



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

*FACULTAD DE INGENIERÍA*

DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL TOPOGRÁFICA  
Y GEODÉSICA

CONTROL DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS  
MEDIANTE DIAGONALES ACTIVAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

SAMUEL MARCELO GUTIÉRREZ HERMENEGILDO

DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ



MÉXICO. D.F.

2004



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/031/04

Señor  
SAMUEL MARCELO GUTIÉRREZ HERMENEGILDO  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"CONTROL DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS MEDIANTE DIAGONALES ACTIVAS"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS
- II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
- III. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL ANTE ACCIONES SÍSMICAS
- IV. FORMULACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL
- V. RESULTADOS
- VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- VII. REFERENCIAS

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

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

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a de 23 Marzo del 2004.  
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
CFB/AJP/crc.

*a to planeo*  
Juan Antonio del Valle P.  
23 Junio 2004

*[Signature]*  
18-JUN-04

*[Signature]*  
23-JUN-04

*[Signature]*  
18/06/04

*[Signature]*  
Abel Torresca  
23 Jun-04

---

---

**Él da vigor al fatigado y al que no tiene fuerzas, energía. Hasta los jóvenes se cansan y se rinden, los más valientes tropiezan y caen; pero aquellos que ponen su esperanza en el Señor, renuevan sus fuerzas; les nacen alas como de águila, corren y no se cansan, caminan y no se fatigan.**

**(Isaías 40, 25-31)**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A DIOS, principalmente por seguirme brindando motivos para dar mi mayor esfuerzo, gracias por escucharme y acompañarme siempre a lo largo de mi vida. Gracias María Guadalupe, por interceder por mí ante él, por enseñarme a tener fé.**

**Con todo el amor, respeto y admiración a mis padres: Rosalía y José, por la confianza que han depositado en mí. Gracias por sus consejos y su apoyo durante toda mi vida.**

**Gracias a mis hermanos: Angélica y Javier por sus consejos de gran importancia y porque con su ejemplo me motivan. Les agradezco su cariño y comprensión.**

**A todos mis familiares por haberme apoyado a mí y a mi familia en los momentos difíciles, muchas gracias.**

**Al Dr. José Alberto Escobar Sánchez por su paciencia su tiempo y orientación durante el desarrollo de este trabajo como director de tesis.**

**Agradezco a todos los profesores con los que tomé clases desde que comencé a estudiar. Gracias por las enseñanzas de cada uno, me quedarán siempre presentes.**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México que me dio la oportunidad de estudiar en sus aulas desde la Escuela Nacional Preparatoria 9, hasta la Facultad de Ingeniería. Gracias por haberme dado los conocimientos para llegar a ser Ingeniero Civil.**

**Agradezco la amistad de mis compañeros y amigos. Gracias por su agradable compañía y sobre todo por el gusto de haberlos conocido.**

---

---

**ÍNDICE****CONTROL DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS MEDIANTE DIAGONALES  
ACTIVAS**

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
1.1 Antecedentes	
1.2 Objetivos	
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>5</b>
<b>3. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL ANTE ACCIONES SÍSMICAS</b>	<b>6</b>
3.1 Sistemas de control pasivo	
3.1.1 Sistemas de aislamiento de base	
3.1.2 Sistemas para disipar energía	
3.1.3 Sistemas inerciales acoplados	
3.1.4 Ubicación de los sistemas disipadores de energía en las estructuras	
3.2 Sistemas de control activo	
3.2.1 Diagonales activas	
3.2.2 Amortiguador de masa activo (AMD)	
3.2.3 Ejemplos de sistemas de control estructural activo de gran escala	
3.3 Sistemas de control híbrido	
3.4 Sistemas de control semiactivo	
3.5 Experiencia en México sobre los sistemas de control estructural ante acciones sísmicas	
3.5.1 Aplicaciones en edificios	
<b>4. FORMULACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL</b>	<b>16</b>
4.1 Cálculo de desplazamientos para estructuras sin control estructural	
4.2 Cálculo de fuerzas para controlar estructuras con diagonales activas	
4.2.1 Cálculo de la respuesta sísmica con diagonales activas	
4.2.1.1 Método numérico basado en la interpolación de la función de la excitación	
4.3 Modelo estructural	
4.4 Registros sísmicos considerados	
4.5 Aplicación del programa para calcular la respuesta sísmica	
4.6 Casos estudiados	

<b>5. RESULTADOS</b>	<b>47</b>
5.1 Caso 1: Modelo flexible desplantado en suelo blando	
5.2 Caso 2: Modelo flexible desplantado en suelo de transición	
5.3 Caso 3: Modelo flexible desplantado en suelo duro	
5.4 Caso 4: Modelo rígido desplantado en suelo blando	
5.5 Caso 5: Modelo rígido desplantado en suelo de transición	
5.6 Caso 6: Modelo rígido desplantado en suelo duro	
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>68</b>
<b>7. REFERENCIAS</b>	<b>70</b>

## INTRODUCCIÓN

En muchos países entre ellos México, se presentan sismos que causan un gran número de fallas y daños en las estructuras. Por ello, es necesario tomar consideraciones especiales en su diseño, como la selección apropiada de un sistema estructural y tener cuidado en cumplir con los requisitos necesarios para el dimensionamiento de sus elementos. Aún en otros países donde la ocurrencia de sismos es mucho menor, el riesgo ante terremotos intensos es suficientemente alto para que sus efectos deban tomarse en cuenta en el diseño de las estructuras.

Los efectos de un sismo sobre una estructura comienzan cuando ésta responde a la excitación sísmica, que puede ser descrita por una historia de aceleraciones, velocidades o desplazamientos que se presentan en el suelo sobre el que está desplantada. La amplitud de la vibración necesaria para disipar esa energía generada por el movimiento sísmico, depende de las características del sistema constituido por el conjunto suelo-cimentación-estructura. Las principales características de la respuesta de un sistema como ese pueden ilustrarse mediante el estudio de un sistema de un grado de libertad.

Por otro lado, el objetivo del control es conseguir que una estructura reduzca su respuesta de desplazamientos, velocidades, aceleraciones y cortantes basales mediante dispositivos colocados en lugares estratégicos de la misma para que los efectos de un sismo se reduzcan lo más posible.

El control es muy importante porque permite construir estructuras con mayor capacidad para disipar la energía que llega por efecto de los sismos, además, los daños que éstos pueden provocar se reducen considerablemente haciendo que los gastos de reparación sean mínimos.

En este trabajo se estudia el control de la respuesta de estructuras sometidas a sismos intensos. Para ello se estudian modelos de un grado de libertad con periodos fundamentales de vibración de 2s y 0.5s respectivamente. Dichos modelos son sometidos a tres registros sísmicos correspondientes al sismo de septiembre de 1985 en la ciudad de Mexico. El control se aplica mediante diagonales activas y se estudia el efecto de la rigidez y el amortiguamiento de control en la respuesta de la estructura.

Para lograr este propósito, en este trabajo se desarrollan los siguientes capítulos:

- 1. Antecedentes y objetivos.** Se presenta un panorama general de las alternativas que incorporan elementos y dispositivos estructurales para reducir la respuesta sísmica, además, se presenta el objetivo general de esta investigación.
- 2. Planteamiento del problema.** Se hace una breve descripción del problema que se va a estudiar, haciendo énfasis sobre las acciones que provoca un sismo en una estructura y de los daños que puede causar.
- 3. Estado actual del conocimiento de los sistemas de control estructural ante acciones sísmicas.** Se presenta una perspectiva sobre lo que se ha hecho para resolver el problema en estudio, se describen los sistemas de control utilizados principalmente en estructuras de edificios, ejemplificando con algunos casos de importancia. También se presentan algunos casos en Mexico donde se aplica control pasivo con dispositivos disipadores de energía.



**4. Formulación del modelo estructural.** Se describe la geometría del modelo a estudiar, su rigidez, peso y los registros sísmicos que se emplean para su análisis, así como el método empleado para el cálculo de la respuesta sísmica y los casos que se consideraron para el análisis.

**5. Resultados.** Se presentan los resultados obtenidos y se identifica el caso en el que el control activo es más efectivo.

**6. Conclusiones y Recomendaciones.** Se presentan las conclusiones a las que se llega con esta investigación, así como las recomendaciones para estudios posteriores.

## 1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

### 1.1 Antecedentes

Muchas estructuras han demostrado ser vulnerables ante las acciones sísmicas, sufriendo daños importantes y en algunos casos el colapso total provocando pérdidas irreparables de vidas humanas. Por lo anterior, se deben diseñar estructuras que sean capaces de resistir las fuerzas sísmicas. Al respecto, el diseño sísmico se ha enfocado en construir estructuras con gran capacidad para deformarse más allá del estado elástico, llegando a un comportamiento inelástico que ocurre típicamente en sus regiones críticas, usualmente en las uniones viga-columna. En estas regiones, conocidas como articulaciones plásticas, se espera que ocurra una disipación substancial de energía durante un sismo. Sin embargo, su rigidez y resistencia pueden degradarse por los ciclos de carga a que son sometidas y ante un sismo severo, es posible obtener daños más allá de una posible reparación de la estructura.

Tradicionalmente, en el diseño sísmico, se recurre al incremento en las dimensiones de las secciones transversales de columnas y vigas, o a la incorporación de elementos estructurales como muros de concreto reforzado y diagonales de acero para aumentar la resistencia y rigidez del marco. Estas medidas son benéficas para la respuesta de la estructura ante sismos, ya que los elementos estructurales pueden permanecer sin daños. Sin embargo, por las características del evento y del suelo donde se encuentra desplantado un edificio, estas alternativas convencionales pueden provocar que se experimenten mayores fuerzas sísmicas o incrementos significativos en las sollicitaciones en la cimentación de la estructura (Arista, 1994).

Actualmente, se cuenta con dispositivos reductores de la respuesta estructural. Por ejemplo, con los aisladores de base la energía de entrada puede ser controlada o minimizada en una estructura. Con esta alternativa, el valor del periodo fundamental de vibración de la estructura es alejado del periodo dominante del suelo (Soong, 2000). Las aceleraciones transmitidas a la estructura y la demanda de cargas de los elementos y equipos son también reducidas. Sin embargo, dadas las características del aislamiento de base su aplicación se ha limitado a edificios de poca altura desplantados en suelo duro o roca.

También es posible la disipación de energía a través de sistemas de control estructural. Estas alternativas se clasifican según su funcionamiento como control pasivo y control activo. En el primer tipo, están incluidos aquellos con una respuesta predefinida por el diseñador ante cualquier excitación que sufra la estructura y dependen solo de las condiciones de servicio a las que se encuentren. En el segundo, se encuentran los que ajustan sus características particulares de rigidez o resistencia de la estructura en cada instante de tiempo mediante mecanismos de control para cada uno de los eventos sísmicos (Soong y Dargush, 1997).

En los últimos años, la factibilidad de utilización de estas nuevas alternativas en edificios se incrementó como resultado de investigaciones recientes que las justifican como reductoras eficientes de la respuesta sísmica. Diversos Institutos e investigadores en el mundo han propuesto un gran número de dispositivos. En el capítulo 3 se presenta un panorama de los más importantes.

## **1.2 Objetivos**

Determinar la influencia que la variación de la rigidez y el amortiguamiento de control de las diagonales activas tienen sobre la respuesta sísmica de estructuras desplantadas en suelo blando, suelo de transición y suelo duro, sometidas a registros sísmicos de la ciudad de México.

Las diagonales activas son un sistema de control estructural en el cual éstas se conectan desde la parte superior de un edificio hasta la base. Consisten en un cable de acero presforzado que pasa por poleas. En el instante en el que se presente un sismo, éste es detectado por un sensor (acelerómetro que mide las aceleraciones del suelo y que se coloca en ciertos niveles del edificio). Un controlador (computadora conectada al acelerómetro) calcula la fuerza de tensión que aplicará un actuador (colocado en la base del edificio) al cable. Con ello se proporciona una mayor rigidez a la estructura para producir un control de la vibración que causan los sismos o el viento.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los sismos son movimientos de la corteza terrestre producidos por una liberación brusca de energía en la capa superficial de la tierra (Bazán y Meli, 1998). Deben su origen a una acumulación previa de energía que se propaga en forma de ondas provocando una serie de movimientos vibratorios en el terreno. Están considerados como uno de los fenómenos naturales más traumáticos, ya que en tan solo algunos segundos y sin previo aviso pueden causar grandes desastres. Se calcula que durante el siglo XX el número de víctimas ascendió a más de 50 millones de personas fallecidas a consecuencia de la falla de estructuras en todo el mundo.

En México, los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985, afectaron principalmente a la ciudad de México, provocando daños intensos y aún colapso de edificios recientemente construidos.

En consecuencia, las experiencias de los efectos de los sismos en las estructuras, indican que el suelo tiene una influencia importante en los daños causados a éstas, tanto como medio de propagación de las ondas sísmicas como por las propias alteraciones o fallas que afectan su capacidad de carga.

La energía sísmica llega a la cimentación de los edificios debido a un complejo proceso ondulatorio en el suelo. Esto hace que las estructuras reciban impulsos en todas las direcciones. Aunque esto sea así, las estructuras se pueden analizar considerando que las fuerzas de inercia actúan en dos direcciones principales ortogonales y horizontales.

La combinación de los movimientos sísmicos con la excentricidad entre los centros de masa y rigidez, además de la posible acción de las componentes de rotación del movimiento ondulatorio, provocan movimientos rotacionales alrededor de un eje vertical, produciendo la torsión del sistema estructural.

Debido a los desplazamientos, los elementos que forman el sistema estructural, sufren deformaciones axiales, de cortante, flexión o de torsión. Cada una de estas deformaciones genera esfuerzos en ellos. De esta forma se acumula y libera energía.

Un sismo constituye la carga más severa a la que la mayoría de las estructuras pueden estar sujetas. Por eso, el ingeniero debe diseñarlas de tal manera que se evite su colapso ante el sismo más severo. Con ello se asegura la vida humana pero se acepta la posibilidad de daño estructural, sobre la base de que es menos costoso reparar o reemplazar las estructuras afectadas por un sismo fuerte, que construir cada una de ellas lo suficientemente resistentes para evitar daños.

Este concepto de diseño enfrenta al ingeniero con el desafío de lograr un diseño económico que sea susceptible al daño sísmico, pero que al mismo tiempo no llegue al colapso total aún ante el sismo más intenso.

### 3. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL ANTE ACCIONES SÍSMICAS

Con el propósito de minimizar los efectos y daños que un sismo puede causar a una estructura, han surgido ideas que proponen incluir sistemas de control que disipen la energía sísmica que llega a un edificio. Estos sistemas pueden ser de control pasivo, activo, híbrido y semiactivo.

#### 3.1 Sistemas de control pasivo

Son dispositivos que dependen solo de las condiciones de trabajo en las que se encuentren, por lo que su respuesta no es controlable. Se pueden clasificar en sistemas de aislamiento de base, sistemas para disipar la energía y sistemas inerciales acoplados.

##### 3.1.1 Sistemas de aislamiento de base

Son dispositivos flexibles ante movimientos horizontales y rígidos en los verticales. Se colocan entre la cimentación y la superestructura para separar a un edificio del movimiento del suelo y así lograr protegerlo de los efectos que causan los sismos.

Algunos ejemplos son como los que se muestran en las figuras 3.1 y 3.2 (Cahís, 2000). El primero consiste en un dispositivo de neopreno con núcleo de plomo. Con él se logra un mejor control en los desplazamientos de base que con un dispositivo sin núcleo de plomo. El segundo, contrarresta el movimiento transmitido a la estructura mediante el coeficiente de fricción (Cahís, 2000).

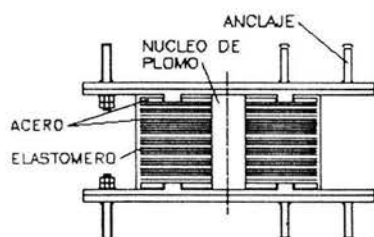


Figura 3.1. Dispositivo de neopreno con núcleo de plomo (Cahís, 2000).

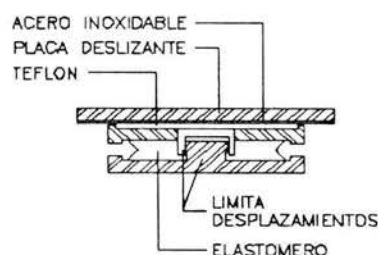


Figura 3.2. Aislador de base con fricción (Cahís, 2000).

##### 3.1.2 Sistemas para disipar energía

Los sistemas para disipar energía se pueden clasificar en disipadores histeréticos y disipadores viscoelásticos.

Los disipadores histeréticos dependen del desplazamiento y se basan en la plastificación de metales que se puede producir a partir de esfuerzos axiales, de flexión, cortante o de torsión y esto se consigue con metales como el acero.

Un ejemplo es como el que se muestra en la figura 3.3 (Cahís, 2000). Consiste en un dispositivo con dos placas en forma de U que disipan energía al enrollarse cuando existe un desplazamiento entre sus extremos.

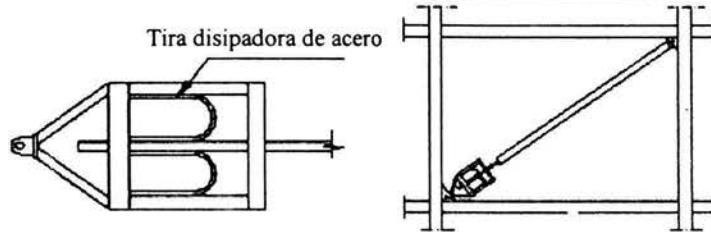


Figura 3.3. Disipador por flexión (Cahís, 2000).

Otro ejemplo es el disipador llamado ADAS (Added Damping And Stiffness) que está formado por varias placas paralelas en forma de X como se muestra en la figura 3.4. El número de placas paralelas depende de las necesidades de la estructura en la que se coloque (Bruneau, 1993).

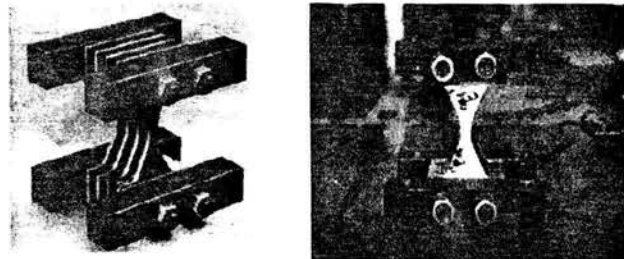


Figura 3.4. Dispositivo ADAS (Tena, 2003).

Otro disipador es el T-ADAS que como el ADAS, está formado por varias placas de acero pero trapezoidales como se observa en la figura 3.5, sólo que en este caso las placas se encuentran en un extremo empotradas y en el otro articuladas (Cahís, 2000).



Figura 3.5. Dispositivo T-ADAS (Tena, 2003).

Un ejemplo de los disipadores basados en la extrusión de metales es como el que se muestra en la figura 3.6 en el que el plomo es forzado a pasar por un orificio y al presentarse un cambio de sección se disipa energía (Rodríguez, 2003).

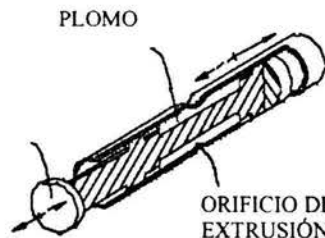


Figura 3.6. Disipador por extrusión del plomo (Rodríguez, 2003).

La disipación de energía por fricción se consigue con un dispositivo que se coloca en la intersección de un contraventeo que impide el desplazamiento cuando se presenta un movimiento, este dispositivo se muestra en la figura 3.7 (Cahís, 2000).

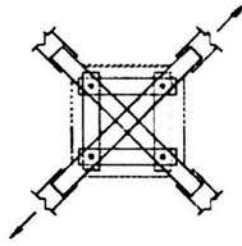


Figura 3.7. Disipador de fricción (Cahís, 2000).

Los disipadores viscoelásticos se basan en sólidos o fluidos viscoelásticos. Su comportamiento depende fundamentalmente de la velocidad.

En la figura 3.8 se muestra un disipador viscoelástico que está formado por placas metálicas unidas por material viscoelástico. Este dispositivo aumenta el amortiguamiento estructural por lo que ha sido empleado para reducir la respuesta en edificios ante los efectos de los sismos y del viento (Tena, 2003).

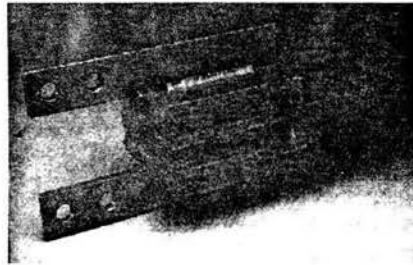


Figura 3.8. Disipador viscoelástico (Tena, 2003).

### 3.1.3 Sistemas inerciales acoplados

Se instalan en el nivel más alto de los edificios. Su masa y rigidez ayudan a que su frecuencia de oscilación sea igual a la frecuencia fundamental de la estructura. Un ejemplo de estos sistemas se muestra en la figura 3.9. Se denominan “Tuned mass damper” (TMD) y constan de una masa que tiene un solo grado de libertad, un resorte y un mecanismo de amortiguamiento.

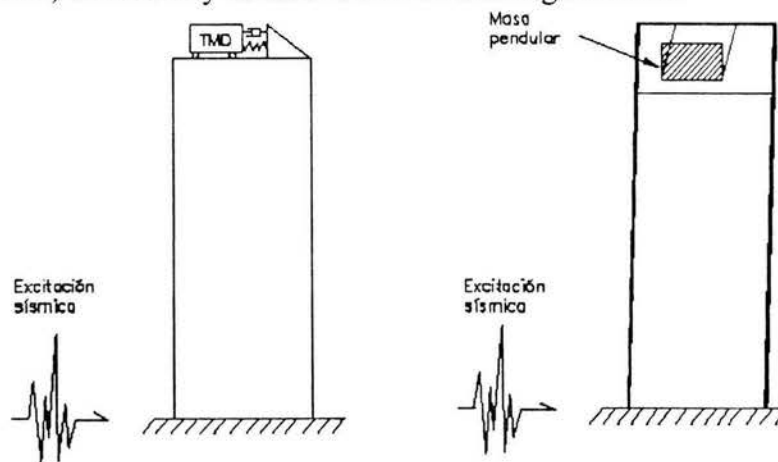


Figura 3.9. Localización del sistema TMD en un edificio (Cahís, 2000).

Los TMD requieren una gran masa y mucho espacio para su instalación. Para resolver este problema se ha propuesto el uso de tanques de agua, pero pueden crear distintos modos de vibración y durante un sismo fuerte la estructura puede llegar a comportarse plásticamente alargando su periodo (Cahís, 2000).

### 3.1.4 Ubicación de los sistemas disipadores de energía en las estructuras

Los disipadores se instalan en una estructura cuando los marcos soportan la mayor parte de la carga vertical. Así el sistema disipativo sólo resiste las cargas horizontales. La figura 3.10 muestra varios ejemplos de la ubicación de los disipadores de energía. Con el sistema A se han utilizado los disipadores por flexión y los viscoelásticos. El sistema B se emplea básicamente para el dispositivo de fricción. El sistema C se ha usado para los dispositivos ADAS y T-ADAS. Los sistemas D, E y F se proponen para la rehabilitación de edificios con muros de mampostería.

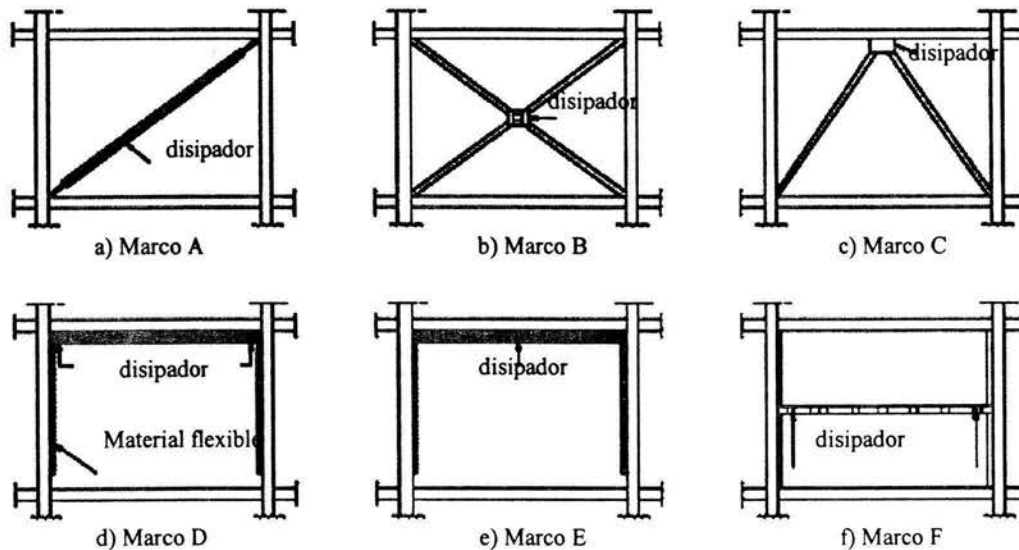


Figura 3.10. Ubicación de los disipadores de energía (Cahís, 2000).

### 3.2 Sistemas de control activo

Estos sistemas modifican la rigidez lateral de la estructura o aplican fuerzas externas para eliminar su movimiento por efecto de un sismo. El movimiento se detecta mediante sensores que miden la respuesta en varias partes de la estructura. Los sensores se conectan a una computadora (controlador) que envía señales a sistemas o actuadores que aplican fuerzas a la estructura para contrarrestar su movimiento (Rodríguez, 2003).

Un sistema de control activo consiste principalmente de:

- Sensores situados en la estructura, empleados para medir la excitación externa.
- Controladores que se basan en las mediciones de los sensores y que, a través de un algoritmo de control, calculan la fuerza a aplicar por los actuadores.
- Actuadores, que funcionan con energía externa, para aplicar las fuerzas necesarias para contrarrestar el sismo.

Presenta las siguientes ventajas (Cahís, 2000):

- Son más efectivos que los sistemas de control pasivo para el control de la respuesta estructural.
- Se usan para el control estructural ante vientos fuertes y sismos.
- Incrementan la seguridad en las personas.



Pero también tienen desventajas como:

- Un costo de mantenimiento elevado.
- Necesitan fuentes de energía externa para funcionar.
- En edificios con varios grados de libertad, se necesitan varios sensores y actuadores, lo que puede llevar a tener un problema dinámico complejo.

### 3.2.1 Diagonales Activas

Son elementos que reemplazan a los contraventeos que se colocan en los marcos de una estructura, se han adecuado para poder ser operadas usando actuadores que logran liberar y tensar a las diagonales para agregar amortiguamiento y rigidez activa a una estructura. Con este mecanismo se logra controlar eficientemente la vibración de un edificio. La figura 3.12 muestra las fuerzas activas de control en las diagonales que producen un equilibrio con las fuerzas laterales de cada nivel de un edificio (Connor y Boutros, 1996).

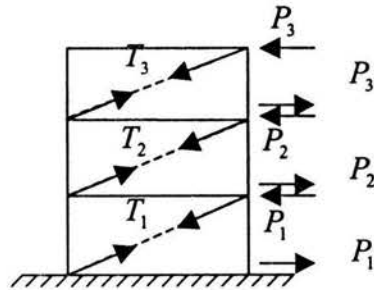


Figura 3.12. Fuerzas de control con diagonales activas (Connor y Boutros, 1996).

Los sensores miden la combinación de variables tales como la aceleración, velocidad y desplazamiento que son causadas por un sismo. Estos datos inicialmente están en forma de señales que son convertidas a secuencias de tiempo discretas y transmitidas a la unidad del controlador.

El controlador compara la respuesta medida con la respuesta esperada y con ello establece la acción a seguir para comunicar las instrucciones a los actuadores que aplicarán la fuerza de control. La unidad del controlador está compuesta por una computadora digital y un software diseñado para evaluar el sismo y generar las instrucciones para los actuadores. El proceso de decisión está basado en un algoritmo que sigue un procedimiento durante el periodo que la estructura es controlada. Además, el controlador tiene otras capacidades como las de ajustar dinámicamente los parámetros del sistema.

El actuador genera y aplica la fuerza de control de acuerdo a las instrucciones que le envía el controlador, pero existe un retraso entre el intervalo de tiempo en el que se registra la señal del sismo y el de aplicación de la fuerza. Por ello, los datos del tiempo  $t$  son usados por una computadora para que la fuerza sea aplicada en un tiempo  $t+\Delta t$ . Idealmente, el actuador debe responder instantáneamente a las características de la respuesta.

### 3.2.2 Amortiguador de masa activo (AMD)

El amortiguador AMD, se instala en uno de los últimos niveles de un edificio (figura 3.14) Consiste en una masa que se puede mover y que es aproximadamente 1% de la masa total de la estructura. A la masa se le conecta un actuador que le aplica una fuerza para contrarrestar los efectos de los sismos y con ello reducir la respuesta estructural del edificio. (Cahís, 2000).

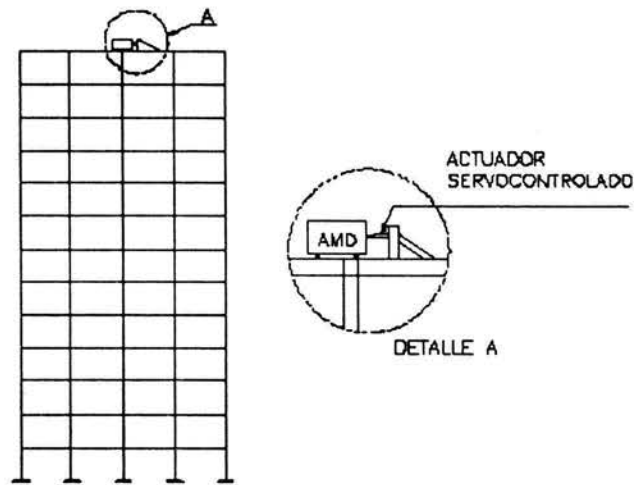


Figura 3.14. Edificio con control de desplazamientos mediante AMD (Cahís, 2000).

### 3.2.3 Ejemplos de sistemas de control estructural activo de gran escala

AMD en el edificio Kyobashi Seiwa, Japón. Este edificio es muy esbelto como se muestra en la figura 3.15. Tiene un ancho de 4 m, longitud de 12 m, y una altura de 33 m (11 niveles). Está construido por marcos de acero formados por columnas en cajón y vigas I. El peso total de la estructura es de 400 t y cuenta con un sistema AMD. Tiene dos masas, una pesa aproximadamente 4 t y es para controlar la vibración lateral en la dirección ancha y se localiza en el último nivel al centro del edificio, una segunda masa pesa 1 t y se usa para reducir la vibración torsional, ésta última se localiza también en el último nivel pero en un extremo.

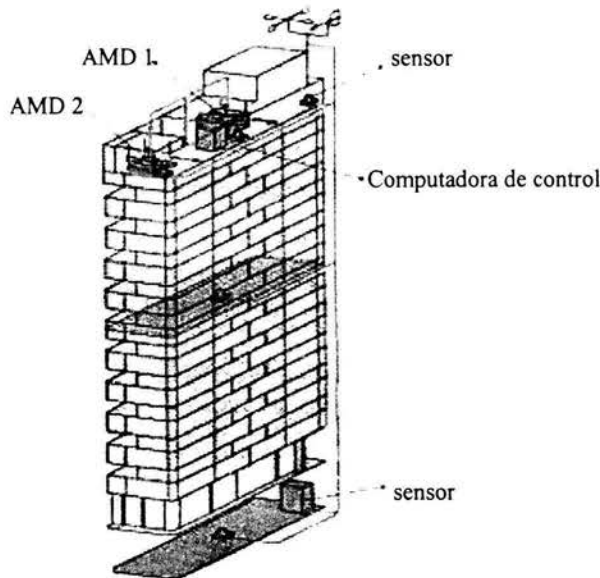


Figura 3.15. Edificio Kyobashi Seiwa Japón, con sistema AMD (Connor y Boutros, 1996).

Instituto de investigación Kajima Technical (Japón) con sistema de control AVS (Active Variable Stiffness). Edificio de tres niveles (figura 3.16). Tiene una estructura de acero y contraventeos en forma de A a los que se les colocan aparatos de rigidez variable (AVS) instalados entre la unión de la diagonal y la viga para alterar la rigidez del edificio. El edificio también está reforzado con diagonales colocadas en las otras caras para incrementar la rigidez total y así minimizar el efecto de la torsión.

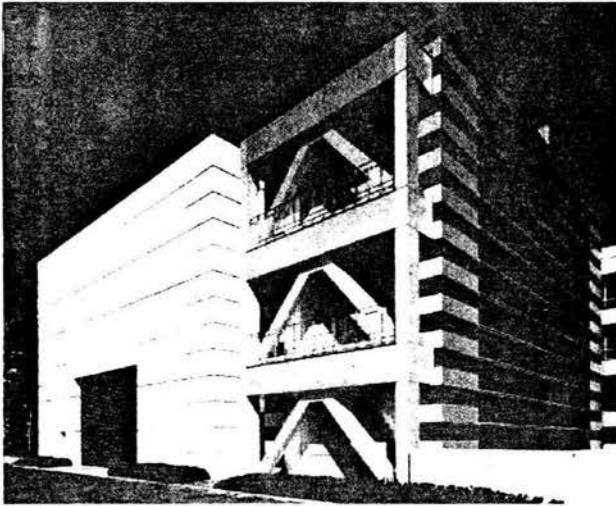


Figura 3.16. Vista del instituto de investigación Kajima Technical (Connor y Boutros, 1996).

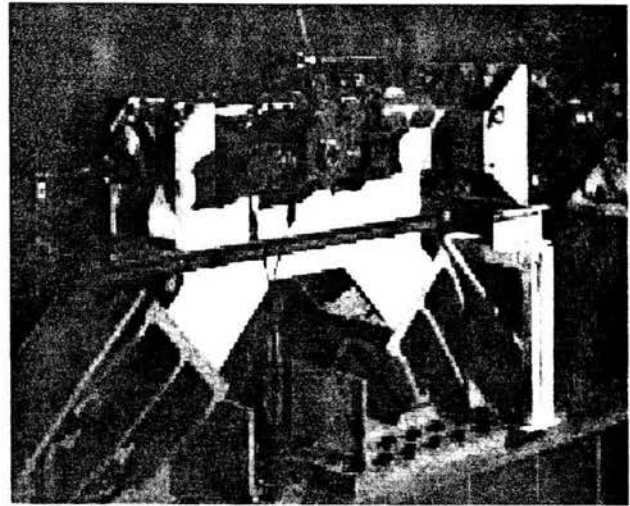


Figura 3.17. Sistema de control AVS (Active Variable Stiffness (Connor y Boutros, 1996).

Sistema TMD en el edificio Nishikicho (Japón). El edificio Nishikicho tiene 14 niveles y 2 sótanos (figura 3.18). Está localizado en la ciudad de Tokio Japón, y a su alrededor hay edificios de menor altura lo que provoca que el efecto del viento sea considerable. En el edificio hay una combinación de los sistemas AMD y TMD instalados en el centro de gravedad del último nivel para controlar la vibración del edificio en ambas direcciones horizontales (Connor y Boutros, 1996).



Figura 3.18. Vista del edificio Nishikicho (Connor y Boutros, 1996).

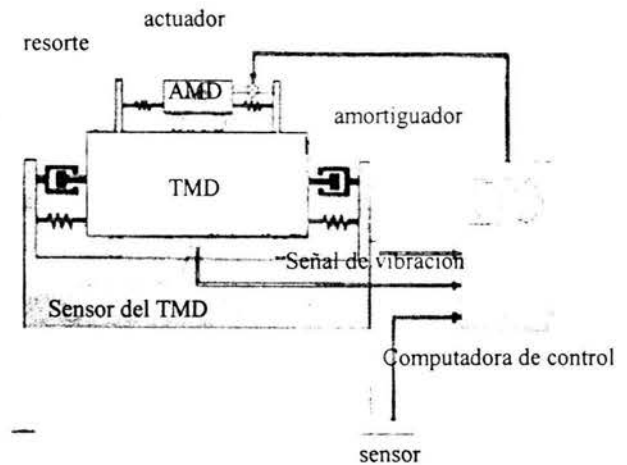


Figura 3.19. Diagrama conceptual de los sistemas AMD y TMD (Connor y Boutros, 1996).

Estructura en Tokio, Japón, de 600 t con diagonales activas. Este edificio es de seis niveles. Tiene una planta simétrica de 10 x 10 m y altura de 21.7 m. Está construido y conectado rígidamente por marcos de acero compuestos por columnas en cajón y por vigas I. La estructura se diseñó para ser flexible de acuerdo a la excitación que registra el edificio en su nivel más alto ya que su periodo fundamental es de 1.5 s, y se diseñó con una aceleración del suelo de 0.1 g. El sistema de control que se emplea son las diagonales activas ABS (Active Bracing System) (Connor y Boutros, 1996).

### 3.3 Sistemas de control híbrido

Son una combinación de los sistemas activos y pasivos, esto hace que en caso de que falle el componente activo, el sistema pasivo ejerce las funciones de control, además para su funcionamiento se requiere poca energía.

Un ejemplo de estos sistemas es el aislamiento de base con control activo. Aquí el dispositivo pasivo busca separar a la estructura del terreno como se muestra en la figura 3.20. Al presentarse un desplazamiento entre la cimentación y la superestructura éste se controla mediante un actuador que aplica una fuerza de control.

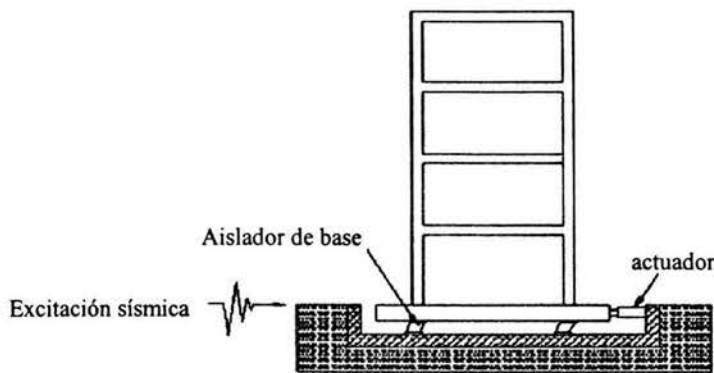


Figura 3.20. Aislamiento de base con control activo (Cahís, 2000).

### 3.4 Sistemas de control semiactivo

Su funcionamiento es parecido al de los sistemas de control activo, sólo que el control se consigue con dispositivos cuyas características de rigidez o amortiguamiento se pueden controlar, lo que permite cambiar las propiedades dinámicas de una estructura con una cantidad de energía menor que la que se emplearía en un sistema activo. Entre estos dispositivos se encuentran (Tena 2003):

El sistema AVS (figura 3.21). Cuenta con un dispositivo hidráulico formado por un pistón que se desplaza dentro de un cilindro con dos cámaras que están conectadas para abrirse o cerrarse mediante una válvula.

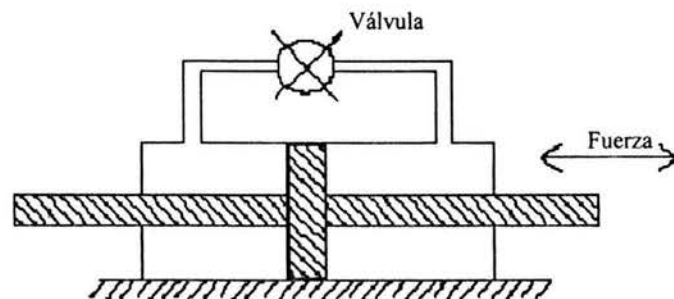


Figura 3.21. Dispositivo para control semiactivo (Cahís, 2000).

Los amortiguadores con fluidos de viscosidad controlable a partir de campos eléctricos o magnéticos como el de la figura 3.22 se llaman amortiguadores magnetorreológicos. Una posible ubicación en una estructura es como la que se muestra en la figura 3.23 (Cahís, 2000).

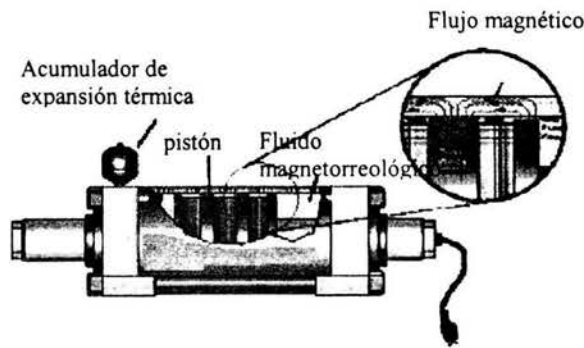


Figura 3.22. Esquema de un amortiguador magnetorreológico (Cahís, 2000).

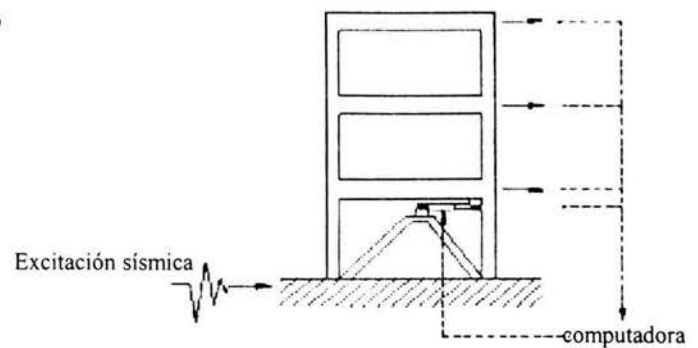


Figura 3.23. Control estructural con un amortiguador magnetorreológico (Cahís, 2000).

### 3.5 Experiencia en México sobre los sistemas de control estructural ante acciones sísmicas

A causa de los daños sufridos en la ciudad de México por los sismos de septiembre de 1985, surgió el interés por controlar la respuesta sísmica de estructuras a base de sistemas de control. Inicialmente el interés fue por los disipadores ADAS y al mismo tiempo en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se desarrolló un dispositivo al que se llamó Dispositivo Solera (Tena, 2003), el cual disipa energía cuando se deforman unas placas de acero (figura 3.24).

Después, a finales de los años noventa, comenzó a existir interés por los dispositivos viscoelásticos, debido a su aplicación en la construcción del edificio de la empresa 3M en la ciudad de México y en la actualidad, el uso de dispositivos con fluidos viscosos está llamando mucho la atención por la utilización de amortiguadores viscosos como el que se muestra en la figura 3.25 en la construcción de la Torre Mayor.



Figura 3.24. Dispositivo Solera (Tena, 2003).

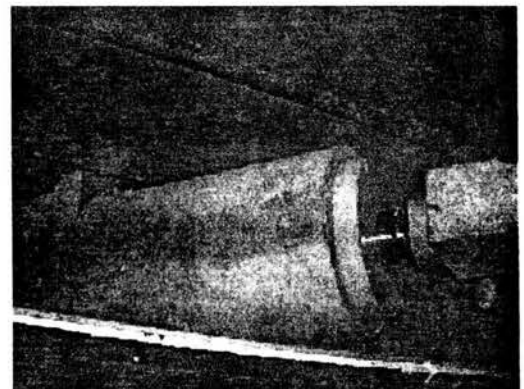


Figura 3.25. Amortiguador viscoso (Tena, 2003).

#### 3.5.1 Aplicaciones en edificios

Desde finales de los años ochenta se han utilizado en México disipadores pasivos de energía tanto para la rehabilitación de estructuras como para el diseño de edificios en zonas sísmicas. Las primeras aplicaciones se hicieron en la reestructuración de edificios como el Edificio Izazaga, el Hospital de Cardiología del Centro Médico Siglo XXI (figura 3.26) y las de Oficinas Centrales del IMSS (figura 3.27) con dispositivos ADAS (Tena, 2003).



Figura 3.26. Reestructuración del Hospital de Cardiología del Centro Médico Siglo XXI (Tena, 2003).



Figura 3.27. Reestructuración de las oficinas centrales del IMSS (Tena, 2003).

Además, se han utilizado conexiones friccionantes en el Hospital 20 de Noviembre del ISSSTE, disipadores con materiales viscoelásticos en el edificio corporativo 3M (figura 3.28), amortiguadores viscosos en la Torre Mayor y en el edificio Fray Servando. Todos estos edificios ubicados en la Ciudad de Mexico.

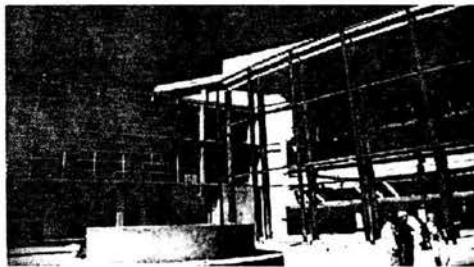


Figura 3.28. Edificio corporativo de 3M, diseñado con dispositivos viscoelásticos (Tena, 2003)

Un ejemplo reciente de la construcción de un edificio con disipadores de energía en México es la Torre Mayor (figura 3.31), que debido a su gran relación de esbeltez, origina que se desarrollen esfuerzos muy grandes en la cimentación. Por ello, se decidió emplear una estructuración a base de marcos perimetrales continuos con elementos de acero y amortiguadores viscosos (Tena, 2003)

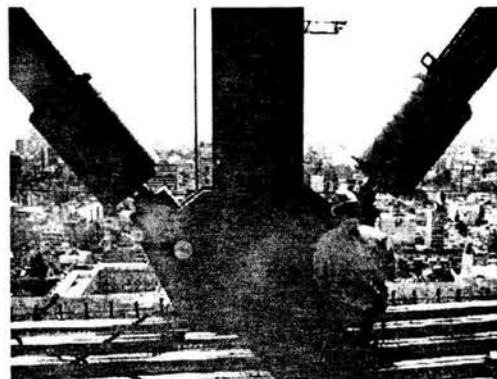


Figura 3.29. Edificio Torre Mayor con amortiguadores viscosos (Tena, 2003)

Desafortunadamente, en México aún no hay aplicaciones de otros sistemas de control además de los pasivos, pero se intenta que con este trabajo se vean las ventajas que se tienen con el control activo y poder en un futuro aplicarlos a estructuras reales en México.

## 4 FORMULACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL

Las diagonales han sido usadas desde hace tiempo para el control pasivo de la respuesta sísmica de puentes. En años más recientes se ha investigado sobre la posibilidad de controlar la respuesta de estructuras por medio de diagonales activas y ya no por simples diagonales “pasivas” o contraventeos que se colocan en los marcos de una estructura.

En la actualidad, existen muchos edificios con diagonales o contraventeos que proporcionan rigidez a su estructura y por lo tanto reducen la amplitud de sus oscilaciones. Sin embargo, la frecuencia de las oscilaciones aumenta debido al uso de estas diagonales. Esto causa excesivas vibraciones e inseguridad a los ocupantes de un edificio. Por estas razones, investigadores han propuesto la idea de operar las diagonales activamente usando actuadores, esto se logra liberando y tensando las diagonales para agregar rigidez y amortiguamiento a una estructura (Leipholtz, 1986).

Las diagonales pueden ser colocadas como se muestra en la figura 4.1, donde se observa una estructura con un mecanismo que es usado para el control de la vibración. Éste consiste en diagonales pretensadas que están fijas en la esquina superior derecha del edificio, una en cada cara, y pasan por la esquina inferior izquierda a través de un sistema de poleas hasta la planta baja del edificio. En este nivel hay cuatro actuadores (uno para cada diagonal), que están instalados con sistemas de control y conectados a las diagonales. Un sistema de control activo de fuerzas es generado una vez que en el edificio se presenta un desplazamiento.

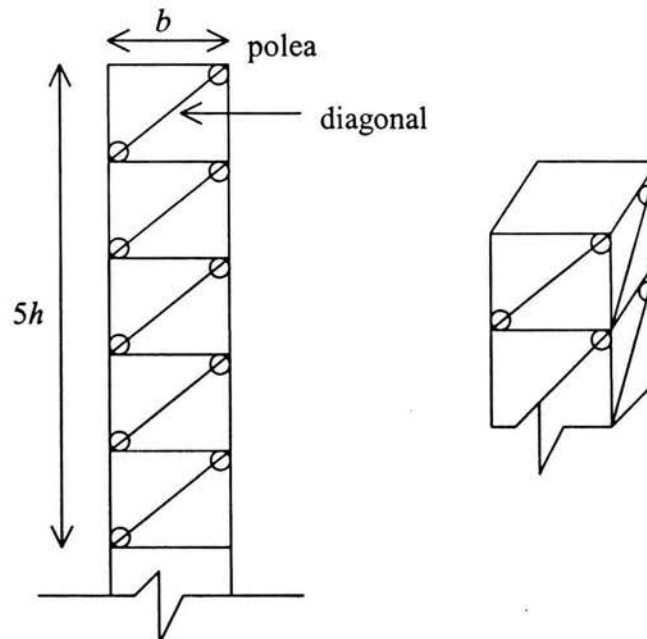


Figura 4.1. Ejemplo de un arreglo de diagonales activas en un edificio (Leipholtz, 1986).

Entonces, las diagonales activas pueden ser conectadas desde la parte superior del edificio hasta la base para producir un control más efectivo de las fuerzas sísmicas y de los efectos del viento. Esta idea ha sido usada en algunos edificios de países como Japón , Estados Unidos y Nueva Zelanda.

En general, este sistema es controlado mediante tres componentes que son: sensores, controladores y un actuador (Connor y Boutros, 1996). Un esquema conceptual de su funcionamiento sobre una estructura se muestra en la figura 4.2. Cuando se presenta una excitación, se generan fuerzas sísmicas que actúan sobre el edificio provocando una respuesta de desplazamientos, velocidades y aceleraciones en cada nivel. La excitación y la respuesta son detectadas por los sensores. Estos mandan los datos registrados del movimiento al controlador. El controlador sabe qué hacer porque tiene una computadora con un programa que calcula la fuerza con la que se va a tensar a la diagonal. Cuando conoce el valor de esta fuerza, dependiendo de qué tan grande es el sismo, le envía la orden a un actuador y éste tensa a la diagonal con la fuerza necesaria para contrarrestar la fuerza del sismo, provocando que la respuesta estructural se reduzca.

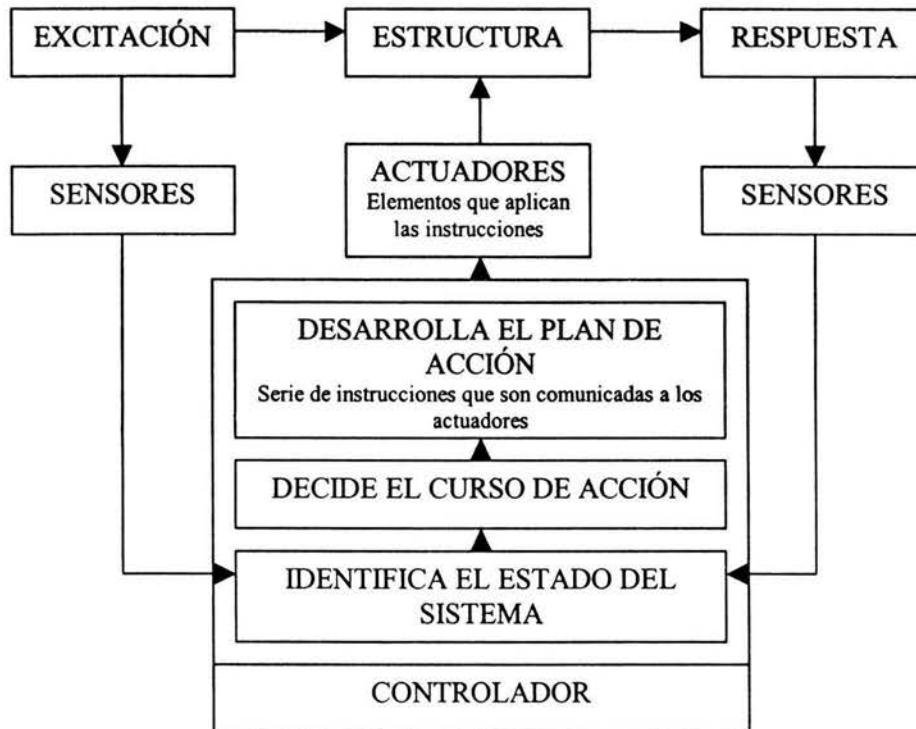


Figura 4.2 Componentes de un sistema de control activo (Connor y Boutros, 1996).

#### 4.1 Cálculo de desplazamientos para estructuras sin control estructural

Las estructuras sin control, son aquellas que no cuentan con algún elemento o sistema adicional que les aporte mayor rigidez, y les ayude a disipar la energía que es provocada por un sismo, lo cual reduciría la respuesta sísmica a valores menores a los que obtendría sin un sistema de control.

Se dice que una estructura tiene un comportamiento elástico lineal si la relación fuerza-deformación es como la que se muestra en la figura 4.3. a. Por el contrario, si el comportamiento es como el ilustrado en la figura 4.3.b se le llama inelástico (Mendoza, 2003). En este trabajo se estudiarán sólo estructuras con comportamiento elástico lineal.



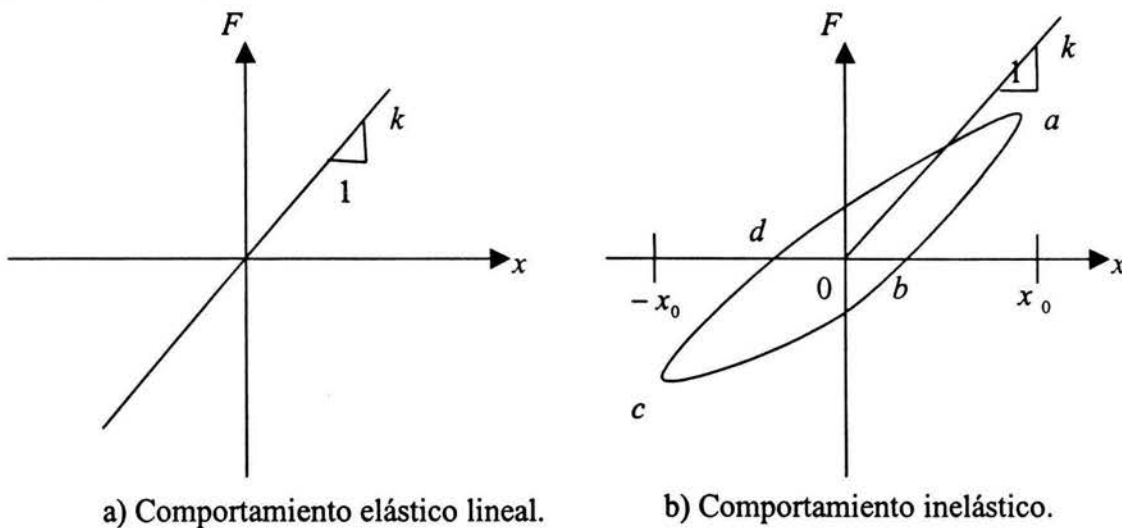


Figura 4.3: Gráficas fuerza-desplazamiento para estructuras con comportamiento elástico e inelástico.

En general, un sistema elástico puede presentar diferentes modos de vibrar. Por ejemplo, una cuerda elástica puede vibrar en diversas formas. En el más simple de los casos, la configuración de un sistema en vibración, en cualquier instante, puede especificarse con una sola coordenada. A tales casos se les llama sistema de un grado de libertad.

Un sistema de un grado de libertad como el mostrado en la figura 4.4 está integrado por una masa concentrada  $m$ , en un sistema que tiene rigidez  $k$  y un amortiguador viscoso  $c$ .

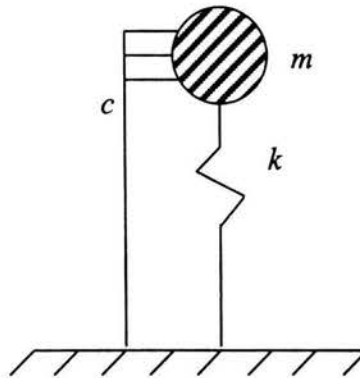


Figura 4.4. Sistema de un grado de libertad.

El número de desplazamientos independientes requeridos para definir la posición desplazada de la masa con respecto a su posición original es denominado el número de grados de libertad. La estructura de la figura 4.5, tiene libertad de movimiento en la dirección de la excitación. Un análisis estático de la estructura deberá ser formulado con tres grados de libertad (desplazamiento lateral y dos giros) para determinar la rigidez lateral del marco. Por el contrario, para el análisis dinámico solo tiene un grado de libertad. Por lo que, si se consideran dos tipos de excitación: fuerza externa en la dirección lateral que varía con el tiempo y la aceleración debida al movimiento del suelo  $x_s(t)$ , en cada instante, los desplazamientos de la masa están relacionados por:

$$x_r(t) = x(t) + x_s(t) \quad (4.1)$$

donde:

$x_t(t)$  = desplazamiento total de la masa

$x(t)$  = desplazamiento por efecto de la fuerza externa

$x_s(t)$  = desplazamiento por efecto del movimiento sísmico

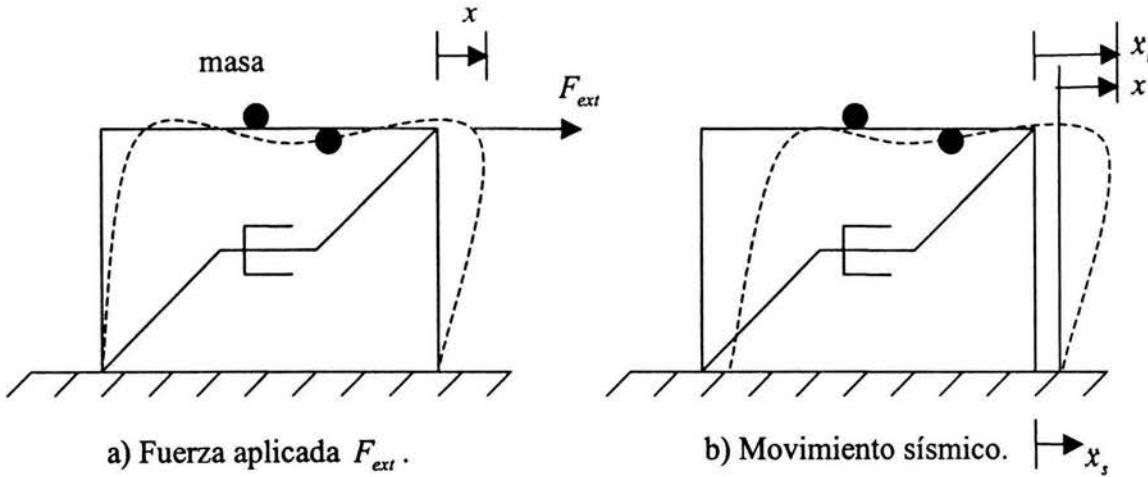


Figura 4.5. Desplazamientos provocados en una estructura ante una fuerza externa y una excitación.

En un sistema de un grado de libertad, al aplicar una fuerza externa y un movimiento en la base definido por una historia de aceleraciones del suelo, la masa entrará en oscilación y se generarán sobre ella tres tipos de fuerzas como se observa en la figura 4.6.

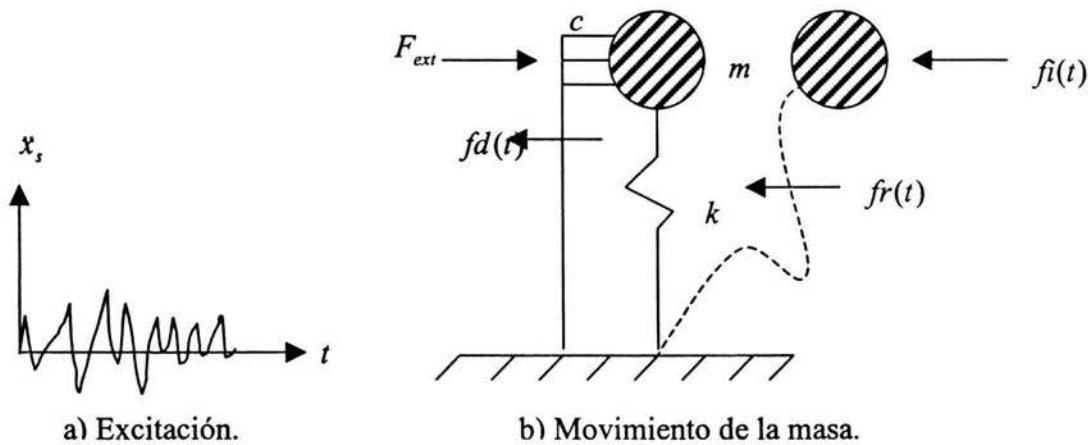


Figura 4.6. Fuerzas internas que se generan al aplicar una excitación y una fuerza externa en un sistema de un grado de libertad.

Estas fuerzas son:

a) La fuerza restauradora  $fr(t)$  (figura 4.7) que se genera en la columna por su rigidez lateral al tratar de ser desplazada, está dada por:

$$fr(t) = kx(t) \quad (4.2)$$

b) La fuerza disipadora  $fd(t)$ , (figura 4.7) que trata de restablecer el equilibrio de la estructura en vibración.

$$fd(t) = cx(t) \quad (4.3)$$

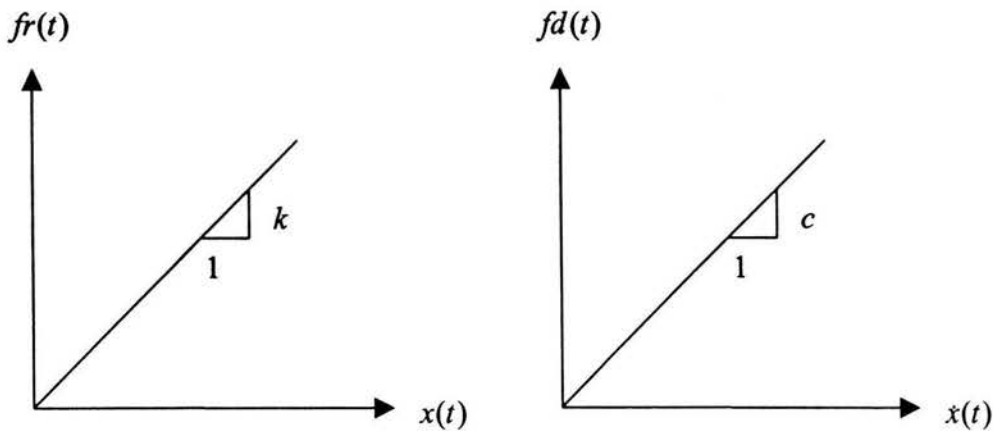
c) La fuerza de inercia  $fi(t)$ , (figura 4.7) que, de acuerdo al principio de D'Alambert es proporcional a la masa y a la aceleración total que ésta sufre.

$$fi(t) = mx(t) \quad (4.4)$$

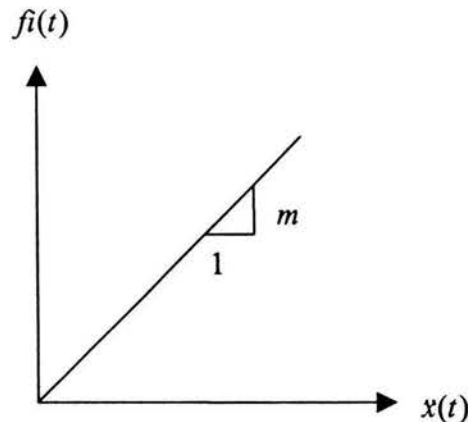
donde:

$c$  = coeficiente de amortiguamiento viscoso

$x(t)$  = velocidad



a) Fuerza restauradora  $fr(t) = kx(t)$ .      b) Fuerza disipadora  $fd(t) = cx(t)$ .



c) Fuerza de inercia  $fi(t) = mx_i(t) = mx(t) + m\ddot{x}(t)$ .

Figura 4.7. Fuerzas internas que se generan en un sistema estructural al aplicar una excitación y una fuerza externa.

De la figura 4.6.b, el equilibrio de fuerzas es:

$$fi(t) + fd(t) + fr(t) = -F_{ext} \quad (4.5)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.2), (4.3) y (4.4) en la (4.5), se obtiene:

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = -F_{ext} - m \ddot{x}_s(t) \quad (4.6)$$

Considerando que  $F_{ext} = 0$  ya que sólo se considera al sistema cuando está sujeto a un movimiento en su base, se tiene que la ecuación (4.6) se transforma a:

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = -m \ddot{x}_s(t) \quad (4.7)$$

Obteniéndose así, una ecuación diferencial de segundo orden, que es la ecuación de movimiento que gobierna el comportamiento de un sistema de un grado de libertad con comportamiento lineal cuando es sujeto a una aceleración en su base (Bazán y Meli, 1998).

Dividiendo entre  $m$  a la ecuación (4.7) se obtiene:

$$\ddot{x}(t) + \frac{c}{m} \dot{x}(t) + \frac{k}{m} x(t) = -\ddot{x}_s(t) \quad (4.8)$$

En esta ecuación aparecen las constantes  $\frac{c}{m}$  y  $\frac{k}{m}$  que representan conceptos relacionados con la vibración libre (que el sistema vibre sin fuerza externa). Esto es:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (4.9)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.10)$$

donde:

$\omega$  = frecuencia circular del sistema no amortiguado

Esta frecuencia es aquella con la que oscila el sistema cuando se le impone un desplazamiento y se le suelta. Cuando el amortiguamiento es nulo el sistema describe un movimiento armónico simple, con la frecuencia mencionada y con período igual a:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4.11)$$

El amortiguamiento representa la disipación de energía que la estructura realiza principalmente debido a fricción interna de los materiales y a rozamiento entre los componentes de la construcción. Este amortiguamiento reduce las oscilaciones. En vibración libre se define como amortiguamiento crítico aquel para el cual el sistema, después de desplazado, volvería a su posición de reposo sin oscilar. Éste vale:

$$C_{cr} = 2\sqrt{km} \quad (4.12)$$

Por lo tanto, la constante de amortiguamiento puede expresarse como una fracción del amortiguamiento crítico en la forma:

$$\xi = \frac{c}{C_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (4.13)$$

pero

$$\sqrt{km} = m\sqrt{\frac{k}{m}} = m\omega$$

entonces:

$$\xi = \frac{c}{2m\omega} \Rightarrow c = 2m\xi\omega \quad (4.14)$$

Siendo entonces:

$$\frac{c}{m} = 2\omega\xi \quad (4.15)$$

Por lo que al sustituir las ecuaciones (4.9) y (4.15) en la (4.8) se obtiene:

$$x(t) + 2\omega\xi x(t) + \omega^2 x(t) = -x_s(t) \quad (4.16)$$

Para vibraciones libres sin amortiguamiento. La ecuación (4.16) se reduce a:

$$x(t) + \omega^2 x(t) = 0 \quad (4.17)$$

De la ecuación (4.17) con condiciones iniciales  $x(0) = x_0$  y  $\dot{x}(0) = \dot{x}_0$  se acepta que la solución homogénea de la ecuación diferencial es de la forma:  $x(t) = C e^{\lambda t}$  donde  $C$  y  $\lambda$  son constantes que no son función del tiempo. Entonces si:

$$x(t) = C e^{\lambda t} \quad (4.18)$$

$$\dot{x}(t) = \lambda C e^{\lambda t} \quad (4.19)$$

$$x(t) = \lambda^2 C e^{\lambda t} \quad (4.20)$$

Sustituyendo estas ecuaciones en la (4.17):

$$\lambda^2 C e^{\lambda t} + \omega^2 C e^{\lambda t} = 0 \quad (4.21)$$

Reduciendo términos semejantes se obtiene:

$$\lambda^2 + \omega^2 = 0 \quad (4.22)$$

$$\lambda^2 = -\omega^2 \quad (4.23)$$

Las soluciones de esta ecuación serán:

$$\lambda_{1,2} = \pm \omega^2 \quad (4.24)$$

$$\lambda_1 = i \omega \quad (4.25)$$

$$\lambda_2 = -i \omega \quad (4.26)$$

Sustituyendo estas ecuaciones en la (4.18):

$$x(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (4.27)$$

Para vibraciones libres con amortiguamiento, la ecuación (4.7) queda de la forma:

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = 0 \quad (4.28)$$

Resolviendo esta ecuación se obtienen como soluciones las ecuaciones (4.18), (4.19) y (4.20); que sustituyendo en la ecuación (4.28) y reduciendo términos se obtiene:

$$\lambda^2 + \frac{c}{m} \lambda + \frac{k}{m} = 0 \quad (4.29)$$

Resolviendo la ecuación (4.29):

$$\lambda_{1,2} = \frac{-\left(\frac{c}{m}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{c}{m}\right)^2 - 4(1)\left(\frac{k}{m}\right)}}{2(1)} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega^2} \quad (4.30)$$

Para la raíz de la ecuación (4.30) se presentan 3 casos: el primero es que fuera igual a cero, el segundo que fuera menor a cero y el tercero que fuera mayor a cero.

Tomando el caso en el que la raíz es igual a cero, se presenta amortiguamiento crítico (es decir la separación entre que exista vibración o no). Esto es:

$$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega^2 = 0 \quad (4.31)$$

$$\frac{c}{2m} = \omega \Rightarrow C_{cr} = 2m\omega \quad (4.32)$$

$$\xi = \frac{c}{C_{cr}} = 1 \quad (100\% \text{ del amortiguamiento}) \quad (4.33)$$

Con ello se llega a la ecuación (4.14). Sustituyendo en la ecuación (4.29) las ecuaciones (4.9) y (4.15) se obtiene:

$$\lambda^2 + 2\omega\xi\lambda + \omega^2 = 0 \quad (4.34)$$

Resolviendo la ecuación (4.34):

$$\lambda_{1,2} = \frac{-(2\omega\xi) \pm \sqrt{(2\omega\xi)^2 - 4(1)(\omega^2)}}{2(1)} \quad (4.35)$$

$$\lambda_{1,2} = -\omega\xi \pm \sqrt{(\omega\xi)^2 - \omega^2} \quad (4.36)$$

Para el caso en el que la raíz de la ecuación (4.36) es menor a cero se tienen sistemas subamortiguados:

$$\sqrt{[(\omega\xi)^2 - \omega^2](-1)(-1)}$$

$$\sqrt{-1}\sqrt{\omega^2 - (\omega\xi)^2} = i\omega\sqrt{1 - \xi^2}$$

Si se realiza el cambio de variable:

$$\omega' = \omega\sqrt{1 - \xi^2}$$

Sustituyendo en (4.36):

$$\lambda_{1,2} = -\omega\xi \pm i\omega' \quad (4.37)$$

Sustituyendo la ecuación (4.37) en la (4.27) se obtiene:

$$x(t) = C_1 e^{(-\omega\xi + i\omega')t} + C_2 e^{(-\omega\xi - i\omega')t} \quad (4.38)$$

Simplificando:

$$x(t) = e^{-\omega\xi t} [C_1 e^{i\omega' t} + C_2 e^{-i\omega' t}] \quad (4.39)$$

Se sabe que:

$$e^{\pm\theta} = \text{Cos } \theta \pm i \text{ Sen } \theta \quad (4.40)$$

Por lo que la ecuación (4.39) se puede escribir como:

$$x(t) = e^{-\omega\xi t} [C_1 (\text{Cos } \omega' t + i \text{ Sen } \omega' t) + C_2 (\text{Cos } \omega' t - i \text{ Sen } \omega' t)] \quad (4.41)$$

Agrupando términos semejantes:

$$x(t) = e^{-\omega\xi t} [(C_1 + C_2) \text{Cos } \omega' t + (C_1 - C_2) i \text{ Sen } \omega' t] \quad (4.42)$$

Realizando el siguiente cambio de variables:

$$B_1 = i(C_1 - C_2) \quad (4.43)$$

$$B_2 = C_1 + C_2 \quad (4.44)$$

Sustituyendo estas ecuaciones en la (4.42):

$$x(t) = e^{-\omega \xi t} [B_1 \text{Sen } \omega' t + B_2 \text{Cos } \omega' t] \quad (4.45)$$

Derivando la ecuación (4.45) con respecto al tiempo se obtiene la ecuación de velocidad, esto es:

$$\dot{x}(t) = e^{-\omega \xi t} [B_1 \omega' \text{Cos } \omega' t - B_2 \omega' \text{Sen } \omega' t] - [B_1 \text{Sen } \omega' t - B_2 \text{Cos } \omega' t] (\omega \xi) e^{-\omega \xi t} \quad (4.46)$$

Al evaluar con condiciones iniciales el desplazamiento en la ecuación (2.45) se tiene que:

$$x(t=0) = e^{-0} [B_1(0) + B_2(1)] = x_0 \quad (4.47)$$

entonces:

$$\Rightarrow B_2 = x_0 \quad (4.48)$$

Ahora, para la velocidad en la ecuación (4.46):

$$\dot{x}(t=0) = e^{-0} [B_1 \omega'(1) - B_2 \omega'(0)] - [B_1(0) + B_2(1)] (\omega \xi) e^{-0} = \dot{x}_0 \quad (4.49)$$

$$B_1 \omega' - B_2 (\omega \xi) = \dot{x}_0 \quad (4.50)$$

$$B_1 = \frac{\dot{x}_0 + B_2 (\omega \xi)}{\omega'} \quad (4.51)$$

Sustituyendo la ecuación (4.48) en la (4.51):

$$B_1 = \frac{\dot{x}_0 + x_0 (\omega \xi)}{\omega'} \quad (4.52)$$

Recordando que  $\omega' = \omega \sqrt{1 - \xi^2}$  y sustituyendo las ecuaciones (4.48) y (4.52) en la (4.45) se obtiene:

$$x(t) = e^{-\omega \xi t} \left[ \frac{\dot{x}_0 + x_0 (\omega \xi)}{(\omega \sqrt{1 - \xi^2})} \text{Sen}(\omega \sqrt{1 - \xi^2} t) + x_0 \text{Cos}(\omega \sqrt{1 - \xi^2} t) \right] \quad (4.53)$$

Con esta ecuación se puede calcular la historia del desplazamiento de un sistema de un grado de libertad con comportamiento lineal conociendo su frecuencia, la relación de amortiguamiento crítico, el desplazamiento y la velocidad para condiciones iniciales.



## 4.2 Cálculo de fuerzas para controlar estructuras con diagonales activas

Al tomar en cuenta el efecto de un sistema de control como las diagonales activas, la ecuación (4.7) se ve afectada por un término adicional que es la fuerza de control  $F_c$ . Esta fuerza está expresada como una combinación lineal de la velocidad  $\dot{x}(t)$  y del desplazamiento  $x(t)$  (Connor y Boutros, 1996).

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_s(t) + F_c \quad (4.54)$$

La fuerza de control, se puede expresar como:

$$F_c = K_a \dot{x}(t) + K_d x(t) \quad (4.55)$$

donde:

$K_a$  = amortiguamiento de control que es aportado por un amortiguador

$K_d$  = rigidez de control que es aportada por una diagonal

El control es proporcionado a una estructura mediante los siguientes pasos:

- registrar la respuesta
- determinar  $\dot{x}(t)$  y  $x(t)$
- calcular  $F_c$  con la ecuación (4.55)
- aplicar  $F_c$  con un actuador

Al sustituir la ecuación (4.55) en la (4.54) y dividiendo entre  $m$  se obtiene:

$$\ddot{x}(t) + \frac{c}{m} \dot{x}(t) + \frac{k}{m} x(t) = -\ddot{x}_s(t) + \frac{K_a}{m} \dot{x}(t) + \frac{K_d}{m} x(t) \quad (4.56)$$

Sustituyendo en la ecuación (4.56) las ecuaciones (4.9) y (4.15) se obtiene la nueva ecuación de equilibrio dinámico:

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega\dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = -\ddot{x}_s(t) + \frac{K_a}{m} \dot{x}(t) + \frac{K_d}{m} x(t) \quad (4.57)$$

Esta es la ecuación de movimiento que hay que resolver para calcular la respuesta sísmica de un sistema de un grado de libertad al que se le aplica control activo (figura 4.7).

Al aislar un marco de la figura 4.1 se obtendrá un sistema como el mostrado en la figura 4.8.

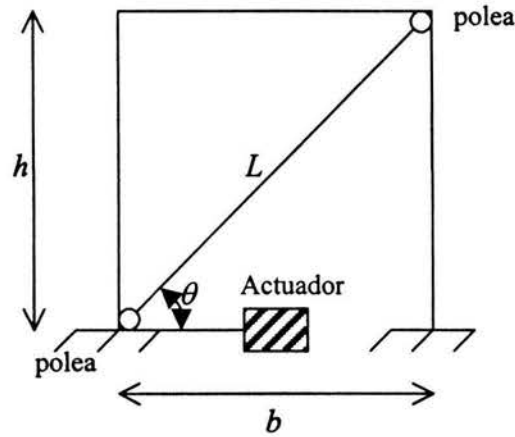


Figura 4.8. Marco aislado con diagonal activa.

Al aplicar una excitación en la base del marco de la figura 4.8, y suponiendo que la viga es infinitamente rígida, el desplazamiento de los nudos superiores es el mismo (figura 4.9).

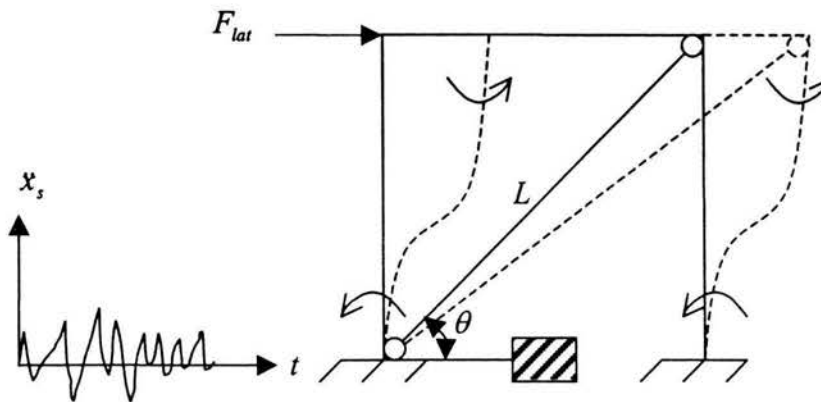


Figura 4.9. Efecto de la Fuerza externa sobre el marco.

El desplazamiento que provoca la acción de esta fuerza se puede analizar como se muestra en la figura 4.10.

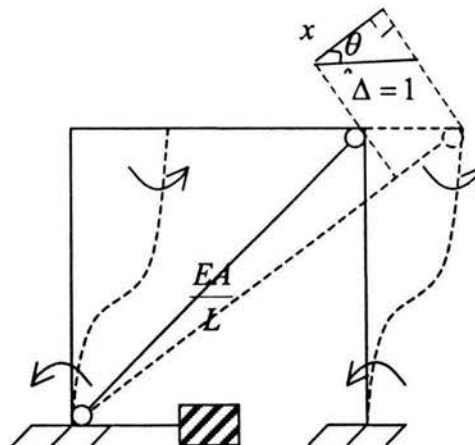


Figura 4.10. Geometría del desplazamiento del marco.

De la figura 4.10 el coseno del triángulo formado al desplazarse el marco es:

$$\cos \theta = \frac{x}{\Delta} \quad (4.58)$$

donde:

$x$  = desplazamiento de la diagonal al desplazarse el marco

$\Delta$  = desplazamiento horizontal del marco

Si  $\Delta = 1$ , el desplazamiento de la diagonal será:

$$x = \Delta \cos \theta \quad \Rightarrow \quad x = \cos \theta \quad (4.59)$$

Pero de la figura 4.10:

$$\cos \theta = \frac{b}{L} \quad (4.60)$$

De donde:

$$L = \frac{b}{\cos \theta} \quad (4.61)$$

Si la rigidez de la diagonal es:

$$K d = \frac{E A}{L} \quad (4.62)$$

donde:

$E$  = módulo de elasticidad que depende del material con que está hecha la diagonal

$A$  = área transversal de la diagonal

$L$  = longitud de la diagonal

De acuerdo con la ecuación (4.62) se tiene:

$$\frac{EA}{\frac{b}{\cos \theta}} = \frac{EA}{b} \cos \theta \quad (4.63)$$

Entonces:

$$K d = \frac{EA}{b} \cos \theta \quad (4.64)$$

Pero, la fuerza es igual al producto de la rigidez por el desplazamiento:

$$F = kx \quad (4.65)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.64) y (4.59) en la (4.65), se obtiene:

$$F = \frac{EA}{b} \cos \theta (\cos \theta) \quad (4.66)$$

$$F = \frac{EA}{b} \cos^2 \theta \quad (4.67)$$

Ésta es la fuerza axial en la diagonal provocada por un desplazamiento lateral unitario del marco (figura 4.11).

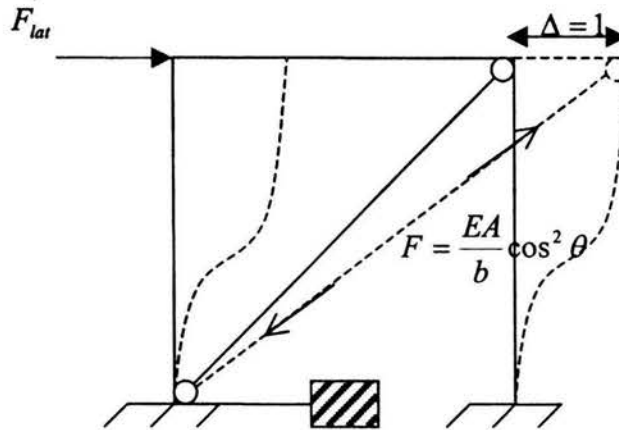


Figura 4.11. Fuerza generada en la diagonal al desplazarse el marco una cantidad unitaria.

Al realizar la proyección horizontal de  $P$ , la fuerza con la que el actuador debe jalar a la diagonal para equilibrar a la estructura es:

$$F = \frac{EA}{b} \cos^2 \theta (\cos \theta) = \frac{EA}{b} \cos^3 \theta \quad (4.68)$$

En general al incrementarse el número de niveles en el marco, cada entrepiso se desplazará como se muestra en la figura 4.12.

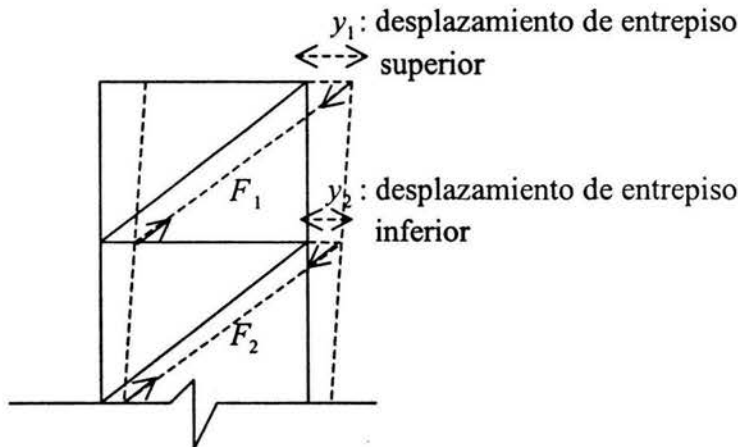


Figura 4.12. Fuerzas de tensión que aparecen en un marco de más de un nivel con diagonales activas.

El desplazamiento de entrepiso será:

$$\Delta = y_1 - y_2 \quad (4.69)$$

Al sustituir esta ecuación en la (4.59) se encuentra que:

$$x = (y_1 - y_2) \cos \theta \quad (4.70)$$

Sustituyendo esta ecuación en la (4.65) se tiene que, para las diagonales del marco de la figura 4.12:

$$F_1 = \frac{EA}{b} (y_1 - y_2) \cos^2 \theta \quad (4.71)$$

$$F_2 = \frac{EA}{b} (y_2 - y_3) \cos^2 \theta \quad (4.72)$$

Al realizar las proyecciones correspondientes, se pueden calcular las fuerzas que debe aplicar el actuador para equilibrar las fuerzas laterales que actúan en cada nivel de una estructura cuando hay una excitación en su base.

La figura 4.13 muestra un ejemplo de un marco de un edificio, en el que, al aplicar una excitación en su base se generan fuerzas laterales. Al colocar un sistema de control a base de diagonales activas, el actuador debe aplicar una fuerza. Así, que con este sistema de control, las fuerzas que actúan sobre el edificio son la que hay en la base y la del ultimo nivel, ya que en los demás pisos existe un equilibrio de fuerzas.

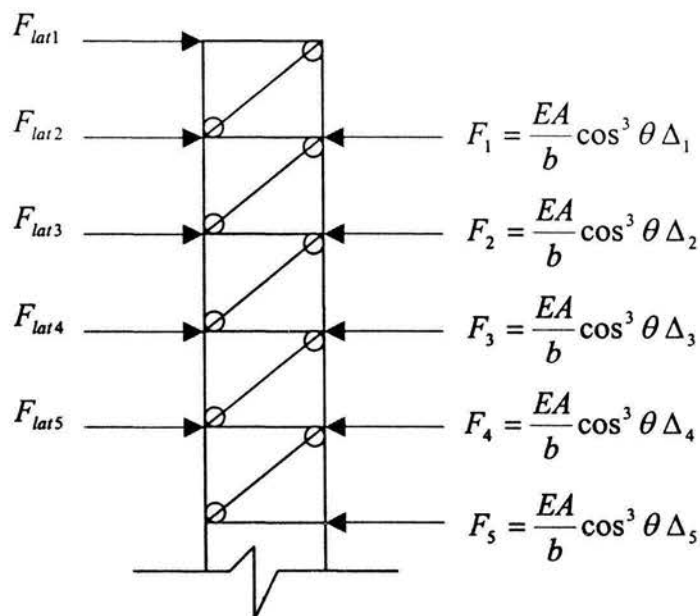


Figura 4.13. Fuerzas que tendrá que aplicar el actuador para contrarrestar las fuerzas laterales.

Por lo tanto, la rigidez de control se puede calcular como:

$$K d = \frac{EA}{b} \cos^3 \theta \quad (4.73)$$

Por otro lado el amortiguamiento de control, dependerá del tipo de amortiguador que se coloque. En este trabajo se considerarán como datos los valores de  $K d$  y  $K a$ .

Para un amortiguador viscoso la fuerza de amortiguamiento se puede calcular como (Connor y Boutros, 1996):

$$F_a = 2 w_a L_a V_a \quad (4.74)$$

donde

$w_a$  = ancho del amortiguador

$L_a$  = longitud del amortiguador

$V_a$  = Esfuerzo cortante en el amortiguador

$$V_a = G_v \gamma_a \quad (4.75)$$

donde:

$G_v$  = coeficiente de viscosidad del fluido que está dentro del amortiguador

$\gamma_a$  = relación entre la velocidad y el espesor del fluido viscoso

$\gamma_a$  se calcula como:

$$\gamma_a = \frac{\dot{x}}{t_d} \quad (4.76)$$

donde:

$\dot{x}$  = velocidad del amortiguador al desplazarse

$t_d$  = espesor del fluido viscoso

Al sustituir la ecuación (4.76) en la (4.75) y en la (4.74) se obtiene:

$$F_a = \left[ \frac{2 w_a L_a G_v}{t_d} \right] \dot{x} \quad (4.77)$$

La ecuación (4.77) se puede escribir como:

$$F_a = K_a \dot{x} \quad (4.78)$$

donde la rigidez de amortiguamiento que proporciona un amortiguador viscoso se puede calcular como:

$$K_a = \left[ \frac{2 w_a L_a}{t_d} \right] G_v \quad (4.79)$$

A partir de la geometría del amortiguador viscoso como el que se muestra en la figura (4.14) se pueden calcular  $w_a$ ,  $L_a$  y  $t_d$

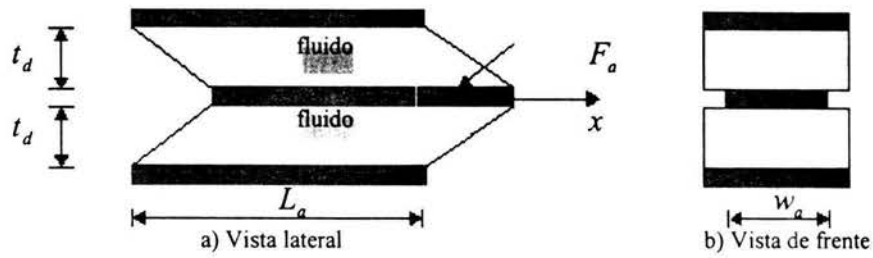


Figura 4.14. Geometría de un amortiguador viscoso (Connor y Boutros, 1996).

Un diagrama esquemático de un amortiguador viscoso empleado para aplicaciones estructurales es como el que se muestra en la figura 4.15.



Figura 4.15. Esquema de un amortiguador viscoso (Connor y Boutros, 1996).

En la figura 4.16 se presenta un amortiguador que se usa actualmente para el control de estructuras. Éste tiene un fluido que es forzado a pasar por un orificio que se encuentra en un pistón para que pueda cambiar de sección creando una fuerza de resistencia que depende de la velocidad de una diagonal que se conecta al dispositivo.

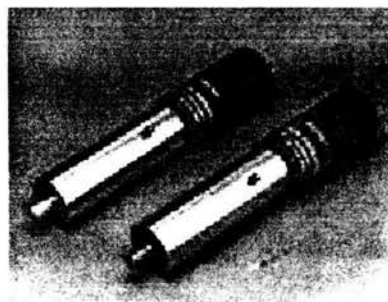


Figura 4.16. Vista exterior de un amortiguador viscoso (Connor y Boutros, 1996).

#### 4.2.1 Cálculo de la respuesta sísmica de un sistema estructural con diagonales activas

Al conocer los valores de la rigidez y el amortiguamiento de control se puede resolver la ecuación (4.59), y así calcular la respuesta de un sistema estructural, al que se le aplica control con diagonales activas. En este trabajo, la ecuación (4.59) se resolvió mediante un método numérico basado en la interpolación de la función de la excitación que sería en este caso alguno de los registros sísmicos considerados (Craig, 1981). En este método, se elige una aceleración en cada instante de tiempo  $\Delta t$ , la elección de  $\Delta t$  debe considerar el intervalo de tiempo en que están registradas las excitaciones.

### 4.2.1.1 Método numérico basado en la interpolación de la función de la excitación

En muchos problemas prácticos de dinámica estructural la función de la excitación  $p(t)$ , no se puede representar en forma de una expresión analítica, sino que está dada por una serie de valores discretos  $p_i \equiv p(t_i)$  para  $i = 0$  hasta  $N$ . Estos valores pueden ser presentados en una forma tabular o gráficamente como se muestra en la figura 4.17. El intervalo de tiempo es frecuentemente tomado como una constante  $\Delta t$  dada por:

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i \tag{4.80}$$

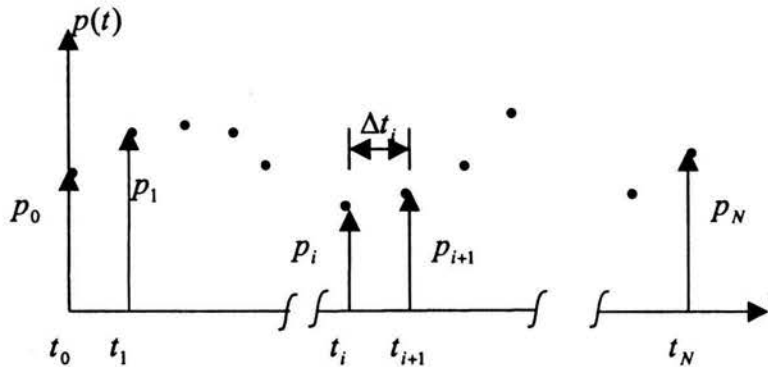


Figura 4.17. Excitación representada por puntos discretos.

Una forma de obtener la respuesta de esta excitación es mediante la solución de la integral de Duhamel. Al hacerlo así se tendría un trabajo tedioso, por lo que un procedimiento más directo y eficiente involucra la interpolación de la función de excitación. La figura 4.18 muestra dos casos. En el primero se utiliza un paso constante y en el segundo caso se utiliza un paso lineal para la interpolación de las funciones de excitación. Para la interpolación con paso constante, el valor de la fuerza en el intervalo  $t_i$  hasta  $t_{i+1}$  es  $\bar{p}_i$ , donde al inicio del intervalo el valor es  $p_i$  y al final del intervalo es  $p_{i+1}$ , expresándolo de la forma:

$$\bar{p}_i = 0.5(p_i + p_{i+1}) \tag{4.81}$$

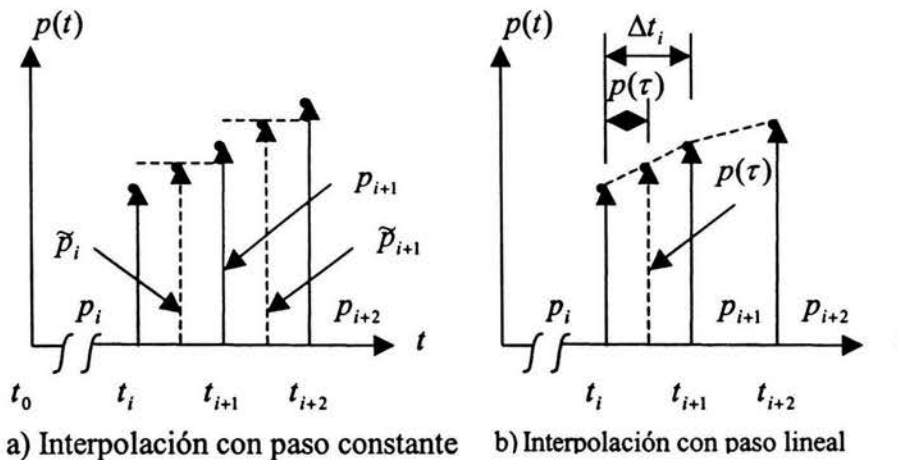


Figura 4.18. Interpolación de las funciones de excitación.



Para la interpolación con paso lineal el valor de la fuerza interpolada está dado por:

$$P(\tau) = p_i + \left(\frac{\Delta p_i}{\Delta t_i}\right)\tau \quad (4.82)$$

donde:

$$\Delta p_i = p_{i+1} - p_i \quad (4.83)$$

Considerando la respuesta de un sistema sin amortiguamiento. Para paso constante, la interpolación de la respuesta forzada puede obtenerse con la ecuación 5.8 (Craig, 1981) y la respuesta debida a condiciones iniciales distintas a cero con la ecuación 3.7, (Craig, 1981) entonces:

$$x(\tau) = x_i \cos \omega_n \tau + \left(\frac{\dot{x}_i}{\omega_n}\right) \text{sen } \omega_n \tau + \left(\frac{\tilde{p}_i}{k}\right)(1 - \cos \omega_n \tau) \quad (4.84)$$

$$\frac{\dot{x}(\tau)}{\omega_n} = -x_i \text{sen } \omega_n \tau + \left(\frac{\dot{x}_i}{\omega_n}\right) \cos \omega_n \tau + \left(\frac{\tilde{p}_i}{k}\right) \text{sen } \omega_n \tau \quad (4.85)$$

Evaluando estas expresiones en un tiempo  $t_{i+1}$ , (para  $\tau = \Delta t_i$ ) se tiene:

$$x_{i+1} = x_i \cos(\omega_n \Delta t_i) + \left(\frac{\dot{x}_i}{\omega_n}\right) \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) + \left(\frac{\tilde{p}_i}{k}\right)[1 - \cos(\omega_n \Delta t_i)] \quad (4.86)$$

$$\frac{\dot{x}_{i+1}}{\omega_n} = -x_i \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) + \left(\frac{\dot{x}_i}{\omega_n}\right) \cos(\omega_n \Delta t_i) + \left(\frac{\tilde{p}_i}{k}\right) \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) \quad (4.87)$$

Las ecuaciones (4.86) y (4.87) evalúan el estado dinámico  $(x_{i+1}, \dot{x}_{i+1})$  de un sistema estructural en un tiempo  $t_{i+1}$  y  $(x_i, \dot{x}_i)$  en un tiempo  $t_i$ .

En contraste al paso constante de la interpolación de la excitación, el paso lineal permite una aproximación. La ecuación (4.82) puede ser usada para derivar en ecuaciones de recurrencia basadas en un paso lineal de interpolación de la excitación para un sistema sin amortiguar. Esto es:

$$x_{i+1} = x_i \cos(\omega_n \Delta t_i) + \left(\frac{\dot{x}_i}{\omega_n}\right) \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) + \left(\frac{p_i}{k}\right)[1 - \cos(\omega_n \Delta t_i)] + \left(\frac{\Delta p_i}{k}\right)\left(\frac{1}{\omega_n \Delta t_i}\right)[\omega_n \Delta t_i - \text{sen}(\omega_n \Delta t_i)] \quad (4.88)$$

$$\frac{\dot{x}_{i+1}}{\omega_n} = -x_i \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) + \left(\frac{\dot{x}_i}{\omega_n}\right) \cos(\omega_n \Delta t_i) + \left(\frac{\tilde{p}_i}{k}\right) \text{sen}(\omega_n \Delta t_i) + \left(\frac{\Delta p_i}{k}\right)\left(\frac{1}{\omega_n \Delta t_i}\right)[1 - \cos(\omega_n \Delta t_i)] \quad (4.89)$$

Recurriendo a las ecuaciones (4.84) hasta (4.87) es conveniente expresarlas de la siguiente forma (Craig, 1981)):

$$x_{i+1} = A p_i + B p_{i+1} + C x_i + D x_i \quad (4.90)$$

$$\dot{x}_{i+1} = A' p_i + B' p_{i+1} + C' x_i + D' \dot{x}_i \quad (4.91)$$

donde:

$$A = \frac{1}{k \omega_d z} \left\{ e^{-\beta z} \left[ \left( \frac{\omega_d^2 - \beta^2}{\omega_n^2} - \beta z \right) \text{sen } \omega_d z - \left( \frac{2 \omega_d \beta}{\omega_n^2} + \omega_d z \right) \text{cos } \omega_d z \right] + \frac{2 \beta \omega_d}{\omega_n^2} \right\} \quad (4.92)$$

$$B = \frac{1}{k \omega_d z} \left\{ e^{-\beta z} \left[ - \left( \frac{\omega_d^2 - \beta^2}{\omega_n^2} \right) \text{sen } \omega_d z + \left( \frac{2 \omega_d \beta}{\omega_n^2} \right) \text{cos } \omega_d z \right] + \omega_d z - \frac{2 \beta \omega_d}{\omega_n^2} \right\} \quad (4.93)$$

$$C = e^{-\beta z} \left[ \text{cos } \omega_d z + \left( \frac{\beta}{\omega_d} \right) \text{sen } \omega_d z \right] \quad (4.94)$$

$$D = \left( \frac{1}{\omega_d} \right) e^{-\beta z} \text{sen } \omega_d z \quad (4.95)$$

$$A' = \frac{1}{k \omega_d z} \left\{ e^{-\beta z} \left[ (\beta + \omega_n^2 z) \text{sen } \omega_d z + \omega_d \text{cos } \omega_d z \right] - \omega_d \right\} \quad (4.96)$$

$$B' = \frac{1}{k \omega_d z} \left[ - e^{-\beta z} (\beta \text{sen } \omega_d z + \omega_d \text{cos } \omega_d z) + \omega_d \right] \quad (4.97)$$

$$C' = - \left( \frac{\omega_n^2}{\omega_d} \right) e^{-\beta z} \text{sen } \omega_d z \quad (4.98)$$

$$D' = e^{-\beta z} \left[ \text{cos } \omega_d z - \left( \frac{\beta}{\omega_d} \right) \text{sen } \omega_d z \right] \quad (4.99)$$

De las ecuaciones anteriores  $\beta = \xi \omega_n$  y  $z = \Delta t_i$

Conocido el desplazamiento y la velocidad, la aceleración puede ser calculada a partir de la ecuación (4.7) como:

$$x_i = \frac{p_i - c \dot{x}_i - k x_i}{m} \quad (4.100)$$

En las figuras 4.19 a 4.22 se presenta el diagrama de flujo algoritmo utilizado para calcular la respuesta de una estructura de un grado de libertad con control debido a diagonales activas.

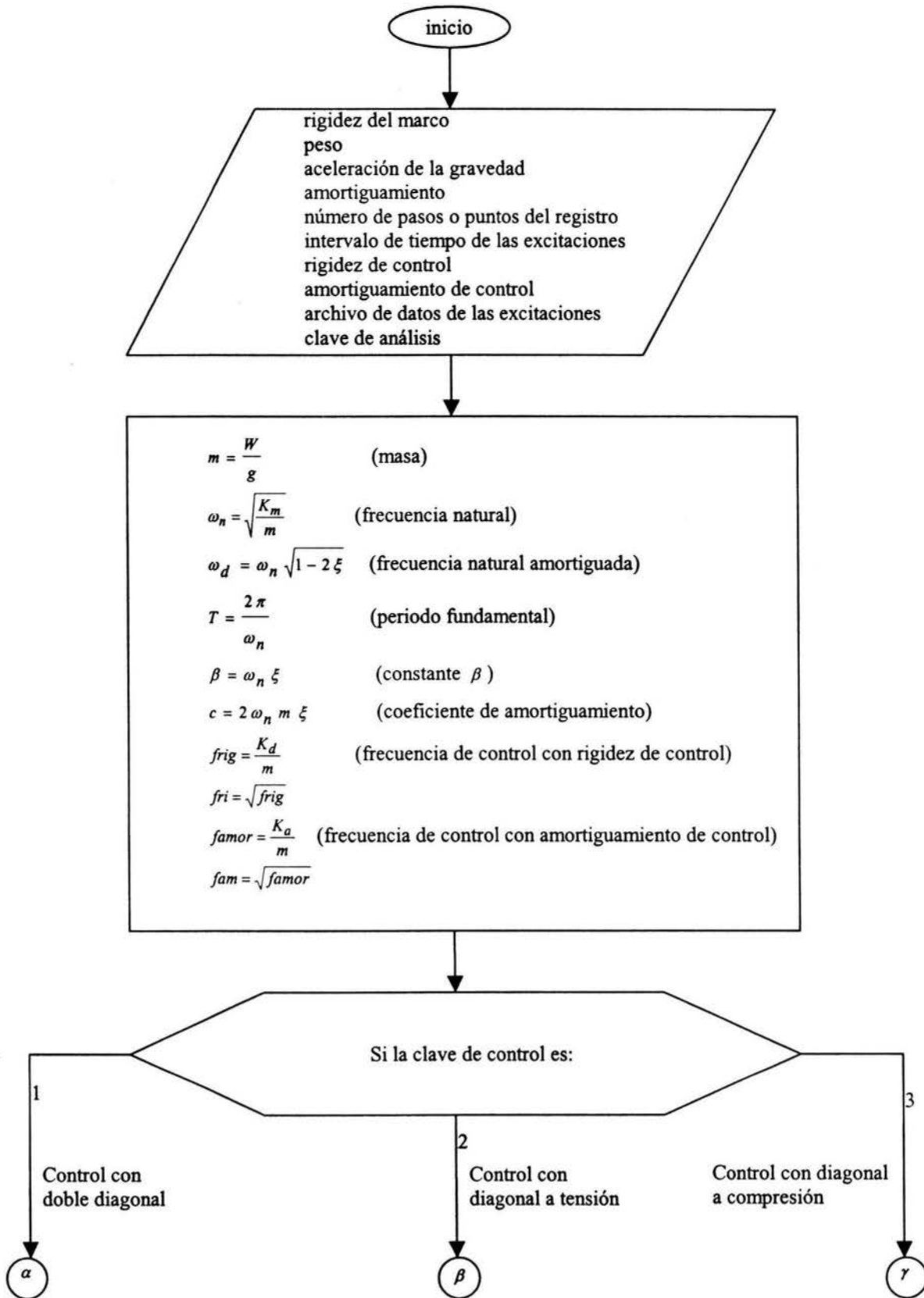


Figura 4.19. Diagrama de flujo del algoritmo para controlar la respuesta de un sistema de un grado de libertad mediante diagonales activas.

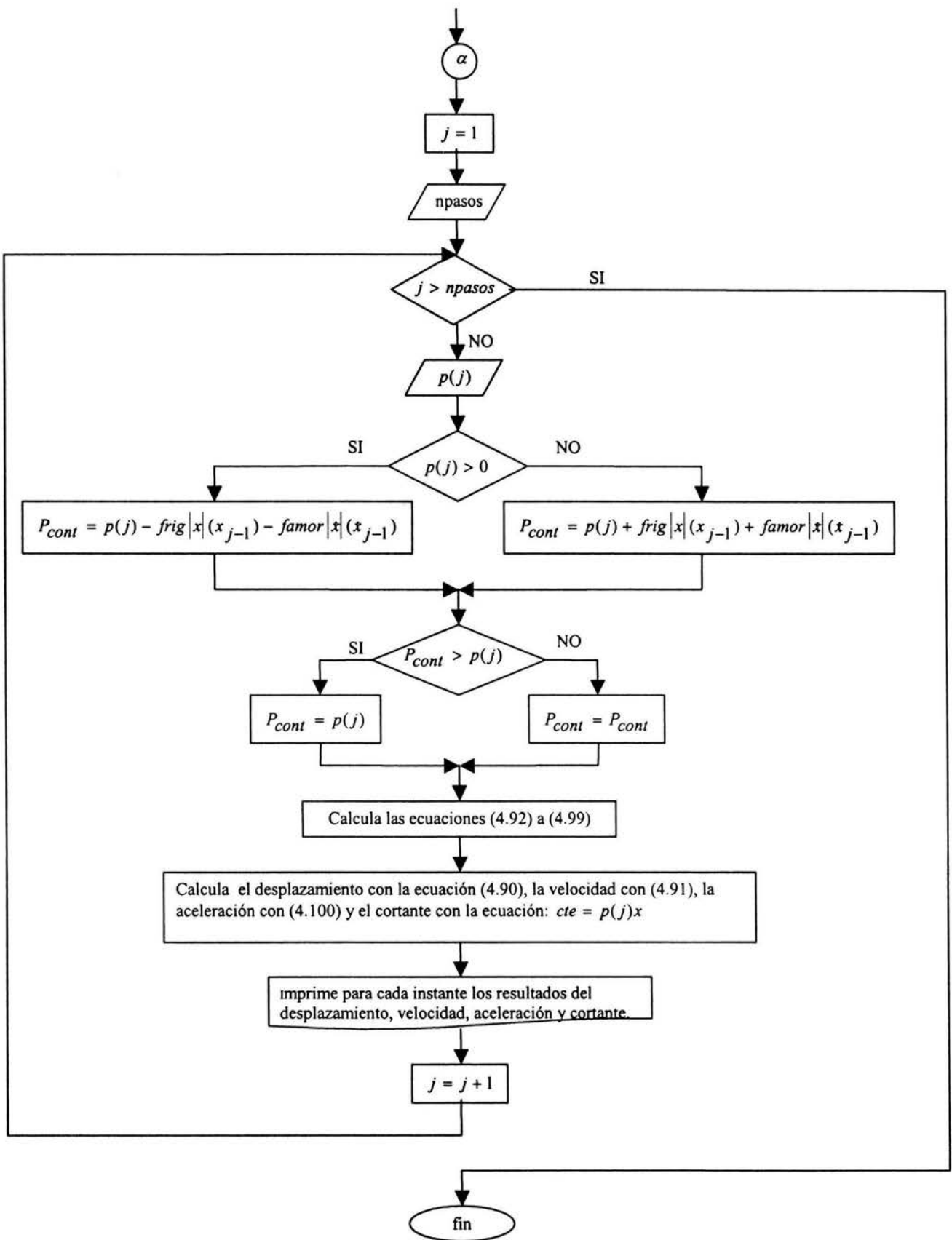


Figura 4.20. Continuación del diagrama de flujo del algoritmo de control con doble diagonal.

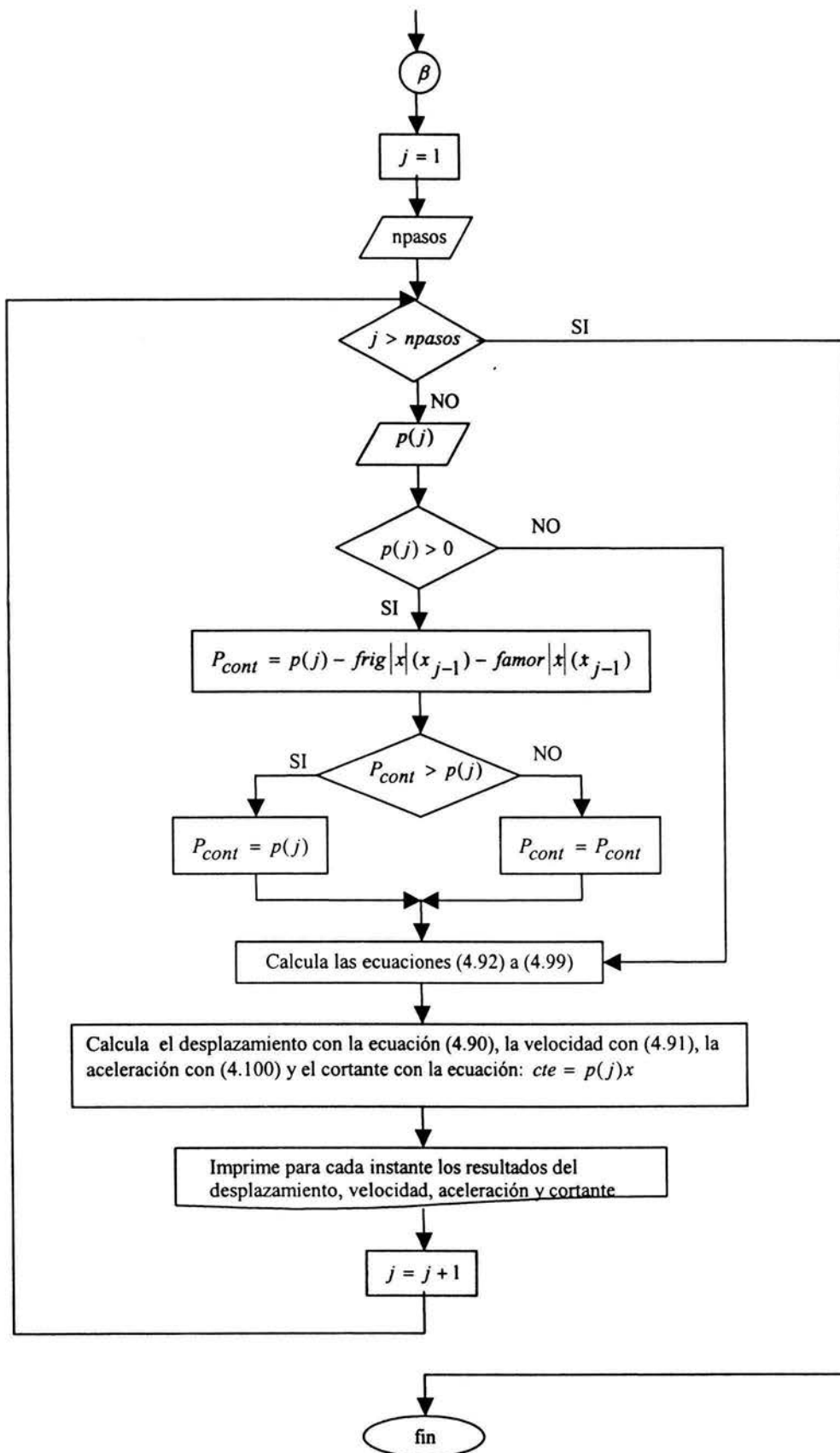


Figura 4.21. Continuación del diagrama de flujo del algoritmo de control con una diagonal a tensión.

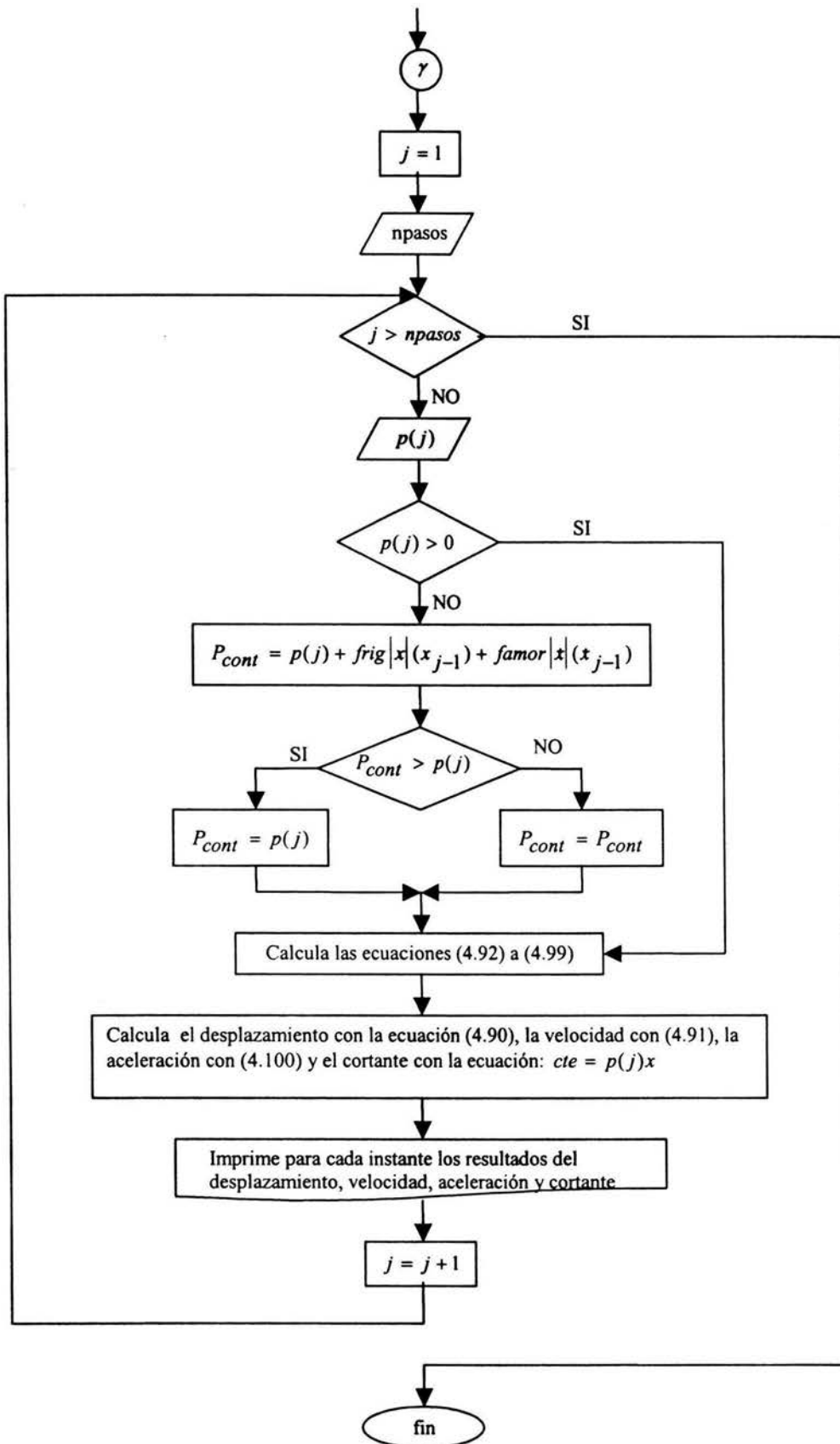


Figura 4.22. Continuación del diagrama de flujo del algoritmo de control con una diagonal a compresión

Los datos para el algoritmo son la rigidez del marco, peso, aceleración de la gravedad, factor de amortiguamiento, número puntos del registro, el intervalo de tiempo de las excitaciones, la rigidez y amortiguamiento de control, el nombre del archivo del registro sísmico y la clave de análisis.

El programa calcula la masa, la frecuencia natural, la frecuencia natural amortiguada, el periodo fundamental de vibración, el coeficiente de amortiguamiento, la frecuencia de control con rigidez de control, la frecuencia de control con amortiguamiento de control. Además, calcula la respuesta sísmica de un sistema estructural con diagonales activas al considerar las siguientes claves de análisis:

Con la clave 1 ( control con doble diagonal ). Se controlan los desplazamientos y velocidades positivos y negativos. Dependiendo del signo que tenga la excitación en cada punto, se le sumará o restará la fuerza de control. Ésta se calcula con la rigidez y el amortiguamiento de control.

En la clave 2 (control con diagonal a tensión) se controlan sólo los desplazamientos y velocidades positivos ya que a cada punto de la excitación se le restará la fuerza de control. También como en la clave 1 sólo se considerará a la excitación menor o igual a la de sin control para calcular la respuesta sísmica.

La última clave es la 3 (control con diagonal a compresión), en ésta sólo se controlan los desplazamientos y velocidades negativos al sumar la fuerza de control a cada punto de la excitación.

Finalmente, con la nueva excitación (ya sea reducida o no), se calcula la historia de desplazamientos, velocidades, aceleraciones y cortantes basales de la estructura.

### 4.3 Modelo estructural

Se considera un grado de libertad que es el desplazamiento lateral  $x$  a lo largo del eje principal X. Los elementos del modelo son: las columnas que se consideraron axialmente inextensibles, la viga y dos diagonales activas.

Se estudiaron dos periodos fundamentales 0.5 s y 2 s. Con el objetivo de estudiar dos casos extremos. El primero corresponde a un modelo rígido y en el otro uno flexible.

La rigidez total del marco es la suma de las rigideces de sus columnas y se consideró como una constante igual a  $K_m = 24EI/h^3$ . Con el objetivo de analizar el efecto de la rigidez y el amortiguamiento de control de las diagonales activas en la respuesta del modelo. Se estudiaron diferentes valores de los parámetros de control.

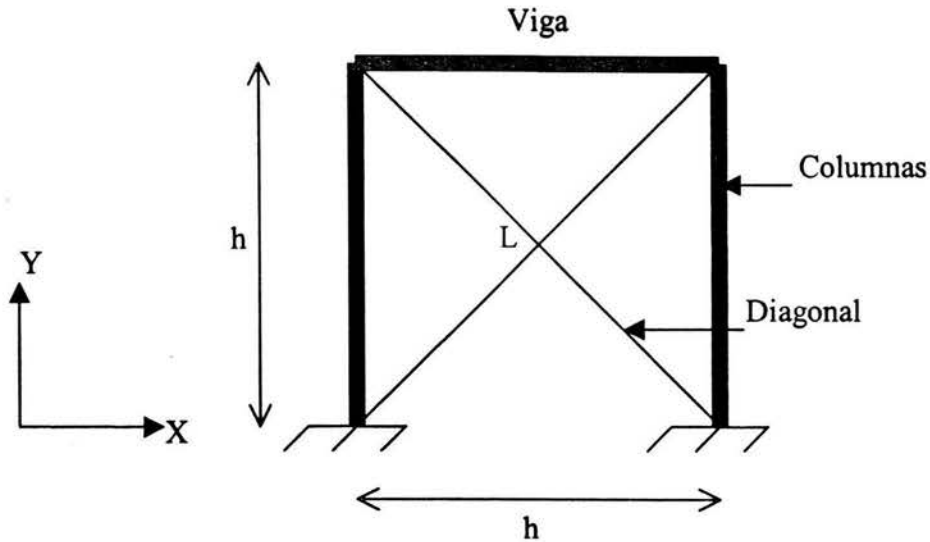


Figura 4.23. Modelo estructural estudiado.

Para cada caso estudiado, conocidos el periodo y la rigidez se calcula el peso de la estructura:

Para la estructura flexible,  $T = 2s$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{2} = 3.14 \text{ rad/s}$$

$$\omega^2 = \frac{K_m}{m} \Rightarrow m = \frac{K_m}{\omega^2}$$

$$m = \frac{100}{(3.14)^2} = 10.13 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 / \text{cm}$$

$$m = \frac{W}{g} \Rightarrow W = mg$$

$$W = 10.13 (981) = 9939.60 \text{ kg}$$

Para la estructura rígida,  $T = 0.5s$

$$\omega = \frac{2\pi}{0.5} = 12.56 \text{ rad/s}$$

$$m = \frac{100}{(12.56)^2} = 0.63 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 / \text{cm}$$

$$W = 0.63 (981) = 621.22 \text{ kg}$$



Además, en el modelo permanecerán constantes la aceleración de la gravedad,  $g = 981 \text{ cm/s}^2$  y la relación de amortiguamiento  $\xi = 0.05$ . Para diseño por sismo el valor común del amortiguamiento es 5% del crítico (Bruneau, 1993). En el diseño a base de espectros de respuesta también se emplea este valor.

Para el modelo con diagonales activas (figura 4.24), se tendrá que la diagonal trabajará a tensión, cuando el desplazamiento sea positivo (figura 4.24.a), y a compresión cuando se presente desplazamiento negativo (figura 4.24.b). Por lo tanto, se requieren dos diagonales que trabajen a tensión para controlar ambos desplazamientos (figura 4.24.c). Por esta razón, en todos los casos estudiados en este trabajo, se analiza al modelo con dos diagonales, con el propósito de poder controlar los desplazamientos positivos y negativos.

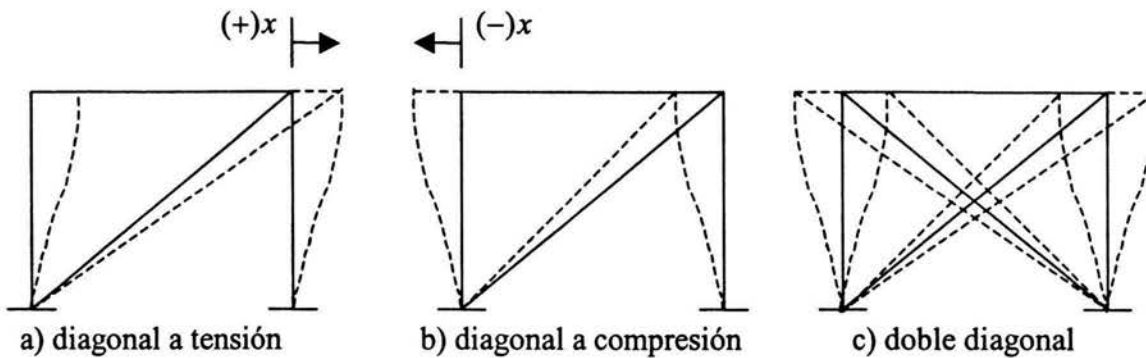


Figura 4.24. Casos de control con las diagonales activas.

#### 4.4 Registros sísmicos considerados

En cada caso se aplicaron tres registros sísmicos obtenidos en la ciudad de Mexico el 19 de septiembre de 1985. El primero corresponde a la zona de terreno blando (SCT) está definido por 9000 puntos a cada 0.02s (figura 4.25). El segundo se obtuvo en zona de transición (VIV) y consta de 3000 puntos a cada 0.02s (figura 4.26), y finalmente se tiene un registro en suelo duro (CU) definido por 7315 puntos a cada 0.01s (figura 4.27). En todos los casos se usó el componente más intenso. Para el primero y segundo registros fue el Este-Oeste, mientras que en el tercero se empleó el Norte-Sur.

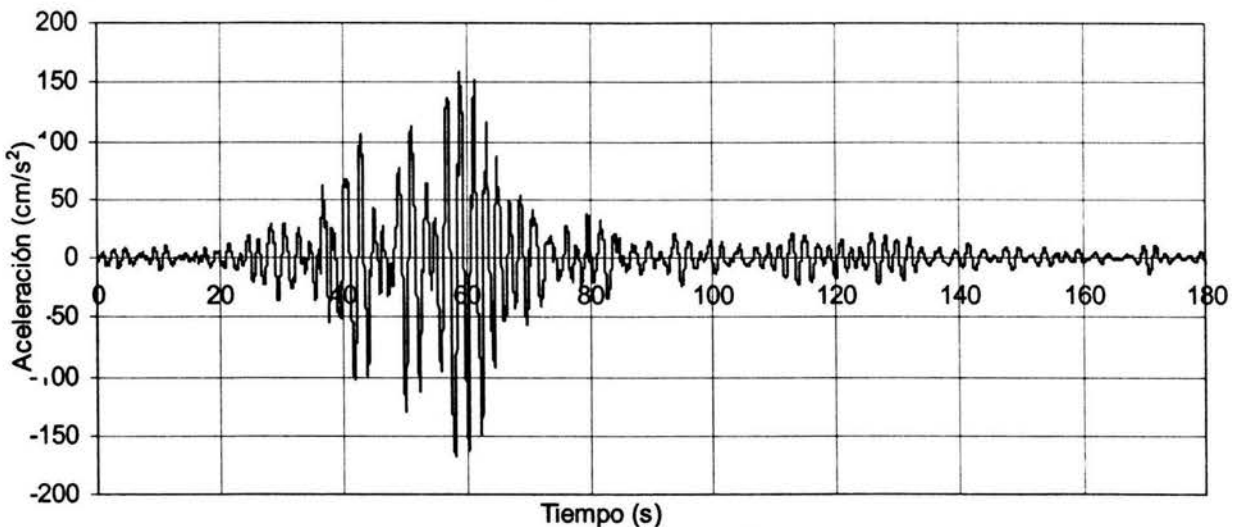


Figura 4.25. Acelerograma del sismo de 1985 en suelo blando (SCT), dirección Este-Oeste.

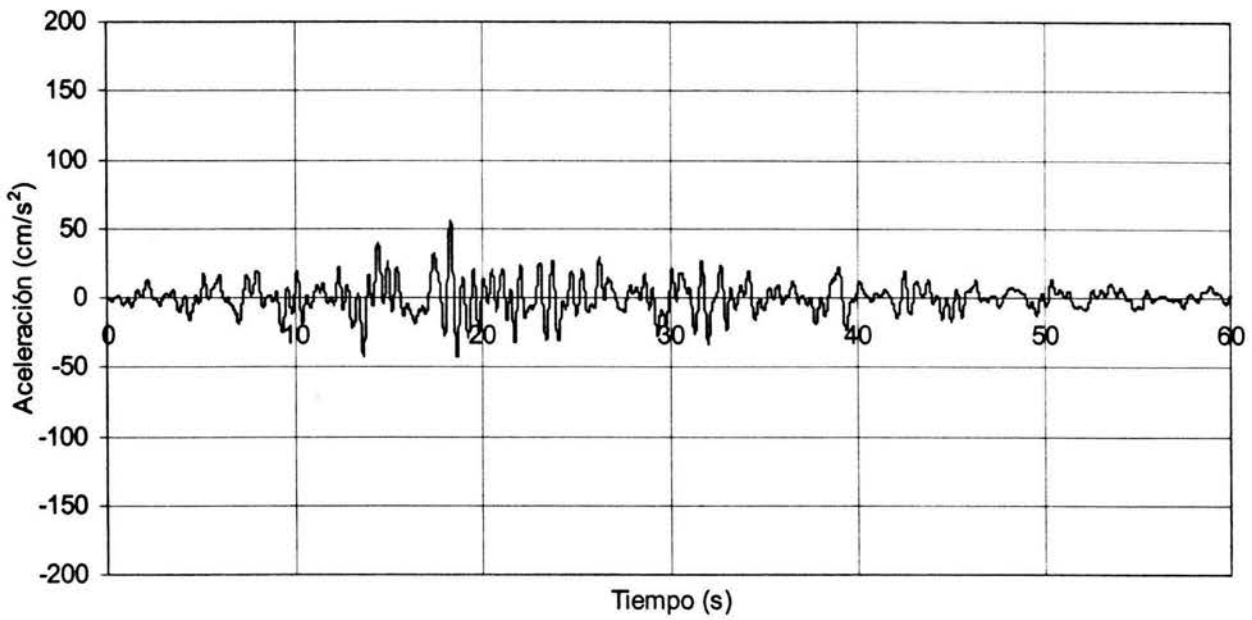


Figura 4.26. Acelerograma del sismo de 1985 en suelo de transición (VIV), dirección Este-Oeste.

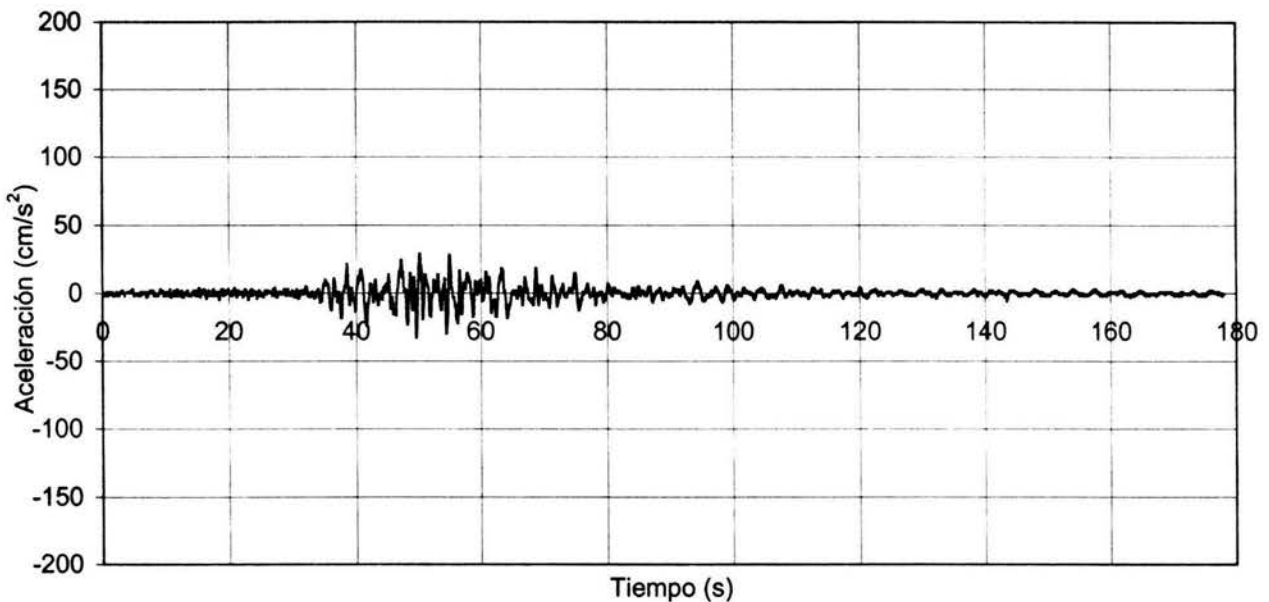


Figura 4.27. Acelerograma del sismo de 1985 en suelo duro (CU), dirección Norte-Sur.

#### 4.5 Aplicación del programa para calcular la respuesta sísmica

El programa se calibró con un ejemplo (Craig, 1981) que consiste en un sistema de un grado de libertad que tiene las siguientes características:

$$K = 40 \frac{lb}{in}$$

$$W = 38.6 \text{ lb}$$

$$\omega_n = 20 \frac{rad}{s}$$

$$\Delta t = 0.02 \text{ s}$$

$$g = 386 \frac{in}{s^2}$$

$$c = 0$$

$$\omega_d = \omega_n$$

$$\beta = 0$$

$$p(t) = 10 \cos(10t) \text{ (lb)}$$

En este ejemplo no se aplica control, por lo que los datos de rigidez ( $Kd$ ) y amortiguamiento de control ( $Ka$ ) son nulos, y la clave de análisis no importa, ya que los parámetros de las diagonales activas no tienen efecto.

Craig (1981) presenta los resultados que se anotan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resultados del análisis de un sistema de un grado de libertad (Craig, 1981).

t (seg)	P	A	B	C	D	A'	B'	C'	D'	des (in)	vel (in/s)	acel (in/s <sup>2</sup> )
0	10	0.0131	0.0065	0	0	0.9604	0.9671	0	0	0	0	0
0.02	9.8007	0.0129	0.0061	0.0181	0.0375	0.9412	0.9088	-0.1527	1.7753	0.0196	1.9274	92.1588
0.04	9.2106	0.0121	0.0055	0.0687	0.0676	0.8845	0.8144	-0.5805	3.1985	0.0745	3.4727	68.1925
0.06	8.2534	0.0108	0.0046	0.1417	0.0841	0.7926	0.6875	-1.1979	3.9762	0.1538	4.3170	30.5816
0.08	6.9671	0.0091	0.0036	0.2221	0.0829	0.6691	0.5331	-1.8783	3.9222	0.2412	4.2583	-13.9311
0.1	5.4030	0.0071	0.0024	0.2927	0.0632	0.5189	0.3576	-2.4748	2.9899	0.3178	3.2461	-57.4305
0.12	3.6236	0.0048	0.0011	0.3365	0.0271	0.3480	0.1677	-2.8456	1.2817	0.3654	1.3915	-92.1142
0.14	1.6997	0.0022	-0.0002	0.3403	-0.0204	0.1632	-0.0288	-2.8777	-0.9654	0.3695	-1.0482	-111.5615
0.16	-0.2920	-0.0004	-0.0015	0.2965	-0.0722	-0.0280	-0.2242	-2.5075	-3.4160	0.3220	-3.7088	-111.7850
0.18	-2.2720	-0.0030	-0.0028	0.2049	-0.1202	-0.2182	-0.4106	-1.7325	-5.6882	0.2224	-6.1757	-91.8963
0.2	-4.1615	-0.0055	-0.0039	0.0727	-0.1567	-0.3996	-0.5807	-0.6145	-7.4141	0.0789	-8.0495	-54.2808

Al introducir los datos al programa se obtienen los siguientes resultados:

```

cálculo de la respuesta sísmica
rigidez = 40.00
peso = 38.60
g = 386.00
factor de amortiguamiento = .00 %
número de pasos = 11
Δt = .020
rigidez de control = .00
amortiguamiento de control = .00

frecuencia natural = 20.00 Hz
frecuencia natural amortiguada = 20.00 Hz
periodo fundamental = .31 s
frecuencia de control con rigidez = .000 Hz
frecuencia de control con amortiguamiento = .000 Hz
    
```

punto	p(t)	p(t)cont	desplazamiento	velocidad	aceleración	cortante basal
1	10.000	.000	.000	.000	.000	.000
2	9.801	9.801	.020	1.927	92.159	.192
3	9.211	9.211	.075	3.473	68.193	.687
4	8.253	8.253	.154	4.317	30.582	1.269
5	6.967	6.967	.241	4.258	-13.931	1.680
6	5.403	5.403	.318	3.246	-57.431	1.717
7	3.624	3.624	.365	1.392	-92.114	1.324
8	1.700	1.700	.369	-1.048	-111.562	.628
9	-.292	-.292	.322	-3.709	-111.785	-.094
10	-2.272	-2.272	.222	-6.176	-91.896	-.505
11	-4.161	-4.161	.079	-8.049	-54.281	-.328

```

desplazamiento máximo = .369
velocidad máxima = -8.049
aceleración máxima = -111.785
cortante basal máximo = 1.717
    
```

Al comparar los resultados de la Tabla 4.1 con los obtenidos mediante el programa, se puede observar que ambos son iguales, las diferencias observadas se pueden atribuir al efecto de redondeo de decimales.

#### 4.6 Casos estudiados

##### Caso 1: Modelo flexible desplantado en suelo blando

En este caso se estudia un modelo flexible. Por eso se considera un periodo fundamental de 2 s y que está desplantado en un suelo blando como los suelos arcillosos de la ciudad de México. Como se mencionó, el modelo tiene una rigidez constante ( $K_m = 100$  kg/cm) y un peso de 9939.6 kg, además está localizado en la zona III, por lo que se aplica el registro sísmico de 1985 en suelo blando, SCT, en su componente más intensa (Este-Oeste).

El efecto del control se consideró variando los valores de rigidez de control desde cero hasta cien veces el valor de la rigidez del modelo. El amortiguamiento de control ( $K_a$ ) se hizo variar desde cero hasta diez veces el valor de la rigidez del modelo.

##### Caso 2: Modelo flexible desplantado en suelo de transición

Se estudia un modelo con rigidez, periodo fundamental y peso iguales a los del Caso 1, desplantado en un suelo de transición, por lo que se aplica el registro sísmico de 1985, VIV, en su componente más intensa (Este-Oeste).

Los valores de rigidez de control considerados fueron iguales a los del Caso 1 solo que se agregaron los valores de 200, 1500, 1600, 1650 y 1700 kg/cm. Para el amortiguamiento de control se consideraron los mismos valores del caso anterior pero agregando los de 50 y 600 kg·s/cm.

##### Caso 3: Modelo flexible desplantado en suelo duro

En este caso se considera la rigidez, el periodo fundamental y el peso iguales a los del Caso 1, solo que el modelo está desplantado en un suelo duro, por lo que se aplica el registro sísmico de 1985, CU, en su componente más intensa (Norte-Sur).

La rigidez de control se consideró con los mismos valores del caso 1 pero aumentando los de 200, 1200 y 1300 kg/cm. Los valores del amortiguamiento de control que se aplicaron a este caso son los mismos del caso 2.

##### Caso 4: Modelo rígido desplantado en suelo blando

El modelo tiene un periodo fundamental de 0.5 s y está desplantado en un suelo blando, su rigidez es igual a la de los casos anteriores y el peso es de 621.22 kg. Se aplica el registro sísmico SCT, en la componente Este-Oeste.

Además de los valores de rigidez de control del Caso 1 se agregan los de 150, 200, 300 y 400 kg/cm y se eliminan los de 1250 y 2000 kg/cm. Para el amortiguamiento de control se consideraron los valores de 0 a  $K_m$ .

**Caso 5: Modelo rígido desplantado en suelo de transición**

Modelo con rigidez, periodo fundamental y peso iguales a los del caso 4. Se encuentra desplantado en un suelo igual al del caso 2, por lo que también se le aplica ese registro sísmico.

**Caso 6: Modelo rígido desplantado en suelo duro**

Modelo con rigidez, periodo fundamental y peso iguales a los del caso anterior. Está desplantado en un suelo igual al del caso 3, el registro sísmico aplicado es igual al del caso mencionado.

Los valores para la rigidez de control son iguales a los del caso 5 aumentando los valores de 140 y 150 kg/cm. El amortiguamiento de control toma valores de: 10, 20 50 y 100 kg-s/cm.

## 5 RESULTADOS

Se estudió la variación de los valores de la rigidez y el amortiguamiento de control de las diagonales activas, para obtener una pareja de valores que produjera un control aceptable de la respuesta sísmica del modelo estructural.

Los resultados obtenidos de desplazamiento, velocidad, aceleración y cortante basal máximos, se graficaron tomando como eje de las ordenadas la rigidez de control, y eje de las abcisas al resultado obtenido de la respuesta sísmica. Los valores de amortiguamiento de control se tomaron como distintas series.

También se realizaron gráficas del porcentaje de desplazamiento, velocidad, aceleración y cortante, que se controla calculado como:

$$\% \text{ controlado} = \left[ 1 - \frac{cont}{scont} \right] \times 100 \quad (5.1)$$

donde:

*cont* = el resultado obtenido con el efecto del control que proporciona *Kd* y *Ka* (desplazamiento, velocidad, aceleración o cortante basal)

*scont* = resultado obtenido sin control

### 5.1 Caso 1: Modelo flexible desplantado en suelo blando

Para el sistema sin control se obtiene que el valor del desplazamiento máximo es igual a 9.72 cm, la velocidad máxima es 29.29 cm/s, la aceleración máxima es 90.22 cm/s<sup>2</sup> y el cortante basal máximo vale 1383.14 kg.

En las figuras 5.1 a 5.48 se presenta el efecto de variar la rigidez y el amortiguamiento de control sobre los valores máximos de la respuesta (desplazamiento, velocidad, aceleración o cortante basal).

De los resultados obtenidos en este caso (figuras 5.1 a 5.8) se observa que el comportamiento del desplazamiento, velocidad, aceleración y cortante basal son muy similares entre sí.

Cuando sólo se toma en cuenta el amortiguamiento de control y éste es mayor a cero pero menor o igual a 300 kg-s/cm la respuesta sísmica disminuye notablemente. Con este valor de *Ka* se reduce el desplazamiento, velocidad y aceleración en un 80 %, y el cortante basal en un 90 %. Como puede observarse en las figuras, estos resultados son todavía menores a los que se obtienen con sólo considerar a la rigidez de control.

Con el valor de amortiguamiento antes mencionado, el efecto de la rigidez de control hasta 10 kg/cm tiene un efecto nulo en el control. Para valores de *Kd* mayores a 10 kg/cm el comportamiento es muy irregular ya que los resultados aumentan y disminuyen por lo que se puede decir que la efectividad del control es baja.

Al considerar juntos a la rigidez y al amortiguamiento de control en los intervalos  $0 < Kd \leq 1000$  kg/cm y  $0 < Ka \leq 100$  kg·s/cm se obtiene un buen control. Una pareja óptima de valores es  $Kd=2000$  kg/cm y  $Ka=200$  kg·s/cm. Con ésta, la reducción que se obtiene en desplazamiento y velocidad es del 90 %, para la aceleración 85 % y para cortante basal 95 %.

De los resultados obtenidos al considerar sólo a la rigidez o sólo al amortiguamiento de control, o a ambos se observa que la respuesta se puede controlar eficazmente. Los mejores resultados se obtienen cuando se toman en cuenta los dos parámetros. En las figuras 5.1 a 5.8 se observa que con solo considerar al amortiguamiento de control se consigue disminuir la respuesta a resultados bastante aproximados al efecto total por lo que podría considerarse solo a este parámetro de control.

Es por ello que a una estructura flexible desplantada en un suelo blando como el de la ciudad de México se le pueden colocar diagonales activas para controlar su respuesta ante un sismo como el de 1985. Esta opción es muy atractiva ya que los daños que sufriría la estructura ante un terremoto podrían eliminarse completamente.

## 5.2 Caso 2: Modelo flexible desplantado en suelo de transición

En este caso, para el modelo sin control se obtienen valores máximos de desplazamiento de 0.712 cm, velocidad de 2.56 cm/s, aceleración de 8.66 cm/s<sup>2</sup> y el cortante basal de 20.73 kg.

En las figuras 5.9 a 5.16 se puede observar que cuando el amortiguamiento de control es mayor a cero los resultados obtenidos van disminuyendo hasta que en 500 kg·s/cm el desplazamiento y velocidad que se controlan es el 70 %, aceleración 45 % y cortante basal 75 %. Con este amortiguamiento la gráfica que se obtiene al ir aumentando la rigidez de las diagonales tiende a ser una línea recta por lo que la rigidez de control ya no causa efecto en el control de la respuesta.

Cabe resaltar que al aumentar los valores de amortiguamiento de control hasta 500 kg·s/cm las gráficas tienden a converger en el punto donde el amortiguamiento es nulo y la rigidez vale 1650 kg/cm. En este valor, el desplazamiento se reduce al 60 %, velocidad 70 %, aceleración 55 % y cortante basal 80 %. Esto indica que puede tomarse en cuenta sólo la rigidez de control o sólo el amortiguamiento de control para reducir la respuesta máxima.

Si el amortiguamiento es mayor a 500 kg·s/cm los resultados se van acercando a los obtenidos sin control y el efecto de la rigidez de control es casi nulo. En el intervalo de cero a 10 kg/cm el efecto del control produce una línea recta que no ayuda a disminuir la respuesta, y si la rigidez de control es mayor a este valor el comportamiento es muy irregular.

Al considerar juntos la rigidez y el amortiguamiento de control se observa que en los intervalos  $0 < Kd \leq 1000$  kg/cm y  $0 < Ka \leq 200$  kg·s/cm se obtienen porcentajes de reducción de la respuesta de hasta el 50 %. Sin embargo, con 1000 kg/cm y 500 kg·s/cm se reduce aún más el desplazamiento y velocidad (75 %), aceleración (45 %) y cortante basal (85 %).

El efecto de usar por separado  $Kd$  y  $Ka$  en el control, requiere de mayores valores que los empleados en el caso anterior. Cuando se consideran juntos ambos parámetros, la rigidez de control es menor pero el amortiguamiento de control es mayor a los requeridos en el caso 1 para obtener los mayores porcentajes de control.

A una estructura flexible desplantada en suelo de transición se le puede controlar su respuesta reduciéndola hasta en un 50 % con diagonales activas. Con la opción de que podría considerarse sólo la rigidez de control o sólo el amortiguamiento de control para ello.

### 5.3 Caso 3: Modelo flexible desplantado en suelo duro

Al no tener control, se obtienen los valores máximos de 0.758 cm, 2.42 cm/s, 9.41 cm/s<sup>2</sup> y 19.25 kg para el desplazamiento, velocidad, aceleración y cortante basal, respectivamente..

En las figuras 5.17 a 5.24 se puede observar que se consigue un buen control con amortiguamiento entre el intervalo de cero a 600 kg·s/cm. En este valor disminuye 80 % el desplazamiento y la velocidad, 60 % la aceleración y 90 % el cortante basal. Si el amortiguamiento de control está fuera del intervalo antes mencionado el control ya es poco efectivo.

Para una estructura flexible que esté desplantada en un suelo duro se requerirá un mayor amortiguamiento de control que el requerido en los casos 1 y 2 para reducir su respuesta sísmica. Cuando se consideran juntos los parámetros de rigidez y amortiguamiento de control disminuye la respuesta hasta en 80 %.

### 5.4 Caso 4: Modelo rígido desplantado en suelo blando

Se obtiene un desplazamiento de 2.52 cm, una velocidad de 25.02 cm/s, una aceleración igual a 263.49 cm/s<sup>2</sup> y un cortante basal de 383.09 kg cuando el modelo está sin sistema de control.

Tomando únicamente la rigidez hasta 10 kg/cm (figuras 5.25 a 5.32), se reduce el desplazamiento en 10 % y la velocidad, aceleración y cortante basal en 30 %.

Al considerar la rigidez y el amortiguamiento sólo con los valores de 10 kg/cm y 15 kg·s/cm se reduce el desplazamiento en un 40 %, la velocidad en 50 % y el cortante basal en 60 %, pero la aceleración aumenta un 20 % debido a que ahora el amortiguamiento es el que no causa mucho efecto en el control.

Se aprecia un comportamiento muy irregular. Algunos resultados aumentan o disminuyen muy rápidamente e incluso exceden los que se obtienen cuando no hay control. Esto indica que el modelo con rigidez de 100 kg/cm, sólo necesita un 10 % adicional para reducir su respuesta que se le puede proporcionar con solo la rigidez de control que aportan las diagonales activas.

En este caso, a diferencia de los casos 1, 2 y 3 se muestra de manera más clara cómo se puede controlar a la estructura únicamente con la rigidez de control de las diagonales y sin tener la necesidad de agregar amortiguamiento de control.

### 5.5 Caso 5: Modelo rígido desplantado en suelo de transición

La respuesta del modelo sin control produce los valores máximos de 1.42 cm (desplazamiento), 17.44 cm/s (velocidad), 207.07 cm/s<sup>2</sup> (aceleración) y 56.97 kg (cortante basal).

Para este caso, en las figuras 5.33 a 5.40 se observa que un amortiguamiento mayor a 10 kg·s/cm ya no controla la respuesta y menos si aumenta la rigidez. Las gráficas son líneas rectas que tienen valores incluso mayores a los que se obtienen sin control.



---

---

Con una rigidez de 100 kg/cm disminuye 60 % el desplazamiento y el cortante basal, 55 % la velocidad y 30 % la aceleración. Esto muestra, al igual que en el caso anterior, que al aportar únicamente rigidez de control con las diagonales se puede controlar la respuesta de la estructura hasta en un 30 %.

Sin embargo, al considerar la rigidez y el amortiguamiento de control con los valores de 50 kg/cm y 1 kg·s/cm se obtiene una mayor reducción del desplazamiento y velocidad (65 %), aceleración (60 %) y cortante basal (85 %). Esta opción es interesante porque se necesita la mitad de rigidez de control que se emplea cuando sólo se controla con ésta, y al agregar una unidad de amortiguamiento de control se obtiene una mayor disminución en la respuesta de la estructura. A diferencia del caso 5, ahora en un suelo de transición, se requiere una mayor rigidez de control para reducir la respuesta.

### **5.6 Caso 6: Modelo rígido desplantado en suelo duro**

Cuando no hay control los valores máximos de desplazamiento, velocidad, aceleración y cortante basal son 0.579 cm, 4.58 cm/s, 48.59 cm/s<sup>2</sup>, y 17.51 kg.

En las figuras 5.41 a 5.48 se puede observar que la única manera de controlar a la estructura es mediante rigidez de control porque el amortiguamiento de control no causa ningún efecto. Al incluir el amortiguamiento de control los resultados obtenidos son mayores a los obtenidos sin control.

Con una rigidez de control de 140 kg/cm se consigue un alto porcentaje de disminución para el desplazamiento (60 %), velocidad (35 %) y cortante basal (80 %). La aceleración aumenta 10 % debido a que la fuerza de control es mayor a la excitación en este tipo de suelo.

La rigidez de control se puede reducir al tomar en cuenta también el amortiguamiento de control para disminuir la respuesta. Los porcentajes de control son menores, pero aproximados a los obtenidos cuando se controla sólo con rigidez de control. Con los valores de 10 kg/cm y 10 kg·s/cm se reduce el desplazamiento un 40 %, la velocidad en 30 %, el cortante basal 70 %, pero la aceleración aumenta un 15 %.

Al comparar estos resultados con los obtenidos en los casos 4 y 5 se observa que una estructura rígida desplantada en un suelo duro requiere una mayor rigidez que la que necesita cuando está desplantada en un suelo blando. Por lo que, en definitiva, se pueden controlar estructuras rígidas en los tres tipos de suelo de la ciudad de México con solo la rigidez de control que aportan las diagonales.

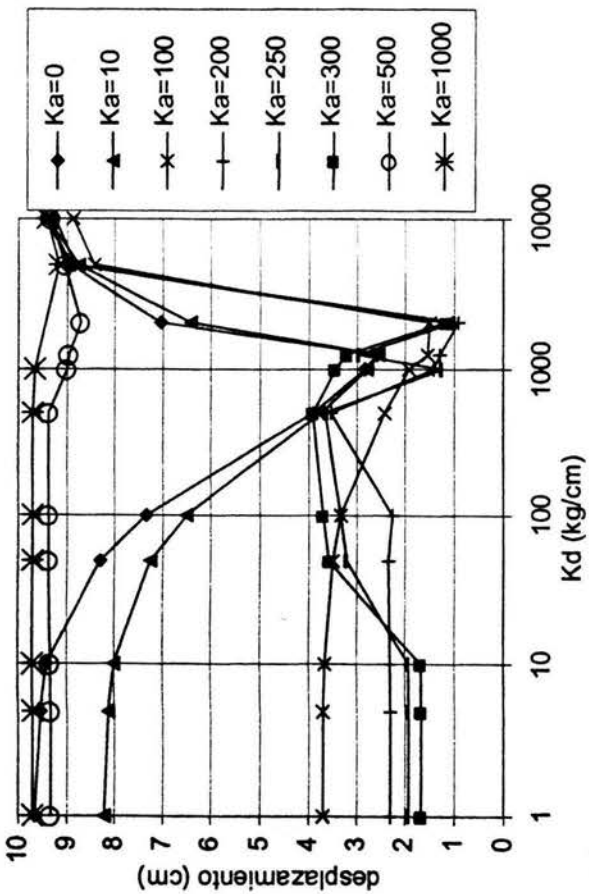


Figura 5.1. Desplazamiento para el Caso 1 T=2s y la excitación (SCT).

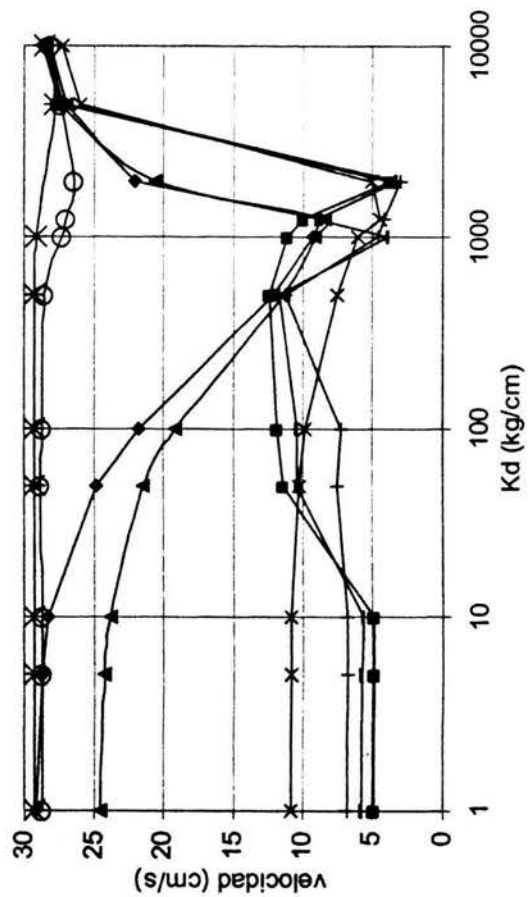


Figura 5.3. Velocidad para el Caso 1 T=2s y la excitación (SCT).

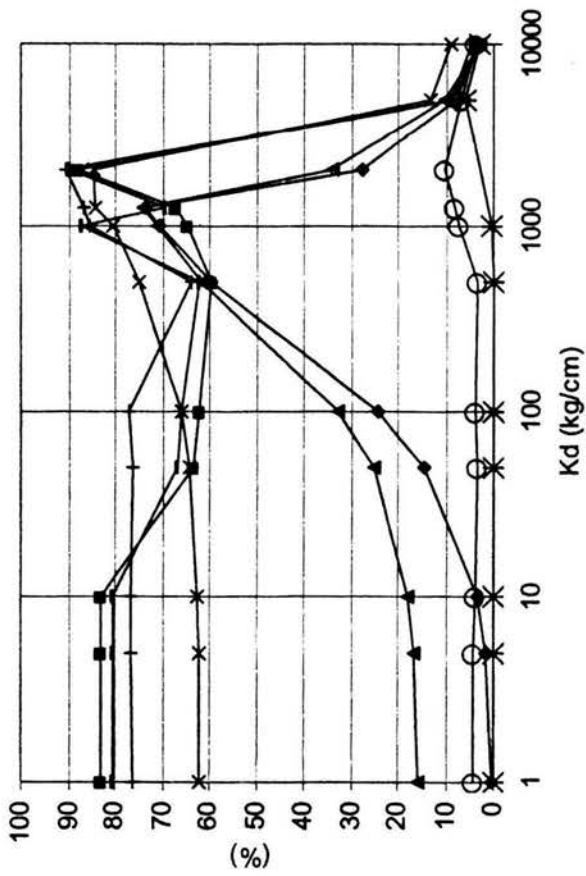


Figura 5.2. Porcentaje de desplazamiento que se controla para el Caso 1 T=2s y la excitación (SCT).

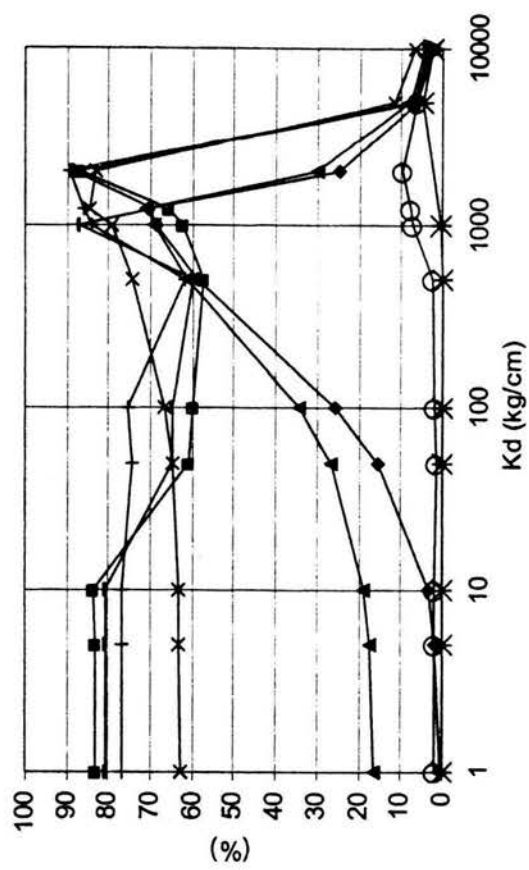


Figura 5.4. Porcentaje de velocidad que se controla para el Caso 1 T=2s y la excitación (SCT).

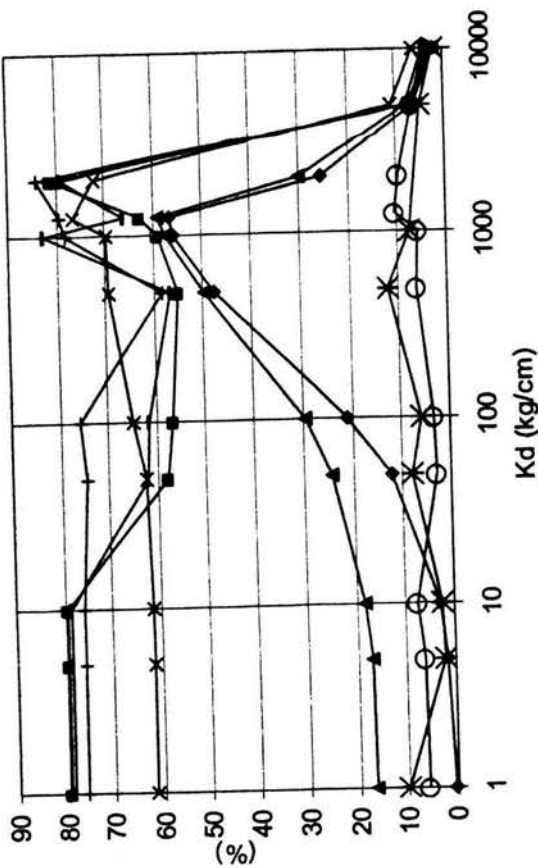


Figura 5.6. Porcentaje de aceleración que se controla para el Caso 1  $T=2s$  y la excitación (SCT).

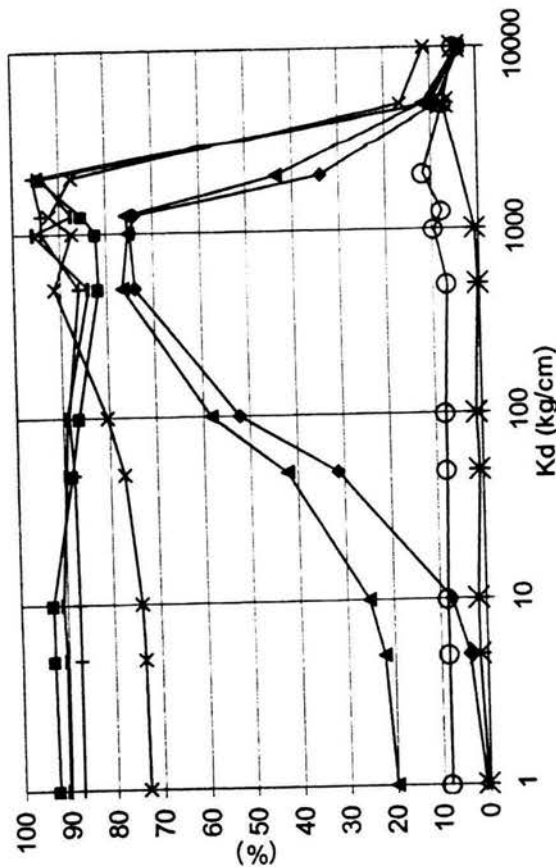


Figura 5.8. Porcentaje de cortante basal que se controla para el Caso 1  $T=2s$  y la excitación (SCT).

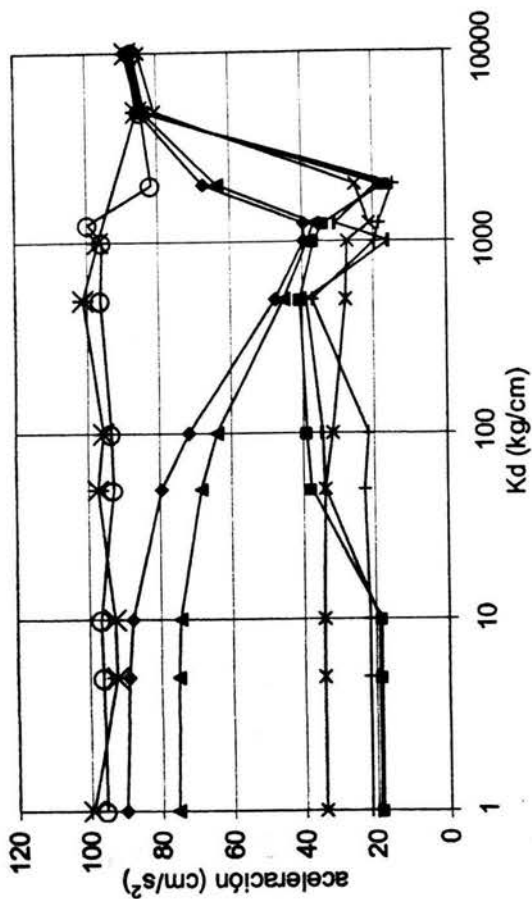


Figura 5.5. Aceleración para el Caso 1  $T=2s$  y la excitación (SCT).

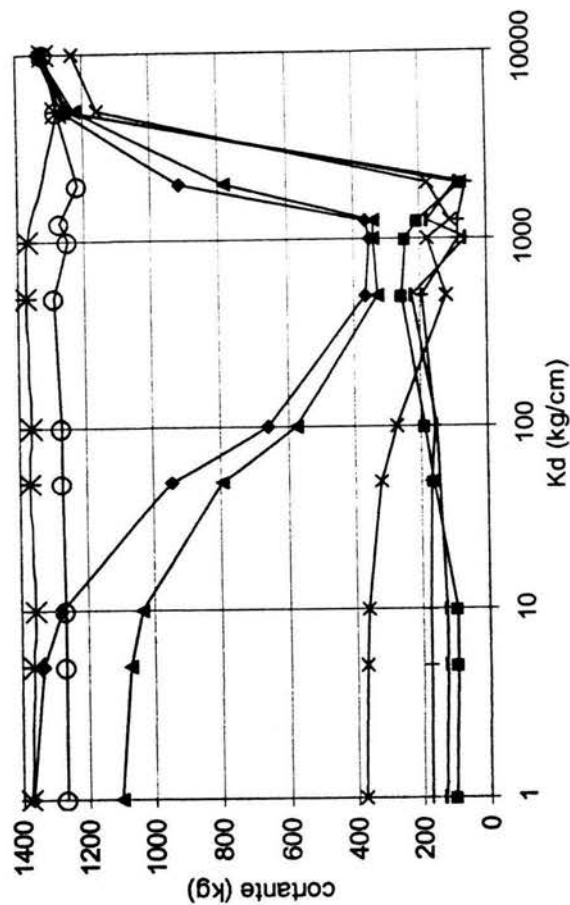


Figura 5.7. Cortante basal para el Caso 1  $T=2s$  y la excitación (SCT).

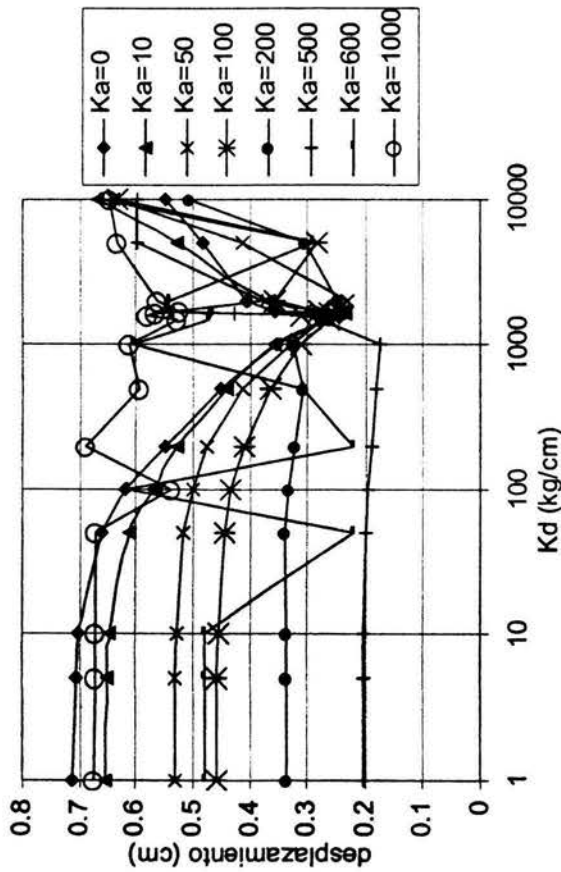


Figura 5.9: Desplazamiento para el Caso 2  $T=2s$  y la excitación (VIV).

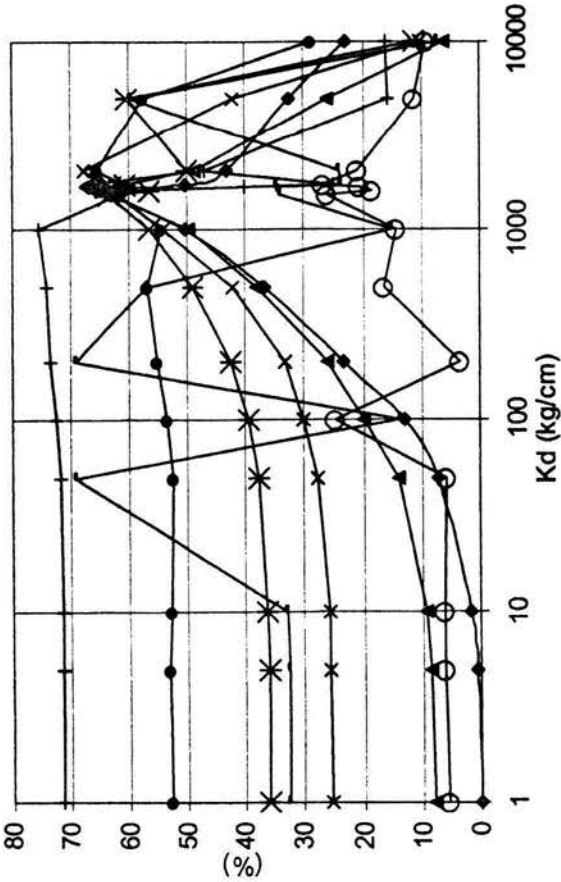


Figura 5.10. Porcentaje de desplazamiento que se controla para el Caso 2  $T=2s$  y la excitación (VIV).

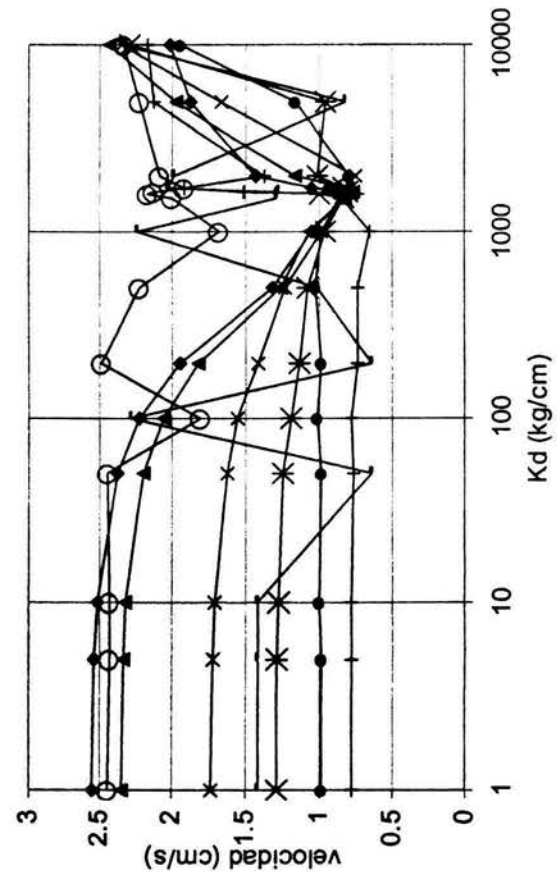


Figura 5.11. Velocidad para el Caso 2  $T=2s$  y la excitación (VIV).

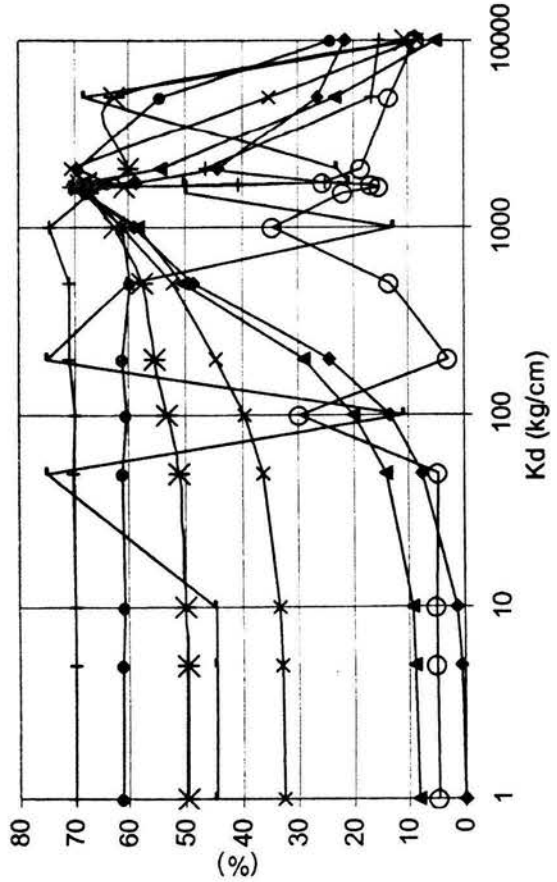


Figura 5.12. Porcentaje de velocidad que se controla para el Caso 2  $T=2s$  y la excitación (VIV).

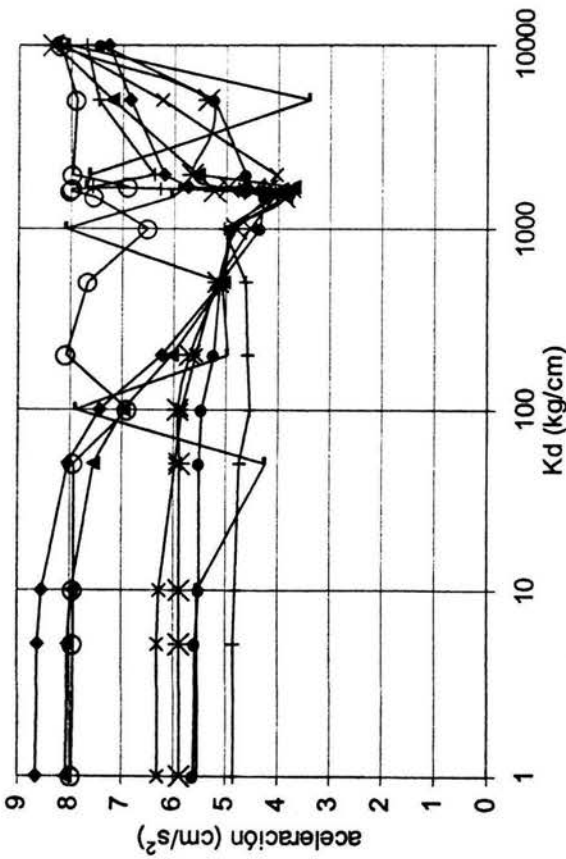


Figura 5.13: Aceleración para el Caso 2 T=2s y la excitación (VIV).

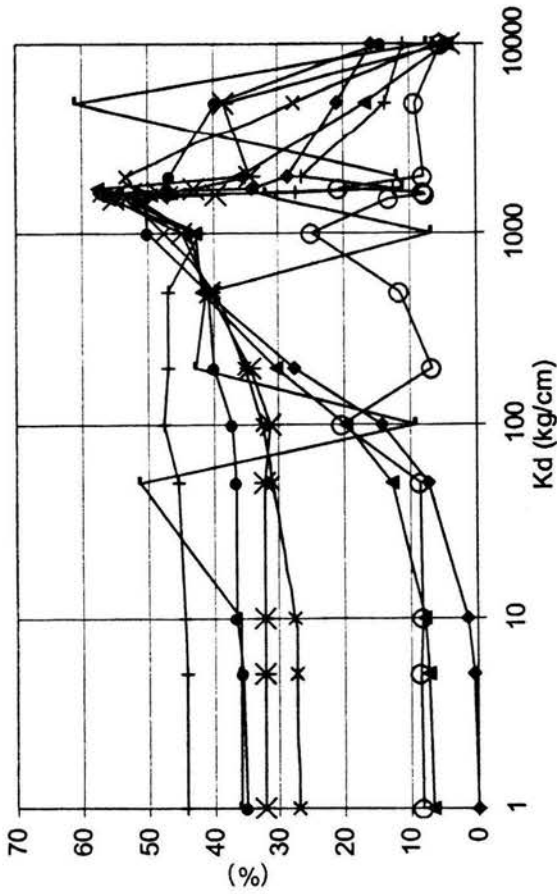


Figura 5.14. Porcentaje de aceleración que se controla para el Caso 2 T=2s y la excitación (VIV).

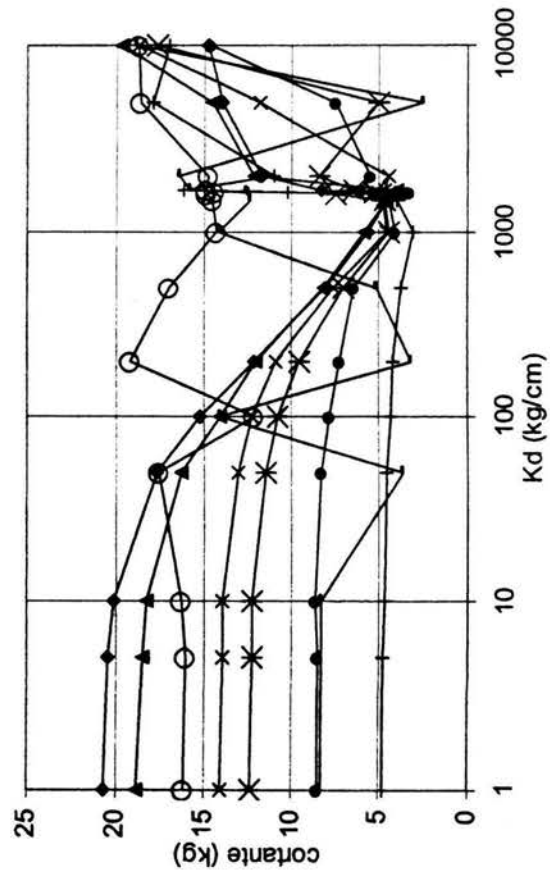


Figura 5.15. Cortante basal para el Caso 2 T=2s y la excitación (VIV).

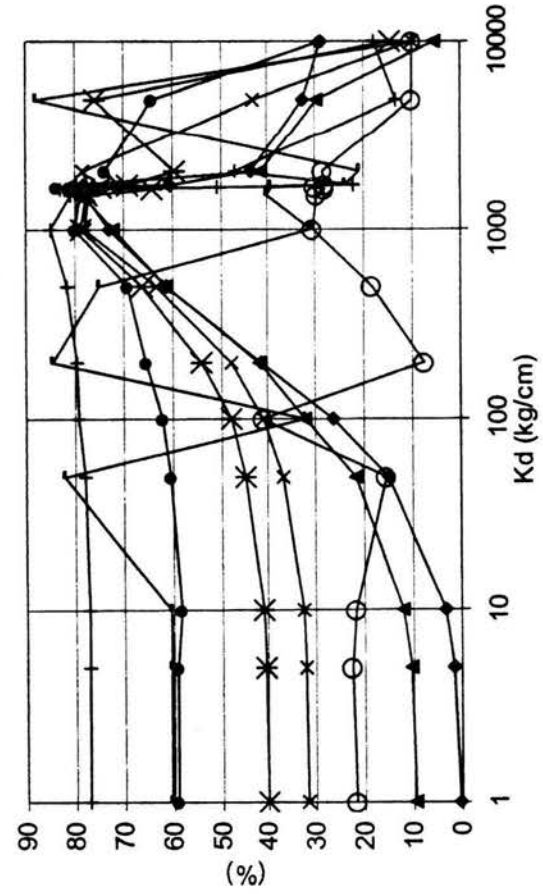


Figura 5.16. Porcentaje de cortante basal que se controla para el Caso 2 T=2s y la excitación (VIV).

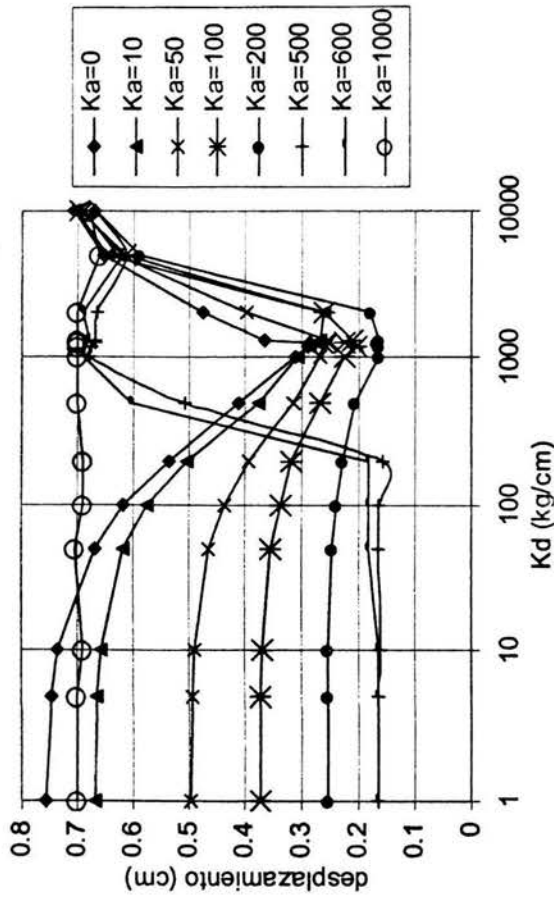


Figura 5.17. Desplazamiento para el Caso 3  $T=2s$  y la excitación (CU).

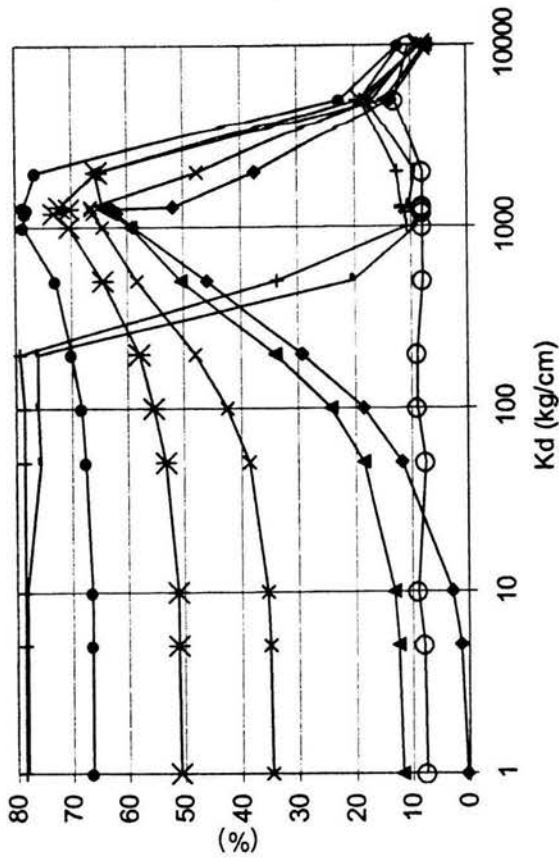


Figura 5.18. Porcentaje de desplazamiento que se controla para el Caso 3  $T=2s$  y la excitación (CU).

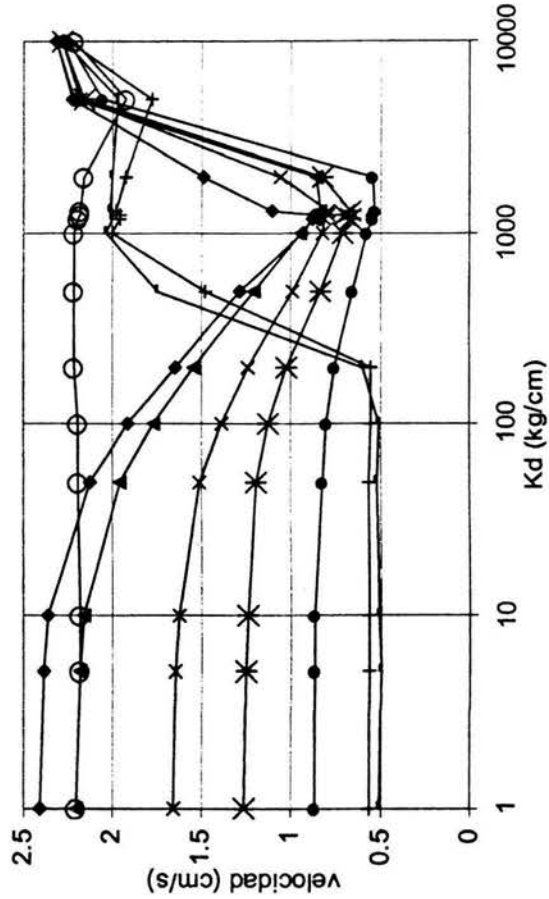


Figura 5.19. Velocidad para el Caso 3  $T=2s$  y la excitación (CU).

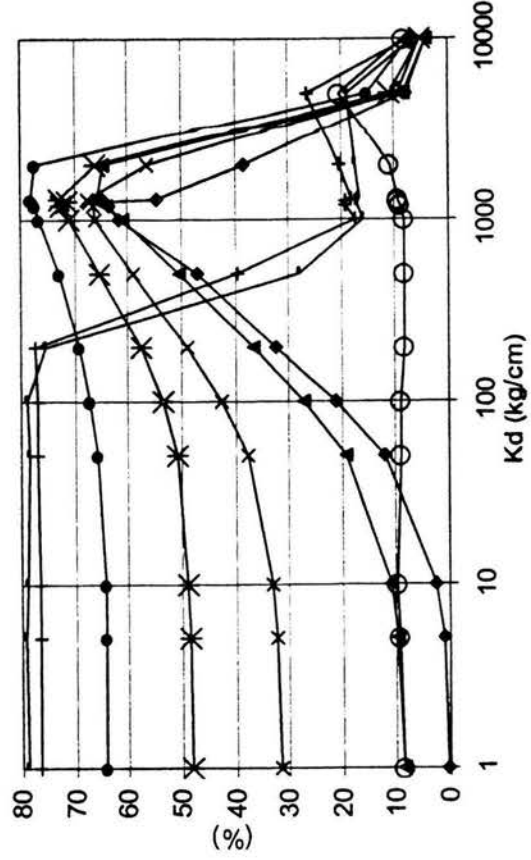


Figura 5.20. Porcentaje de velocidad que se controla para el Caso 3  $T=2s$  y la excitación (CU).

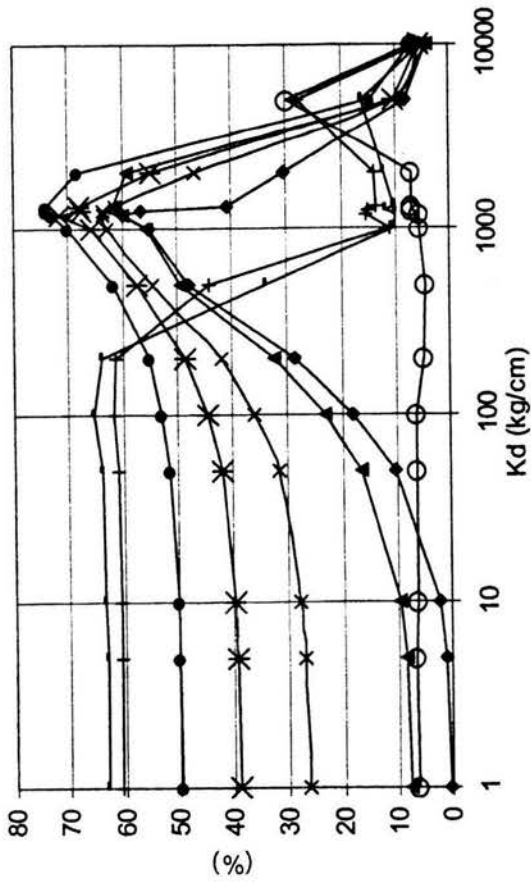


Figura 5.22. Porcentaje de aceleración que se controla para el Caso 3  $T=2s$  y la excitación (CU).

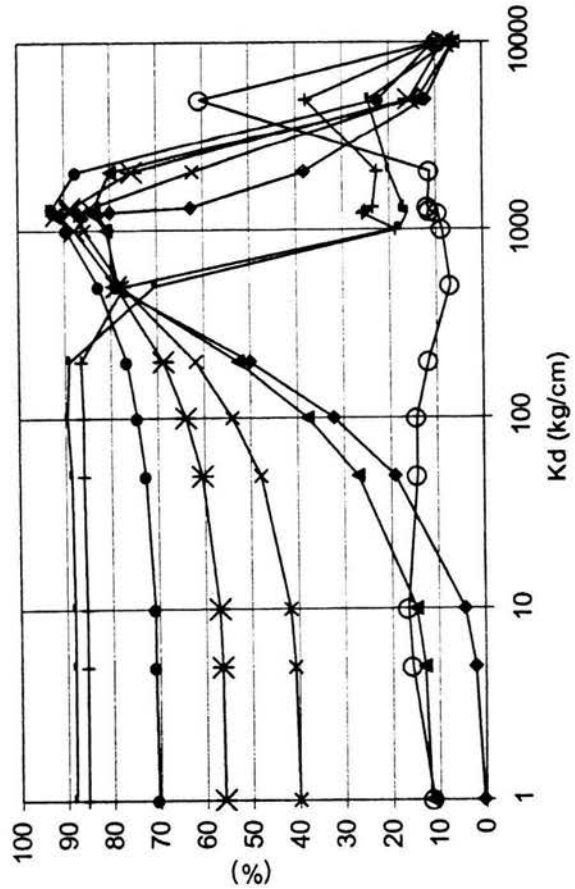


Figura 5.24. Porcentaje de cortante basal que se controla para el Caso 3  $T=2s$  y la excitación (CU).

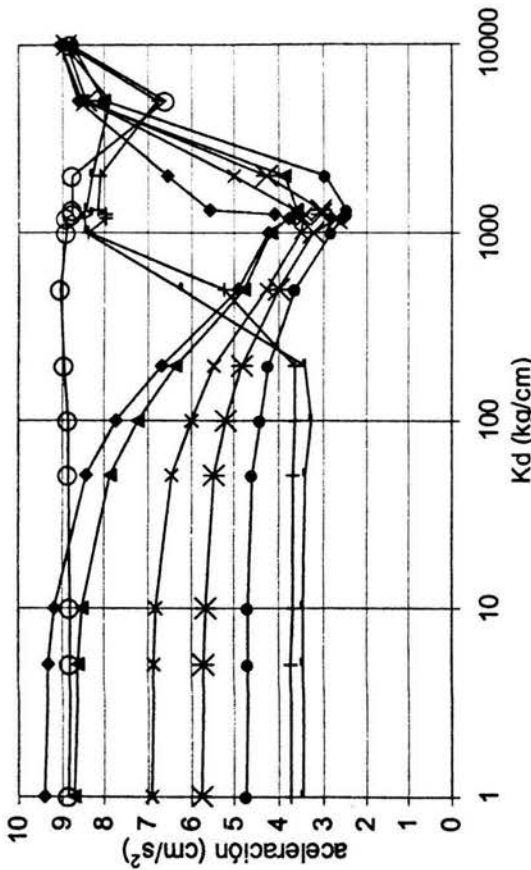


Figura 5.21. Aceleración para el Caso 3  $T=2s$  y la excitación (CU).

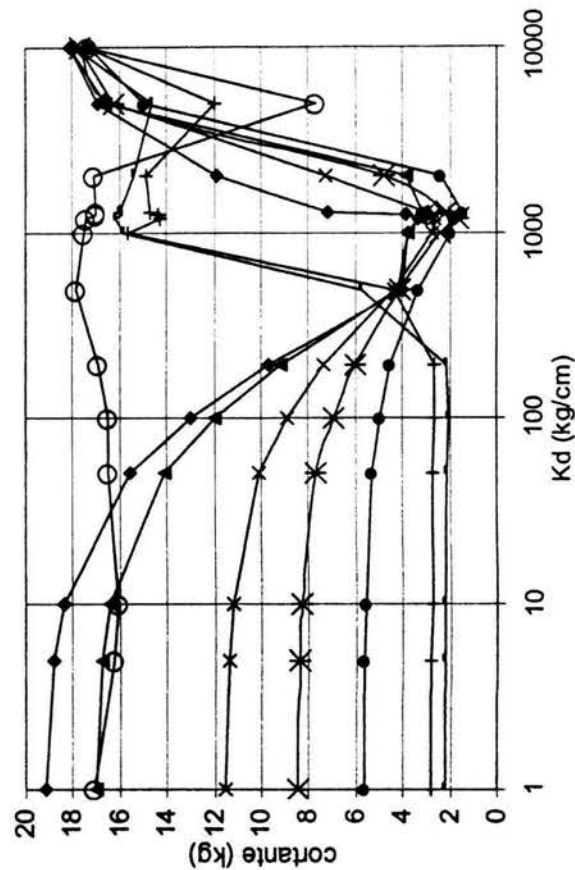


Figura 5.23. Cortante basal para el Caso 3  $T=2s$  y la excitación (CU).

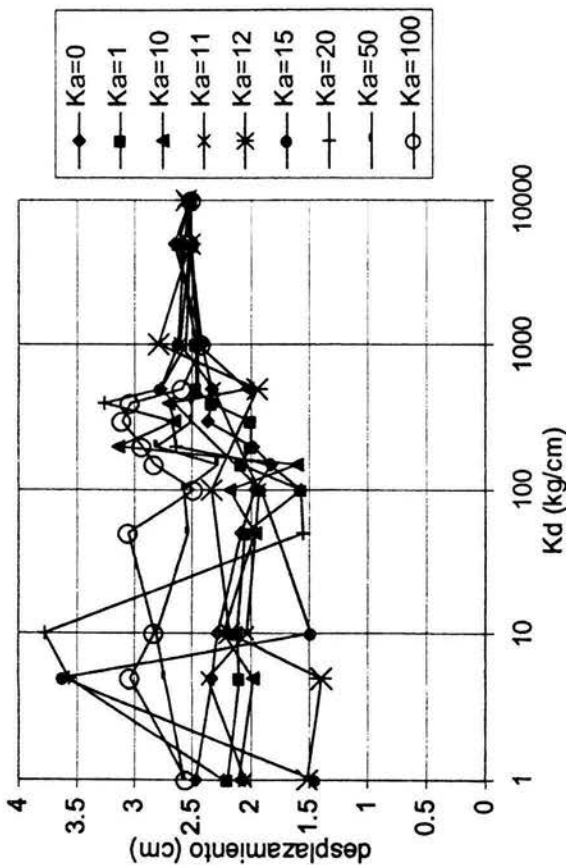


Figura 5.25. Desplazamiento para el Caso 4  $T=0.5s$  y la excitación (SCT).

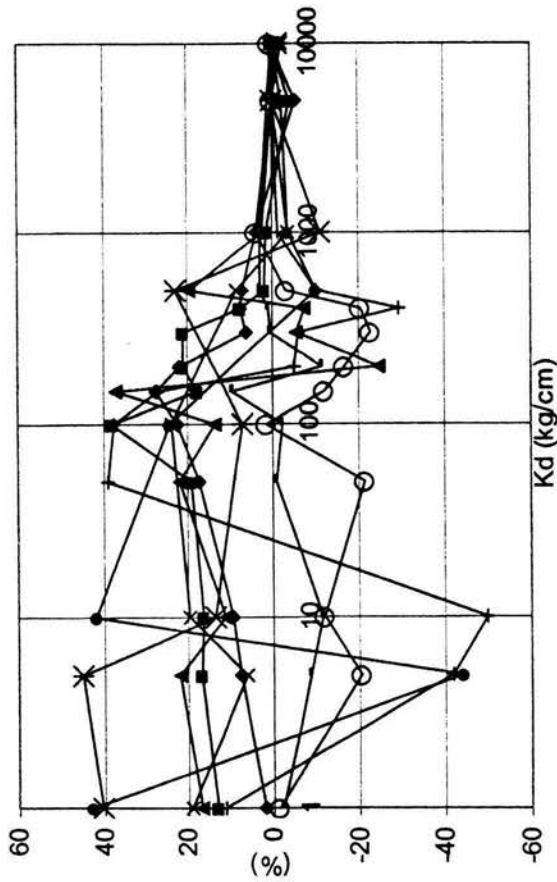


Figura 5.26. Porcentaje de desplazamiento que se controla para el Caso 4  $T=0.5s$  y la excitación (SCT).

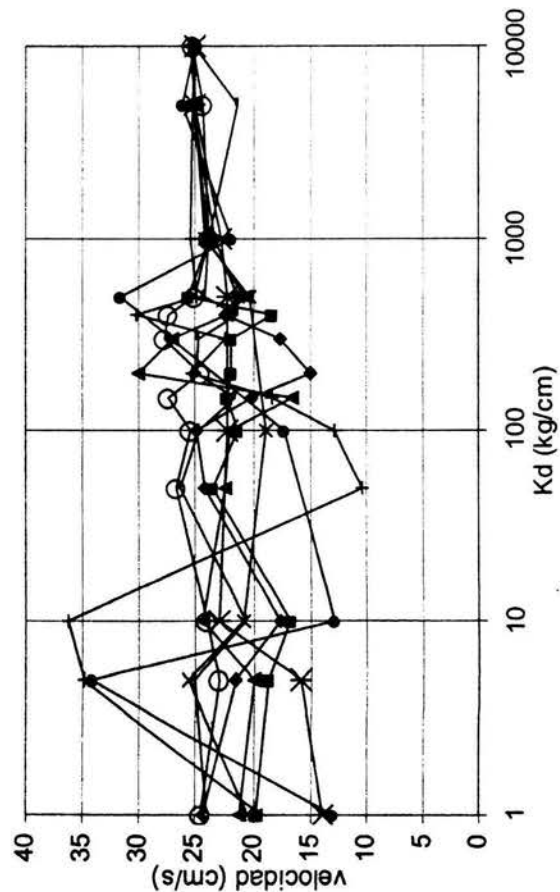


Figura 5.27. Velocidad para el Caso 4  $T=0.5s$  y la excitación (SCT).

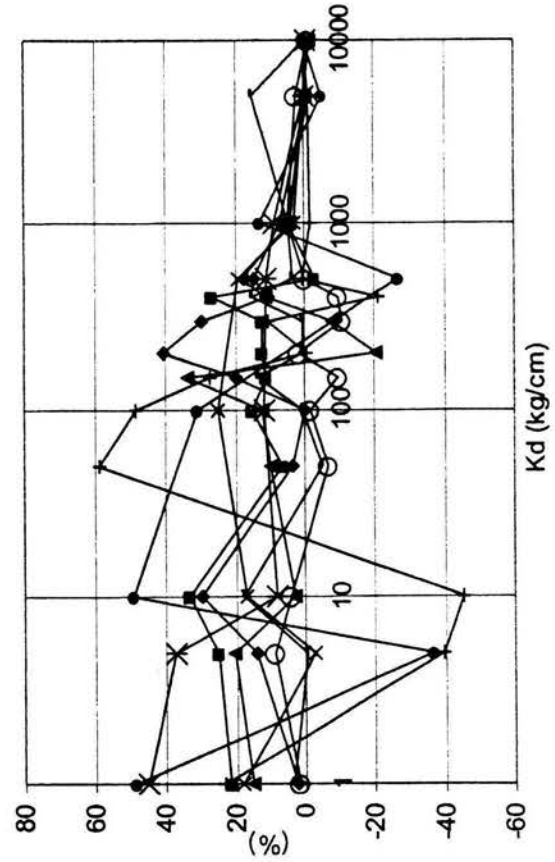


Figura 5.28. Porcentaje de velocidad que se controla para el Caso 4  $T=0.5s$  y la excitación (SCT).



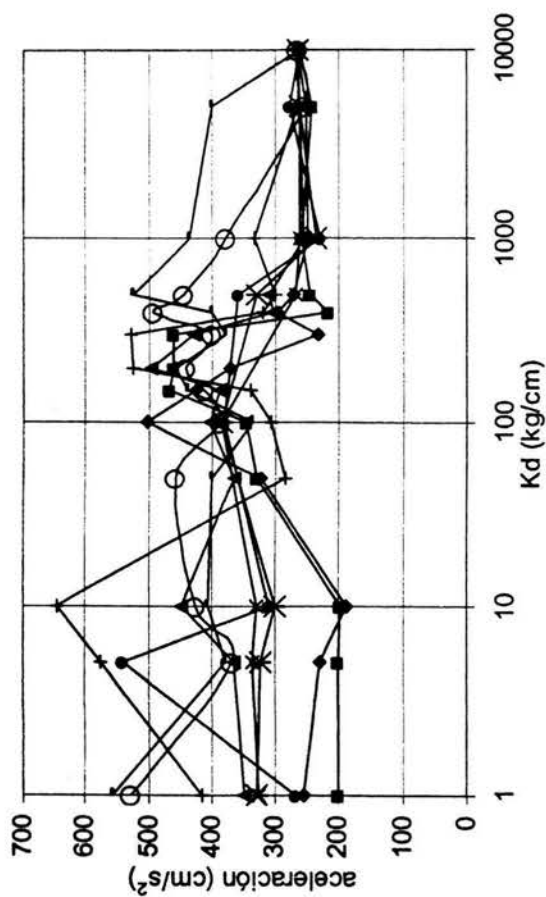


Figura 5.29. Aceleración para el Caso 4  $T=0.5s$  y la excitación (SCT).

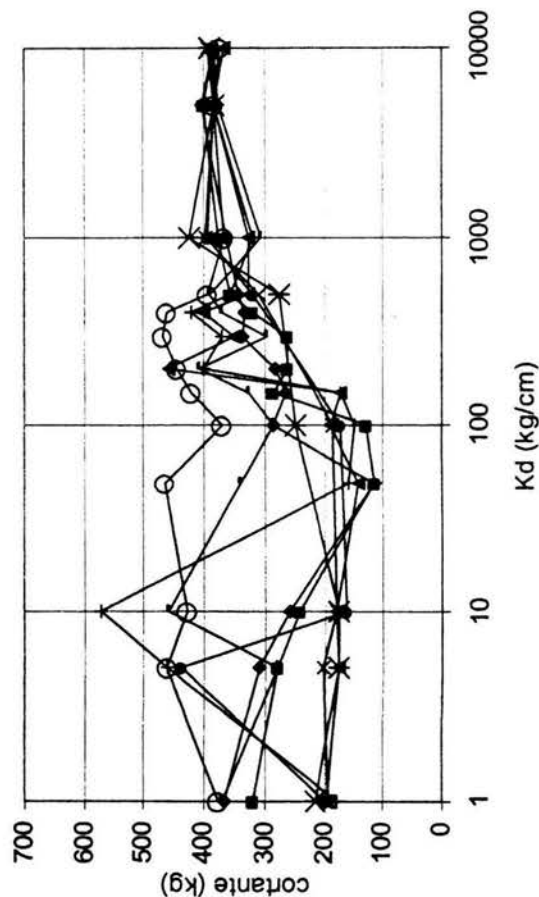


Figura 5.31. Cortante basal para el Caso 4  $T=0.5s$  y la excitación (SCT).

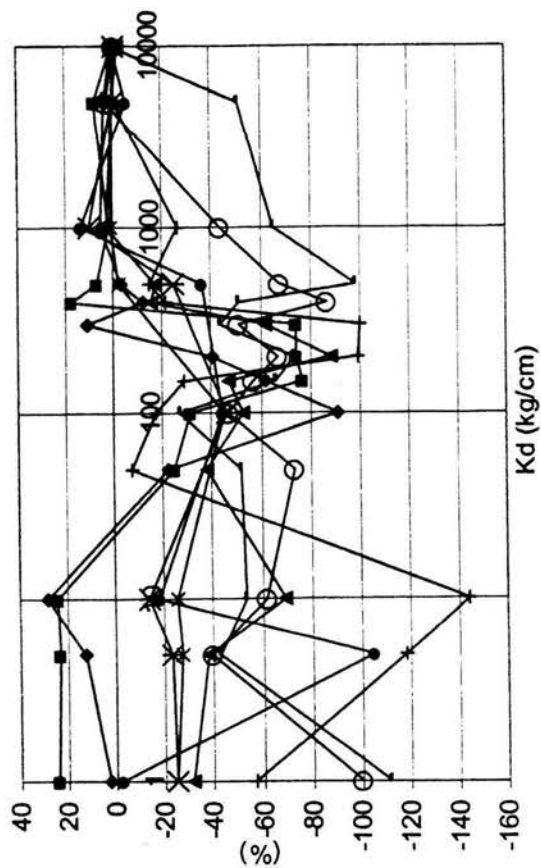


Figura 5.30. Porcentaje de aceleración que se controla para el Caso 4  $T=0.5s$  y la excitación (SCT).

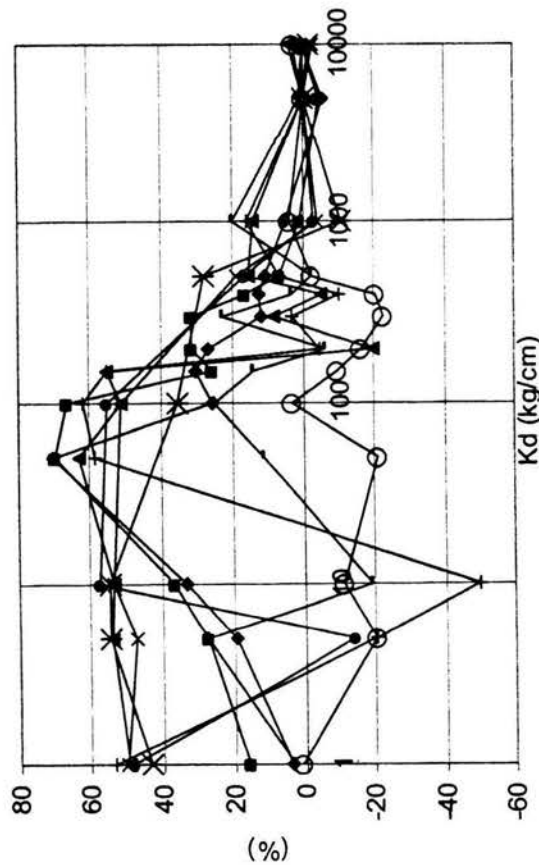


Figura 5.32. Porcentaje de cortante basal que se controla para el Caso 4  $T=0.5s$  y la excitación (SCT).

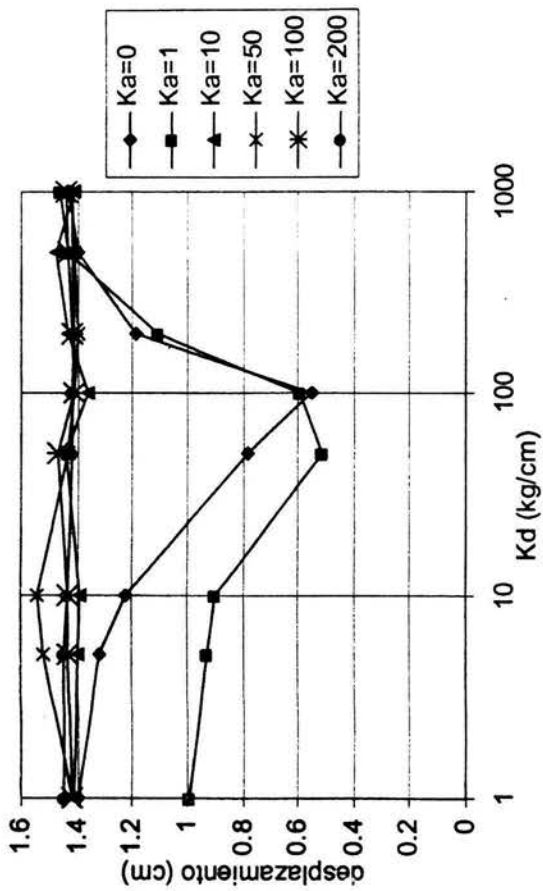


Figura 5.33. Desplazamiento para el Caso 5  $T=0.5s$  y la excitación (VIV).

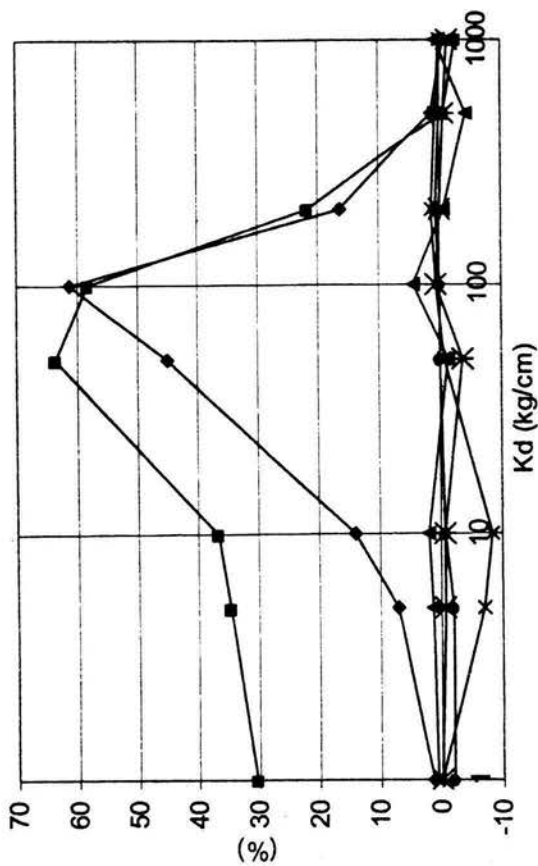


Figura 5.34. Porcentaje de desplazamiento que se controla para el Caso 5  $T=0.5s$  y la excitación (VIV).

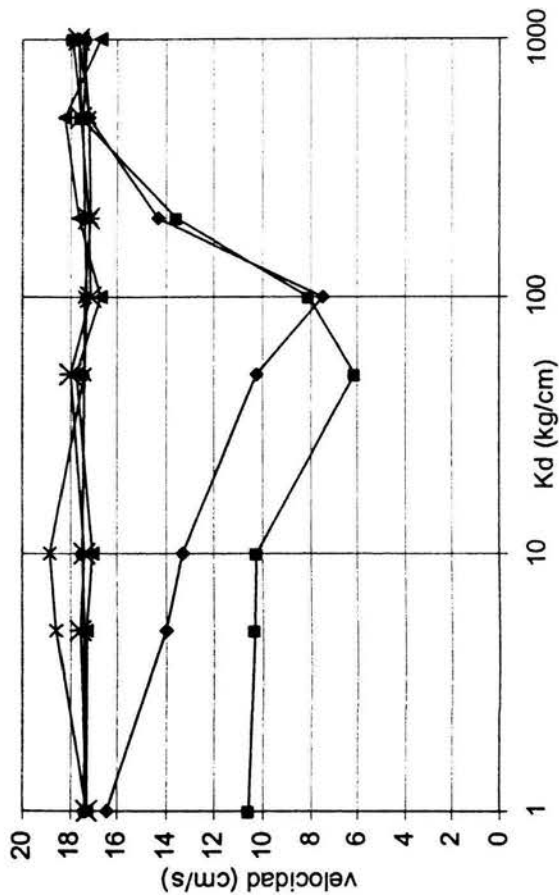


Figura 5.35. Velocidad para el Caso 5  $T=0.5s$  y la excitación (VIV).

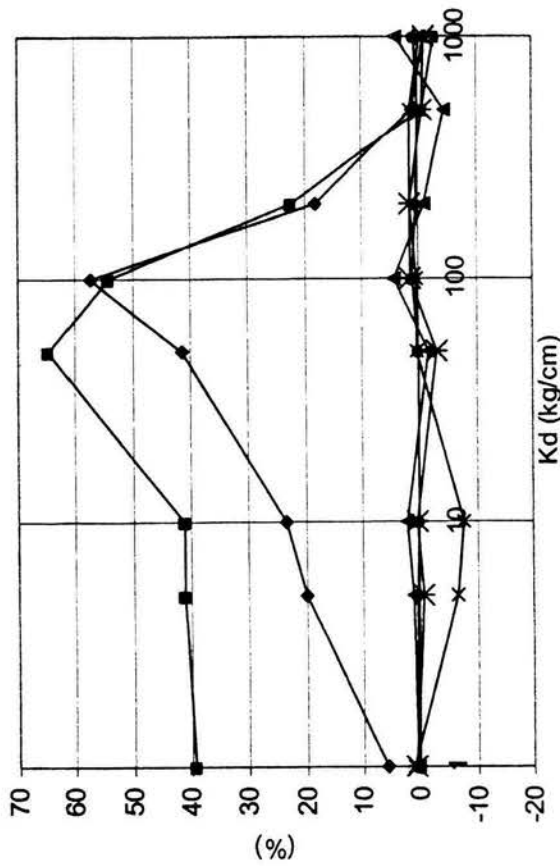


Figura 5.36. Porcentaje de velocidad que se controla para el Caso 5  $T=0.5s$  y la excitación (VIV).

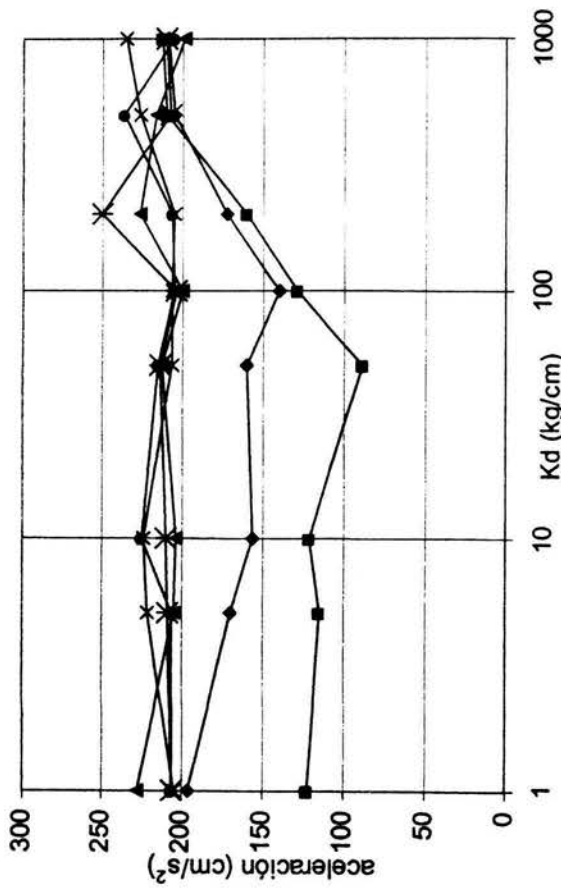


Figura 5.37. Aceleración para el Caso 5  $T=0.5s$  y la excitación (VIV).

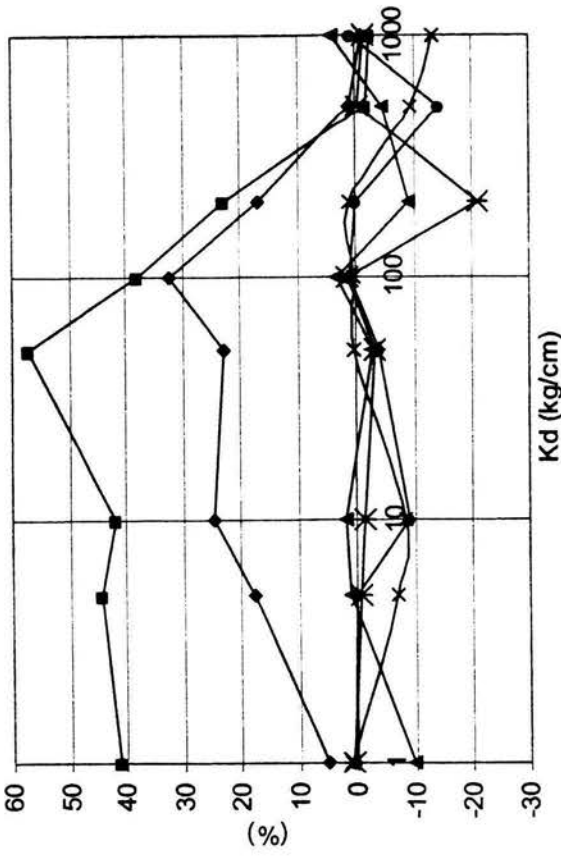


Figura 5.38. Porcentaje de aceleración que se controla para el Caso 5  $T=0.5s$  y la excitación (VIV).

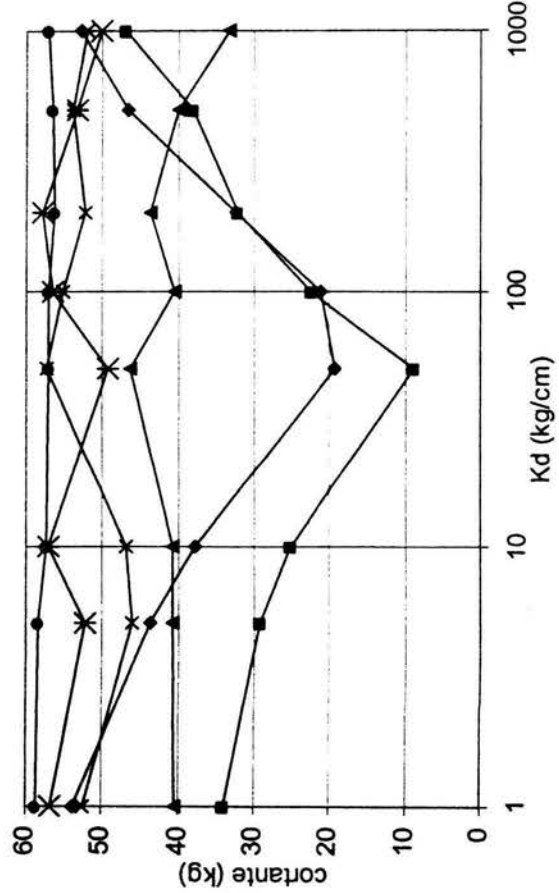


Figura 5.39. Cortante basal para el Caso 5  $T=0.5s$  y la excitación (VIV).

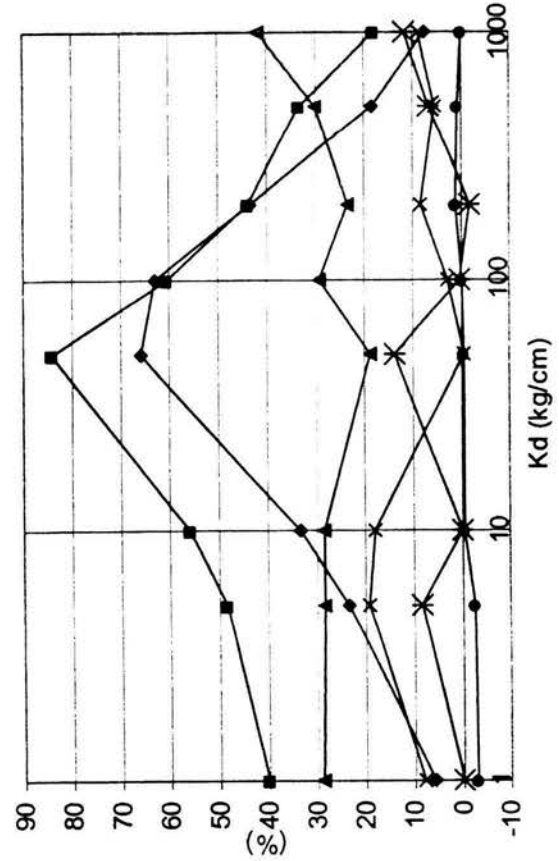


Figura 5.40. Porcentaje de cortante basal que se controla para el Caso 5  $T=0.5s$  y la excitación (VIV).

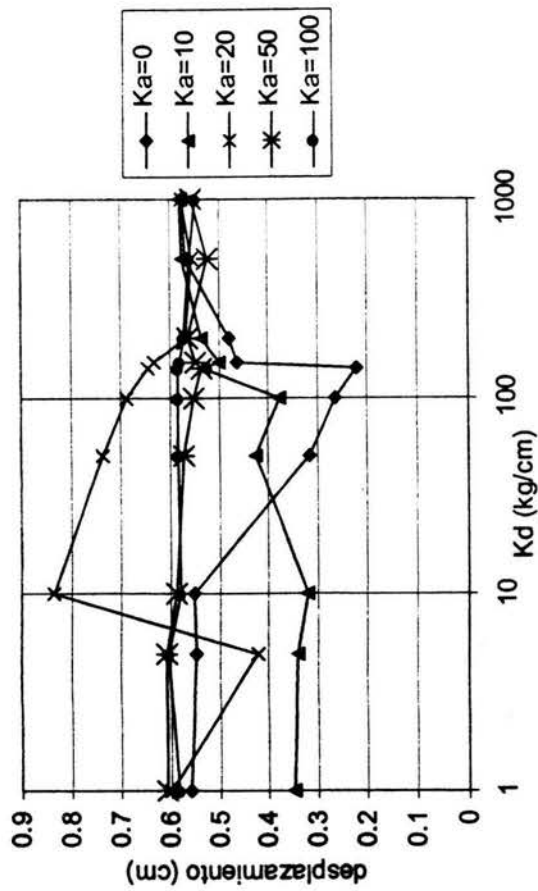


Figura 5.41. Desplazamiento para el Caso 6  $T=0.5s$  y la excitación (CU).

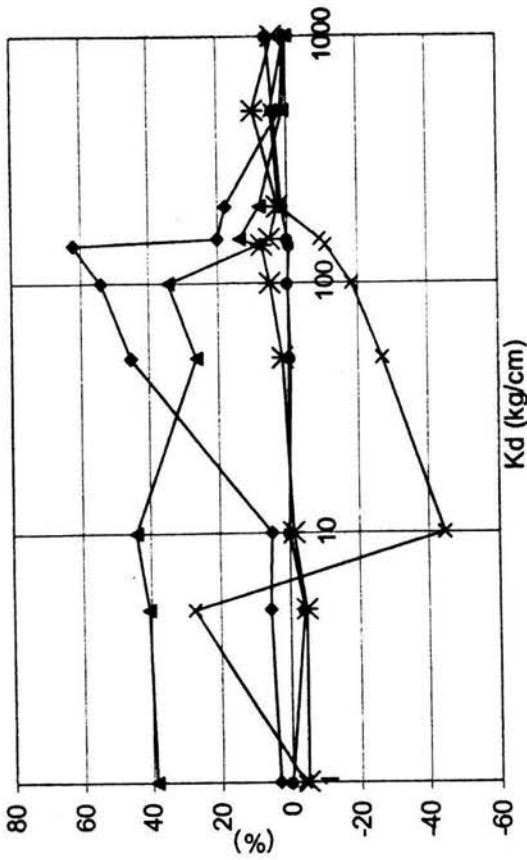


Figura 5.42. Porcentaje de desplazamiento que se controla para el Caso 6  $T=0.5s$  y la excitación (CU).

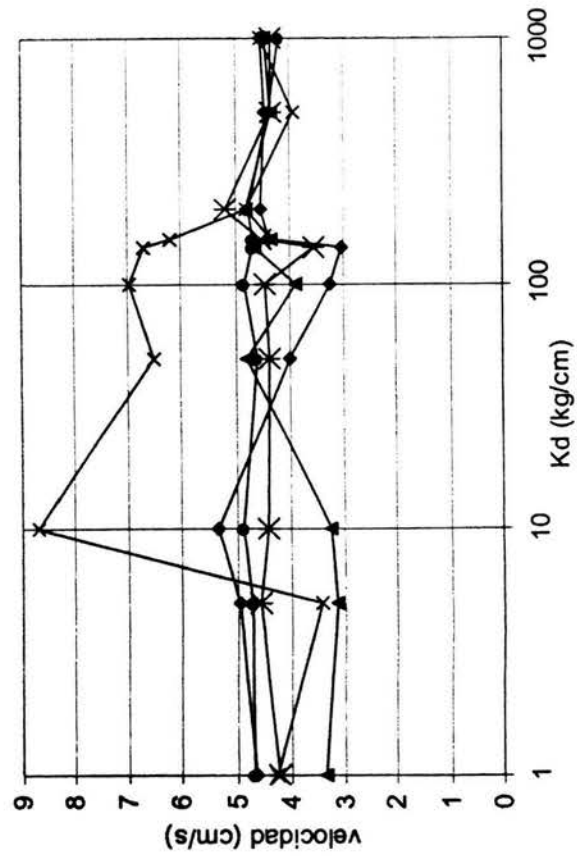


Figura 5.43. Velocidad para el Caso 6  $T=0.5s$  y la excitación (CU).

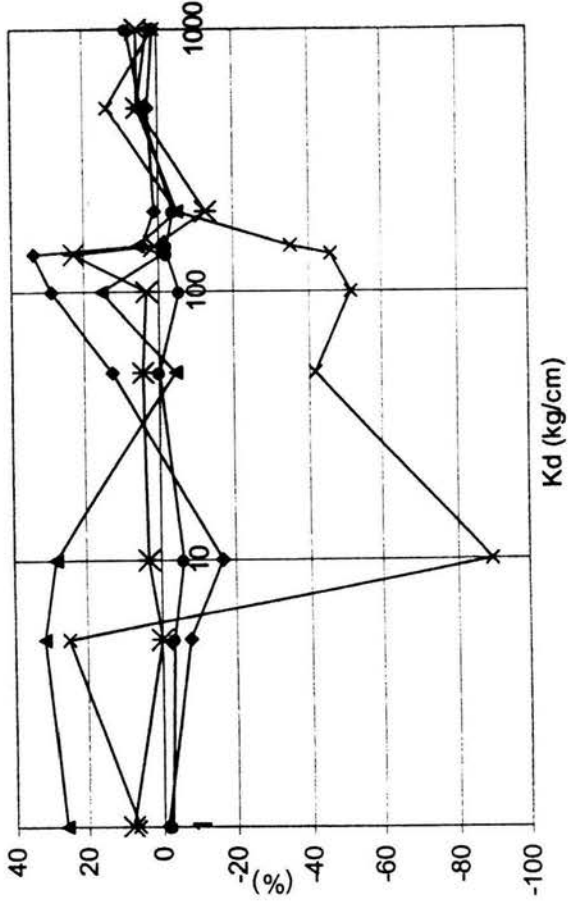


Figura 5.44. Porcentaje de velocidad que se controla para el Caso 6  $T=0.5s$  y la excitación (CU).

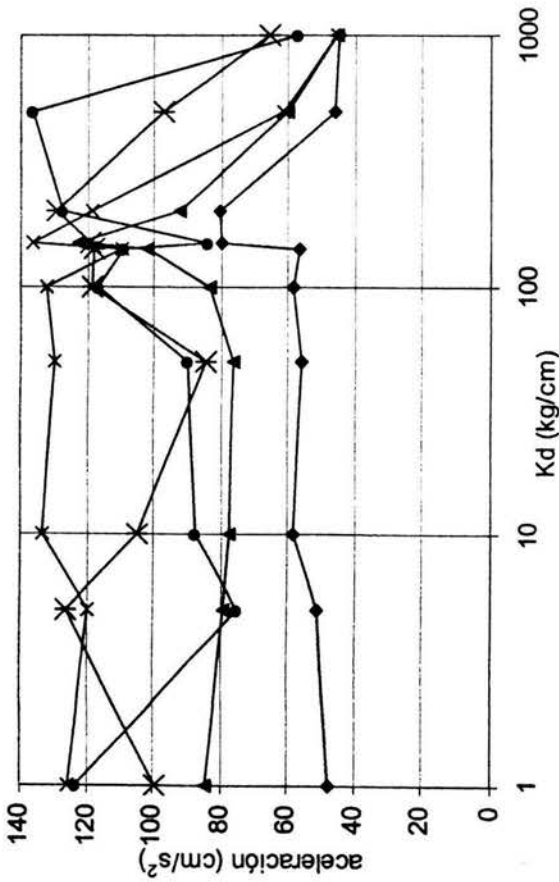


Figura 5.45. Aceleración para el Caso 6  $T=0.5s$  y la excitación (CU).

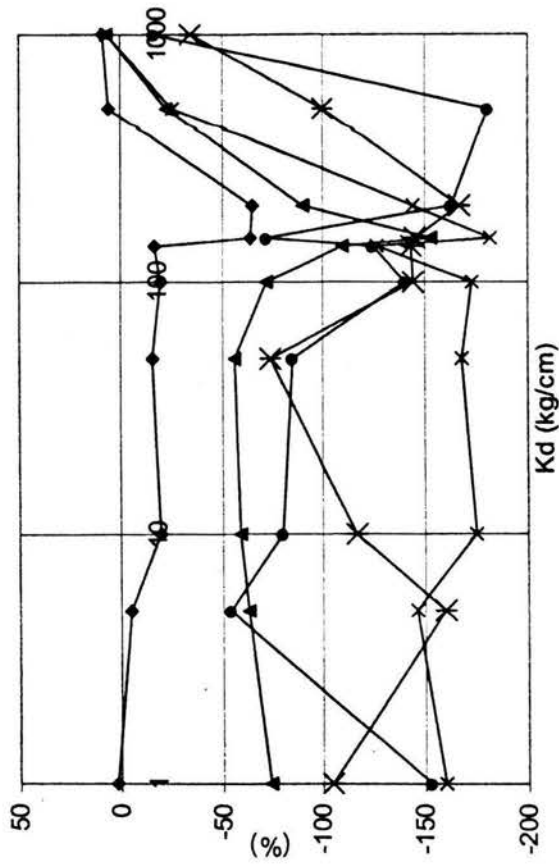


Figura 5.46. Porcentaje de aceleración que se controla para el Caso 6  $T=0.5s$  y la excitación (CU).

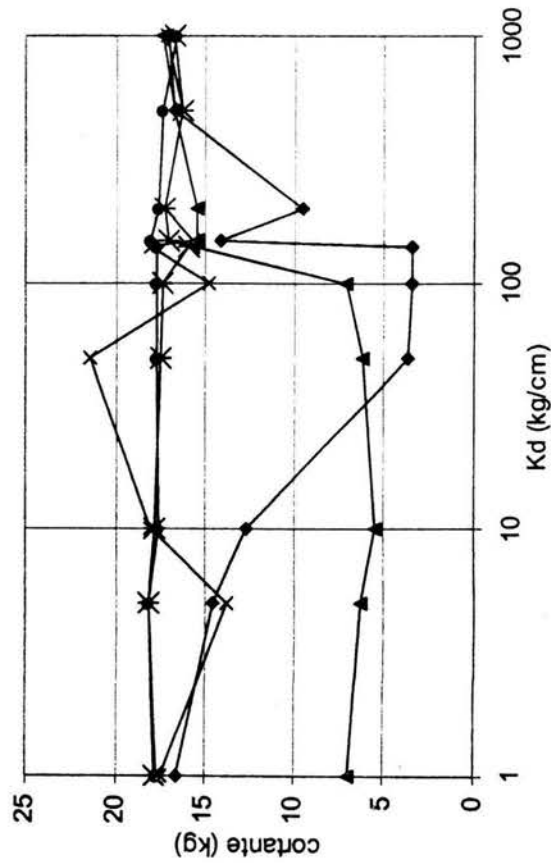


Figura 5.47. Cortante basal para el Caso 6  $T=0.5s$  y la excitación (CU)

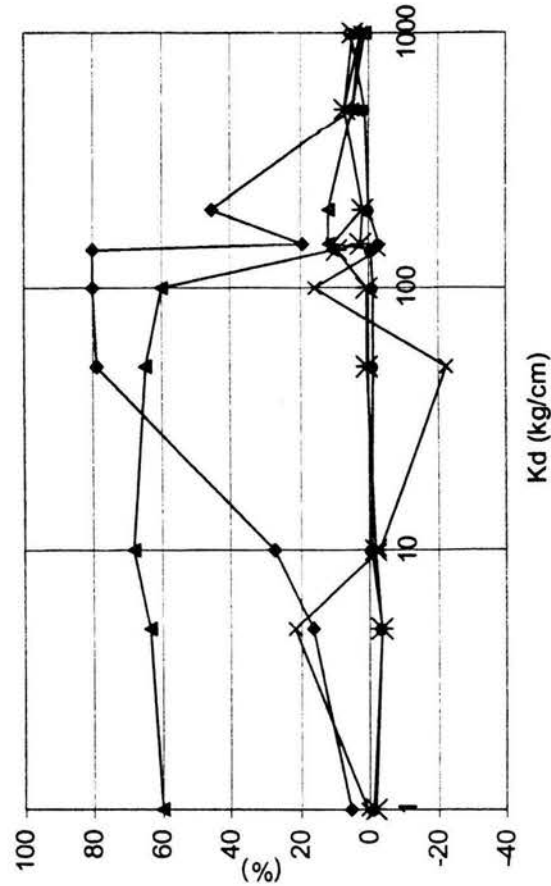


Figura 5.48. Porcentaje de cortante basal que se controla para el Caso 6  $T=0.5s$  y la excitación (CU).

De los resultados obtenidos en los seis casos estudiados se puede observar que en el caso 1 la rigidez y el amortiguamiento de control provocan la máxima reducción de desplazamiento, velocidad, aceleración y cortante basal, esto sucede cuando  $K d = 2000 \text{ kg/cm}$  y  $K a = 200 \text{ kg}\cdot\text{s/cm}$ . Con estos resultados se obtienen las figuras 5.49 a 5.64 en las que se puede observar como va disminuyendo la historia de desplazamientos, velocidades, aceleraciones y cortantes basales.

En estas figuras aparecen los resultados que se obtienen cuando no existe control, cuando se consideran de manera aislada la rigidez y el amortiguamiento de control, y el efecto de ambos  $K d + K a$ .

Las figuras muestran que la mayor respuesta de desplazamientos, velocidades, aceleraciones y cortantes basales se presenta desde los 20s hasta los 80s. Antes y después de este intervalo la respuesta no es tan considerable por lo que el control no es muy significativo en los primeros segundos, pero ya entrando en el intervalo de tiempo antes mencionado el control ya se hace muy efectivo sobre todo considerando la rigidez y el amortiguamiento de control. Así, en general se logra disminuir la respuesta en un 80 %.

Al considerar por separado la rigidez y el amortiguamiento de control se obtienen resultados en el control bastante efectivos. Sin embargo, con solo  $K a$  se consigue un porcentaje similar al mencionado con anterioridad. Por lo que en este caso otra buena opción de control sería solo considerar el amortiguamiento de control.

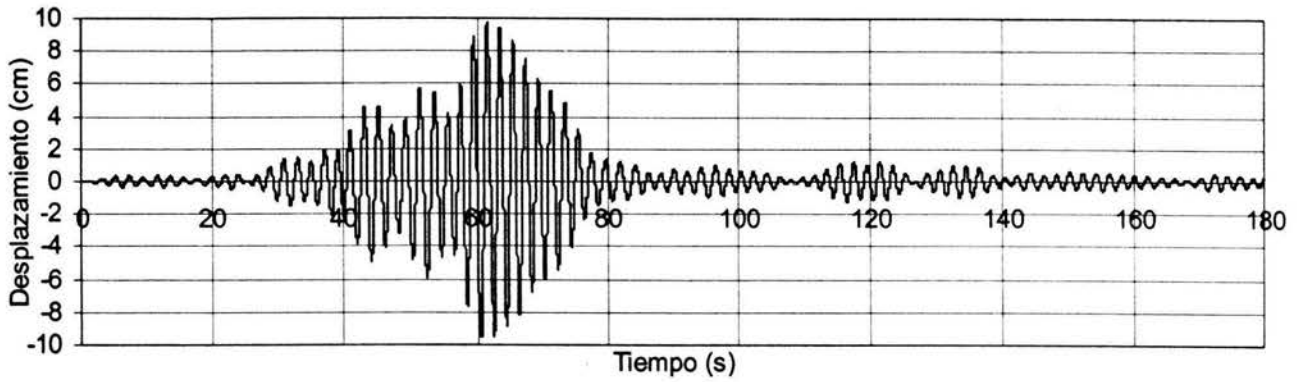


Figura 5.49. História de deslocamentos sem controle para o modelo flexível desplantado em solo mole.

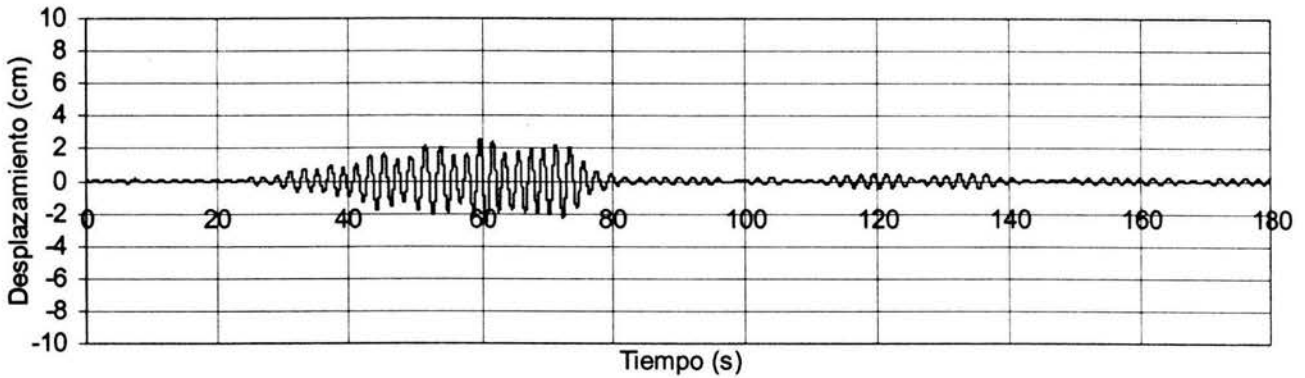


Figura 5.50. História de deslocamentos para o modelo flexível controlado apenas com  $K_d$  desplantado em solo mole.

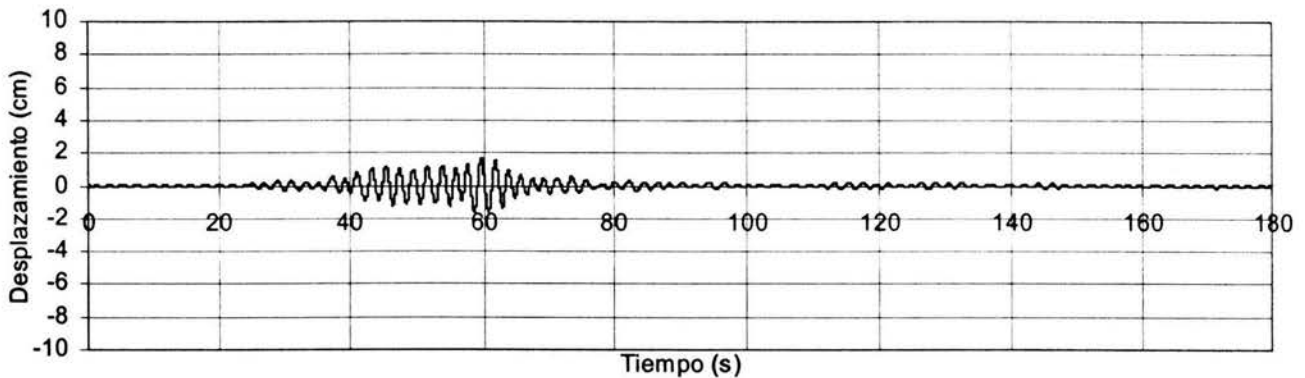


Figura 5.51. História de deslocamentos para o modelo flexível controlado apenas com  $K_a$  desplantado em solo mole.

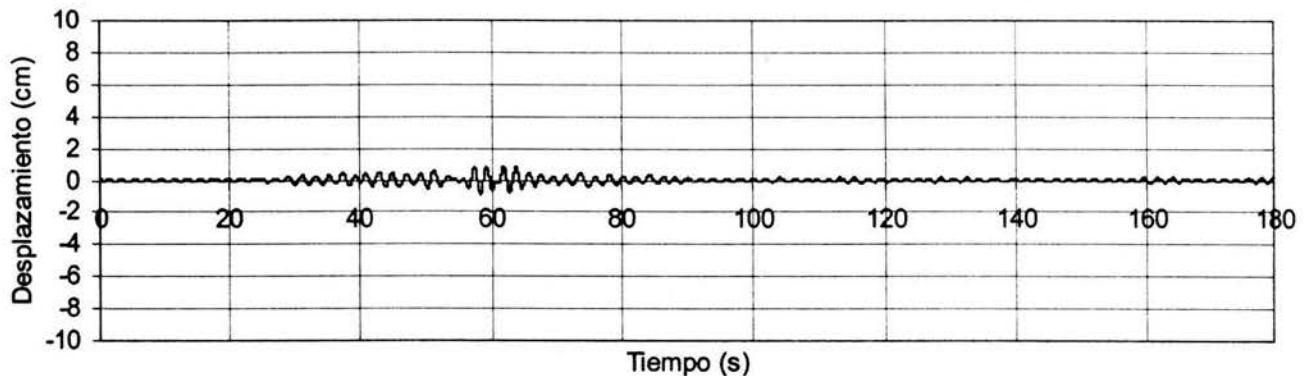


Figura 5.52. História de deslocamentos para o modelo flexível controlado com  $K_d+K_a$  desplantado em solo mole.

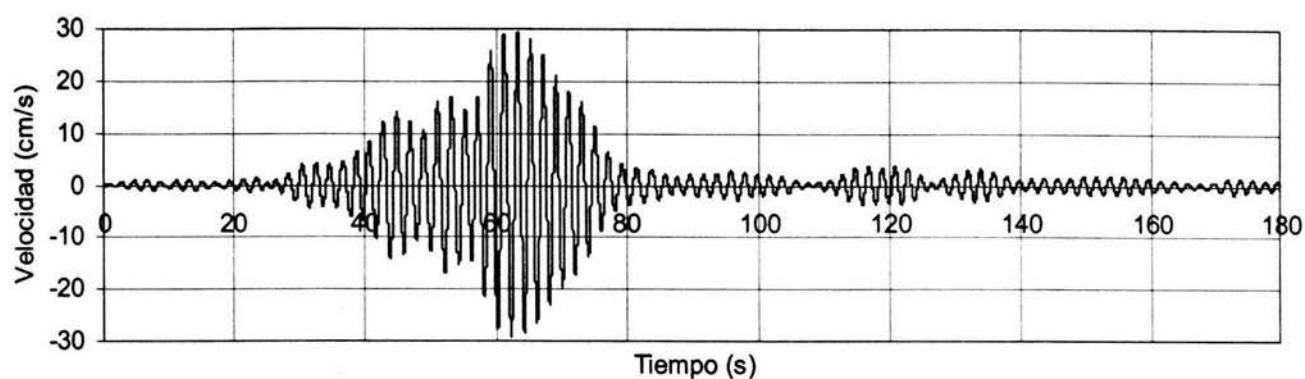


Figura 5.53. História de velocidades sem controle para o modelo flexível desplantado em solo mole.

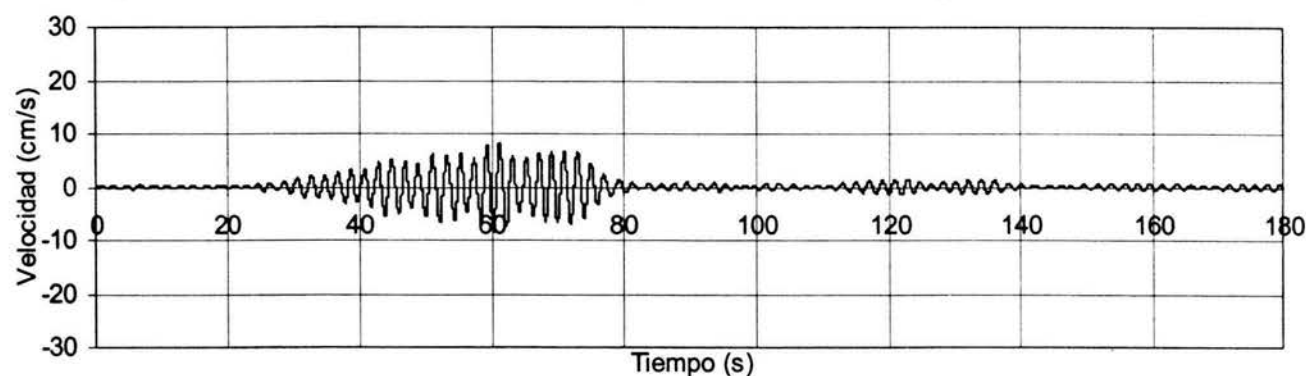


Figura 5.54. História de velocidades para o modelo flexível controlado só com  $K_d$  desplantado em solo mole.

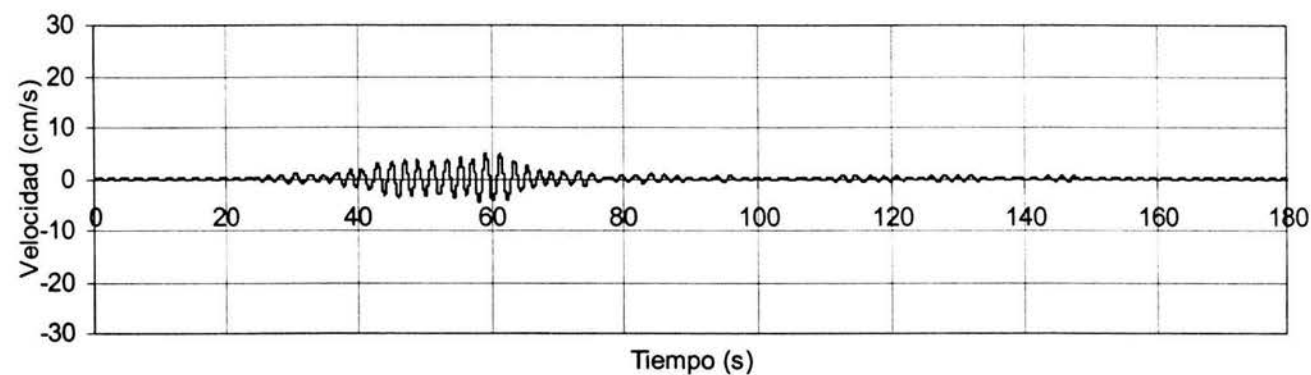


Figura 5.55. História de velocidades para o modelo flexível controlado só com  $K_a$  desplantado em solo mole.

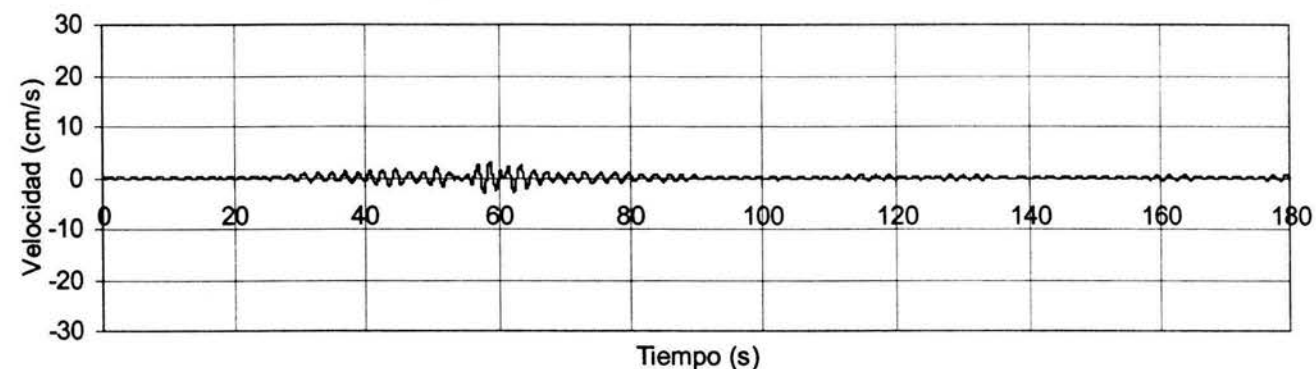


Figura 5.56. História de velocidades para o modelo flexível controlado com  $K_d + K_a$  desplantado em solo mole.



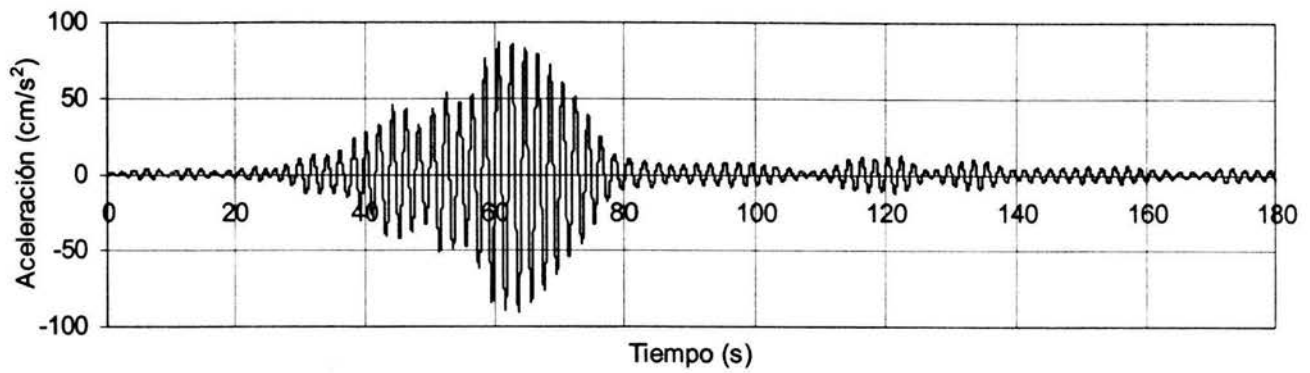


Figura 5.57. História de acelerações sem controle para o modelo flexível desplantado em solo mole.

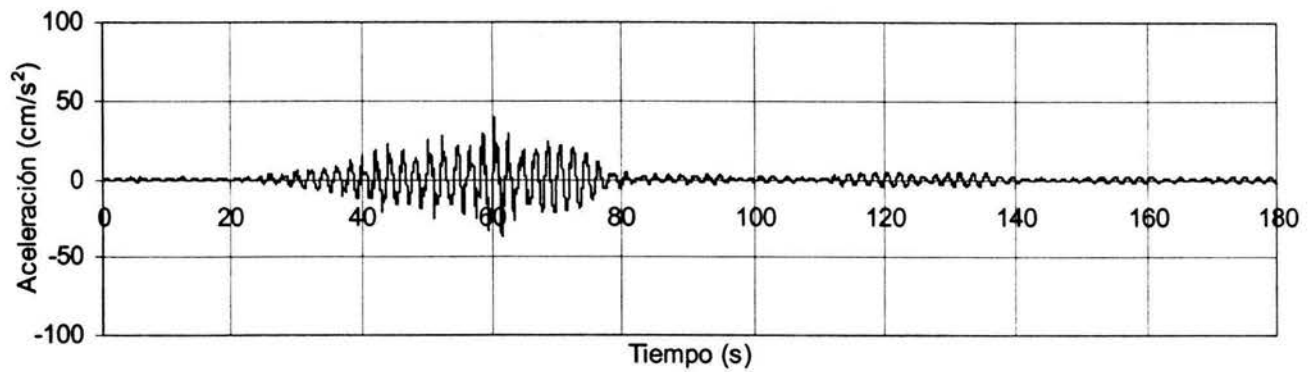


Figura 5.58. História de acelerações para o modelo flexível controlado apenas com  $K_d$  desplantado em solo mole.

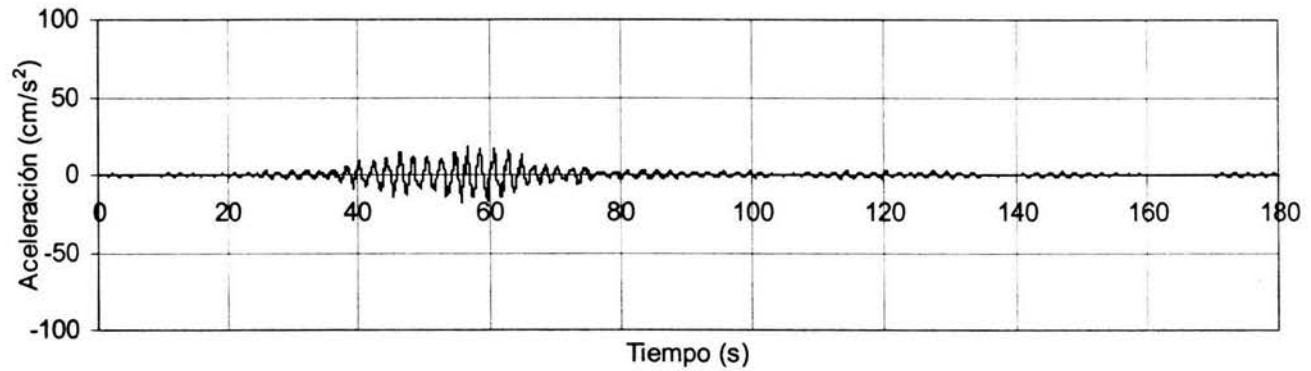


Figura 5.59. História de acelerações para o modelo flexível controlado apenas com  $K_a$  desplantado em solo mole.

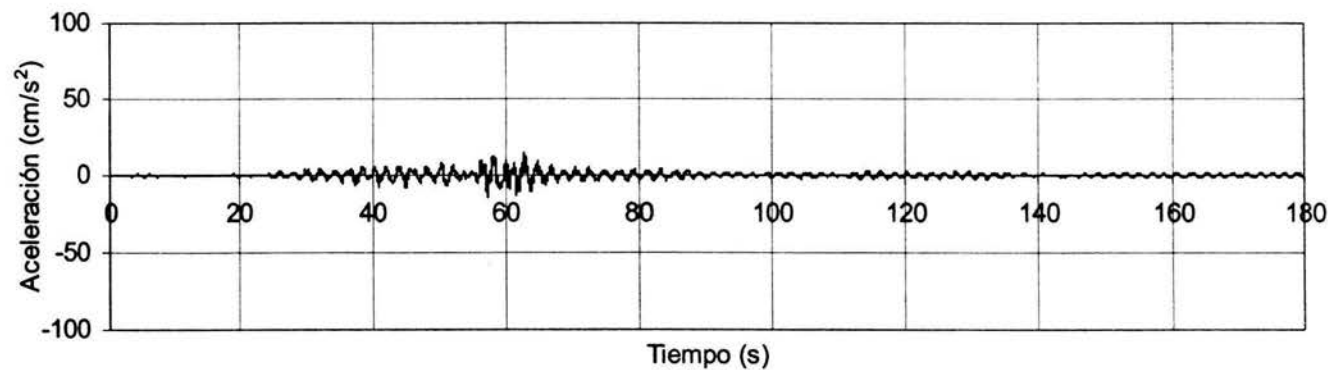


Figura 5.60. História de acelerações para o modelo flexível controlado com  $K_d+K_a$  desplantado em solo mole.

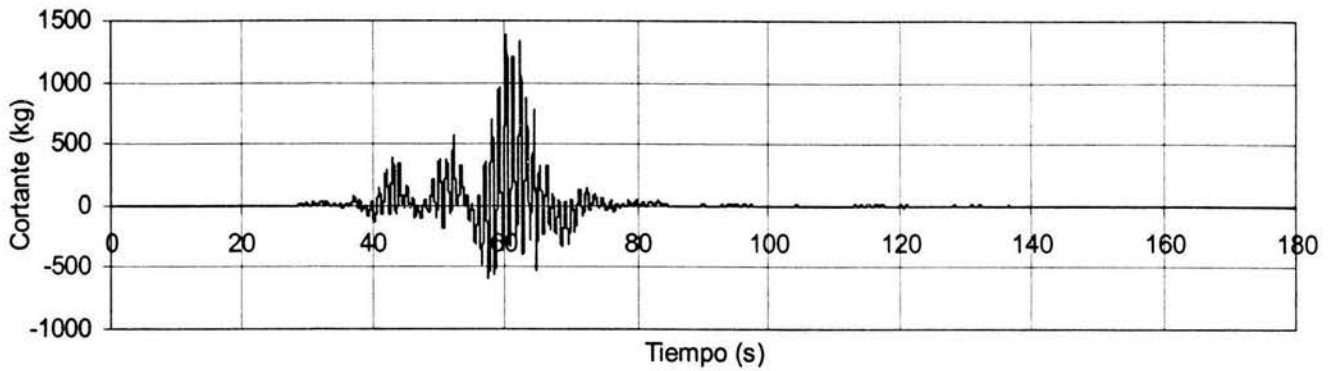


Figura 5.61. Historia de cortantes basales sin control para el modelo flexible desplantado en suelo blando.

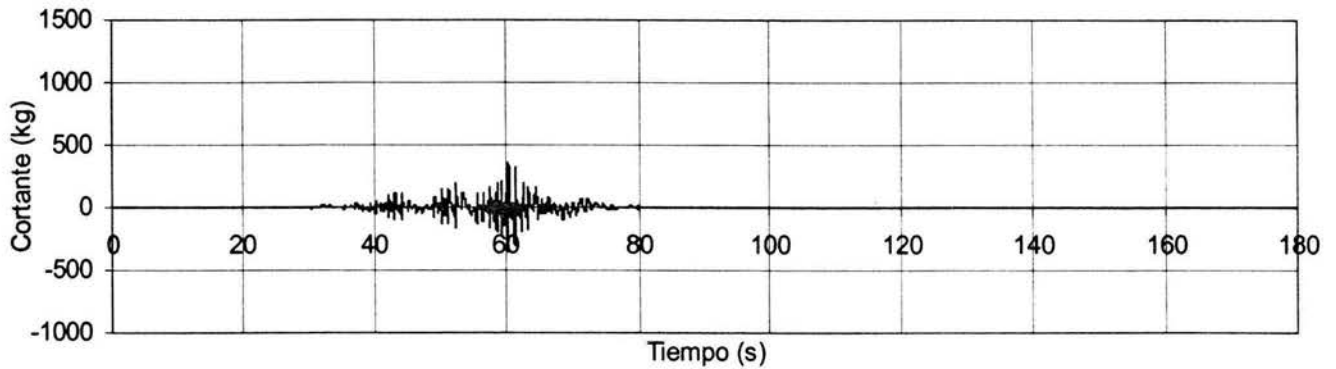


Figura 5.62. Historia de cortantes basales para el modelo flexible controlado sólo con  $K_d$  desplantado en suelo blando.

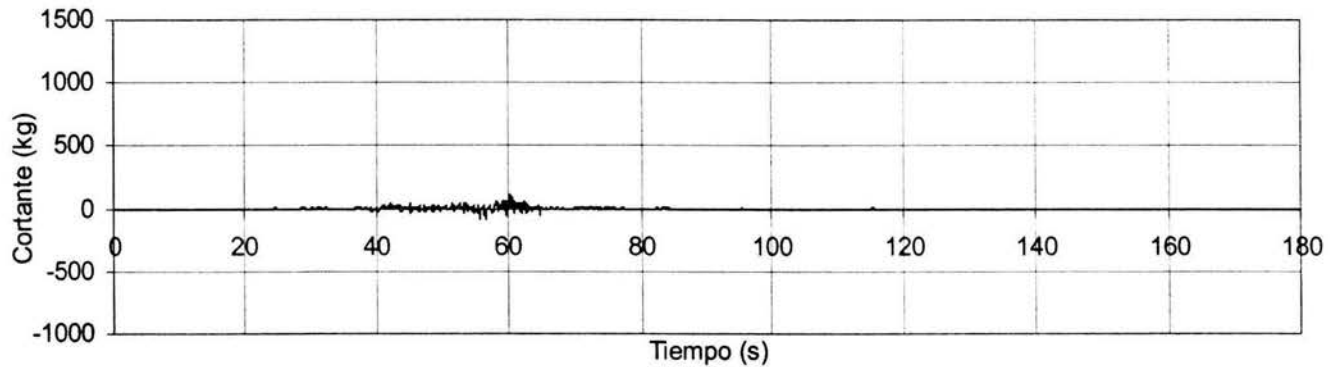


Figura 5.63. Historia de cortantes basales para el modelo flexible controlado sólo con  $K_a$  desplantado en suelo blando.

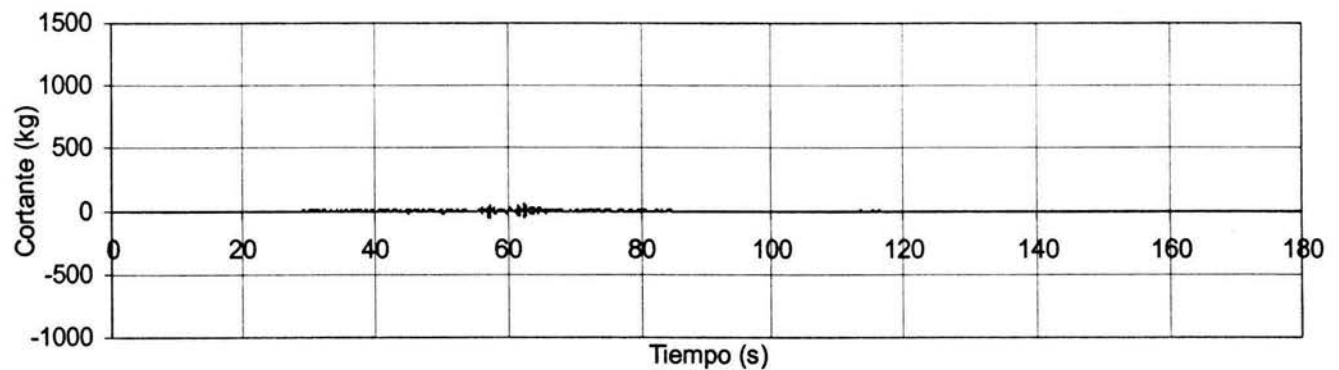


Figura 5.64. Historia de cortantes basales para el modelo flexible controlado con  $K_d + K_a$  desplantado en suelo blando.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo consistió en estudiar el control de la respuesta de estructuras sometidas a sismos intensos. Para ello se analizaron modelos estructurales de un grado de libertad con periodos fundamentales de vibración de 0.5 y 2 s respectivamente. Dichos modelos fueron sometidos a acelerogramas correspondientes al sismo de septiembre de 1985 en la ciudad de México. El control se aplicó mediante diagonales activas. Se evaluó la influencia de la rigidez y el amortiguamiento de control en la respuesta sísmica de estas estructuras desplantadas en suelo blando, de transición y suelo duro.

A partir de los resultados obtenidos se puede decir que la respuesta de estructuras debida a sismos intensos se pueden reducir notablemente mediante sistemas de control estructural.

La energía que genera un sismo se puede disipar a través de dispositivos que se clasifican según su funcionamiento como de control pasivo o activo.

Los sistemas de control pasivo dependen de las acciones de servicio a las que se someten y su respuesta está predefinida por el diseñador considerando un nivel de excitación sobre la estructura.

Los sistemas de control activo ajustan la rigidez de la estructura en cada instante de tiempo mediante mecanismos para cada uno de los eventos sísmicos que se presenten.

Las diagonales activas pueden ser conectadas desde la parte superior hasta la base de un edificio para obtener un control más efectivo de las fuerzas sísmicas y de los efectos del viento.

Al aplicar diagonales activas a un modelo estructural la respuesta sísmica se reduce, sin embargo el tamaño de la reducción dependerá de sus características dinámicas así como del tipo de suelo en el que se encuentre desplantado.

Se obtuvieron mayores reducciones de la respuesta sísmica en estructuras flexibles desplantadas en suelo blando que en estructuras rígidas. Así, se obtuvo un porcentaje de reducción en sus desplazamientos, velocidades, aceleraciones y cortantes basales de aproximadamente el 80%.

En estructuras rígidas desplantadas en suelo duro el control con amortiguamiento de control casi no influye en su respuesta máxima. De acuerdo a los resultados obtenidos, la reducción es del 10% y en algunos casos elevan en más del 100 % la aceleración.

Las estructuras flexibles desplantadas en suelo de transición se controlan mejor con amortiguamiento de control. En las estructuras rígidas el control se puede conseguir pero con sólo la rigidez de control de las diagonales.

Para estudios posteriores sobre el control de la respuesta sísmica de estructuras mediante diagonales activas, se recomienda lo siguiente:

Investigar sobre las características de los sistemas de control comerciales y con base en ello aplicarlos al modelo estructural para tener una respuesta más realista.

Realizar un análisis con modelos planos de varios niveles con una y varias crujiás, con distintas formas en elevación para así poder conocer cómo afecta el considerar más grados de libertad, al buscar reducir la respuesta sísmica.

Estudiar modelos tridimensionales con distintas formas en planta y elevación para tener una perspectiva sobre la influencia que tienen las diagonales activas para controlar la respuesta sísmica considerando el efecto de la torsión sísmica.

Seguir considerando estructuras en distintos tipos de suelo con el propósito de acumular mayor información acerca del efecto que estos provocan en edificios con sistemas de control estructural.

Hacer un análisis con modelos con comportamiento inelástico para estudiar que pasa más allá del comportamiento elástico lineal.

Se recomienda seguir mejorando el programa desarrollado en este trabajo para poder contar con uno que tome en cuenta modelos estructurales más complejos con control activo.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

---

---

**7 REFERENCIAS**

- 1.- Arista A, (1994), "Respuesta sísmica de modelos asimétricos de edificios con disipadores de energía", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, FI-UNAM.
- 2.- Bazán E. y Meli R, (1998), "Diseño sísmico de edificios", Limusa, México.
- 3.- Bruneau M, (1993), "Ductile Design of Steel Structures", Mc-Graw Hill, EUA.
- 4.- Cahís X, (2000), "Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sismorresistente", Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña España.
- 5.- Connor J. y Boutros S.A, (1996), "Introduction to motion based design", Mechanics Publications, EUA.
- 6.- Craig R, (1981), "Structural Dynamics and Introduction to Computer Methods", John Wiley and Sons, EUA.
- 7.- Leipholz H. H. y Abdel-Roman M, (1986), "Control of structures", Martinus Nijhoff Publishers, EUA.
- 8.- Mendoza U.S, (2003), "Estudio de la respuesta sísmica mediante el establecimiento de un modelo geodinámico en suelos de la Ciudad de Puebla", Tesis de Licenciatura, División de Ingeniería Civil Topográfica y Geodésica, FI-UNAM.
- 9.- Rodríguez M.A, (2003), "Análisis estadístico de la respuesta sísmica de un puente con aisladores", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, FI-UNAM.
- 10.- Soong T.T. y Dargush F, (1997), "Passive energy dissipation systems in structural engineering", John Wiley and Sons, EUA.
- 11.- Soong T.T. y Spencer B.F, (2000), "Active, semi-active and hybrid control of structures", 12th WCEE, Nueva Zelanda.
- 12.- Tena C.A, (2003), "Disipación pasiva de energía en Mexico un estado del arte", VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Venezuela.