cortantes son mayores en el modelo aislado que en el modelo empotrado. Por el contrario, en el rango no lineal el valor de la rigidez decrece, al incrementarse el valor del amortiguamiento, abatiéndose los cortantes y los desplazamientos, corroborando con esto las gráficas de desplazamientos, cortantes y comportamiento histerético presentadas en el capítulo 5 en las cuales se observa que la formación de ciclos histeréticos disipa gran cantidad de energía permitiendo disminuir los desplazamientos e incrementando su amortiguamiento con una visible pérdida de rigidez. El valor del periodo se mantiene con un valor similar.

6.3.2 Estimación de parámetros considerando señal segmentada

Se empleó la señal segmentada en ambas estructuras para observar la variación en los parámetros tramo a tramo así como para buscar una mejoría en los resultados.

Los valores obtenidos segmentando la señal en ambos comportamientos para los dos sismos de análisis y en la estructura destinada a oficinas se muestran en las tablas 8 y 9 para el sismo caleta y en las tablas 12 y 11 para el sismo unión.

Para el edificio destinadas a departamentos se muestran las tablas 13 y 14 para el sismo caleta y las tablas 15 y 16 para el sismo unión.

Los tramos segmentados para cada sismo quedaron en ventanas de:

Respuesta sismo Caleta. La señal del sismo caleta fue segmentada en nueve tramos de 10 segundos cada uno, considerando en el último tramo los 16 segundos restantes, con 500 puntos en cada tramo.

Respuesta sismo Unión. En éste sismo se consideraron nueve tramos de 12 segundos y un último de 14 segundos con 300 puntos en cada tramo.

El segmentar la señal por tramos nos permitió observar claramente el efecto que tuvo en ambas estructuras el aislarlas en su base, las gráficas referidas al comportamiento lineal nos muestran que sus características de rigidez y de amortiguamiento permanecen no sufren variaciones significativas, es claro que existe una pequeña degradación de la rigidez, un pequeño incremento el amortiguamiento, y un alargamiento en el periodo de la estructura aislada pero son muy bajos estos. Sin embargo, al permitir que la estructura incurriere en el rango no lineal se incrementa sustancialmente el valor del amortiguamiento y existe una degradación de rigidez significativa, para el sismo caleta estos los valores críticos se presentan entre los 30 y 50 s pertenecientes a los tramos 3, 4 y 5, cuando se presenta una degradación importante en rigidez es en éste punto donde se aprecia un importante incremento en el amortiguamiento del sistema, también el periodo sufre un incremento aproximadamente del 30 por ciento. Para el sismo unión éstos valores críticos se presentan entre los 36 y 60 s, pertenecientes a los 3, 4 y 5, en este también se observa una degradación importante en la rigidez de ambas estructuras, con un incremento muy notable en su amortiguamiento.

En la estructura destinada a departamentos observamos que los valores críticos se presentan en el cuarto tramo, también es notorio el incremento del 15 por ciento en el periodo del sistema.

El programa MATLAB nos permite ajustar los parámetros por medio de iteraciones, para obtener un mejor acoplamiento entre la señal de entrada y la proporcionada por el programa.

Los valores de la fracción de amortiguamiento y periodo obtenidos segmentando la señal fueron graficados en las figuras 57 para el edificio de oficinas y 58 para el edificio de departamentos, con el sismo caleta y en las figuras 59 y 60 para el sismo unión; figurando además en éstas una comparación en cuanto a desplazamiento en la azotea del sistema real y los del sistema equivalente considerando la variación en el tiempo de los parámetros estructurales. En estas gráficas se muestra la variación de las características equivalentes del sistema aislado.

Podemos observar en las figuras 57, 58, 59 y 60 que el periodo equivalente del sistema alcanza valores de alrededor de 1 s y 0.8 s respectivamente en el tramo comprendido entre los 20 y 50 s con amortiguamientos equivalentes hasta de un 25 y 20 por ciento respectivamente del valor crítico. También se muestra que la comparación entre los

desplazamientos de azotes del sistema real y los del sistema equivalente muestran una buena concordancia entre las mismas.

6.4 Comparaciones y comentarios

Por medio del método de identificación de sistemas nos fué posible estimar la variación de los parámetros empleando para tal efecto los resultados obtenidos en el programa Drain-2d, en ésta estimación se consideraron ambo comportamientos (lineal y no lineal), y se pudieron obtener las variaciones de las características dinámicas de los sistemas estructurales sujetos a ambas excitaciones.

En los resultados mostrados en las tablas y en las gráficas observamos que los parámetros estimados en el rango lineal permanecen sin una variación importante, en tanto que en el rango no lineal los parámetros sufren variaciones muy significativas en cuanto a amortiguamiento y rigidez se refiere.

También podemos observar que existe un incremento en el período de la estructura con una degradación de rigidez durante la disipación de la energía por medio del comportamiento histerético de los aisladores con un importante incremento de amortiguamiento, de ésta manera podemos deducir que los resultados obtenidos en cuanto a su comportamiento histerético en el programa 3D-Basis son correctos.

En los resultados obtenidos con la señal segmentada observamos una pequeñas variaciones en los parámetros en los últimos tramos, que con un mayor ajuste podrían mejorarse.

El estimar los parámetros haciendo uso del modelo de un grado de libertad nos permitió obtener las variaciones en las propiedades dinámicas de las estructuras en forma rápida y segura.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Capítulo 7

Conclusiones

Podemos observar de los resultados obtenidos con los diferentes análisis lo siguiente:

Los resultados obtenidos por medio del programa Etabs en cuanto a periodos y formas modales fueron corroborados con otros programas de análisis tal como Cal - 86, por lo cual podemos tener la certeza que estos son correctos.

El método de vibración ambiental fué empleado para medir las propiedades dinámicas en el edificio de departamentos estos resultados obtenidos experimentalmente en campo fueron comparados con los obtenidos empleando los programas anteriormente mencionados existiendo una muy buena correlación.

La comparación entre el modelo empotrado y el modelo aislado no lineal (empleando el programa Drain-2d) nos permitió observar el beneficio que brindó el aplicar el sistema de aislamiento para ambas estructuras traduciéndose en un abatimiento de los cortantes registrados en la base y de los desplazamientos que registraba la estructura siendo éstos mucho menores. El periodo de las estructuras se incrementó notablemente (condición necesaria en el edificio destinado a oficinas debido a la cercanía con el periodo del terreno) observables en las gráficas del capítulo cuarto y sexto.

La disipación de energía fue considerable por medio del comportamiento inelástico presente en todo momento en los aisladores.

El método de identificación de sistemas (idealizando a la estructura como un modelo de un grado de libertad) nos permitió evaluar las variaciones sufridas en las características dinámicas de los sistemas estructurales bajo excitaciones de los dos eventos sísmicos. Se encontró en los resultados obtenidos en la señal por tramos un incremento importante en el amortiguamiento de ambas estructuras, con importantes variaciones en la rigidez sin presentarse daño estructural severo podemos apreciar que cuando se presentó el valor más alto de amortiguamiento la rigidez sufría un decremento apreciable, esto debido a la incursión en el rango inelástico.

Podemos deducir que el sistema de aislamiento es una forma conveniente, práctica y altamente viable como una manera de proveer protección a la estructura cuando esta es

atacada por un sismo, pero solo es recomendable tomando en cuenta el tipo de suelo y las características propias de la estructura a la cual se desea aislar.

El mecanismo de aislamiento fué necesario en la estructura destinada a oficinas debido a la cercanía del periodo de la estructura con la del terreno, este sistema permitió alargar el periodo de la estructura para reducir la respuesta de aceleraciones generadas en la estructura debido a la severidad de los sismos a los cuales se le sujetó, además el incremento en el valor del amortiguamiento permitió disipar esta energía formando ciclos histeréticos.

Por medio de este sistema se puede mantener a la estructura elástica todo el tiempo (consideración hecha en el capítulo 5).

En la estructura destinada a departamentos podemos notar una disminución importante en los desplazamientos y en los cortantes, un gran incremento en el amortiguamiento, en general disminuyó su respuesta debido al sistema de aislamiento incluido. Esta estructura no tiene una cercanía en cuanto al periodo de la estructura con la del terreno se refiere, pero debido a que se localiza en una región de alto riesgo sísmico además de la mala estructuración que tiene fué importante el incluir en sistema de aislamiento en su base, arrojando muy buenos resultados.

REFERENCIAS

- Arya, A.S. (1984). "Sliding concep for mitigation of earthquake disaster of mansory buildings". 8th. World Conf. on Earthquake Engrg., San Francisco, 5, pags. 951-958.
- Boardadman, P.R. , Wood, B.J. y Carr, A.J. (1983). "Union house - A cross braced structure with energy dissipators". Bull. of New Zealand National Society for Earthquake Engrg., 16 (2), pags. 83-97.
- Buckle, I.G. y Mayes, R.L. (1990). "Seismic isolation history, aplication, and performance - A world overview". Earthquake Spectra, 6 (2), pags. 161-202.
- Caspe, M.S. (1970). "Earthquake isolation of multistorey concrete structures". Inst.,Proc., Am., Concr., Vol. 67, Title No. 67-61, pags. 923-933.
- Caspe, M.S. y Kelly, J.M. (1990). "The Earthquake barrier. A solution for adding ductility to otherwise brittle buildings". Proc. of ATC -17 Seminar on Base Isolatiois and Passive Energy Dissipation, Applied Technology Council, Palo Alto, Calif., pags. 331-342.
- Chalhoub, M.S. y Kelly, J.M. (1990). "Sliders and tension controlled reinforced elastomeric bearings combined for earthquake isolation". Earthquake Engrg. and Struct. Dyn., 19 (3), pags. 333-334.
- Constantinou, M.C. y Mokha, A. y Reinhorn, A.M. (1990). "Teflon bearings in base isolation II: Modeling". J. Struct. Engrg. ASCEE, 116 (2), pags. 455-474.
- Delfosse, G.C. (1986). "The Gapec System: A new highly effective aseismic system". Proc. 6th Woldr Confr. on Earthquake Engrg., New Delhi, India, Vol. 3, pag.163.
- Eidinger, J.M. y Kelly, J.M. (1986). "Experimental results of an earthquake isolation system using natural rubber bearings". Report No. UCB/EERC-78/03, Univ., of California, Berkeley.
- Fintel, M. y Khan, F.R. (1969). "Shock absorbing soft storey concept for multi-storey earthquake structes". Proc. Am. Confr. Inst., Vol. 66 Title No. 66-29, pags. 381-390.
- Green, N.B. (1935). "Flexible first storey construction for earthquake resistance". (with discussion by Jhonson, Bednarske, White, Kartzke, Smiths and Williams) Trans. Am. Soc. Civ. Engrg. Paper No. 1906, pags. 654-674.
- González, R., Esteva, L., Muría-Vila, D., Noguez, F. y Hernández, L.E.(1993). "Identificación de parámetros estructurales en edificios instrumentados". Instituto de Ingeniería, UNAM, proyecto 3524, patrocinado por DDF, Diciembre.

Hisano, M. et al. (1988). "Study of a sliding-type base isolation system. Tri-axial shaking table test and simulation". Proc. of Ninth World Confr. on a Earthquake Engrg., Japan, V, pags. 741-746.

Huffman, G.K. (1986). "Full base isolation for earthquake protection by helical springs and viscodampers". Nuclear Engrg. and Desing, 84, pags. 331-338.

Husid, R. y Sanchez, J. (1974). "Earthquake response reduction in buildings with and elastoplastic storey". Reg. Confr. Tall Bldgs, Bangkok, pags. 671-682.

Kannan, A. M. y Powell, G.H. (1975). "Drain - 2d a general purpose computer program for dynamic analysis of inelastic plane structures with user guide". Report No. UBC/EERC-73/22, Earthquake Engrg, Research center, Univ. of California, Berkeley, Calif.

Khan, C.L. y Chopra, A.K. (1977). "Elastic earthquake analisis of torsionally coupled multistorey building". Earthquake Engrg. and Struct. Dyn., 5 (4), pags. 395-412.

Koh, C.G y Kelly, J.M. (1988). "A simple mechanical model for elastomeric bearing used in base isolation". Int. J. Mexh. Sci., 30 (12), pags. 933-943.

Koh, C.G. y Balendra, T. (19879). "Seismic rensponse of base isolation buildings including P- Δ effects of isolation bearings". Earthquake Engrg. Struct. Dyn., 18 (4), pags. 461-473.

Lee, D.M. y Mendland, I.C. (1978). "Base isalotion - An historical development and the influence of higher mode responses". Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engrg., Vol. 11, No. 4, pags. 219-233.

Lung, L. (1987). "System identification - theory for the user". Prentice Hall, Emnglewood Cliffs, New Jersey.

Martel, R.R. (1929). "The effects of earthquakes on buildings with a flexible first storey". Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 19, pags. 167-178.

Newmark, N.M. (1959). "A method of computation for structural dynamics". J. of Engrg. Mech. Div., ASCE 85 (EM3), pags. 67-94.

Nagarajaiah, S., Reinhorn, A. M. y Constantinou, M.C. (1991). "Nonlinear dynamic analysis of three dimensional base isolated structures". J. Struct. Engrg., ASCE, to appear.

Plichon, C. y Jovilet, F. (1978). "Aseismic foundation system of nuclear power plants". Proc. SMIRT Confr., Paper No. C190/78.

Plichon, C., Gueraud, R., Richli, W.H., Gluck, J. y Casagrande, J.F. (1980). "Protection of nuclear power plants againts seism". Nuclear Technology, 49, pags.295-306.

RCDF-87 (1987). "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal". Diario Oficial de la Federación.

Reinhorn, A. M., Rutenberg, A. y Gluck, J. (1977). "Dynamic torsional coupling in asymmetric building structures". Building and Environment, 12, pags. 251-484.

SEAOC, (1990). "Recommended lateral force requirements and commentary". Seismology Committee, Struc. Engrg, Association of California, Sacramento, California.

Skinner, R.I., Kelly, J.M. y Heine, A.J. (1975). "Energy absorption devices for earthquake resistant structures". Proc. 5th. World Confr. Earthquake Engrg., Rome, Vol. 2, pags. 2924-2933.

Staudacher, K. (1985). "Protection for structures in extreme earthquakes: Full base isolation (3-d) by the Swiss seismafloat system". Nuclear Engrg. and Design, 84, pags. 343-357.

Tarics, A.G., Way, D. y Kelly, J.M. (1984). "The implementation of base isolation for the foothill communities law and justice center". Report to the National Science Foundation.

UBC, (1991). "Uniform Building Code". International Confr. of Building Officials, 1992.

Williams, J.H. (1973). "Designing earthquake resistant structures". Tech. REv., Vol. 79, No. 1, pags. 37-43.

Williams, J.H., Crandall, S.H. y Lee, J.H. (1974). "Accumulated slip of friction controlled mass excited by earthquake motions". Trans. A.S.M.E., Jour. Appl. Mech., Vol. A1, Series E, No. 4 pags. 1094-1098.

Wirshing, P.H. y Yao, J.T.P. (1973). "Safety desing concepts for seismic structures". Comput. Struct., Vol. 3, pags. 809-826.

Wilson, E.L., Hollings, J.P. y Dovey, H.H. (1975). "ETABS - Three dimensional analisis of building systems". Report No. UCB/EER-75/13, Earthquake Engrg Research Center, Univ. of California, Berkeley, California.

Zayas, V., Low, S. y Mahin, S. (1987). "The FPS earthquake protection system: Experimental report". Earthquake Engr. Research Center, University of California, Berkeley, California.

K_{zn}	0	$-K_{zn}e_{yn}$	$-K_{zn}$	0	$K_{zn}e_{yn}$				
0	K_{yn}	$K_{yn}e_{zn}$	0	$-K_{yn}$	$-K_{yn}e_{zn}$	0		0	
$-K_{zn}e_{yn}$	$K_{yn}e_{zn}$	K_{zn}	$K_{zn}e_{yn}$	$-K_{yn}e_{zn}$	$-K_{zn}$				
			$K_{zn} + K_{zn-1}$	0	$-K_{zn}e_{yn}$ $-K_{zn-1}e_{yn-1}$				
	SYM.		0	$K_{yn} + K_{yn-1}$	$K_{yn}e_{zn} + K_{yn-1}e_{zn-1}$	SYM.		0	
			$-K_{zn}e_{yn}$ $-K_{zn-1}e_{yn-1}$	$K_{yn}e_{zn} + K_{yn-1}e_{zn-1}$	$K_{zn} + K_{zn-1}$				
						$K_{z1} + K_{z2}$	0	$-K_{z1}e_{y1}$ $-K_{z2}e_{y2}$	
		0		SYM.		0	$K_{y1} + K_{y2}$	$K_{y1}e_{z1} + K_{y2}e_{z2}$	SYM.
						$-K_{z1}e_{y1}$ $-K_{z2}e_{y2}$	$K_{y1}e_{z1} + K_{y2}e_{z2}$	$K_{z1} + K_{z2}$	
							0	$K_{z1}e_{y1}$ $-K_{z2}e_{y2}$	
		0		0		SYM.	0	$K_{y1} + K_{y2}$ $+ K_{y1}e_{z1}$	
							$-K_{z1}e_{y1}$ $-K_{z2}e_{y2}$	$K_{y1}e_{z1} + K_{y2}e_{z2}$	$K_{z1} + K_{z2}$

TABLA 1 La matriz de rigidez de la superestructura explícitamente considerada

Modelaje tridimensional de la suprerestructura Edificio de oficinas		
	Modo	T (s)
Estructura	1	0.51
	2	0.23
Empotrada	3	0.14
	4	0.09

TABLA 2 Periodos naturales obtenidos analíticamente por medio del programa Etabs.
Edificio de oficinas

Modelaje tridimensional de la suprerestructura Edificio de departamentos		
	Modo	T (s)
Estructura	1	0.05
	2	0.04
	3	0.11
	4	0.35
Empotrada	5	0.03
	6	0.02
	7	0.02
	8	0.02
	9	0.02
	10	0.02

TABLA 3 Periodos naturales obtenidos analíticamente por medio del programa Etabs.
Edificio de departamentos

	TRAMO	K	C	T	ξ
Rango lineal	Señal completa	11088.1	54.93	0.745	2.055
Rango no lineal	Señal completa	9951.5	352.77	0.755	13.932

TABLA 4 Estimación de parámetros considerando señal completa. Edificio de Oficinas. Sismo Caleta.

	TRAMO	K	C	T	ξ
Rango lineal	Señal completa	10936.2	34.38	0.761	1.295
Rango no lineal	Señal completa	9166.5	593.32	0.759	24.415

TABLA 5 Estimación de parámetros considerando señal completa. Edificio de Oficinas. Sismo Unión.

	TRAMO	K	C	T	ξ
Rango lineal	Señal completa	12220.50	34.01	0.480	1.820
Rango no lineal	Señal completa	7779.50	147.11	0.602	15.942

TABLA 6 Estimación de parámetros considerando señal completa. Edificio de Departamentos. Sismo Caleta.

	TRAMO	K	C	T	ξ
Rango lineal	Señal completa	12091.10	40.76	0.483	2.193
Rango no lineal	Señal completa	7544.00	215.81	0.611	14.670

TABLA 7 Estimación de parámetros considerando señal completa. Edificio de Departamentos. Sismo Unión.

TRAMO	K	C	T	ξ
1	11434.2	8.00	0.746	0.295
2	11131.5	50.00	0.756	1.867
3	10936.3	45.31	0.763	1.707
4	11352.6	38.62	0.749	1.428
5	11120.2	64.24	0.756	2.400
6	11071.8	64.49	0.758	2.415
7	11059.2	38.42	0.758	1.439
8	11306.7	71.79	0.759	2.660
9	11124.1	67.34	0.756	2.515

TABLA 8 Estimación de parámetros segmentando la señal. Comportamiento lineal Edificio de Oficinas. Sismo Caleta.

TRAMO	K	C	T	ξ
1	11160.7	68.98	0.755	2.573
2	11118.7	309.92	0.756	11.580
3	6399.8	508.11	0.997	25.024
4	6276.0	426.11	1.007	21.191
5	6370.2	531.75	0.999	26.250
6	9400.0	252.00	0.822	10.240
7	10187.3	258.71	0.790	10.100
8	11153.1	161.31	0.755	6.018
9	11050.2	88.90	0.759	3.332

TABLA 9 Estimación de parámetros segmentando la señal. Comportamiento no lineal Edificio de Oficinas. Sismo Caleta.

TRAMO	K	C	T	ξ
1	11000.95	20.563	0.760	0.778
2	11180.20	22.556	0.754	0.841
3	11192.46	28.689	0.754	1.068
4	11322.24	35.263	0.749	1.306
5	10996.40	19.633	0.761	0.739
6	10980.32	19.987	0.761	0.752
7	11000.40	19.990	0.760	0.751
8	11122.10	21.563	0.756	0.806
9	11108.22	20.855	0.757	0.780
10	10894.60	19.199	0.764	0.725

TABLA 10 Estimación de parámetros segmentando la señal. Comportamiento lineal Edificio de Oficinas. Sismo Unión.

TRAMO	K	C	T	ξ
1	11287.60	32.24	0.75	1.20
2	12034.80	416.10	0.73	14.94
3	935.00	510.87	0.82	20.78
4	4100.40	534.26	1.25	32.87
5	6200.60	625.21	1.01	31.28
6	9283.50	614.37	0.83	25.12
7	11198.1	168.08	0.75	6.26
8	11185.7	159.61	0.75	5.95
9	10891.5	40.55	0.76	1.53
10	10852.3	40.62	0.76	1.54

TABLA 11 Estimación de parámetros segmentando la señal. Comportamiento no-lineal Edificio de Oficinas. Sismo Unión.

TRAMO	K	C	T	ξ
1	12717.8	34.00	0.471	1.7810
2	12171.9	25.73	0.481	1.380
3	12204.60	36.30	0.480	1.951
4	12294.30	48.77	0.479	2.603
5	12490.00	50.06	0.475	2.652
6	12203.00	59.81	0.481	3.211
7	12332.10	33.69	0.487	1.899
8	11947.90	25.98	0.486	1.411
9	12107.10	23.76	0.482	1.285

TABLA 12 Estimación de parámetros segmentando la señal. Comportamiento lineal Edificio de Departamentos. Sismo Caleta.

TRAMO	K	C	T	ξ
1	8221.20	37.58	0.586	4.452
2	7055.50	134.15	0.633	9.449
3	6691.74	165.88	0.649	11.997
4	4880.41	212.47	0.760	17.993
5	8051.32	159.97	0.592	10.547
6	7411.74	83.15	0.617	5.714
7	7672.89	96.01	0.606	6.485
8	8192.00	130.98	0.587	8.562
9	8029.10	44.38	0.593	2.931

TABLA 13 Estimación de parámetros segmentando la señal. Comportamiento no-lineal Edificio de Departamentos. Sismo Caleta.

TRAMO	K	C	T	ξ
1	12330.20	19.35	0.478	1.031
2	12448.80	55.84	0.476	2.961
3	12039.10	25.24	0.484	1.361
4	11902.74	57.61	0.487	3.124
5	11908.17	38.52	0.487	2.088
6	11937.00	33.91	0.486	1.836
7	12175.70	16.74	0.481	0.898
8	12108.58	66.36	0.483	3.568
9	11891.61	38.37	0.487	2.082
10	11922.10	36.89	0.486	1.999

TABLA 14 Estimación de parámetros segmentando la señal. Comportamiento lineal Edificio de Departamentos. Sismo Unión.

TRAMO	K	C	T	ξ
1	8491.10	27.12	0.573	1.741
2	7464.10	203.69	0.615	13.948
3	7766.80	221.69	0.603	14.882
4	3468.30	219.67	0.902	22.067
5	4102.40	236.75	0.829	21.868
6	8143.70	153.96	0.588	10.093
7	7789.73	75.83	0.602	5.083
8	7020.89	30.66	0.634	20.165
9	7802.93	18.49	0.602	1.238
10	8491.09	7.71	0.576	0.495

TABLA 15 Estimación de parámetros segmentando la señal. Comportamiento no-lineal Edificio de Departamentos. Sismo Unión.

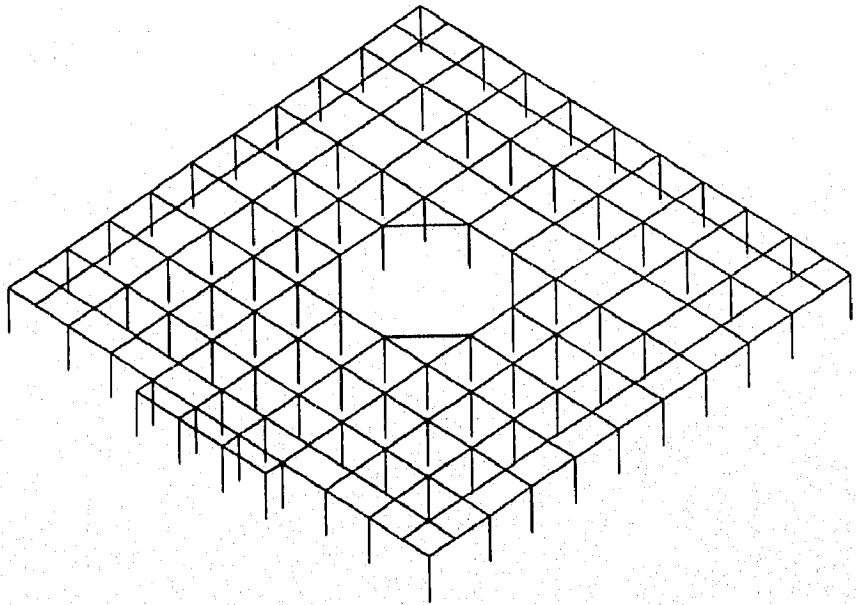


Figura 1a Isométrico de la planta baja.

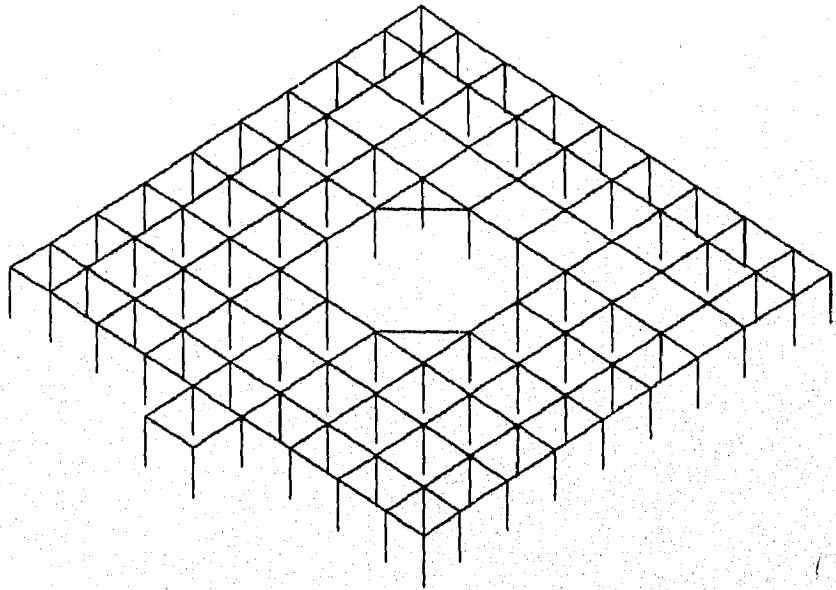


Figura 1b Isométrico del nivel 1.

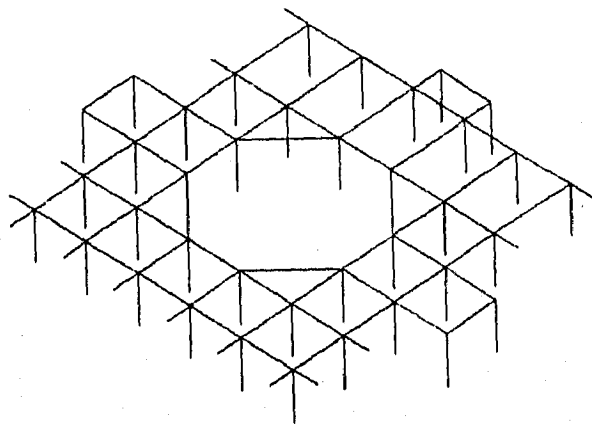


Figura 1d Isométrico del nivel de azotea.

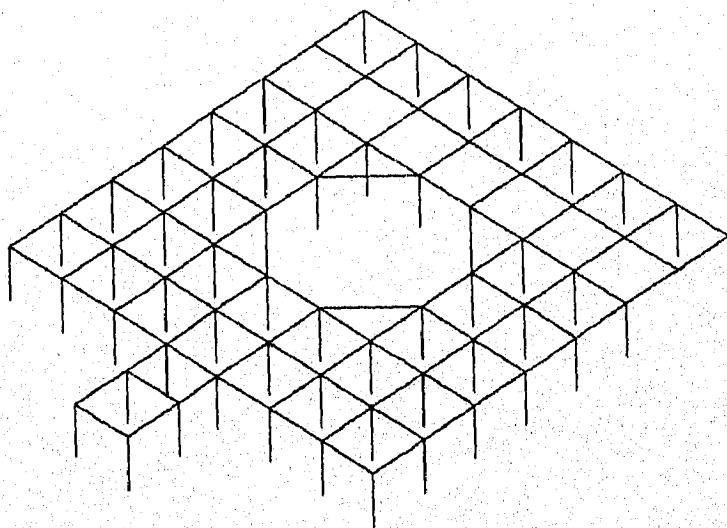


Figura 1c Isométrico del nivel 2.



Figura 2 Isométrico del Edificio destinado a departamentos.

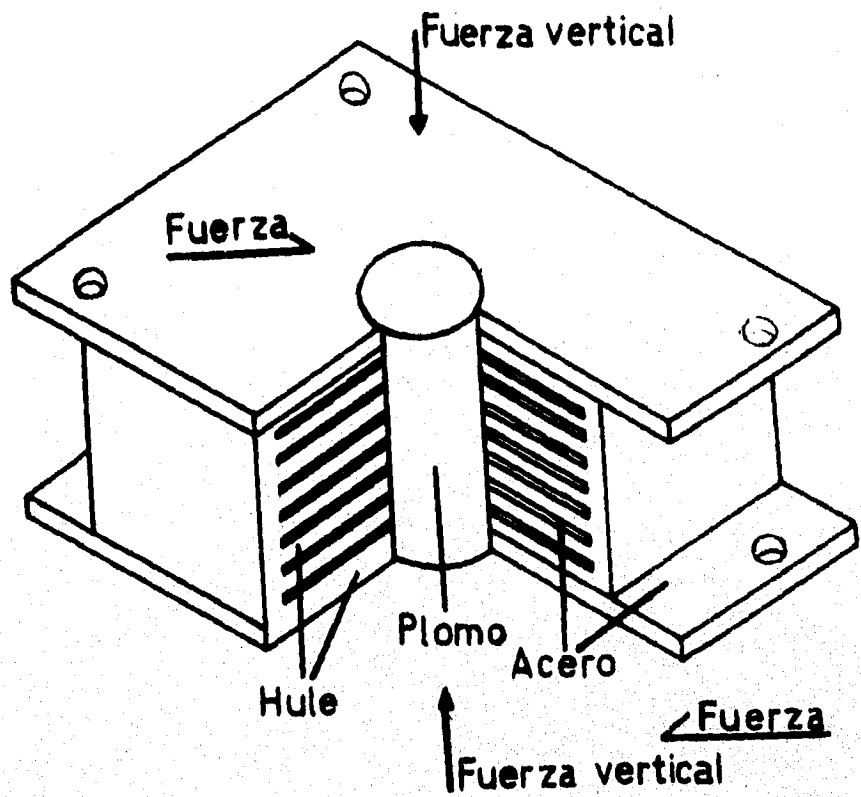


Figura 3 Sistema de aislamiento elastómero laminado con corazón de plomo.

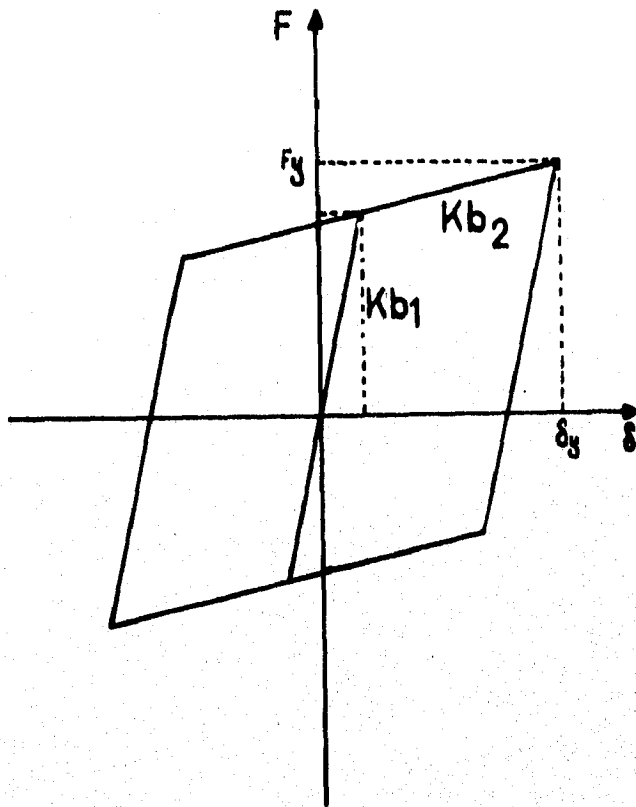
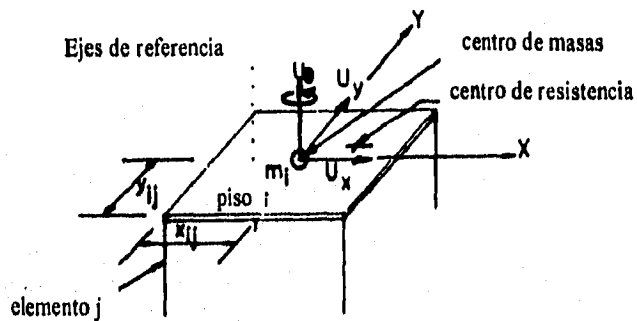
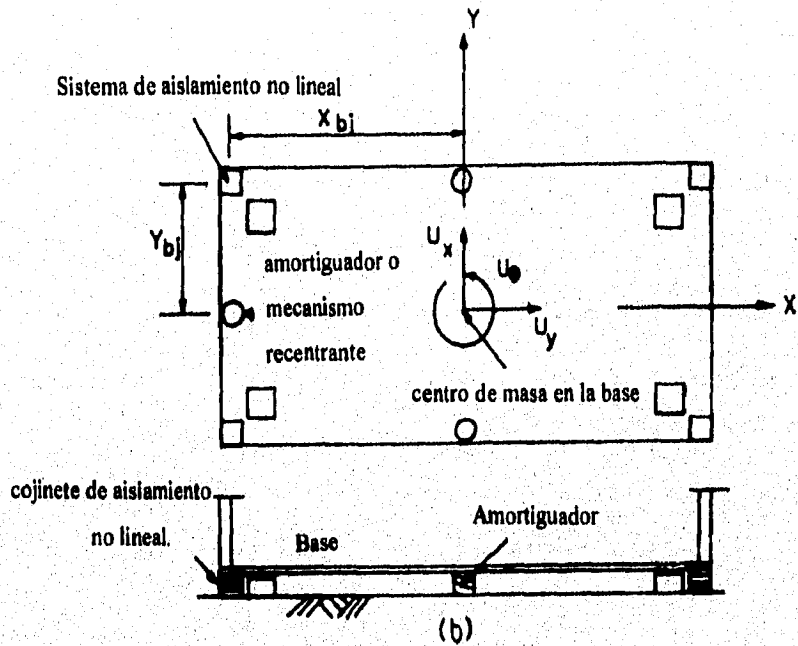


Figura 4 Comportamiento bilineal idealizado del sistema de aislamiento.



(a)



(b)

Figura 5 Grados de libertad y detalles de un piso típico. a) vista en isométrico del piso i; b) vista de la base.

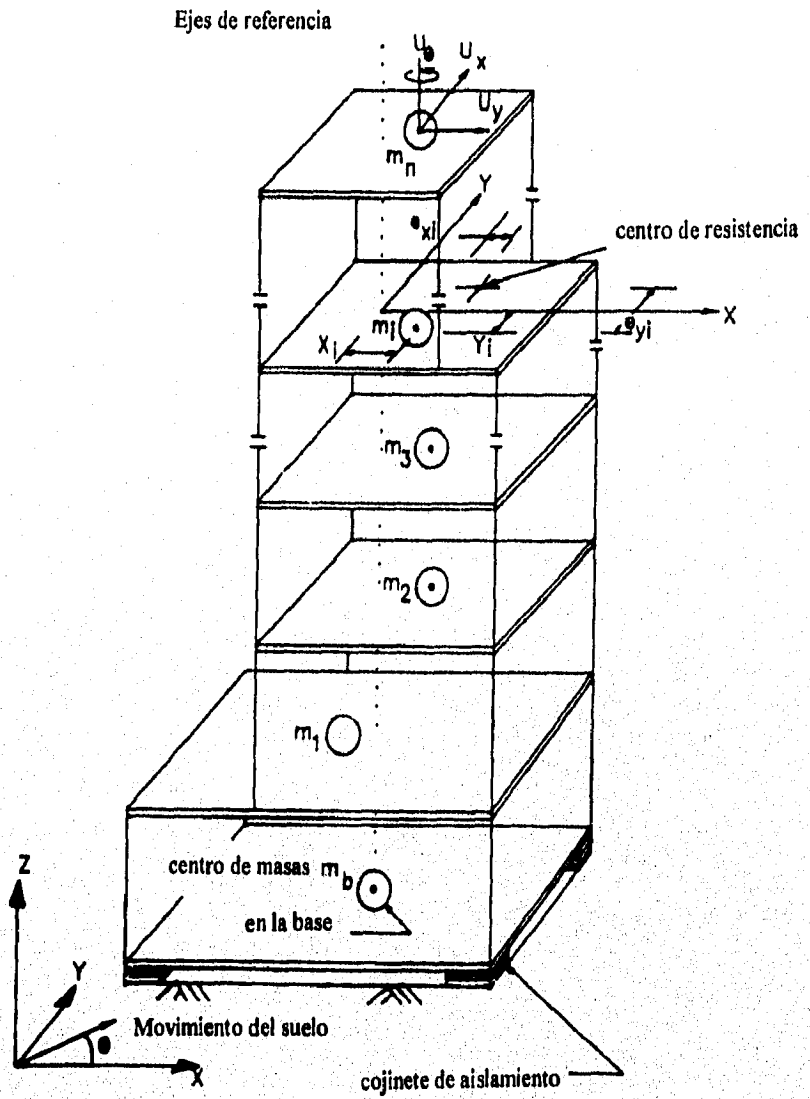


Figura 6 Estructura Asimétrica de base aislada excitada por un movimiento del suelo en ambas direcciones.

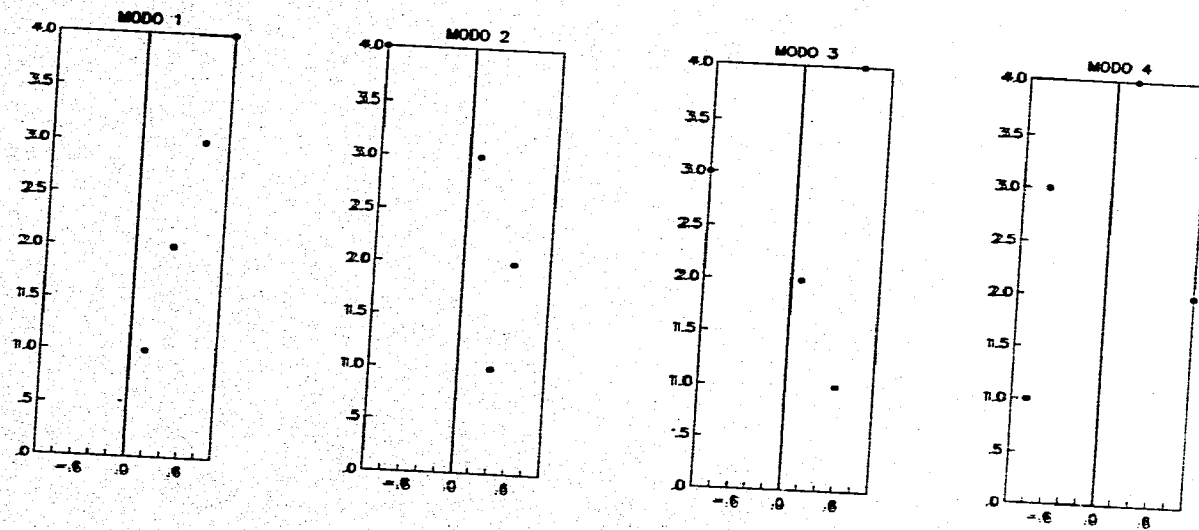


Figura 7 Configuraciones modales obtenidas analíticamente por medio del programa Cal-86. Edificio de Oficinas

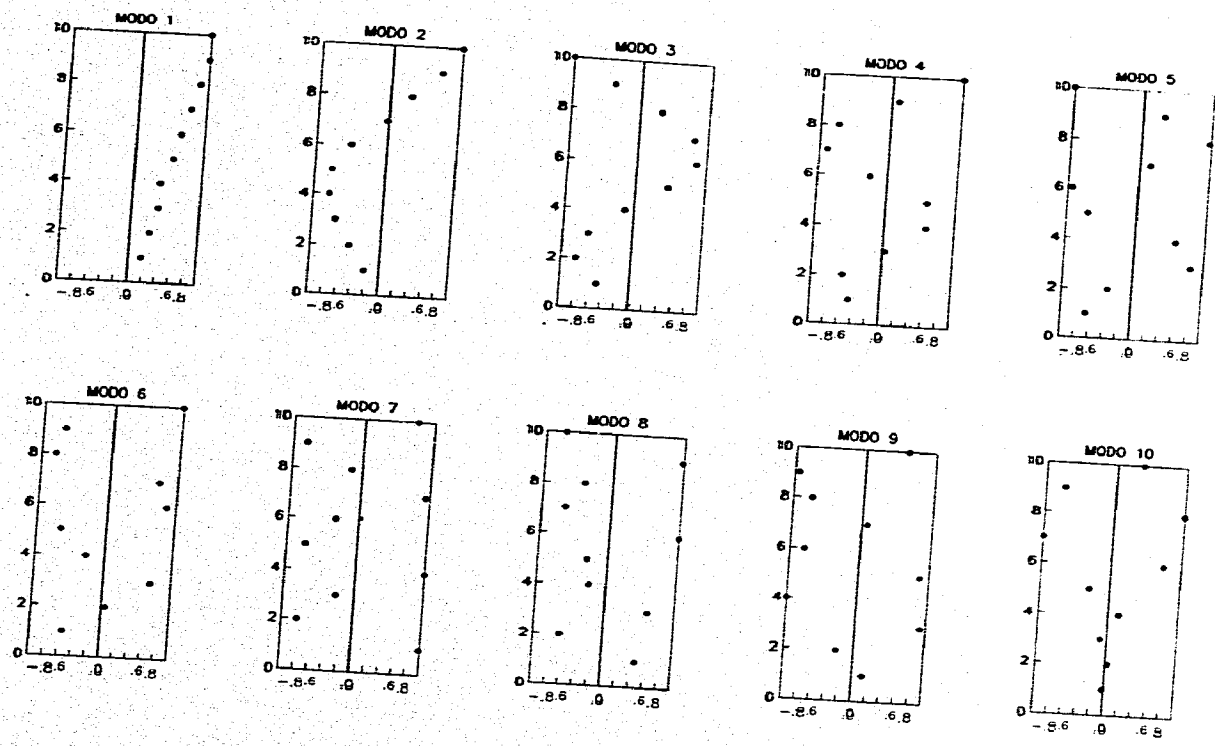


Figura 8 Configuraciones modales obtenidas analiticamente por medio del programa Cal-86. Edificio de Departamentos.

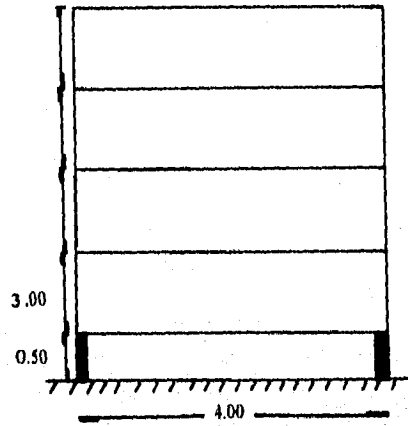


Figura 9 Modelo equivalente representativo del Edificio de Oficinas empleado en el programa Drain-2d.

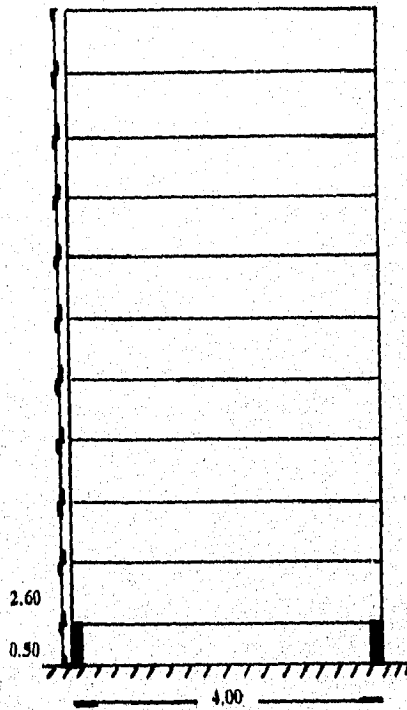


Figura 10 Modelo equivalente representativo del Edificio de Departamentos empleado en el programa Drain-2d.

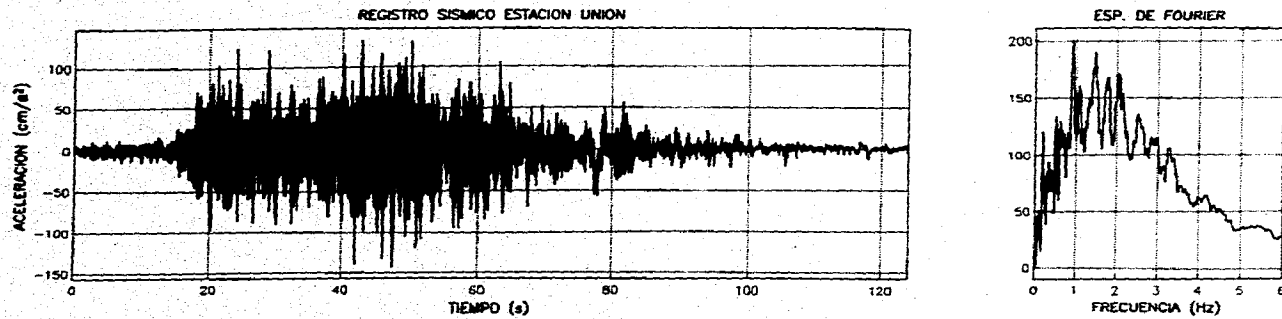


Figura 12 Registro sísmico de la estación Unión, con espectro de fourier.

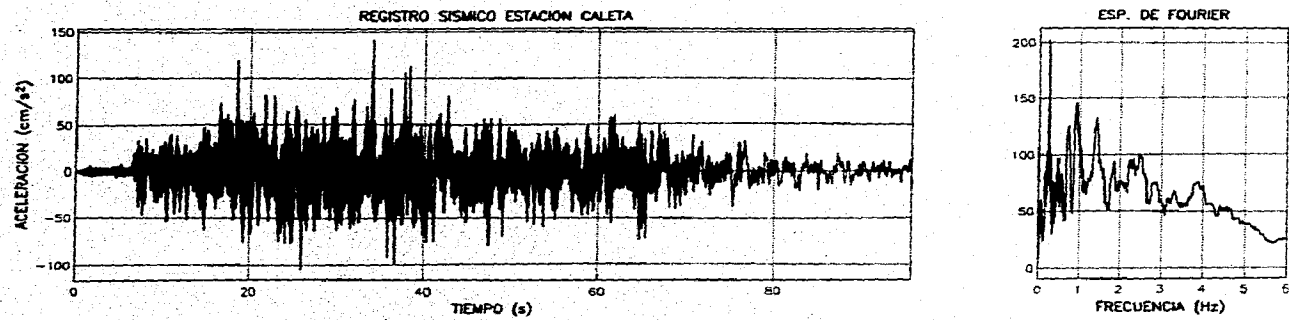


Figura 11 Registro sísmico de la estación Caleta, con espectro de fourier.

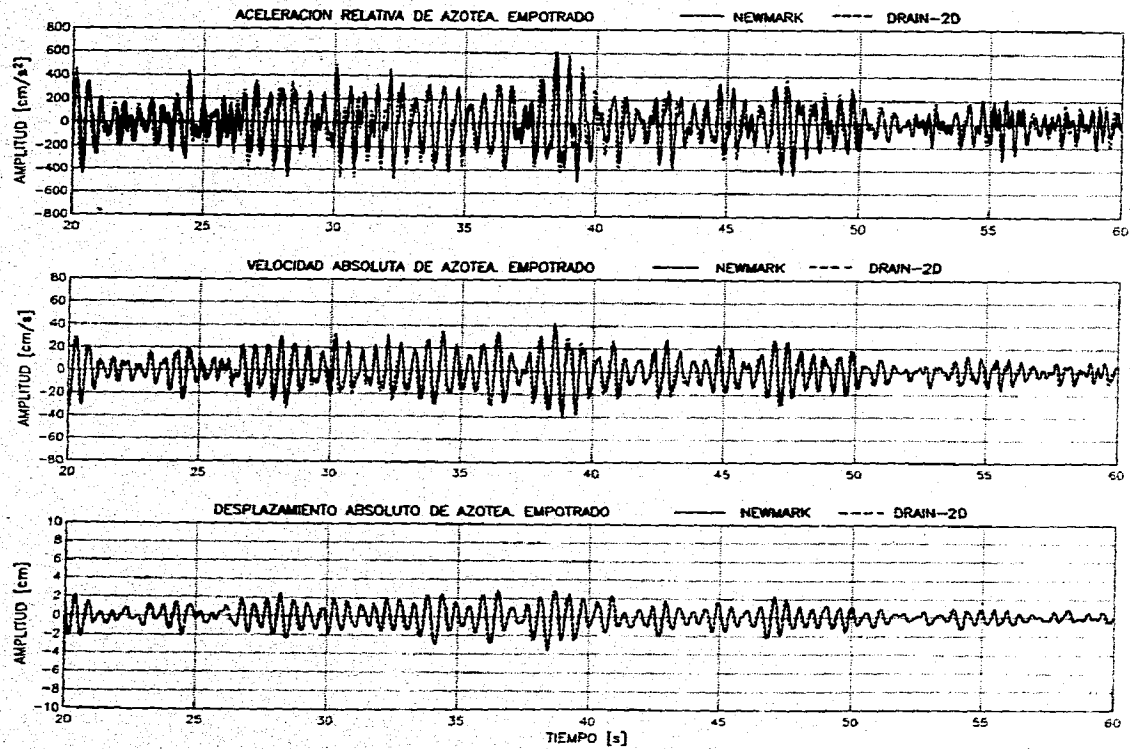


Figura 13 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada. Programa Drain-2D vs Newmark. Sismo Caleta. Edificio de Oficinas.

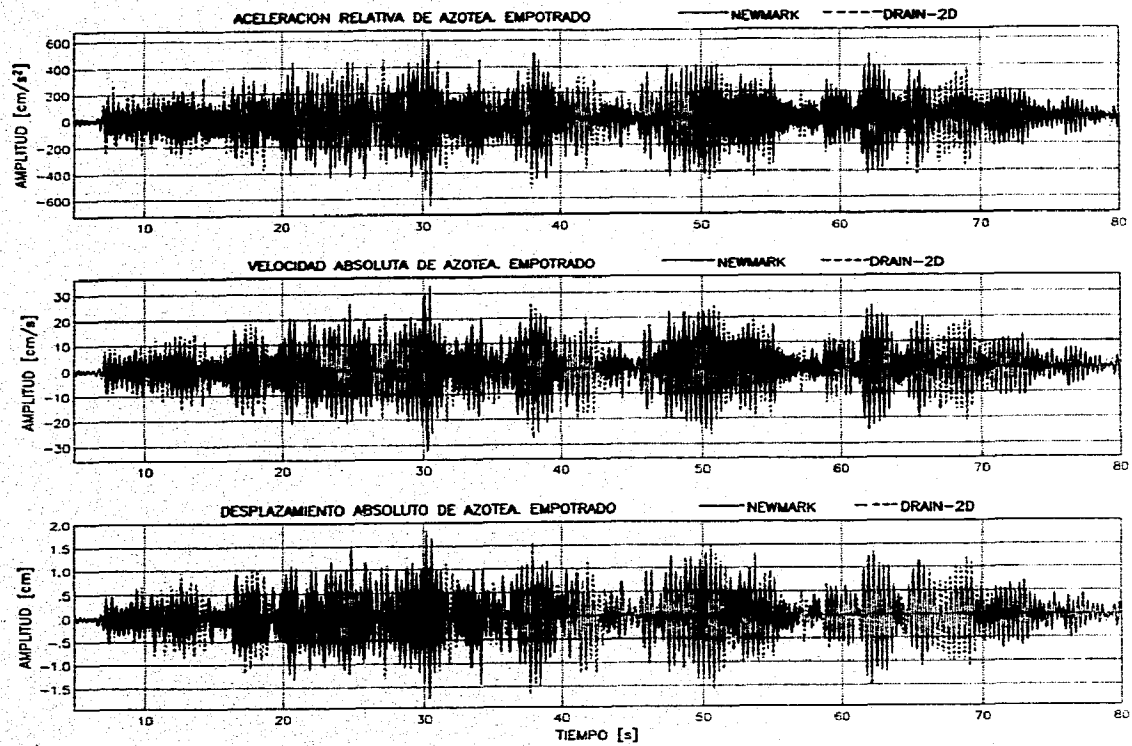


Figura 14 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada. Programa Drain-2D vs Newmark. Sismo Caleta. Edificio de Departamentos.

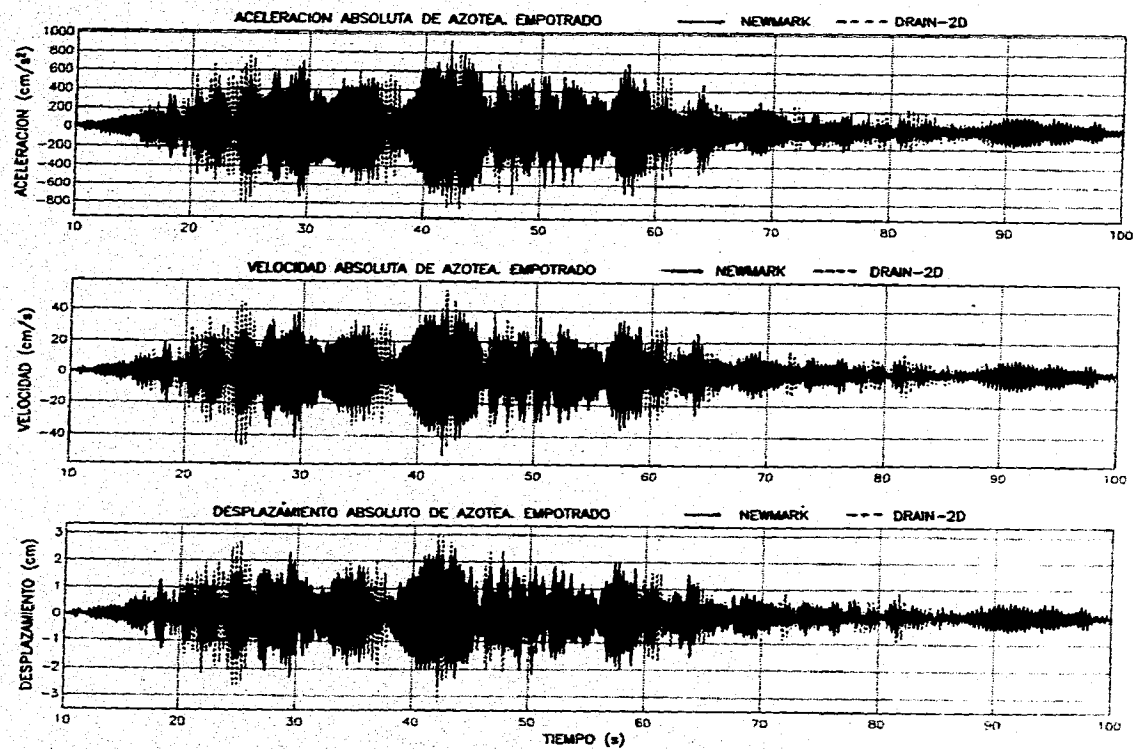


Figura 15 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada. Programa Drain-2D vs Newmark. Sismo Unión. Edificio de Oficinas.

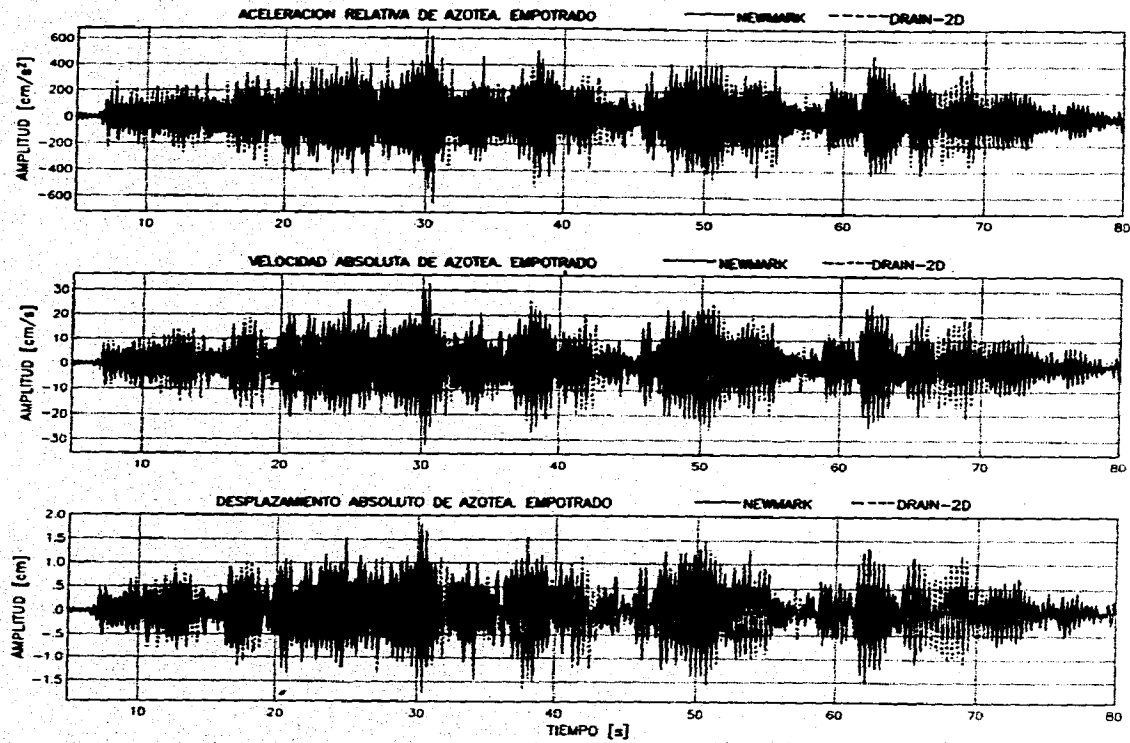


Figura 16 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada. Programa Drain-2D vs Newmark. Sismo Unión. Edificio de Departamentos.

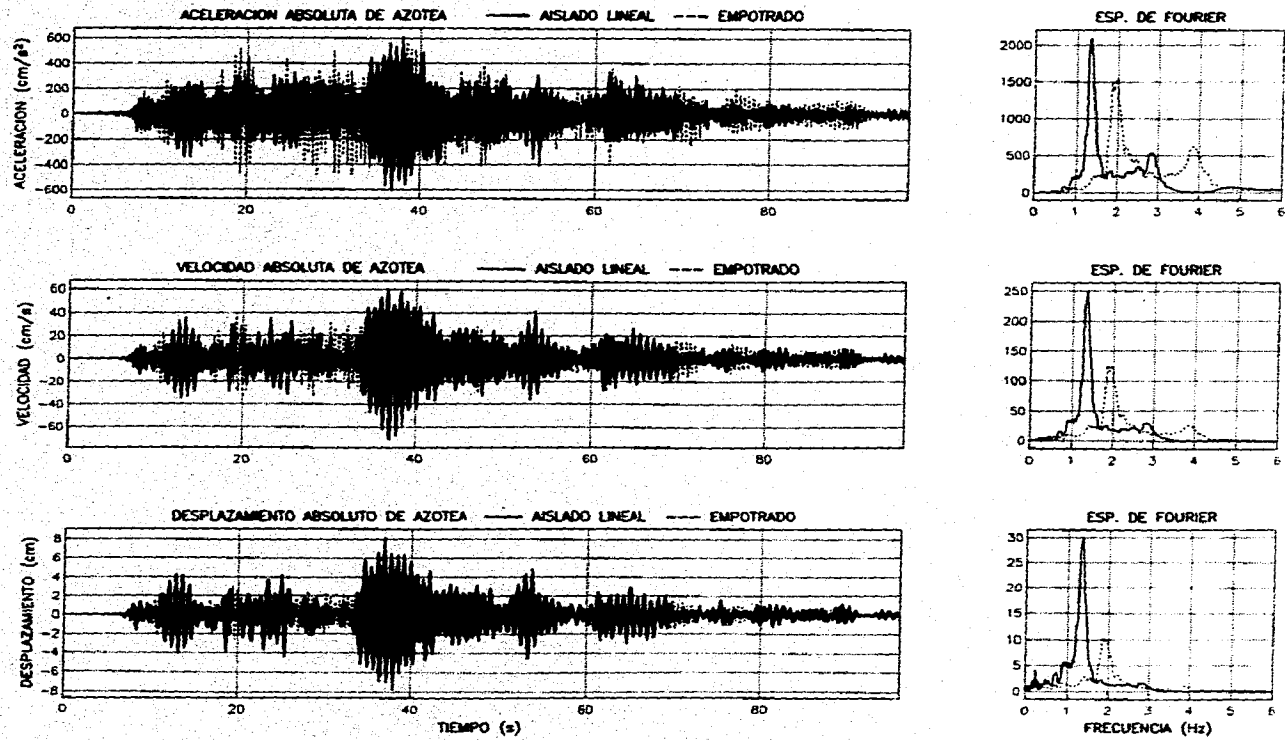


Figura 17 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Caleta. Edificio de Oficinas.

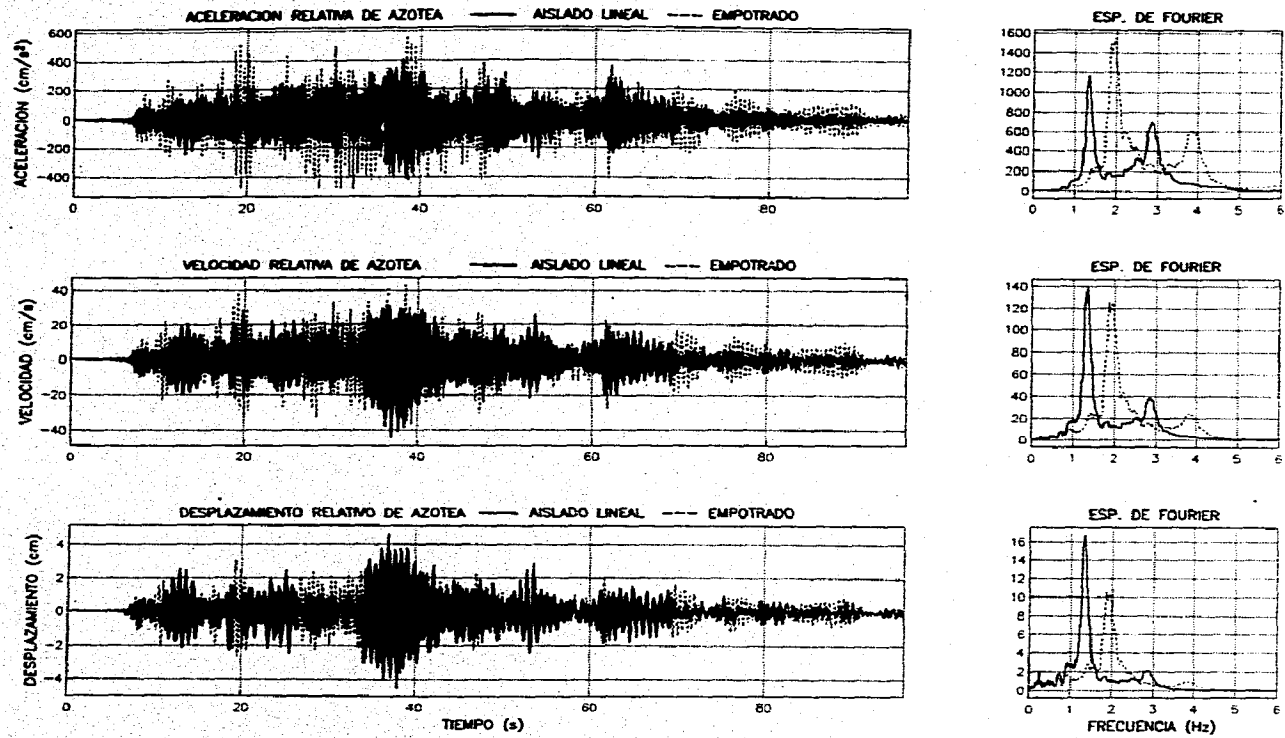


Figura 18 Comparación de las respuestas relativas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Caleta. Edificio de Oficinas.

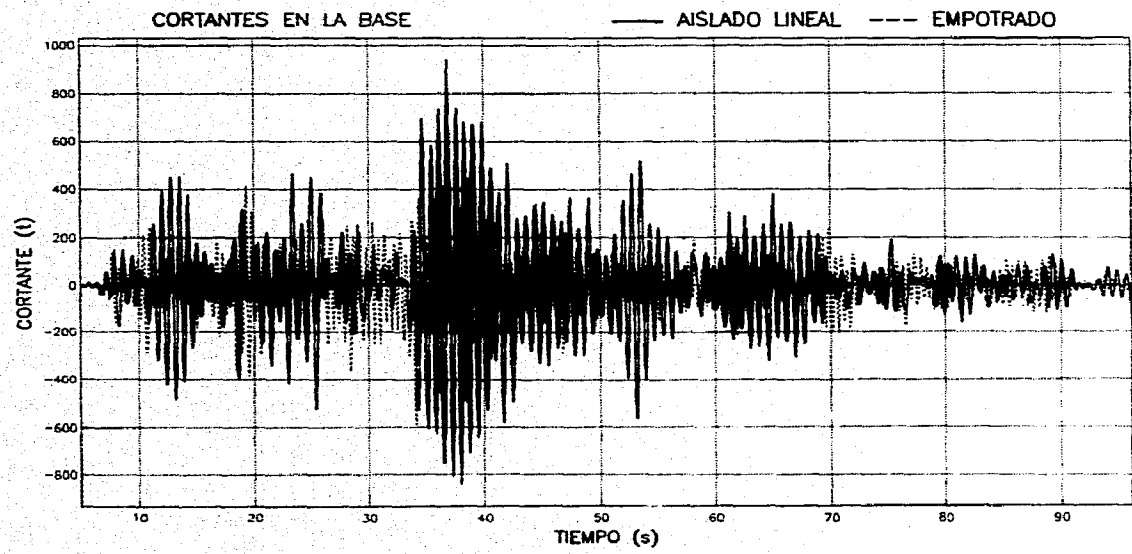


Figura 19 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base empotrada y base aislada. Sismo Caleta. Edificio de Oficinas.

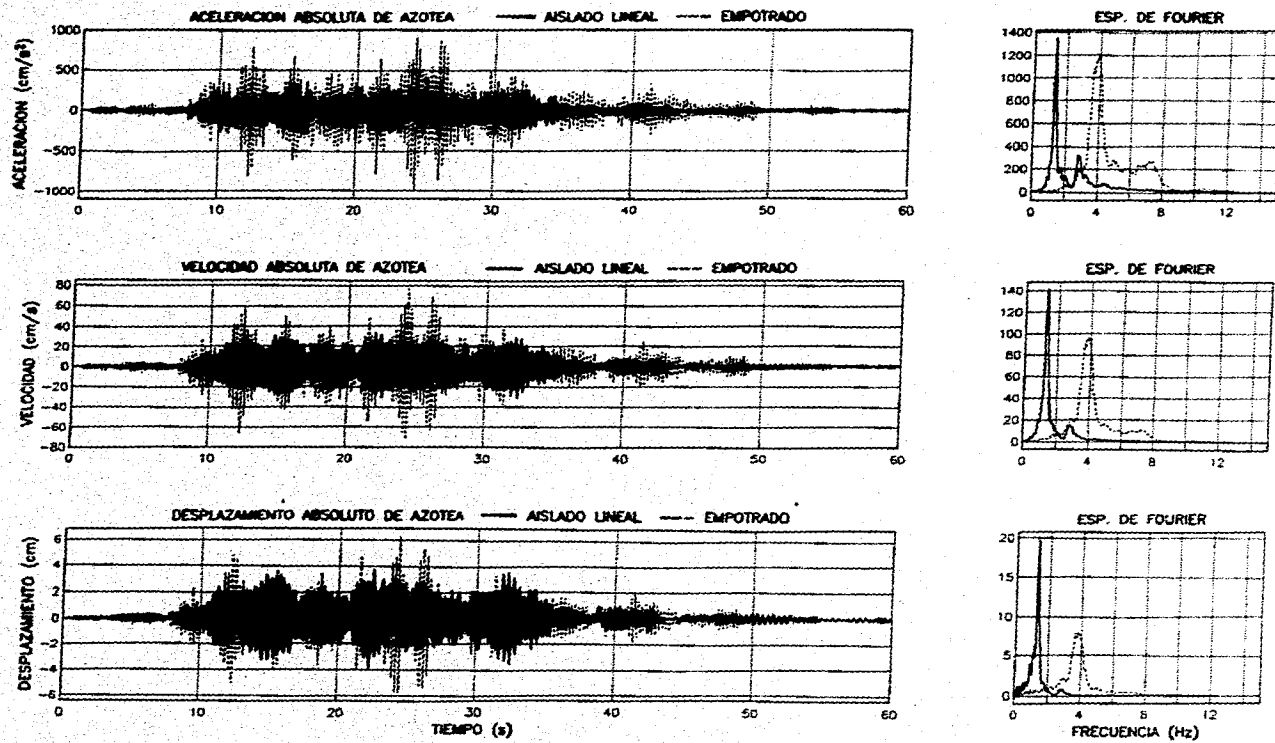


Figura 20 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Oficinas.

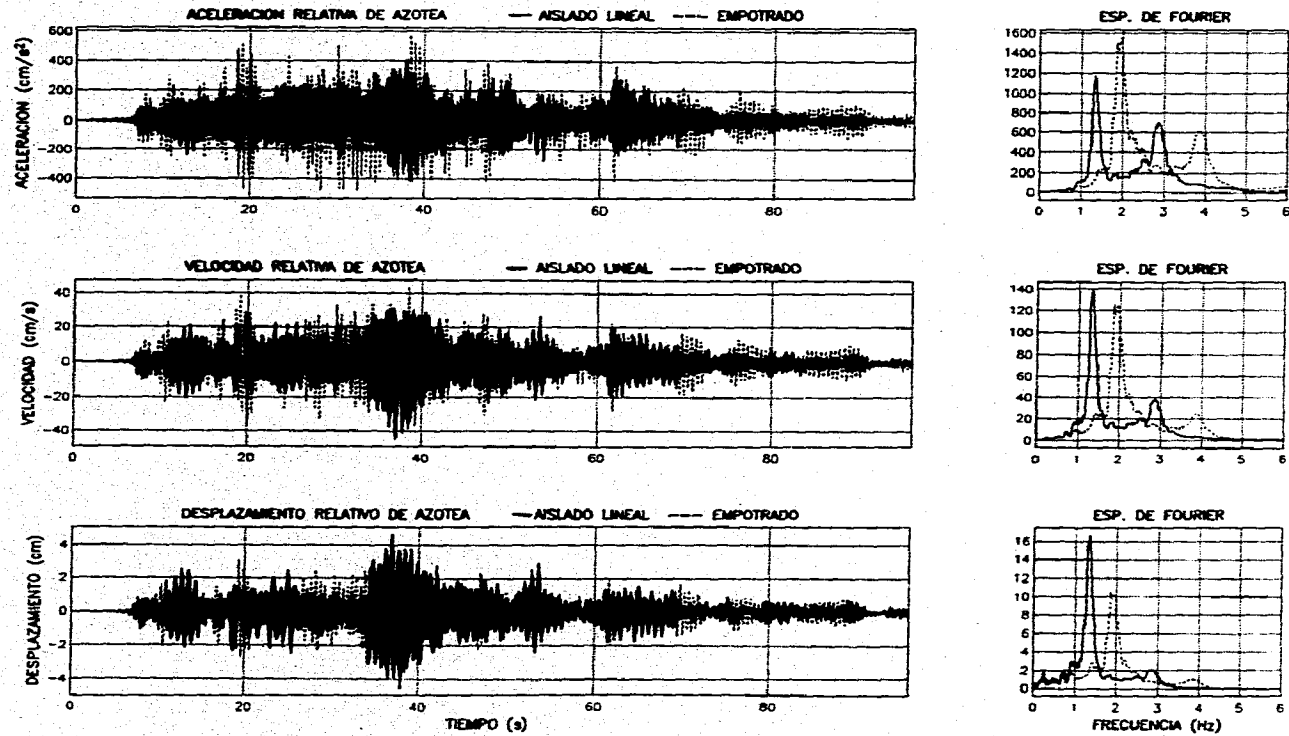


Figura 21 Comparación de las respuestas relativas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Oficinas.

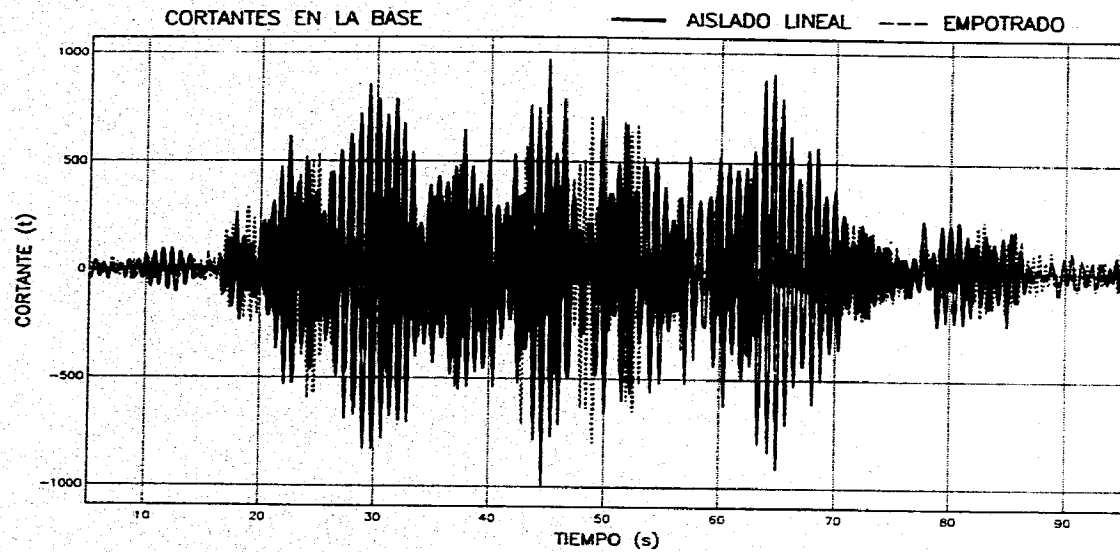


Figura 22 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Oficinas.

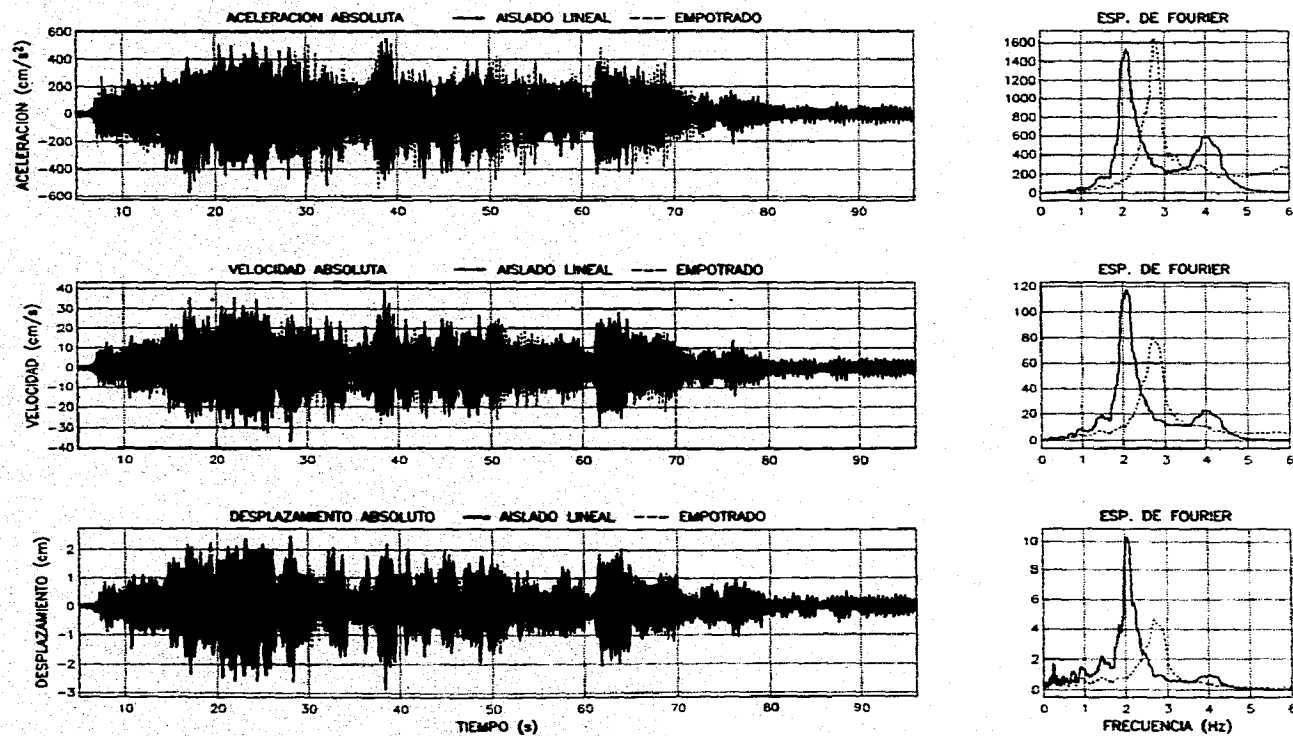


Figura 23 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Caleta. Edificio de Departamentos.

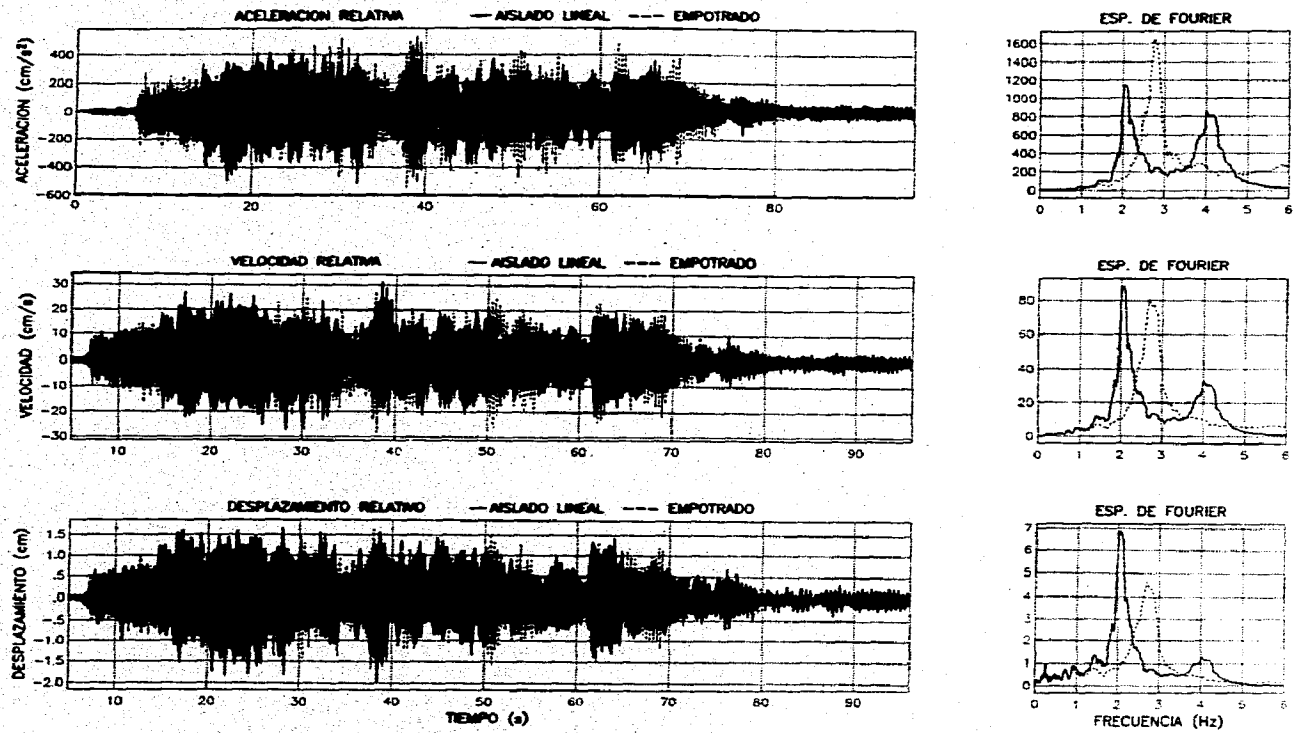


Figura 24 Comparación de las respuestas relativas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Caleta. Edificio de Departamentos.

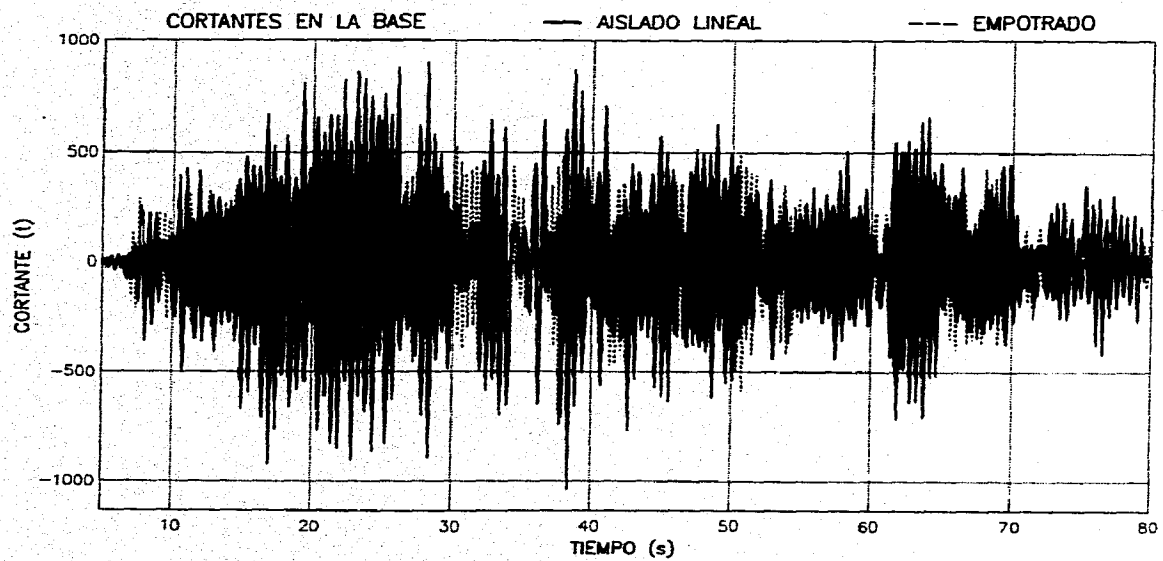


Figura 25 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base empotrada y base aislada. Sismo Caleta. Edificio de Departamentos.

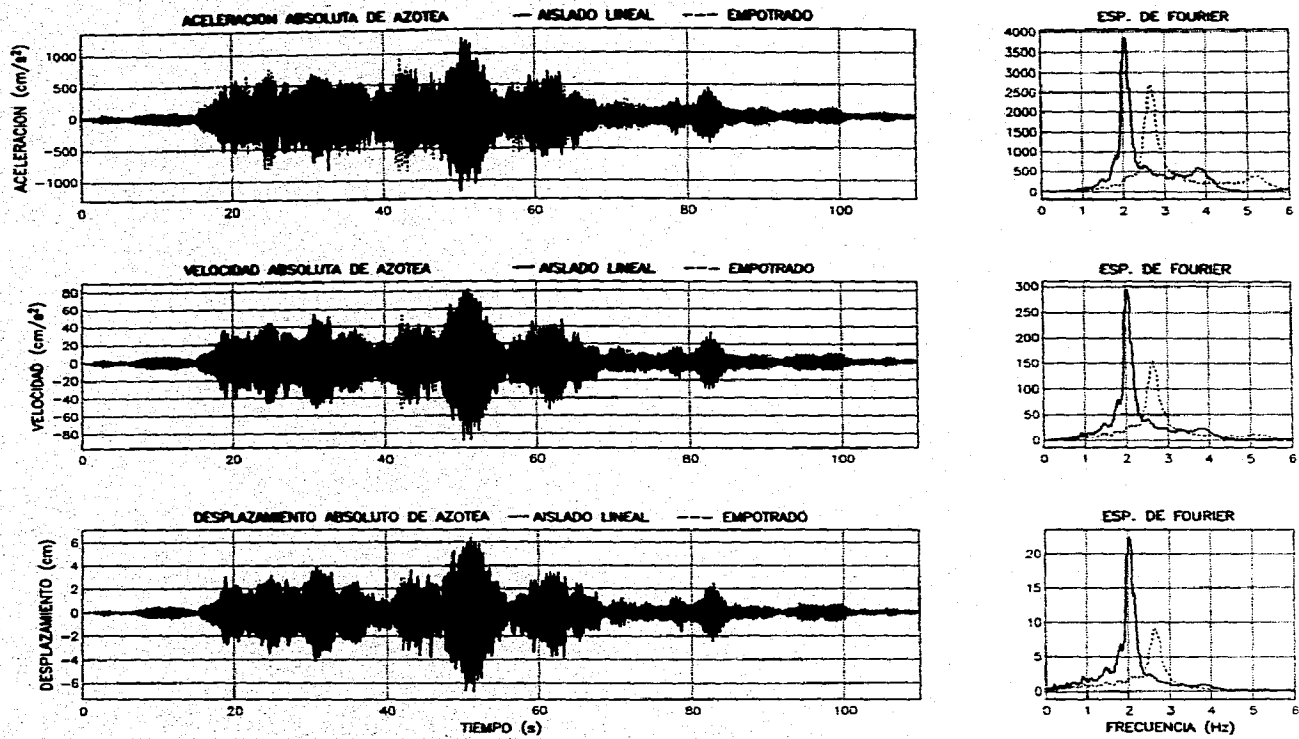


Figura 26 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Departamentos.

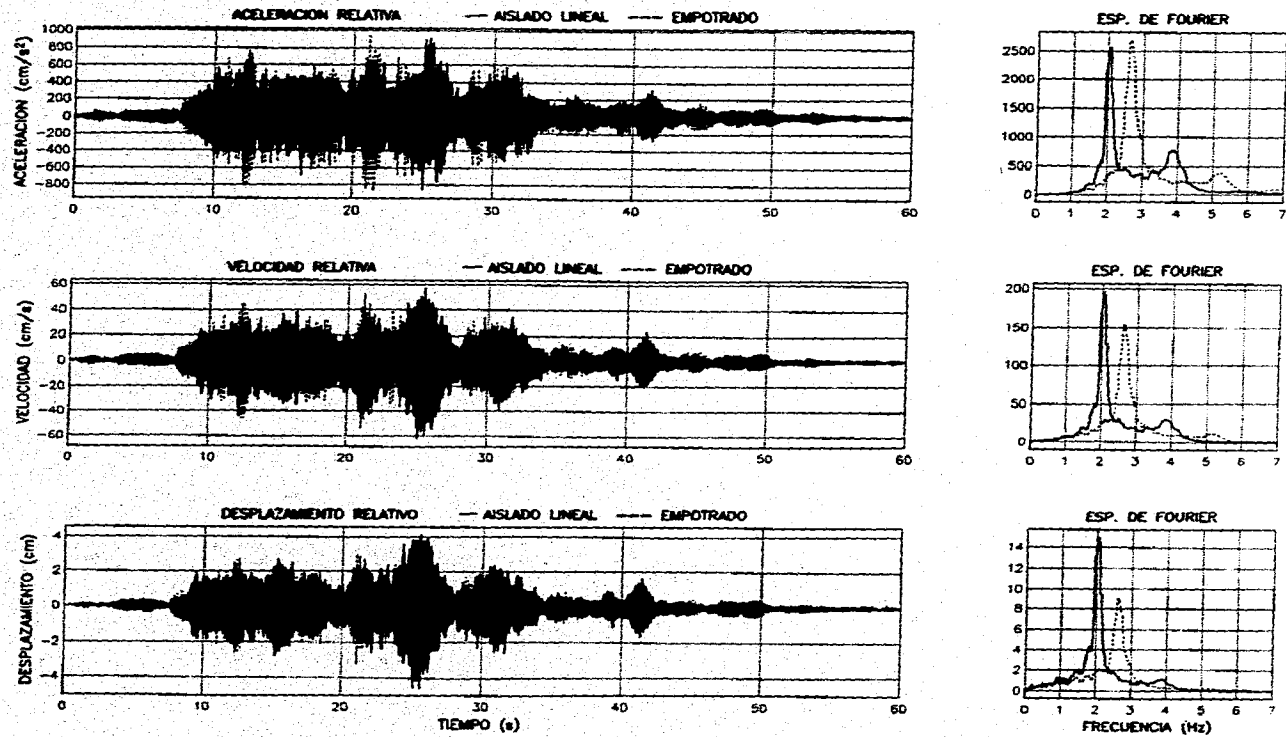


Figura 27 Comparación de las respuestas relativas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Departamentos.

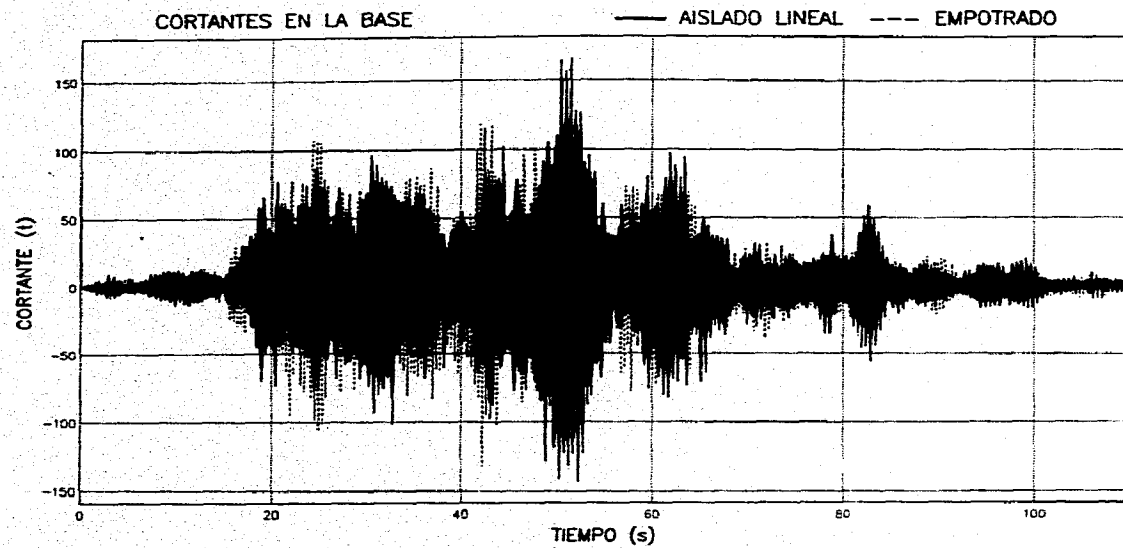


Figura 28 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Departamentos.

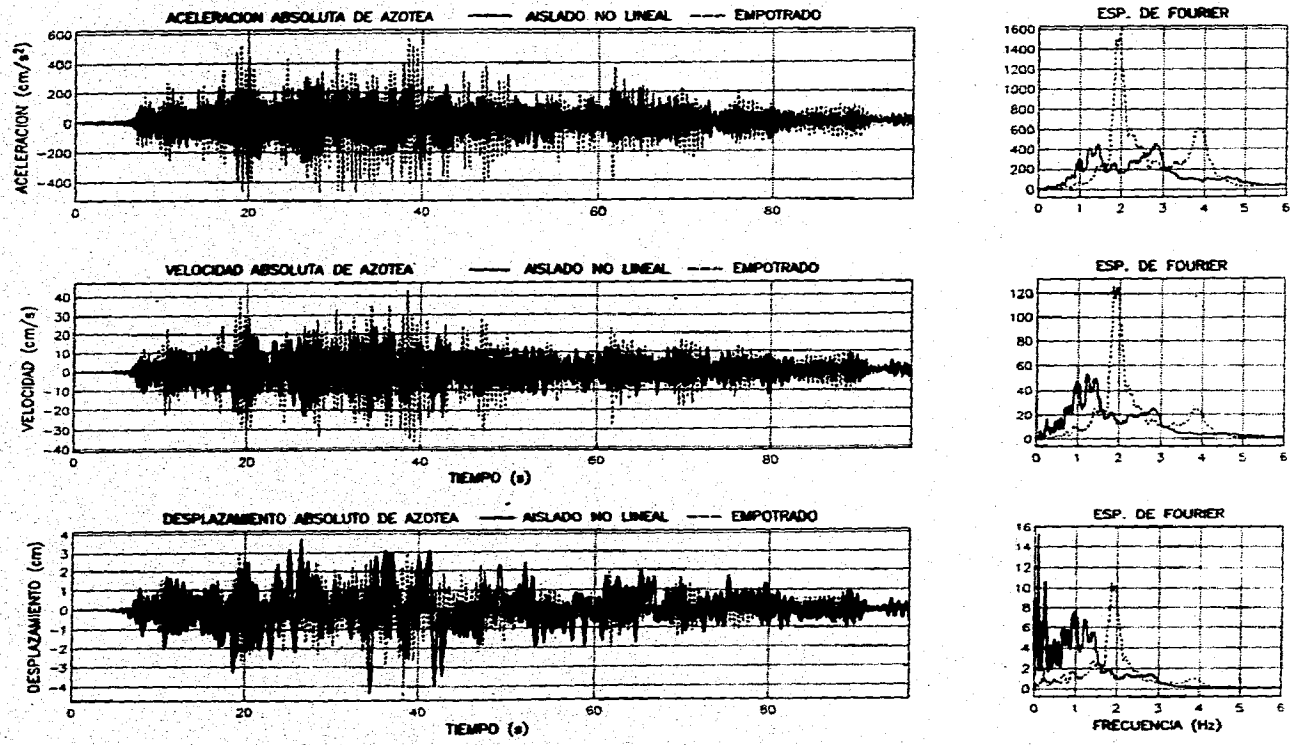


Figura 29 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Calca. Edificio de Oficinas.

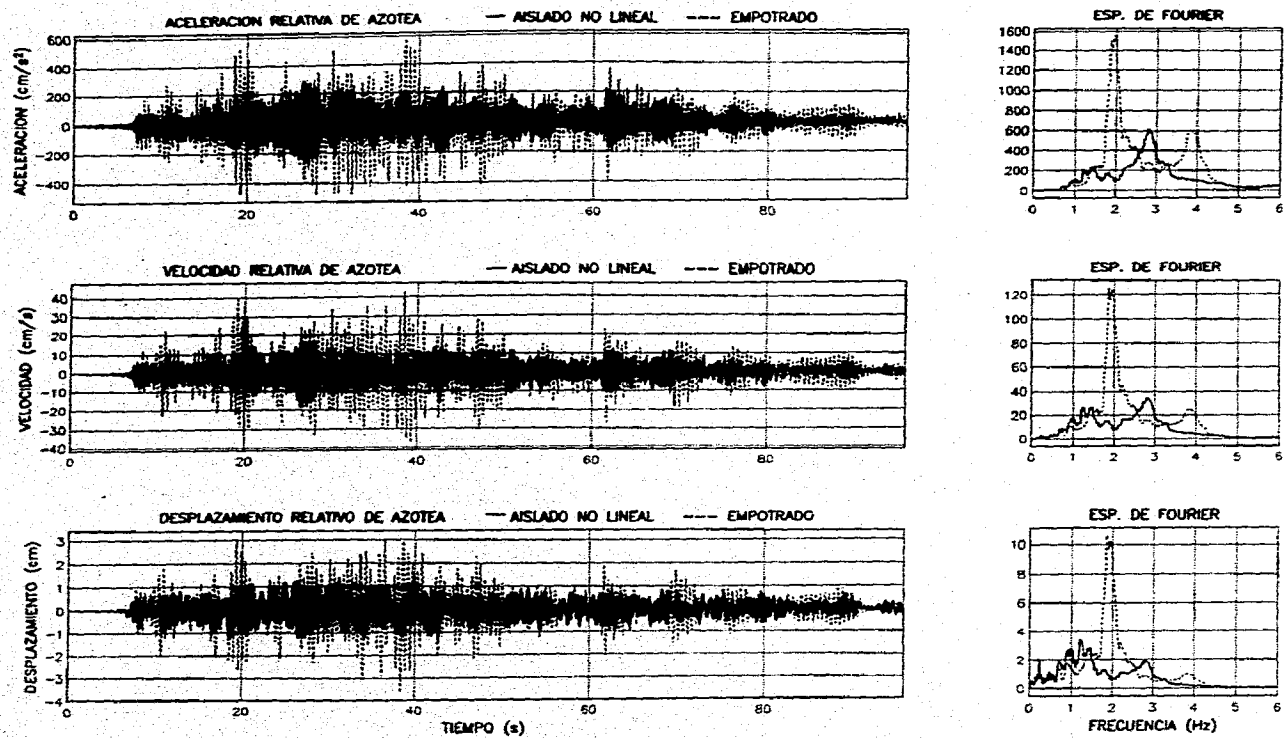


Figura 30 Comparación de las respuestas relativas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Caleta. Edificio de Oficinas.

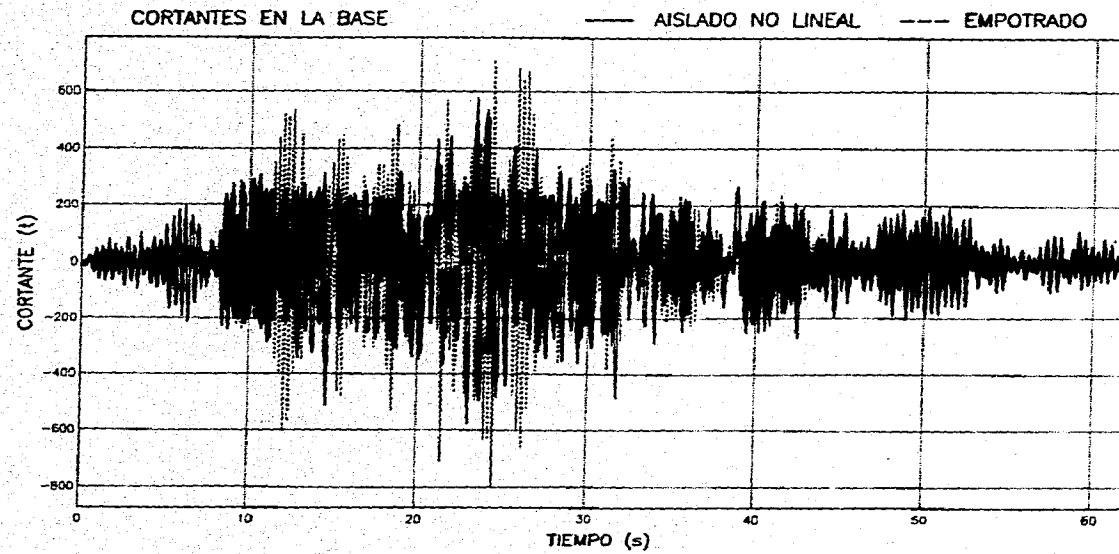


Figura 31 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base empotrada y base aislada. Sismo Caleta. Edificio de Oficinas.

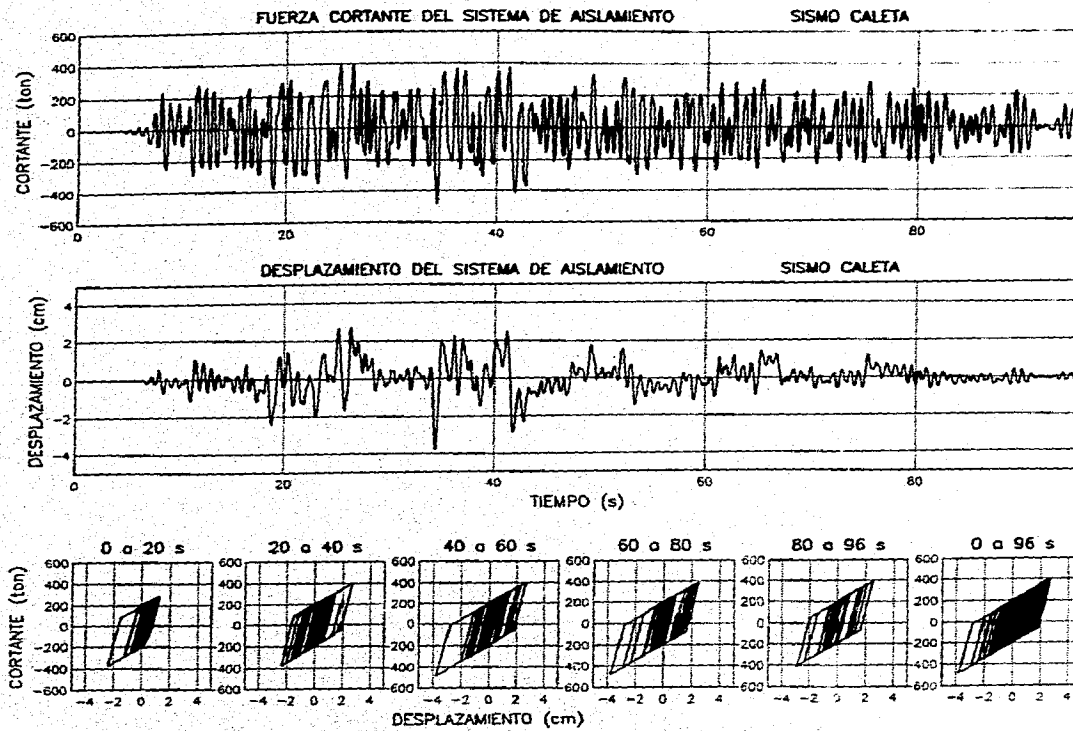


Figura 32 Comportamiento histerético global del sistema de aislamiento segmentando la señal en tramos de 20s. Sismo Caleta. Edificio de Oficinas.

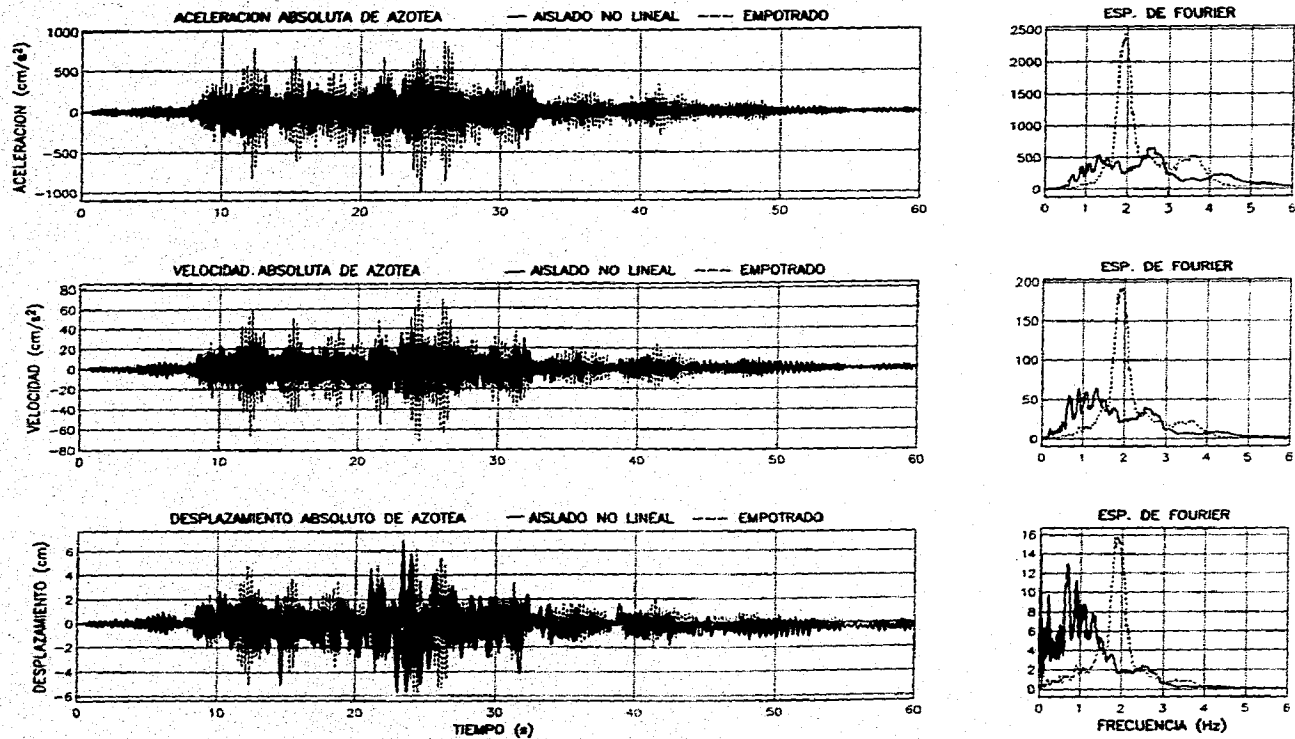


Figura 33 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Oficinas.

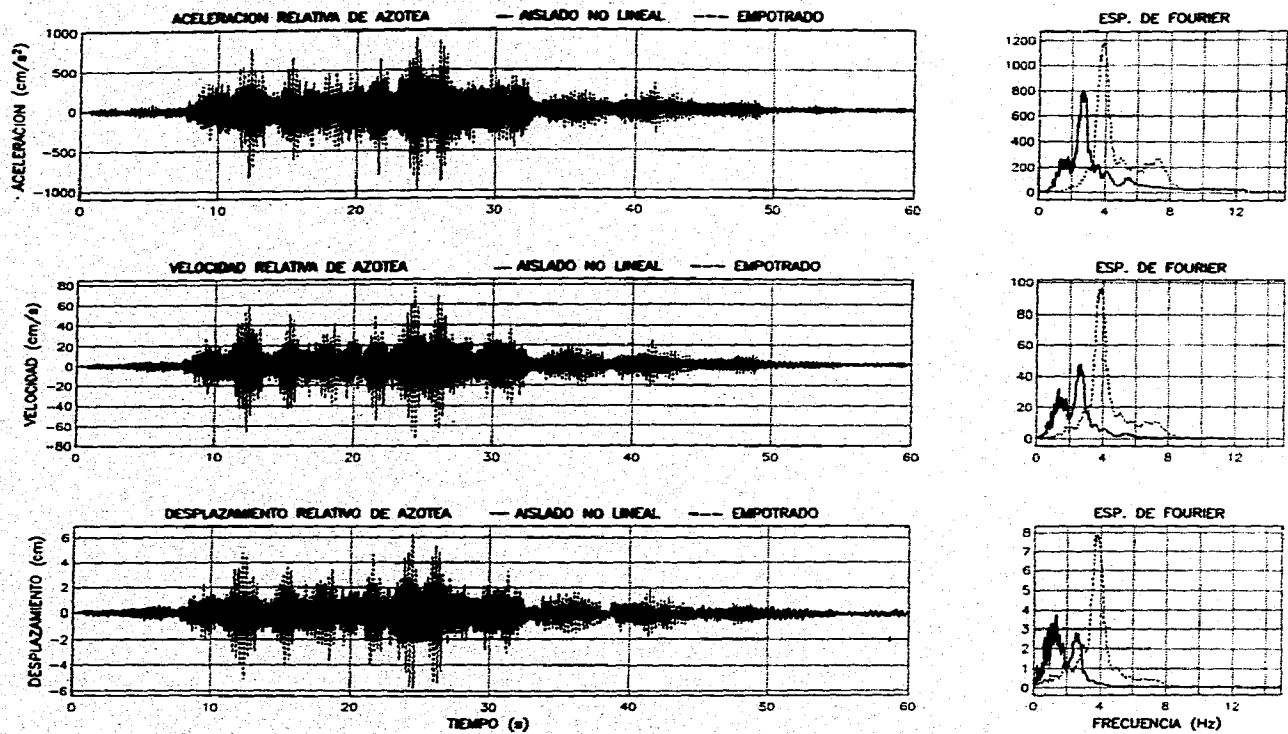


Figura 34 Comparación de las respuestas relativas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Oficinas.

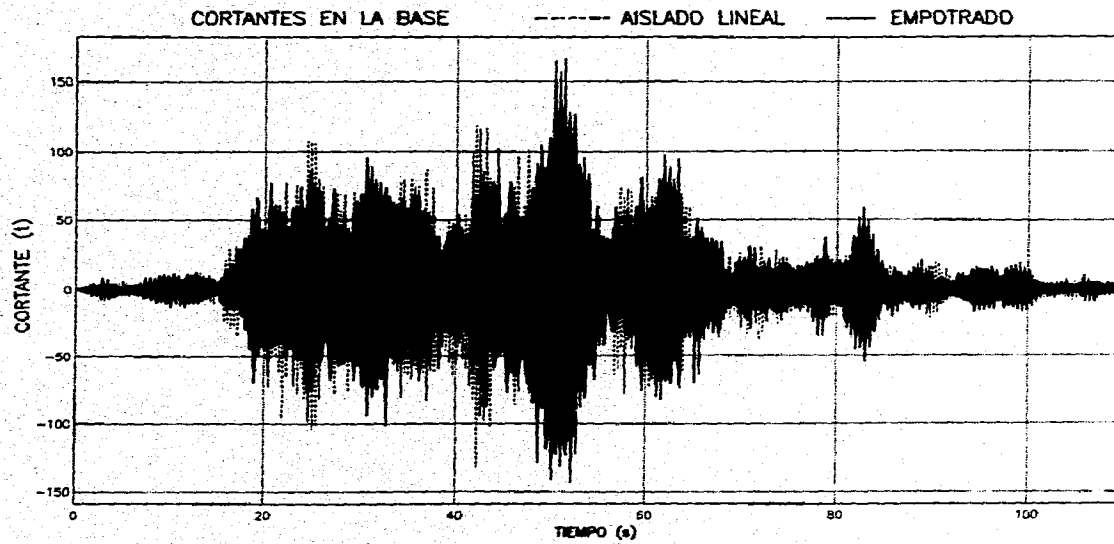


Figura 35 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Oficinas.

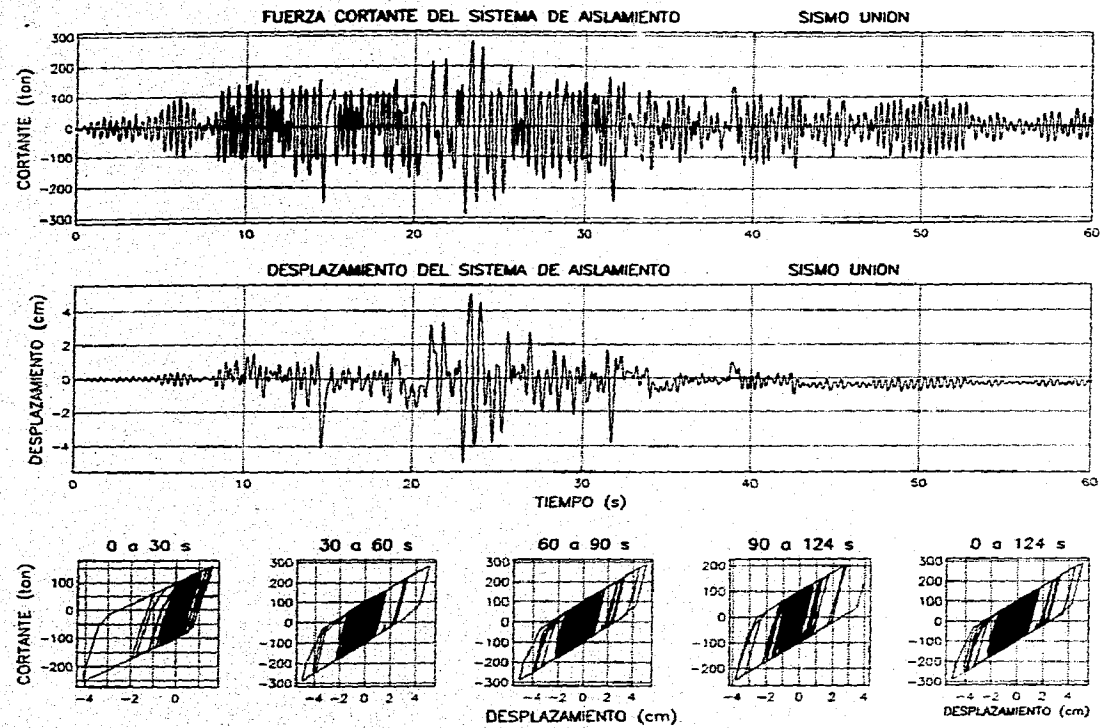


Figura 36 Comportamiento histerético global del sistema de aislamiento segmentando la señal en tramos de 30s. Sismo Unión. Edificio de Oficinas.

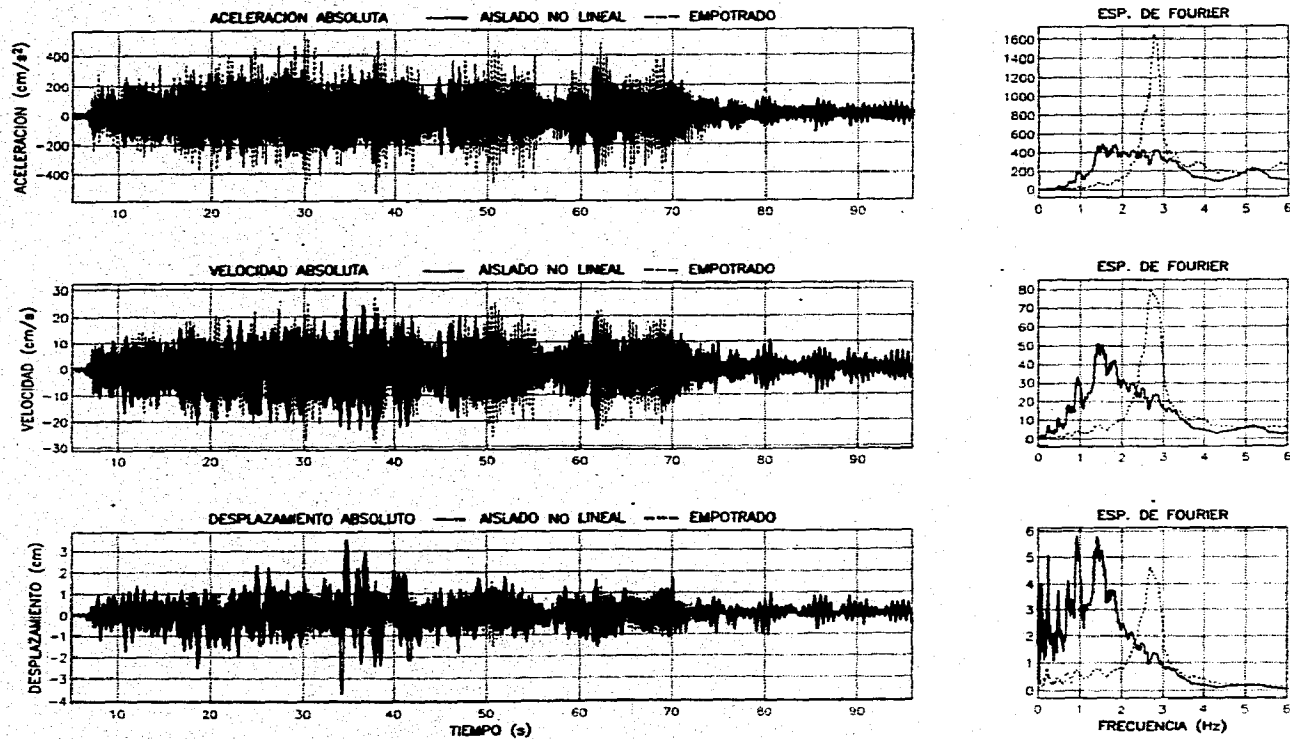


Figura 37 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Caleta. Edificio de Departamentos.

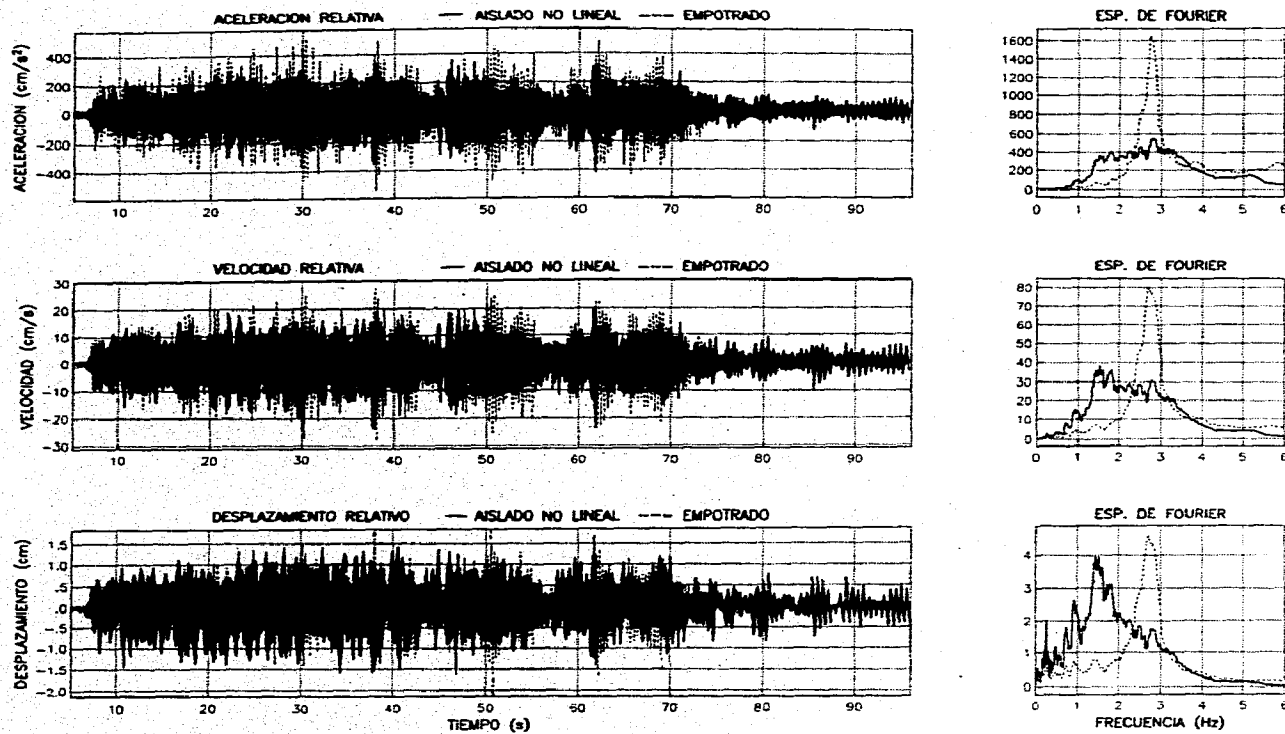


Figura 38 Comparación de las respuestas relativas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Caleta. Edificio de Departamentos.

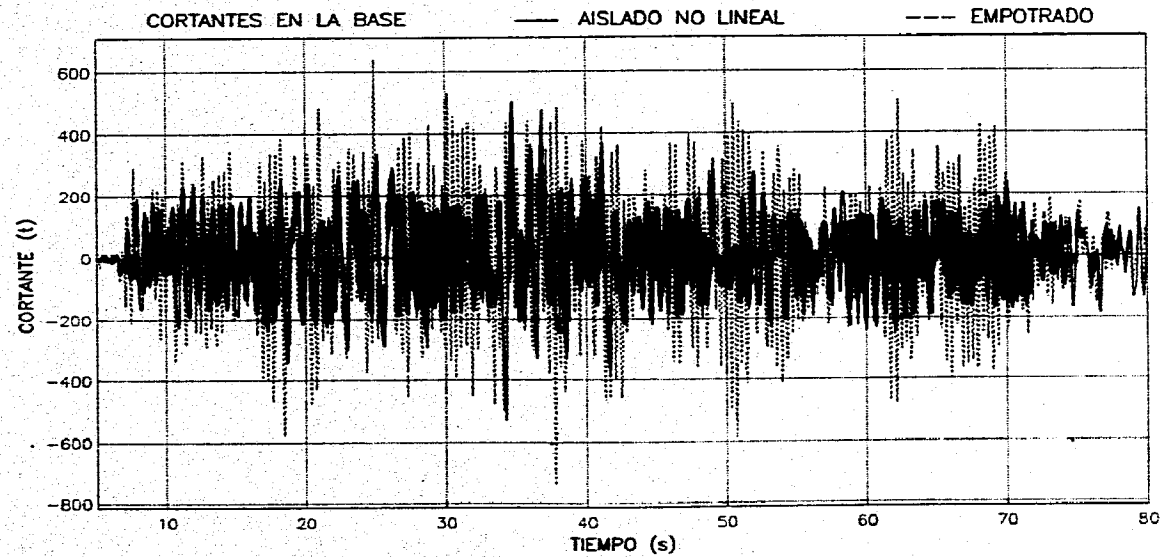


Figura 39 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base empotrada y base aislada. Sismo Caleta. Edificio de Departamentos.

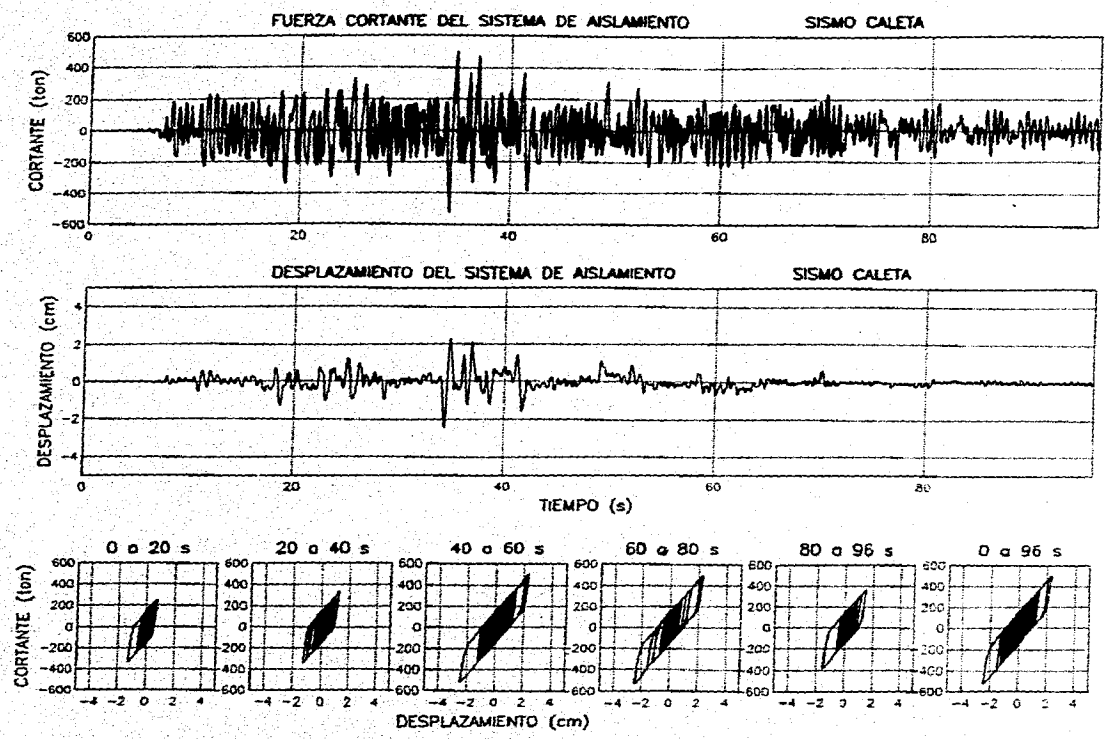


Figura 40 Comportamiento histerético global del sistema de aislamiento segmentando la señal en tramos de 20s. Sismo Caleta. Edificio de Departamentos.

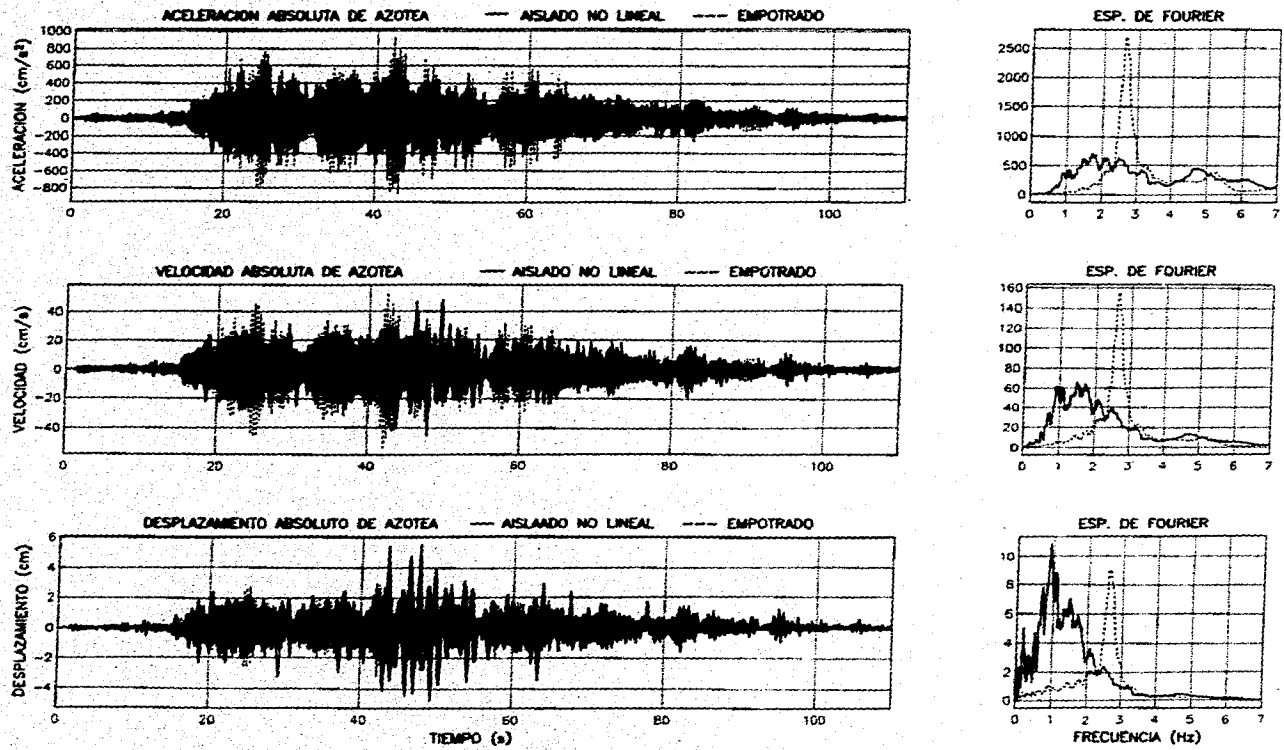


Figura 41 Comparación de las respuestas absolutas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Departamentos.

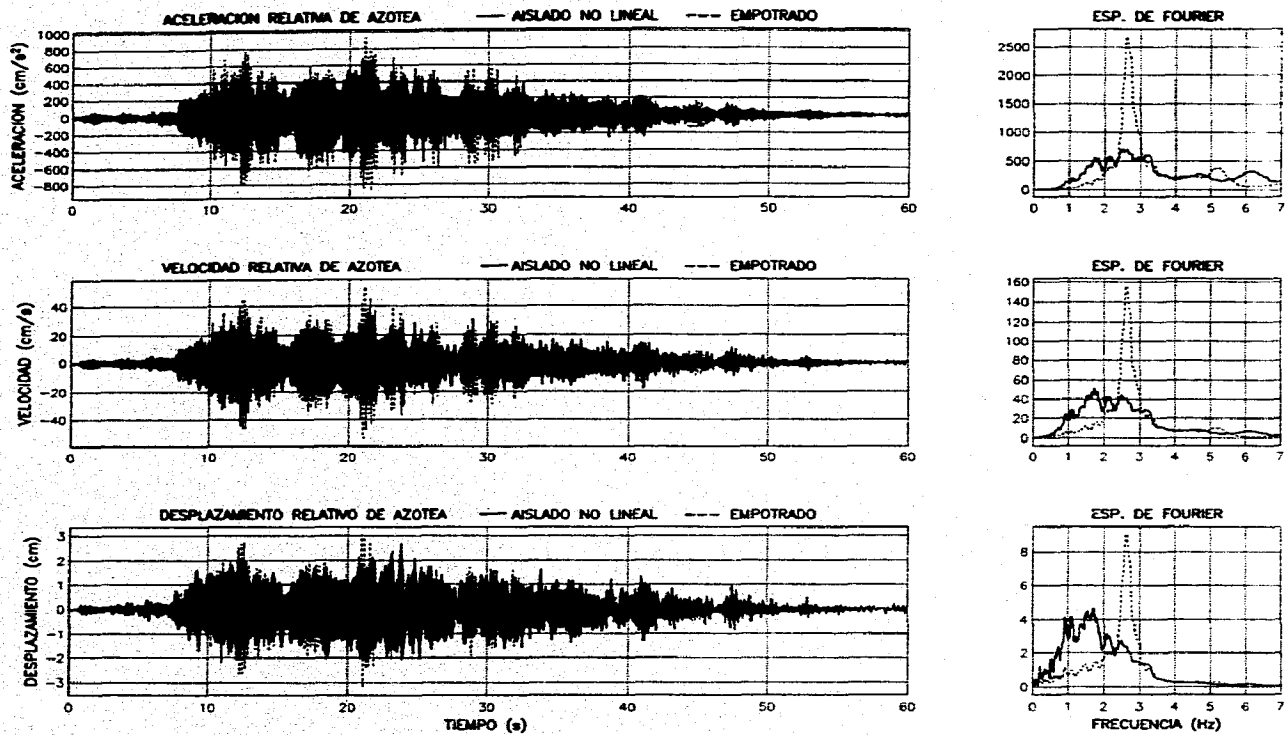


Figura 42 Comparación de las respuestas relativas de azotea considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Departamentos.

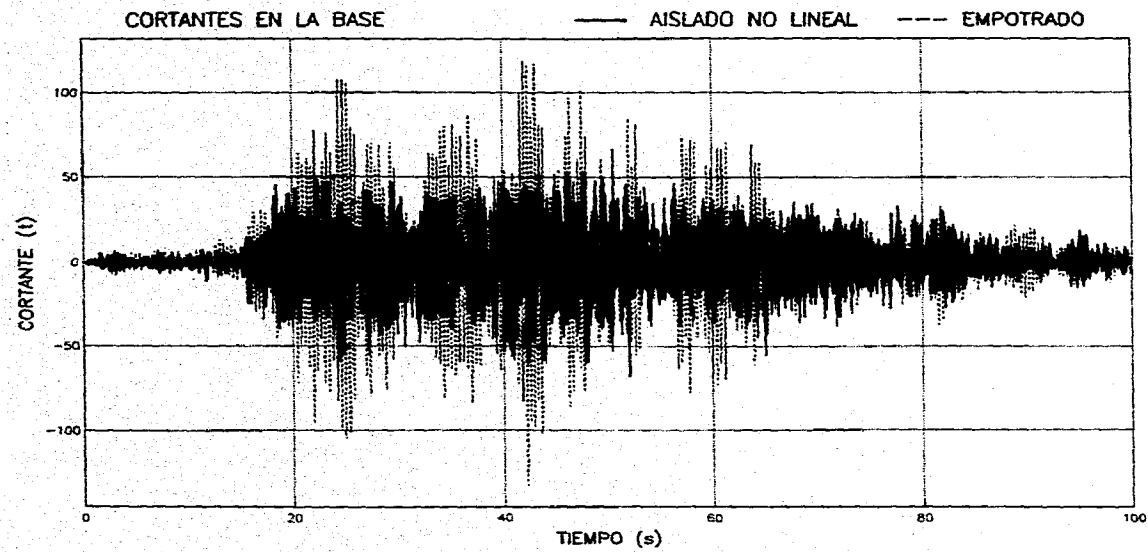


Figura 43 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base empotrada y base aislada. Sismo Unión. Edificio de Departamentos.

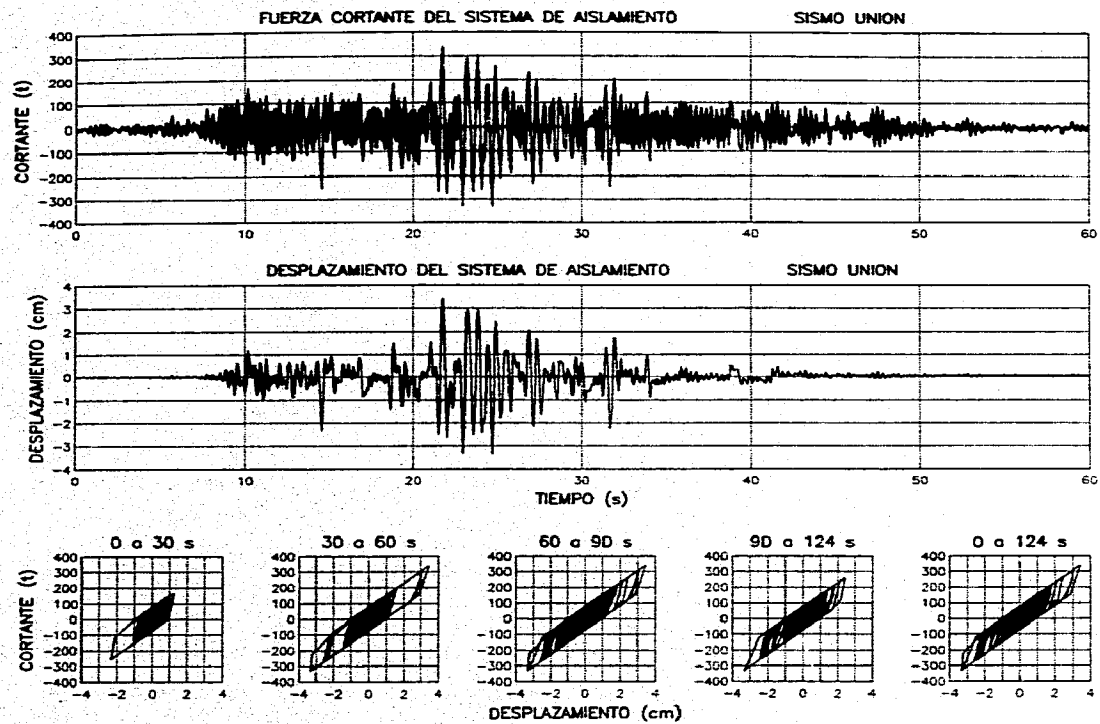


Figura 44 Comportamiento histerético global del sistema de aislamiento segmentando la señal en tramos de 30s. Sismo Unión. Edificio de Departamentos.

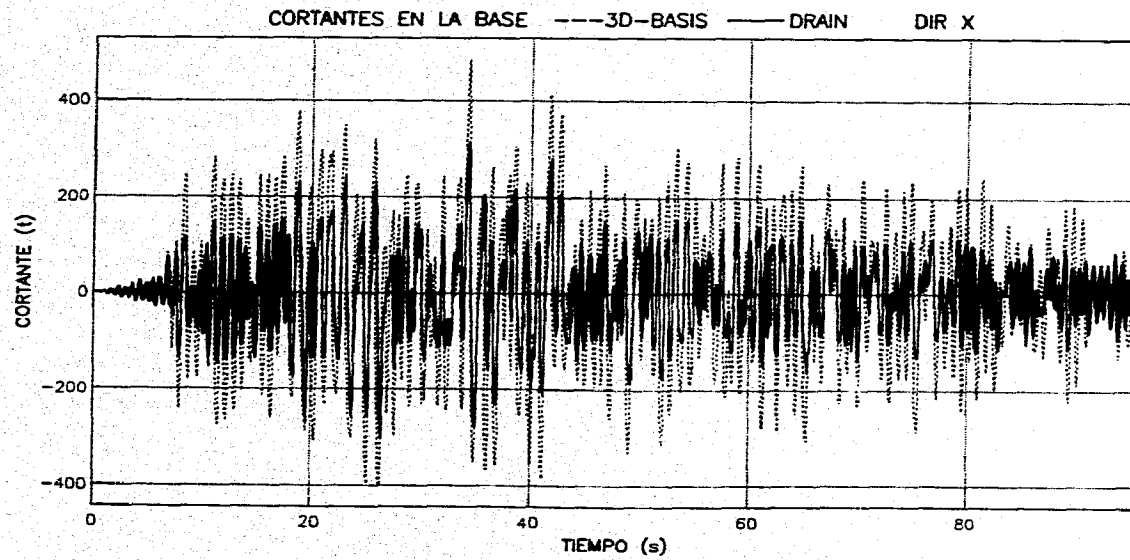


Figura 45 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base aislada, entre los programas 3D-Basis y Drain-2d. Sismo Caleta. Edificio de Oficinas.

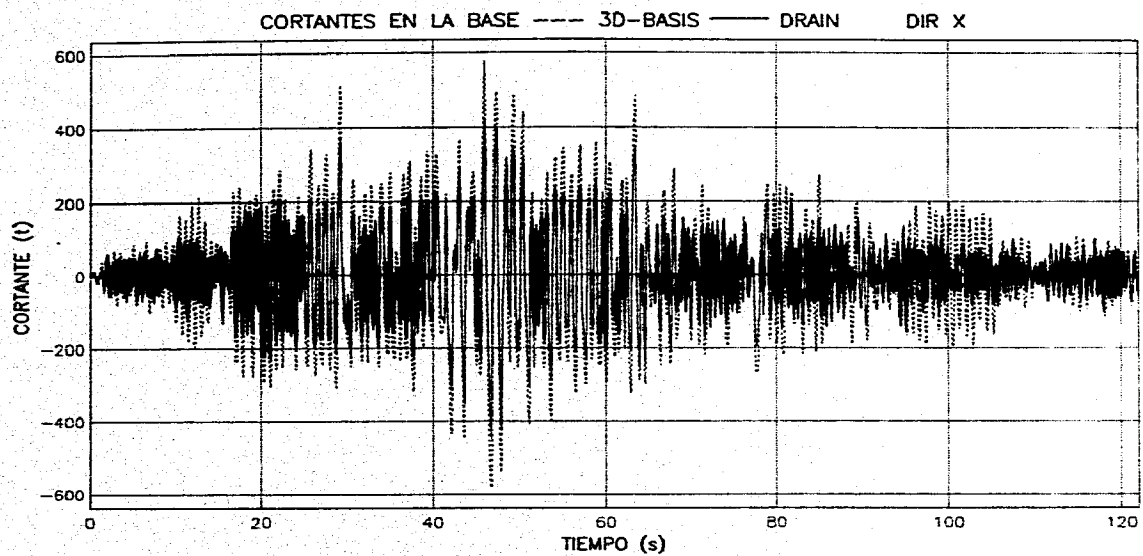


Figura 46 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base aislada, entre los programas 3D-Basis y Drain-2d. Sismo Unión. Edificio de Oficinas.

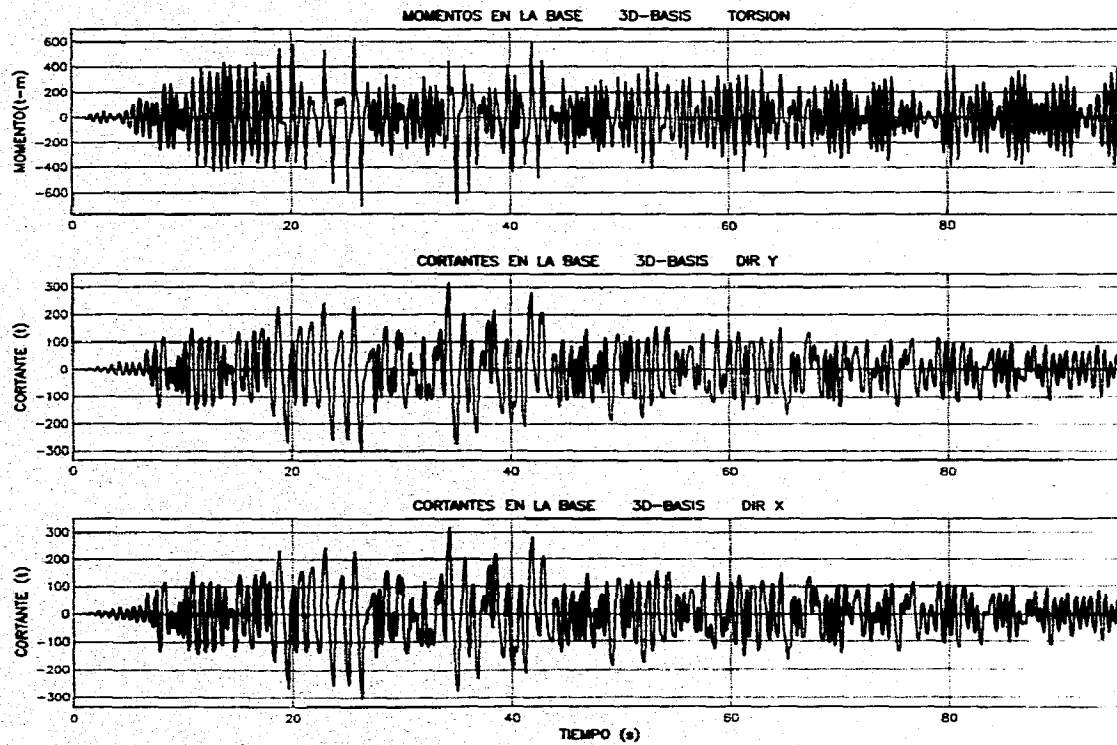


Figura 47 Cortantes en la base en sus direcciones X, Y y Torsión. Sismo Caleta. Edificio de Oficinas.

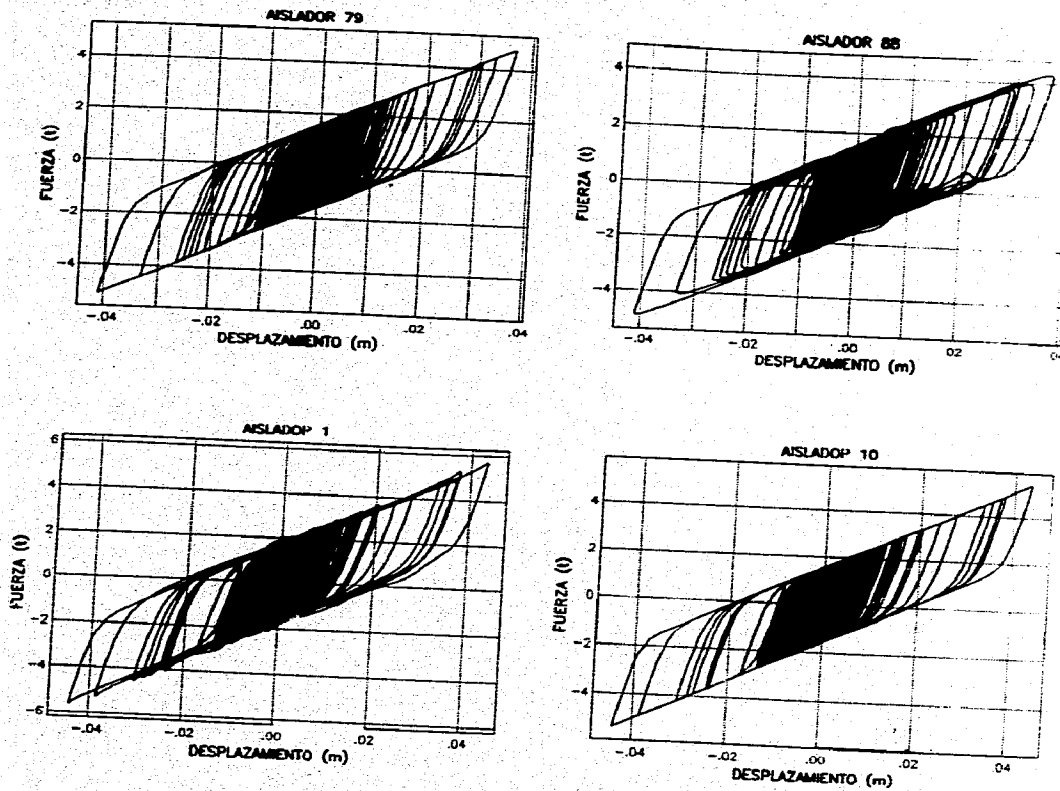


Figura 48 Comportamiento histerético de los aisladores en la base. Sismo Caleta. Edificio de Oficinas.

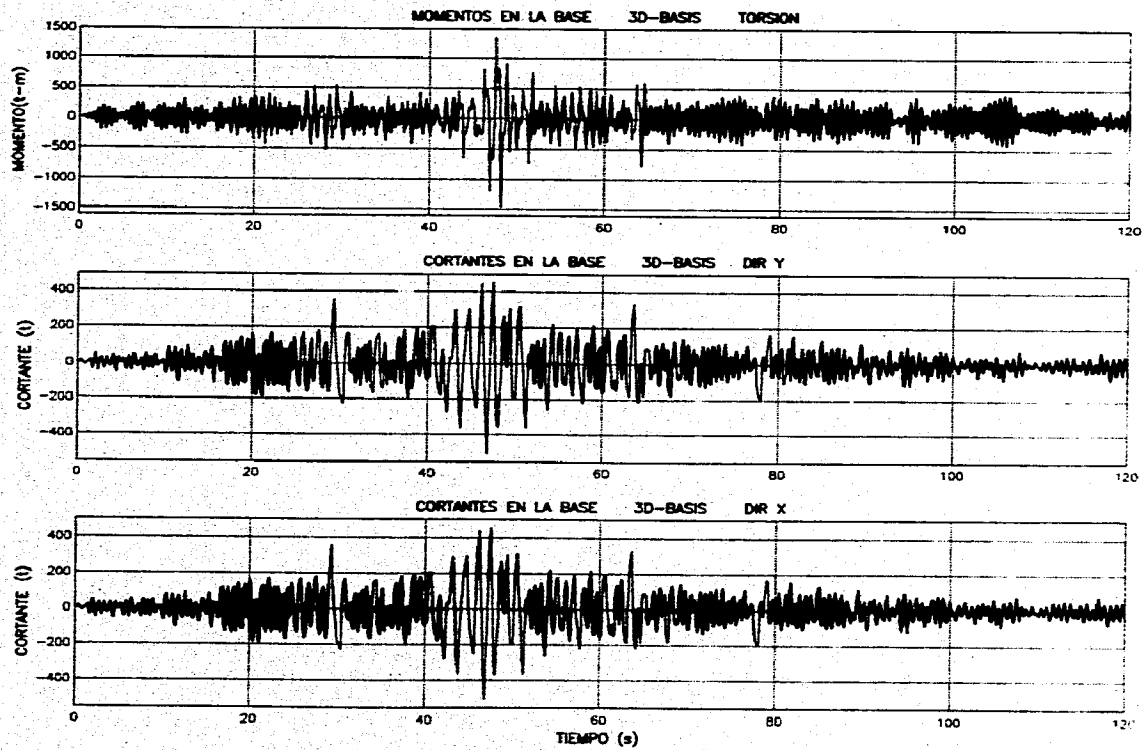


Figura 49 Cortantes en la base en sus direcciones X, Y y Torsión. Sismo Unión. Edificio de Oficinas.

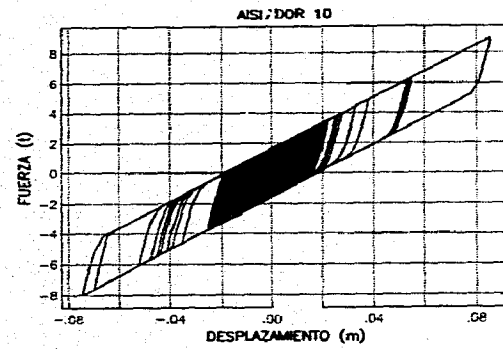
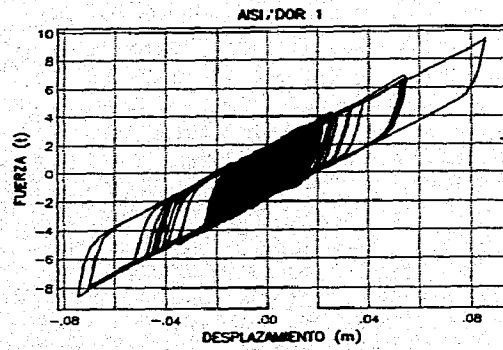
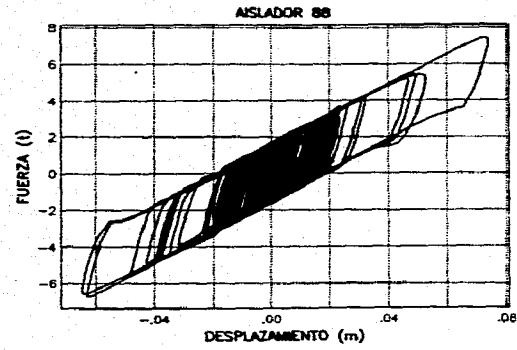
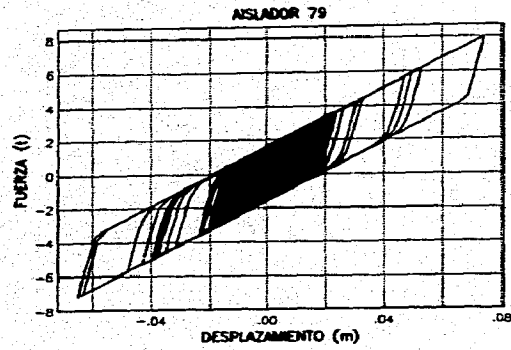


Figura 50 Comportamiento histérico de los aisladores en la base. Sismo Unión. Edificio de Oficinas.

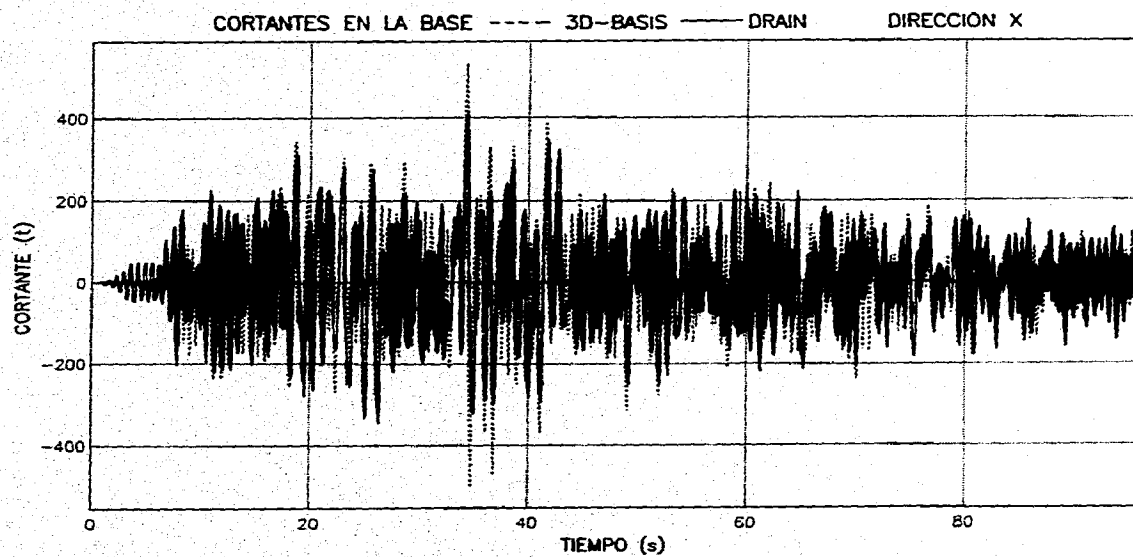


Figura 51 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base aislada, entre los programas 3D-Basis y Drain-2d. Sismo Caleta. Edificio de Departamentos.

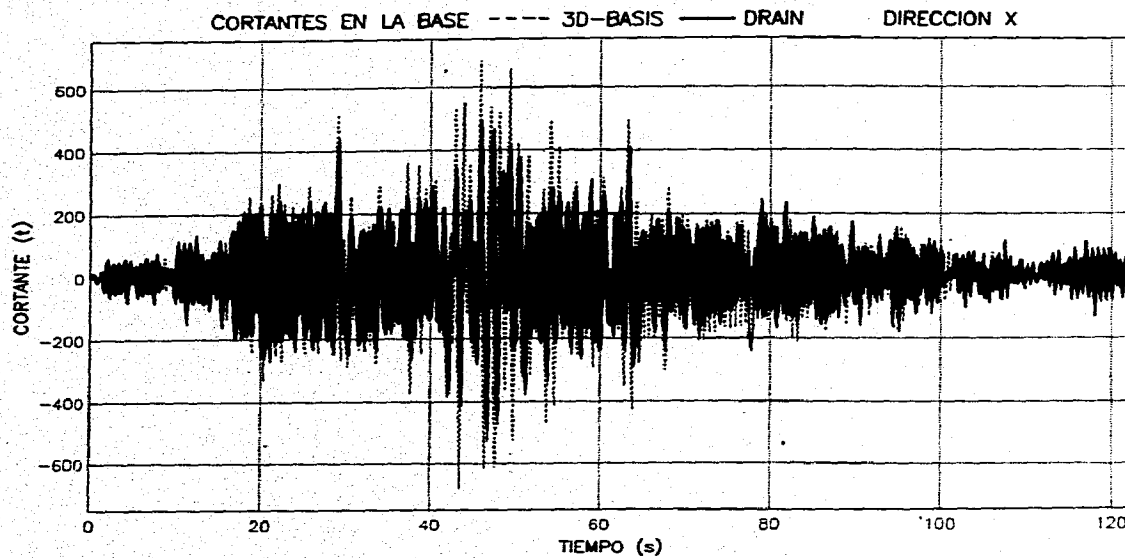


Figura 52 Comparación de la historia de cortantes en la base considerando base aislada, entre los programas 3D-Basis y Drain-2d. Sismo Unión. Edificio de Departamentos.

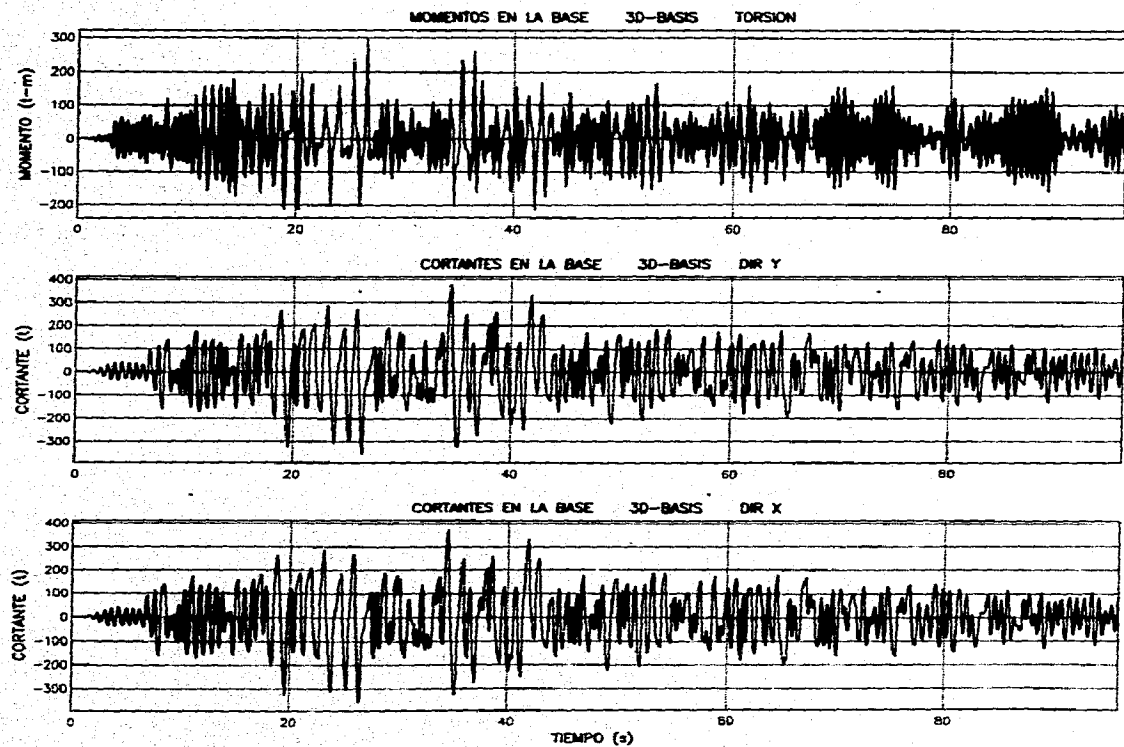


Figura 53 Cortantes en la base en sus direcciones X, Y y Torsión. Sismo Caleta. Edificio de Departamentos.

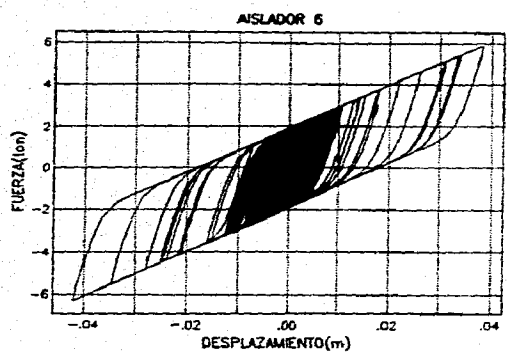
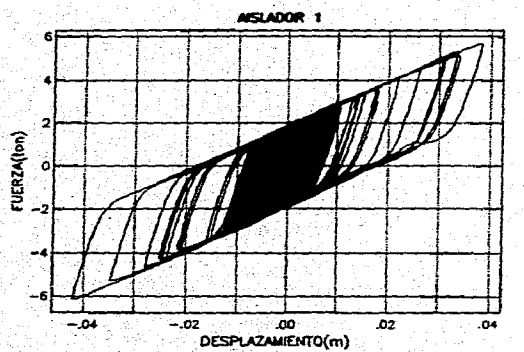
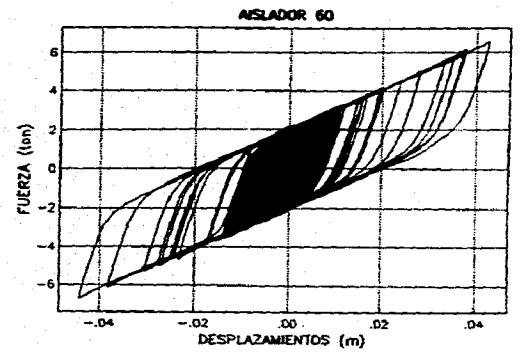
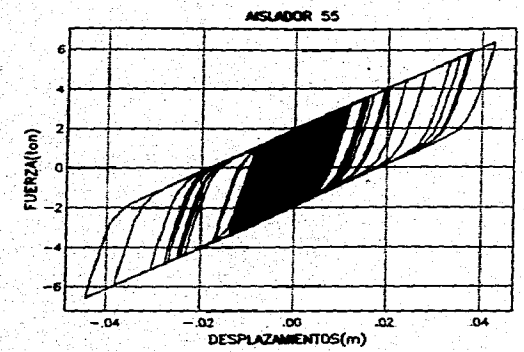


Figura 54 Comportamiento histerético de los aisladores en la base. Sismo Caleta. Edificio de Departamentos.

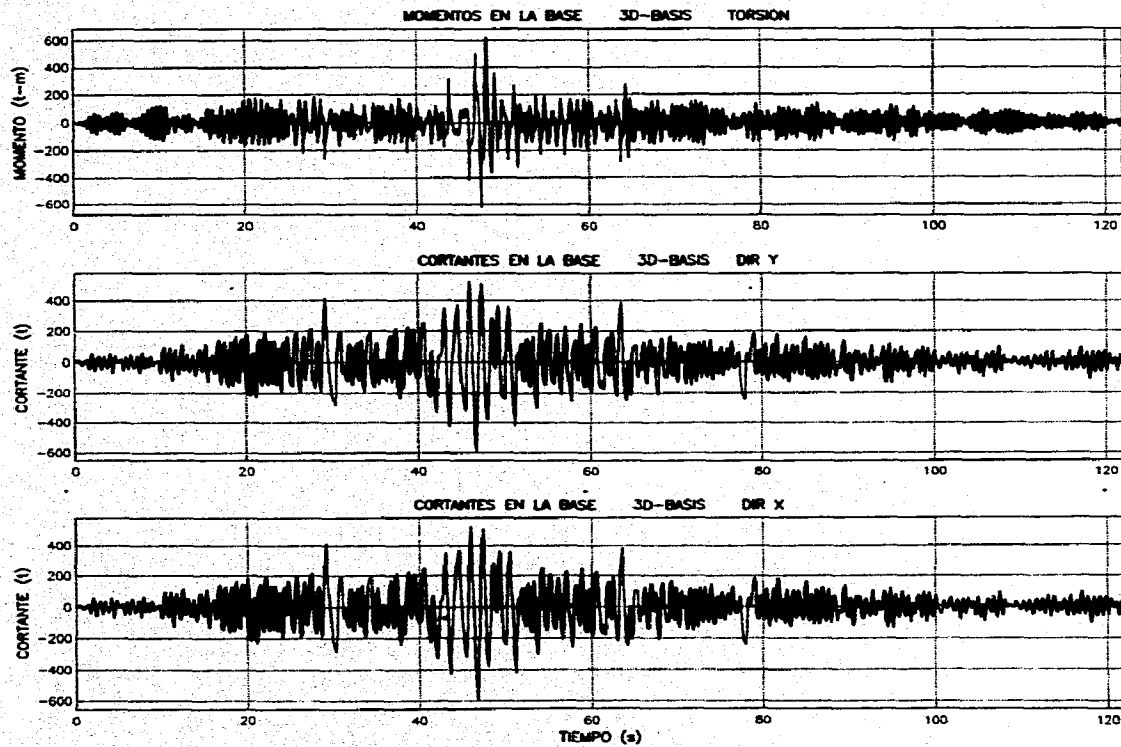


Figura 55 Cortantes en la base en sus direcciones X, Y y Torsión. Sismo Unión. Edificio de Departamentos.

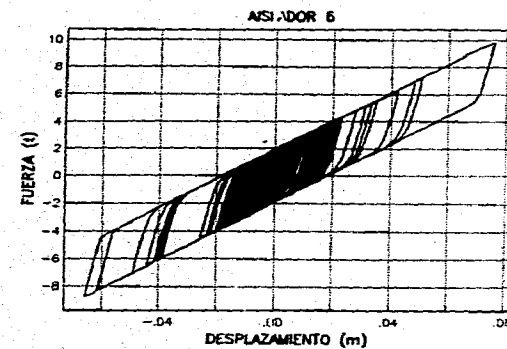
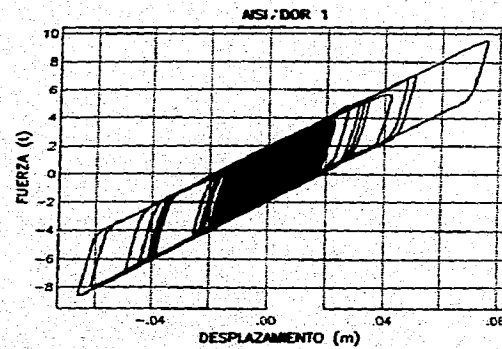
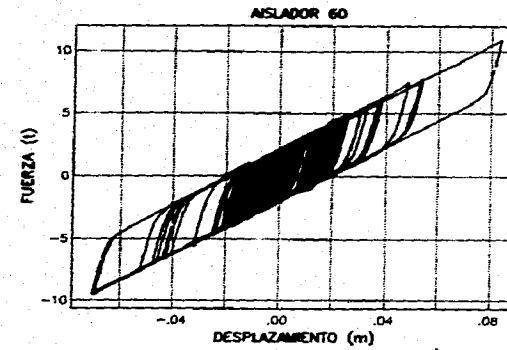
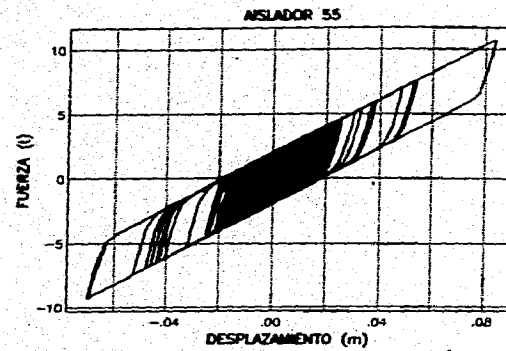


Figura 56 Comportamiento histerético de los aisladores en la base. Sismo Unión. Edificio de Departamentos.

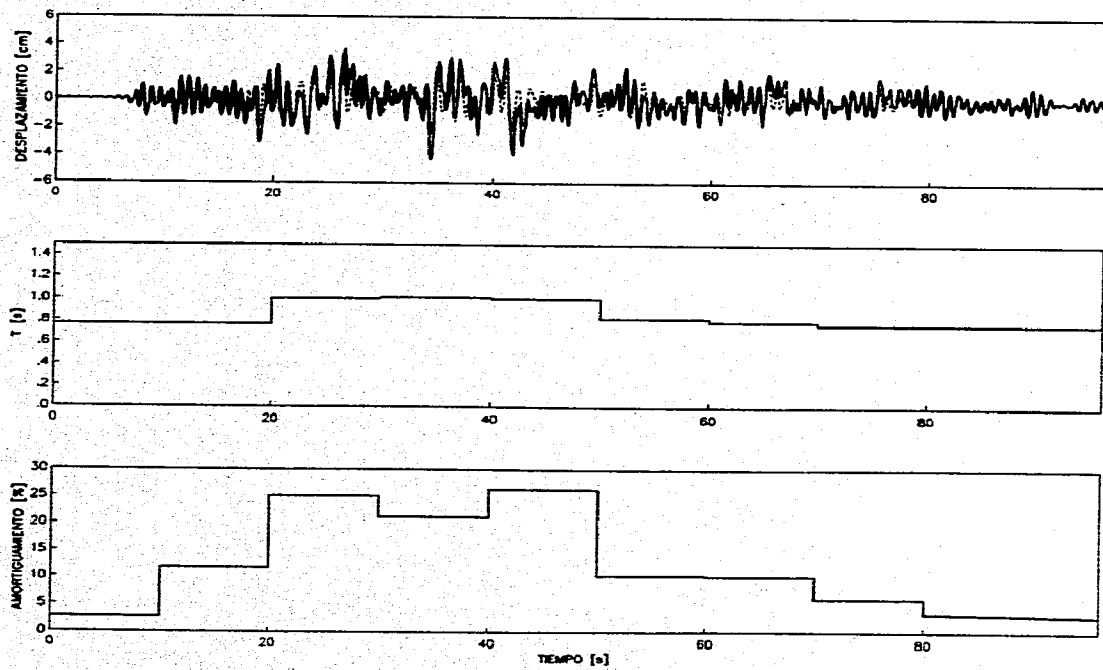


Figura 57 Variación de las características dinámicas equivalentes del sistema aislado. Sismo Caleta. Edificio de Oficinas

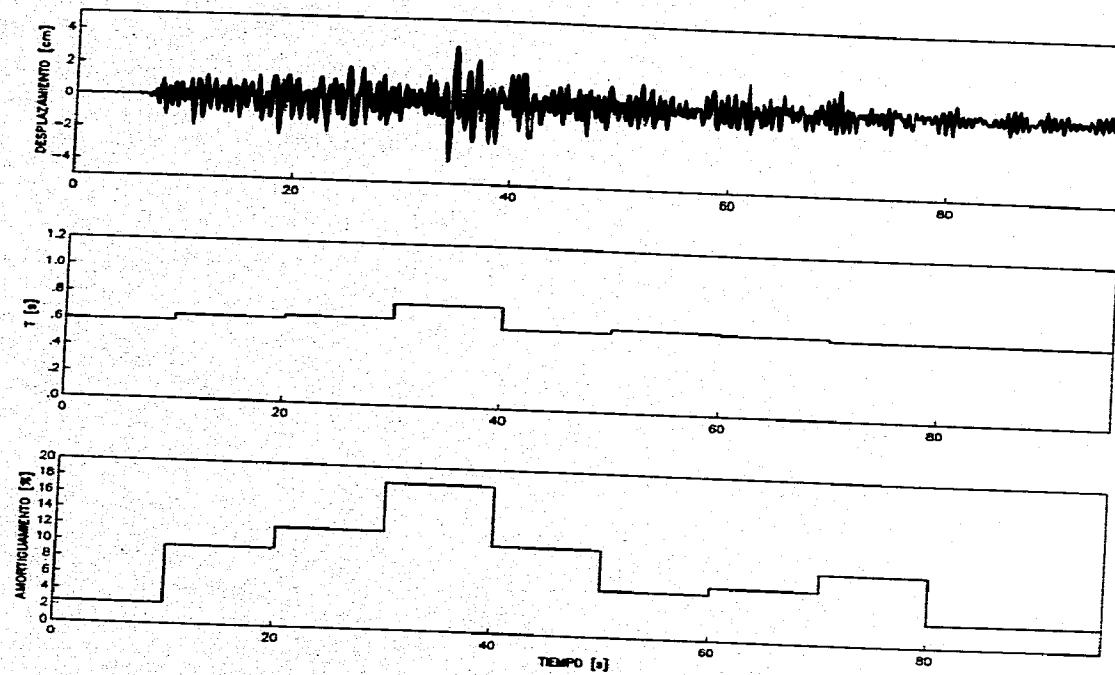


Figura 58 Variación de las características dinámicas equivalentes del sistema aislado.
Sismo Calta. Edificio de Departamentos

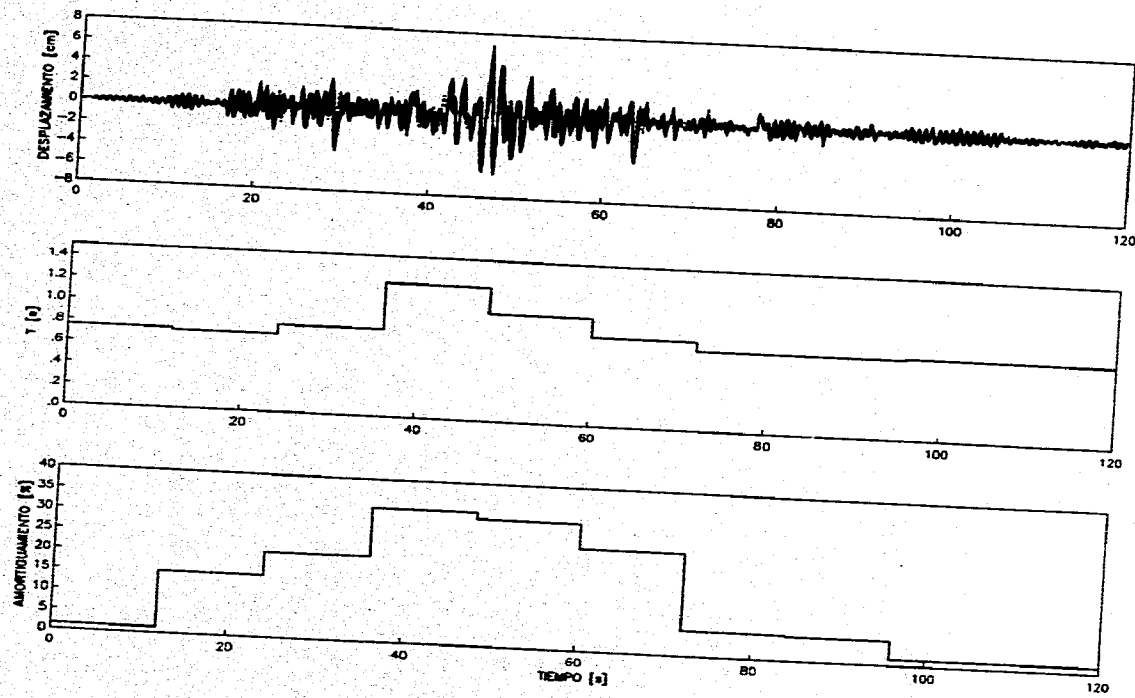


Figura 59 Variación de las características dinámicas equivalentes del sistema aislado.
Sismo Unión. Edificio de Oficinas

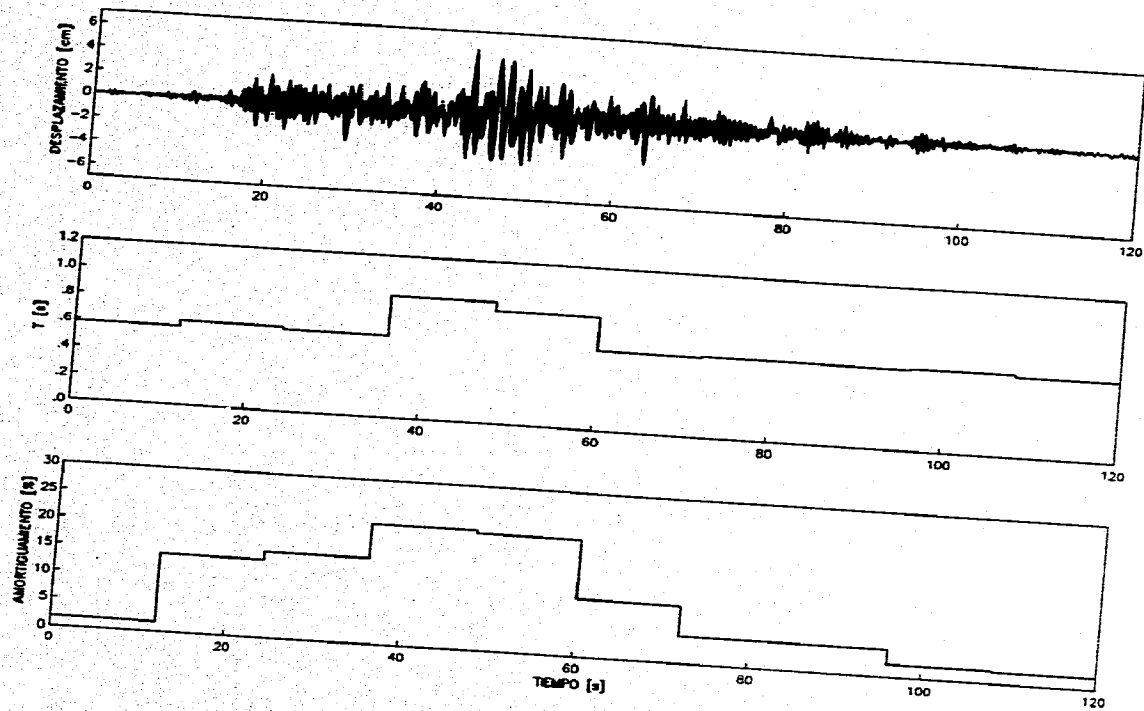


Figura 60 Variación de las características dinámicas equivalentes del sistema aislado. Sismo Unión. Edificio de Departamentos

APÉNDICE

Estimación de las matrices proporcionales de amortiguamiento

Edificio de oficinas

Matriz proporcional de amortiguamiento

$$C = \alpha M + \beta K$$

Matriz de masa:

$$\begin{bmatrix} 42981 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 67226 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 105110 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 141757 \end{bmatrix}$$

Matriz de rigidez:

$$\begin{bmatrix} 0.316e+08 & -0.392e+08 & 0.090e+08 & -0.015e+08 \\ -0.392e+080 & 1.157e+08 & -0.993e+08 & 0.271e+08 \\ 0.090e+080 & -0.093e+08 & 2.410e+08 & -1.892e+08 \\ -0.015e+08 & 0.271e+08 & -1.892e+08 & 3.798e+08 \end{bmatrix}$$

Con las matrices de masa y de rigidez y mediante el programa Etabs se obtienen los siguientes periodos correspondientes a cada modo de vibrar de la estructura:

$$t_1 = 0.51 \text{ s}$$

$$t_2 = 0.23 \text{ s}$$

$$t_3 = 0.14 \text{ s}$$

$$t_4 = 0.09 \text{ s}$$

Tomando como datos los periodos más altos, es decir los dos primeros y teniendo como dato $\xi_1 = 0.03$ y $\xi_2 = 0.05$ podemos calcular los valores de α y β de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\xi_1 = \frac{\alpha T_1}{4\pi} + \frac{\beta\pi}{T_1}$$

$$\xi_2 = \frac{\alpha T_2}{4\pi} + \frac{\beta\pi}{T_2}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones lineales anteriores obtenemos los valores de α y β

$$\alpha = 0.2208$$

$$\beta = 0.0034$$

Con los cuales sustituyendo en la ecuación (1) podemos obtener finalmente la matriz de amortiguamiento:

$$\begin{bmatrix} 116794 & -133280 & 30464 & -50100 \\ -132280 & 408359 & -337620 & 92038 \\ 30464 & -337620 & 842302 & -643280 \\ -5100 & 92038 & -643280 & 1322450 \end{bmatrix}$$

Edificio de departamentos

Matriz proporcional de amortiguamiento

$$C = \alpha M + \beta K$$

Matriz de masa:

13389.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	20530.80	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	20530.80	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	20530.80	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	20530.80	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	32690.22	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	37206.58	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	37206.58	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	49028.75	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	55112.75	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Matriz de rigidez:

5836e+08	-8243e+08	1473e+08	3331e+07	2306e+07	1215e+07	9258e+06	5570e+06	4547e+06	3555e+06	
-8243e+08	1782e+09	-1075e+09	1046e+08	-1190e+05	8976e+06	-7746e+05	1979e+06	-1572e+05	5855e+05	
1473e+08	-1075e+09	1863e+09	-1066e+09	1127e+08	3150e+05	9946e+06	-3090e+05	2634e+06	9066e+04	
3331e+07	1046e+08	-1066e+09	1838e+09	-1058e+09	1159e+08	-1761e+06	1064e+07	1343e+05	3534e+06	
2306e+07	-1025e+05	1127e+08	-1058e+09	1846e+09	-1048e+09	1083e+08	4026e+03	1235e+07	1019e+06	
1256e+07	8741e+06	4566e+05	1159e+08	-1048e+09	2129e+09	-1467e+09	1865e+08	1545e+07	2728e+07	
9055e+06	-3349e+05	9681e+06	-1735e+06	1083e+08	-1467e+09	2742e+09	-1582e+09	1603e+08	5609e+06	
5687e+06	17269e+06	-1533e+05	1063e+07	4025e+03	1865e+08	-1581e+09	2764e+09	-1562e+09	1625e+08	
4535e+06	-1315e+05	2638e+06	1359e+05	1253e+07	1545e+07	1603e+08	-1561e+09	3228e+09	-2227e+09	
3552e+06	5864e+03	9012e+04	3334e+06	1019e+06	2728e+07	5610e+06	1625e+08	-2227e+09	4309e+09	

Con las matrices de masa y de rigidez y mediante el programa Etabs se obtienen los siguientes periodos, correspondientes a los modos de vibrar de la estructura:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= 0.02 \text{ s} \\
 t_2 &= 0.04 \text{ s} \\
 t_3 &= 0.06 \text{ s} \\
 t_4 &= 0.07 \text{ s} \\
 t_5 &= 0.05 \text{ s} \\
 t_6 &= 0.05 \text{ s} \\
 t_7 &= 0.11 \text{ s} \\
 t_8 &= 0.35 \text{ s} \\
 t_9 &= 0.03 \text{ s} \\
 t_{10} &= 0.02 \text{ s}
 \end{aligned}$$

Tomando como datos los periodos más altos, es decir los periodos correspondientes a los niveles séptimo y octavo y teniendo como dato $\xi_1 = 0.03$ y $\xi_2 = 0.05$ podemos calcular los valores de α y β de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 \xi_1 &= \frac{\alpha T_1}{4\pi} + \frac{\beta \pi}{T_1} \\
 \xi_2 &= \frac{\alpha T_2}{4\pi} + \frac{\beta \pi}{T_2}
 \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones lineales anteriores obtenemos los valores de α y β

$$\alpha = 0.4320$$

$$\beta = 0.0020$$

Con los cuales sustituyendo en la ecuación (1) podemos obtener finalmente la matriz de amortiguamiento:

17e+05	-16e+05	29e+05	66e+04	46e+04	24e+04	18e+04	11e+04	90e+03	70e+03
-16e+05	37e+05	-21e+05	20e+05	-23e+02	17e+04	-15e+03	39e+03	-31e+02	170e+03
22e+05	-21e+05	37e+05	-21e+05	22e+05	63e+02	19e+04	-61e+02	53e+02	181e+02
66e+04	20e+03	-21e+05	37e+05	-21e+05	23e+05	-35e+03	21e+04	26e+02	705e+03
46e+04	-20e+02	22e+05	-21e+05	37e+05	-20e+05	21e+05	80e+00	25e+04	209e+03
24e+04	17e+04	91e+02	23e+05	-20e+05	42e+05	-39e+05	32e+05	30e+04	54e+04
18e+04	-60e+02	19e+04	-36e+03	21e+05	-29e+05	59e+05	-36e+05	32e+05	122e+04
11e+04	34e+03	-20e+03	21e+04	80e+00	37e+05	-36e+05	55e+05	-32e+05	30e+05
90e+03	-26e+02	52e+03	27e+02	25e+04	30e+04	32e+05	-32e+05	64e+05	-44e+05
70e+03	17e+03	10e+02	70e+03	20e+03	54e+04	12e+04	32e+05	-44e+05	86e+05