



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

**CONTROL DE LA RESPUESTA DINÁMICA
DE ESTRUCTURAS MEDIANTE EL USO DE
DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO
VISCOSO DEL TIPO LINEAL**

Tesis para optar al título de:
Ingeniero Civil en Obras Civiles

Profesor Patrocinante:
Sr. Adolfo Castro Bustamante
Ingeniero Civil
M. Sc. Eng. Civil

**JUAN PABLO PARDO VERDUGO
VALDIVIA-CHILE**

2007

ÍNDICE

RESUMEN

SUMMARY

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 1

1.1 Generalidades.....	1
1.2 Planteamiento del Problema y justificación.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivos Generales	
1.3.2 Objetivos Específicos	
1.4 Metodología.....	3
1.5 Estructura del Trabajo.....	4
1.6 Alcances y Limitaciones.....	6

CAPÍTULO II: VIBRACIONES DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD 7

2.1 Generalidades.....	7
2.2 Oscilador de un Grado de Libertad con Vibración libre No Amortiguada.....	8
2.3 Oscilador de un Grado de Libertad con Vibración libre Amortiguada.....	12
2.3.1 Amortiguamiento Viscoso	
2.3.2 Tipos de Movimiento	
2.3.3 Sistema Subamortiguado	
2.4 Oscilador de un Grado de Libertad sometido a una Excitación Armónica.....	19
2.4.1 Amplificación y Atraso de la Respuesta Dinámica	
2.5 Oscilador de un Grado de Libertad con Excitación Basal.....	23
2.5.1 Espectro de Respuesta	

CAPÍTULO III: BALANCE ENERGÉTICO EN ESTRUCTURAS Y SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA 27

4.7	Sistema de “N” Grados de Libertad con Disipadores de Energía de Fluido Viscoso.....	70
4.8	Proceso de Diseño de los Disipadores de Fluido Viscoso.....	72
4.8.1	Generalidades	
4.8.2	Determinación del Sistema Estructural	
4.8.3	Determinación del Control de la Respuesta	
4.8.4	Determinación de la Demanda Sísmica	
4.8.5	Determinación del Nivel de Amortiguamiento Suplementario	
4.8.6	Determinación de los Parámetros de los Disipadores de Fluido Viscoso	
4.8.6.1	Método de Hart y Wong	
4.8.6.2	Método propuesto por la FEMA 273	
4.8.6.2.1	Disipadores de Fluido Viscoso con comportamiento Lineal	
4.8.6.2.2	Disipadores de Fluido Viscoso con comportamiento No Lineal	
4.8.7	Verificación de la Respuesta	

CAPITULO V: MODELACIÓN DEL DISIPADOR DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO EN SAP2000

5.1	Generalidades.....	83
5.2	Elementos Link.....	84
5.2.1	Descripción del modelo del Disipador, el Elemento Damper	
5.2.2	Modelo alternativo para el Dispositivo con comportamiento Lineal	
5.3	Verificación del Modelo del Disipador utilizado por SAP2000.....	87
5.3.1	Generalidades	
5.3.2	Descripción del Sistema	
5.3.3	Registro Sísmico de El Centro, 1940	
5.3.4	Respuesta del Sistema utilizando el Método de Newmark	
5.3.5	Respuesta del Sistema utilizando SAP2000	

**CAPITULO VI: CONTROL DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE UNA
ESTRUCTURA DE CINCO PISOS CON DISIPADORES DE
ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO LINEALES**

95

6.1	Generalidades.....	95
6.2	Descripción de la Estructura.....	95
6.3	Componente N10E del Registro Sísmico de Llole, 1985.....	101
6.4	Análisis de la Estructura sin Disipadores de Energía.....	101
6.4.1	Respuesta de la Estructura para un Amortiguamiento Efectivo de 5% del crítico	
6.5	Análisis de la Estructura con Disipadores de Energía de Fluido Viscoso Lineales.....	105
6.5.1	Determinación del Periodo y Modo Fundamental de Vibración	
6.5.2	Determinación del Amortiguamiento Suplementario y de los Parámetros de los Disipadores	
6.5.3	Desplazamiento de la Estructura para un Amortiguamiento Efectivo de 25% del crítico	
6.5.3.1	Caso 1	
6.5.3.2	Caso 2	
6.5.4	Desplazamiento de la Estructura para un Amortiguamiento Efectivo de 20% del crítico	
6.5.4.1	Caso 1	
6.5.4.2	Caso 2	
6.5.5	Respuesta Final de la Estructura para un Amortiguamiento Efectivo del 20% del crítico	
6.6	Comparación de la Respuesta de la Estructura con y sin Disipadores de Fluido Viscoso Lineal.....	116
6.7	Comportamiento de los Disipadores.....	120

CAPITULO VII: CONCLUSIONES	124
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	128
ANEXO A: OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA MEDIANTE EL MÉTODO DE NEWMARK PARA UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD CON DISIPADOR DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO LINEAL SOMETIDO A UNA EXCITACIÓN BASAL	131
ANEXO B: OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE AMORTIGUAMIENTO Y RESPUESTA EN EL TIEMPO DE LA ESTRUCTURA	154

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se estudió y analizó el control de la respuesta dinámica de un edificio en base a marcos de hormigón armado, mediante la adición de Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso con comportamiento Lineal.

La estructura estudiada corresponde a un edificio de hormigón armado de 5 pisos, la cual posee la particularidad de ser flexible en su sentido longitudinal, por lo que las deformaciones entre piso debido a una acción sísmica sobrepasan alrededor del 50% de lo permitido por la normativa vigente. Como opción para reforzar y controlar las distorsiones entre piso se considera el uso de Dispositivos Disipadores de Energía de Fluido Viscoso de tipo Lineal, ubicados en la estructura en la dirección que presenta el problema.

Para el estudio se realiza un análisis Tiempo Historia Lineal de la estructura sometida a la componente N10E del Registro Sísmico de Llole (1985), mediante el programa de análisis estructural SAP2000.

La utilización de los Disipadores de Energía dio como resultado la disminución de los Desplazamientos, Velocidad, Aceleración de los Centros de Masa de cada piso, además de una baja en los Esfuerzos en la Base (Corte y Momento), demostrando ser un método efectivo de control y reforzamiento sísmico, para la estructura estudiada.

SUMMARY

Presently investigation work was studied and it analyzed the control of the dynamic answer of a building based on marks of armed concrete, by means of the addition of Devices of Dissipation of Energy of Viscous Fluid with Lineal behavior.

The studied structure corresponds to a building of concrete of 5 floors, which possesses the particularity of being flexible in its longitudinal sense, for what the deformations among floor due to a seismic action surpass around 50% of that allowed by the effective regulatory scheme. As option to reinforce and to control the distortions among floor is considered the use of Devices Dissipators of Energy of Viscous Fluid of Lineal type, located in the structure in the address that presents the problem.

For the study is carried out an analysis Time Lineal History from the subjected structure to the component N10E of the Seismic Registration of Llolleo (1985), by means of the program of structural analysis SAP2000.

The use of the Dissipators of Energy gave the decrease of the Displacements as a result, Speed, Acceleration of the Centers of Mass of each floor, besides a drop in the Efforts in the Base (Court and Moment), demonstrating to be an effective method of control and seismic reinforcement, for the studied structure.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES:

Debido a la gran vulnerabilidad sísmica de nuestro país, es que uno de los retos principales de la Ingeniería estructural, consiste en el desarrollo de conceptos tecnológicos innovadores que protejan mejor a las estructuras, sus ocupantes y contenidos, de los perjudiciales efectos de las fuerzas que se generan durante los eventos sísmicos.

El enfoque tradicional del diseño sismorresistente se ha fundamentado en proveer una combinación de resistencia y ductilidad para resistir las cargas producidas por los movimientos sísmicos. Es así como los Ingenieros se apoyan en la ductilidad que poseen los materiales que se emplean en la construcción, para evitar las fallas catastróficas y garantizar la estabilidad de la estructura para sismos severo, es decir, la estructura puede quedar inutilizable pero sin colapsar, salvaguardando las vidas de las personas que se encuentren en su interior (Martínez, 2003).

Los daños estructurales son provocados por las deformaciones plásticas que sufre la estructura como medio de disipación de niveles elevados de energía entrante a la estructura durante un evento sísmico. Nuevas tecnologías se han desarrollado para proteger sísmicamente a las estructuras, entre estas se encuentran los “Dispositivos de Disipación Pasiva de Energía”.

El propósito básico de la incorporación de los “Dispositivos de Disipación Pasiva de Energía” en una estructura, es de absorber o consumir una porción importante de la energía sísmica de entrada, reduciendo con ello la demanda de disipación de energía en los elementos estructurales principales, para minimizar su posible daño estructural. Entre los “Dispositivos de Disipación Pasiva de Energía”, se encuentran los de “Fluido Viscoso”. Estos Dispositivos se han empleados con éxito en edificios nuevos y en la restauración de estructuras existentes, demostrando ser un método efectivo de reforzamiento sísmico, como a modo de ejemplo se pueden mencionar el Centro Cívico

de San Francisco (USA), Hospital Raikai (Japón), Torre Mayor (México) y el Puente Amolanas en nuestro país (Taylor, 2004).

La estructura estudiada corresponde a un edificio de hormigón armado de 5 pisos, la cual posee la particularidad de ser flexible en su sentido longitudinal, por lo que las deformaciones entre piso debido a una acción sísmica sobrepasan alrededor del 50% de lo permitido por la normativa vigente. . Como opción para controlar las distorsiones entre piso se considera el uso de Dispositivos Disipadores de Energía de Fluido Viscoso de tipo Lineal, ubicados en la estructura en la dirección que presenta el problema.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN:

En el terremoto del 22 de mayo del 1960 las pérdidas materiales alcanzaron una suma superior a los \$500 millones de dólares de la época, lo que constituye una cifra que sobrepasa el 50% del valor del presupuesto de la nación de aquel año y está sobre el 12% del PIB; además unas 5000 personas perdieron la vida y unos 3000 quedaron heridos.

El 3 de marzo de 1985 se produjo un terremoto en la zona central, afectando una zona con una población de seis millones de habitantes, ocasionando 147 víctimas fatales y unos 2000 heridos; las pérdidas económicas se han estimado en \$1300 millones de dólares, y a manera de comparar se tiene que la tasa de inversión anual tenía un promedio de \$2570 millones de dólares por lo que las pérdidas por el sismo alcanzan el 50% del total de la inversión anual (Arriagada, 2005).

Los Ingenieros Estructurales no pueden estar ajenos a los daños materiales y humanos que ha sufrido nuestro país durante su historia sísmica, es por esto que debe plantearse el desafío de la incorporación de nuevas tecnologías como sistemas de protección sísmica como son “Dispositivos de Disipación Pasiva de Energía”. Si bien ya está avanzando en esto, prueba de ello es la creación de la NCh 2745, “Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica”, la cual fue declarada oficial en noviembre

del 2003, debemos seguir avanzado y estudiar las nuevas tecnologías que son empleadas día a día en las estructuras como sistemas de protección sísmica.

Por lo anterior y por la inevitable vulnerabilidad sísmica de nuestro país es que en la presente memoria de título se plantea el control de la respuesta dinámica de estructuras sometidas a registros sísmicos de gran intensidad, adicionando “Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso” a estructuras que juegan un rol importante durante una catástrofe, como son los hospitales y escuelas.

1.3 OBJETIVOS:

1.3.1 OBJETIVOS GENERALES:

- Estudiar y analizar el control de la respuesta de estructuras sometidas a temblores mediante “Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso”.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Establecer un procedimiento de análisis para edificios con “Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso”, para controlar la respuesta dinámica de la misma.
- Determinar los parámetros necesarios que describen el comportamiento de los “Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso”.

1.4 METODOLOGÍA:

Para lograr cumplir con los objetivos propuestos en esta tesis, se utilizará información de “Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso” dada por fabricantes e Ingenieros con experiencia en el uso de este tipo de tecnologías.

Se desarrollará un algoritmo de diseño de estructuras con Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso que permita obtener información con respecto al desplazamiento, velocidad y aceleración que experimenta la estructura bajo una cierta excitación basal.

Se realizará un análisis modal de la estructura con el objeto de determinar los datos necesarios para la utilización del algoritmo desarrollado, luego se realizará un análisis tiempo historia paso a paso de las estructuras sometidas a un cierto registro sísmico mediante el software SAP2000, de esta manera se tendrá una visión del comportamiento de la estructura con los Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso, en cada instante de tiempo de la duración del registro.

Para poder validar los resultados de la respuesta entregado por SAP2000, se analizará un sistema de un grado de libertad con un dispositivo de Fluido Viscoso con comportamiento Lineal, mediante el método iterativo de Newmark, obteniéndose el resultado de la respuesta que será graficado para ser comparados con la respuesta entregada por SAP2000.

Finalmente se analizará una edificación de hormigón armado de cinco pisos, que posee la particularidad de ser una estructura muy flexible en su sentido longitudinal, por lo que bajo cargas sísmicas en dicho sentido desarrolla grandes deformaciones, que sobrepasan los valores permitidos por la normativa vigente. Como solución a dicho problema se postula la incorporación de Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso con el objeto de controlar las deformaciones.

1.5 ESTRUCTURA DE TRABAJO:

La presente tesis se ha estructurado en seis capítulos y en la parte final se han incluido tres apartados, dos anexos y el otro de referencias bibliográficas.

En el primer capítulo se da una introducción al tema en cuestión, se plantea el problema, los objetivos generales y específicos y las acciones emprendidas para lograr cumplir con lo propuesto.

En el capítulo dos se dan nociones básicas de dinámica de estructuras para un sistema de un grado de libertad. En el capítulo tres se divide en dos partes, la primera de ellas da una visión de estructuras sometidas a movimientos sísmicos, desde el punto de vista energético. Y la segunda recoge el estado del arte en sistemas sismorresistentes avanzados.

En el capítulo cuatro se describe la forma de operar de los Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso, además de plantearse las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del dispositivo. También se muestran algunas aplicaciones del los Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso a nivel nacional y mundial, finalmente se plantea un proceso de diseño para los Dispositivos.

En el capítulo cinco se muestra la manera de cómo modelar los Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso, mediante la utilización del software de análisis estructural SAP2000.

En el capítulo seis se estudia el control de la respuesta sísmica de una estructura de hormigón armado con Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso con comportamiento Lineal, mediante un análisis tiempo historia (paso a paso), para ello la estructura será sometida a una excitación basal correspondiente a la componente N10E del registro sísmico de Lollole, 1985. El modelamiento de los Disipadores y el análisis se realizarán utilizando el software SAP2000.

En el apartado de anexos se muestra el procedimiento que se utiliza para la obtención de la respuesta de un sistema de un grado de libertad sometido a una excitación basal mediante el “Método de Newmark”. Y finalmente se ilustra la variación en el tiempo de la respuesta de la estructura analizada en el Capítulo VI.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES:

A partir tanto de los objetivos generales como de los específicos de la presente tesis se pretende entregar información sobre el control de la respuesta dinámica de estructuras, sometidas a una cierta excitación basal mediante la utilización de Sistemas de Control Pasivo, limitándose a estructuras con Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso con comportamiento Lineal.

CAPITULO II:

VIBRACIONES DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD:

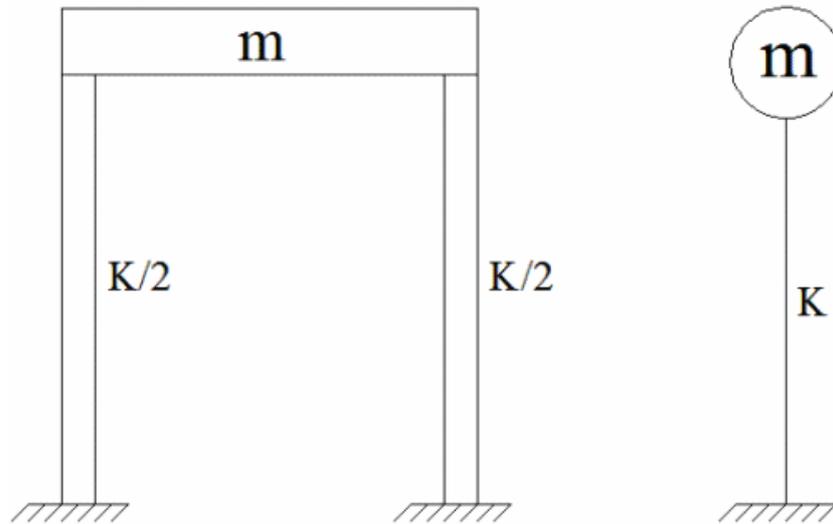
2.1 GENERALIDADES:

Para poder comprender correctamente las vibraciones que sufren las estructuras debido a excitaciones sísmicas, es necesario entender los principios básicos del análisis dinámico (teoría de ondas y vibraciones). Para ello se dará aquí nociones básicas acerca de las características de cuatro modelos dinámicos sencillos cuyo estudio nos permitirá el análisis del modelo sísmico, estos son:

- Oscilador de un grado de libertad con vibración libre no amortiguada.
- Oscilador de un grado de libertad con vibración libre amortiguada.
- Oscilador de un grado de libertad, sometido a una carga armónica.
- Oscilador de un grado de libertad con excitación basal (caso sísmico).

En todos estos casos supondremos que la masa del sistema se concentrará en un punto y que este puede desplazarse solo en una dirección (sistema de un grado de libertad). Se entenderá por vibración libre aquella en la que no existe una fuerza impulsadora periódica que realimente el movimiento.

Fig 2.1: Idealización de un Sistema de un grado de Libertad



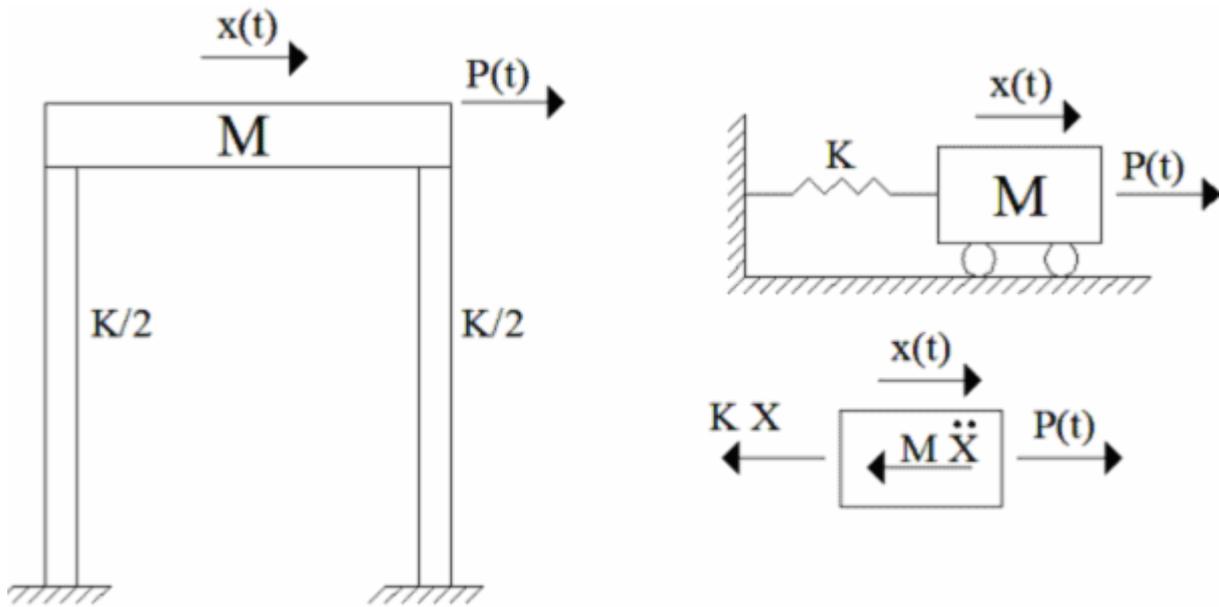
Fuente: Chopra, 2001.

2.2 OSCILADOR DE UN GRADO DE LIBERTAD CON VIBRACIÓN LIBRE NO AMORTIGUADA

En este caso el efecto vibratorio se debe a la aparición de fuerzas de inercia causadas por el movimiento de una masa y el efecto de las fuerzas elásticas con que la estructura se opone a la deformación. De esta manera, las características más relevantes en la idealización estructural son la masa y la rigidez de la misma.

En general, el comportamiento de una estructura de un grado de libertad puede idealizarse con el modelo mecánico de la figura 2.2, en que toda la masa vibrante de la estructura se ha concentrado en un bloque rígido de masa “M” y toda la deformabilidad de la estructura se ha centrado en un resorte sin masa de constante “K” que representa la rigidez de la estructura.

Fig 2.2: Idealización de un Sistema de un grado de Libertad no amortiguado



Fuente: Chopra, 2001.

Antes de estudiar la respuesta de una estructura sometida a una sollicitación dinámica, es conveniente determinar detalladamente las propiedades vibratorias naturales de la estructura, independiente de las características de la excitación. Para esto se considera la situación conocida como vibración libre y que corresponde al movimiento vibratorio que desarrolla la estructura cuando esta libre de toda excitación externa. La ecuación diferencial que gobierna la vibración libre del sistema de la estructura de un grado de libertad se puede derivar a partir del modelo simplificado de la figura 2.2, estableciendo el equilibrio dinámico de las fuerzas que actúan sobre masa “M” y haciendo $P(t)=0$ (vibración libre), entonces se obtiene:

$$m \ddot{x} + k x = 0 \quad (2.1. a)$$

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (2.1.b)$$

Si las condiciones iniciales para $t=0$ son:

$$\begin{aligned}x(0) &= X_0 \\ \dot{x}(0) &= \dot{X}_0\end{aligned}\tag{2.2}$$

La solución general de esta ecuación corresponde a una vibración sinusoidal del tipo:

$$x(t) = X_0 \cos(\omega t) + \frac{\dot{X}_0}{\omega} \sin(\omega t)\tag{2.3.a}$$

$$x(t) = u_0 \sin(\omega t + \phi)\tag{2.3.b}$$

Donde:

ω : Frecuencia propia o natural de vibración del sistema, en [rad/seg]

u_0 : Amplitud del movimiento.

k : Corresponde a la rigidez del sistema.

m : Corresponde a la masa del sistema.

ϕ : Ángulo de fase.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}\tag{2.4.a}$$

$$u_0 = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega}\right)^2}\tag{2.4.b}$$

Donde:

T: Periodo natural de vibración, en [seg]

ω : Frecuencia propia o natural de vibración del sistema, en [rad/seg]
(definida en la ecuación 2.4.a).

2.3 OSCILADOR DE UN GRADO DE LIBERTAD CON VIBRACIÓN LIBRE AMORTIGUADA

Al definir un modelo idealizado para estudiar a través de él, el comportamiento de un sistema real, es preciso tomar todas las precauciones necesarias para que la simulación sea lo más fiel posible a la realidad. En el caso del problema de vibraciones, se puede observar que la idealización del sistema esquematizado en la Fig 2.2 conduce a un movimiento armónico durante la vibración libre como el ilustrado en la Fig 2.3. Sin embargo, en la realidad la vibración de un sistema se ve atenuada con el tiempo. Esto se debe a que los sistemas reales no son conservativos como se ha supuesto en la idealización, sino que disipan energía.

Esta energía es disipada por medio de las propiedades intrínsecas que poseen los materiales, alguna de las formas más corrientes de agregar al sistema este fenómeno de disipación de energía es a través de alguna de las siguientes idealizaciones:

- **Amortiguamiento viscoso:** Representa la resistencia opuesta por un fluido a un cuerpo que se mueve en él. Se idealiza como una fuerza proporcional a la velocidad del movimiento y por lo tanto proporcional también a la frecuencia de la vibración.
- **Amortiguamiento de fricción:** Representa la resistencia al movimiento opuesta por el roce. Es prácticamente independiente del movimiento, motivo por el cual cobra especial importancia hacia el final de la vibración, cuando los otros amortiguamientos se toman despreciables.

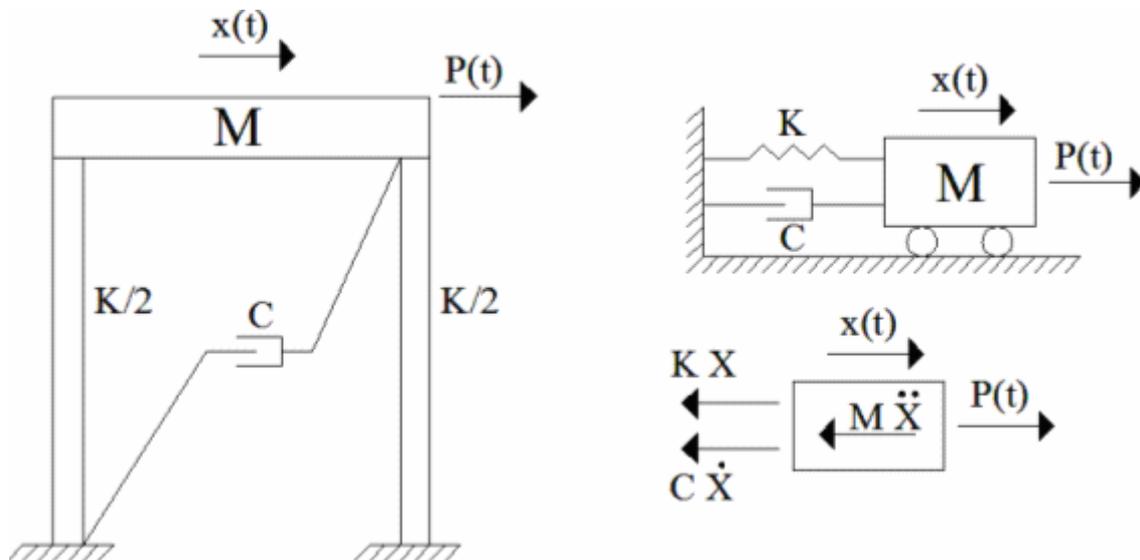
- **Amortiguamiento estructural:** Representa el mecanismo de disipación de energía debido al roce interno de materiales deformables. Se idealiza como una fuerza proporcional a la deformación y por lo tanto independiente de la frecuencia

2.3.1 AMORTIGUAMIENTO VISCOSO:

En la práctica, debido principalmente a simplificaciones analíticas, el tipo de amortiguamiento más usado en las idealizaciones dinámicas es el amortiguamiento viscoso. Esta decisión no implica que el amortiguamiento real encontrado en sistemas estructurales sea de este tipo, sino que más bien se basa en la observación práctica de que con esta idealización es posible representar satisfactoriamente el comportamiento vibratorio de las estructura reales con una complicación matemática mínima (Ruiz, 1974).

El comportamiento de una estructura de un grado de libertad con una fuerza de amortiguamiento se puede idealizar como en la figura siguiente.

Fig 2.4: Idealización de un Sistema de un grado de libertad con Amortiguamiento Viscoso



Fuente: Chopra, 2001.

La ecuación diferencial que gobierna el movimiento de vibración libre de un sistema amortiguado de una estructura de un grado de libertad se puede derivar a partir

del modelo simplificado de la figura 2.4(b), estableciendo el equilibrio dinámico de las fuerzas que actúan sobre masa “M” y haciendo $P(t)=0$ (vibración libre), entonces se obtiene:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = 0 \quad (2.6.a)$$

$$\ddot{x} + 2 \xi \omega \dot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (2.6.b)$$

Donde:

ω : Frecuencia propia o natural de vibración del sistema, en [rad/seg]
(definida en la ecuación 2.4.a).

ξ : Razón de amortiguamiento crítico, que corresponde a la razón del coeficiente de amortiguamiento y el amortiguamiento crítico.

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega} \quad (2.7)$$

El amortiguamiento crítico corresponde al máximo valor que puede tener el coeficiente de amortiguamiento, para que se pueda tener un movimiento vibratorio y esta dado por la expresión:

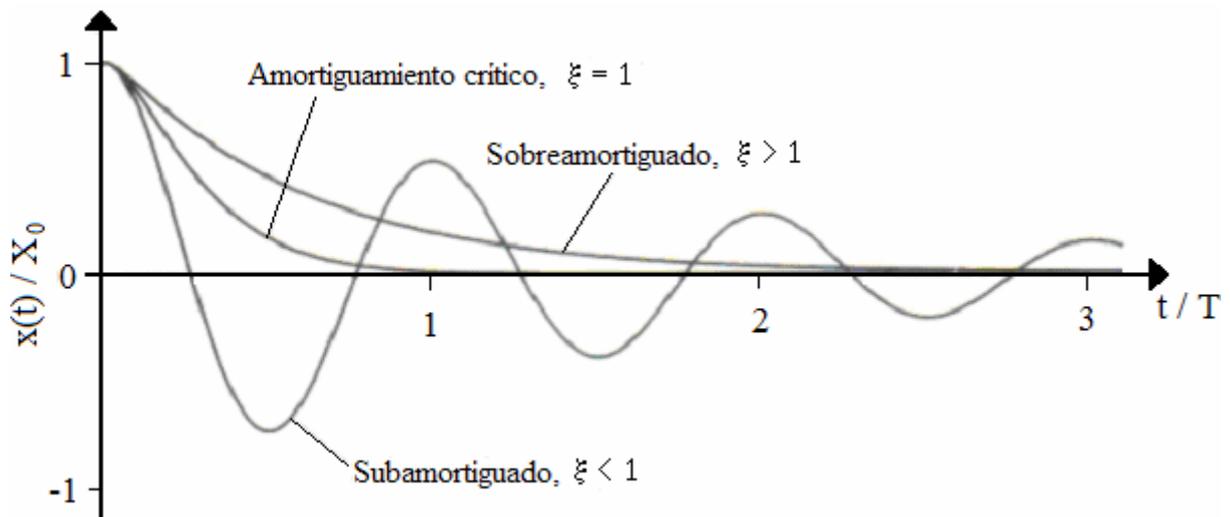
$$c_{cr} = 2m\omega = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega} \quad (2.8)$$

2.3.2 TIPOS DE MOVIMIENTO:

La ecuación 2.6, puede tener tres soluciones dependiendo del valor que toma en coeficiente de amortiguamiento, estos son:

- $c = c_{cr}$ o $\xi = 1$, el sistema retorna a la posición de equilibrio sin oscilar, este corresponde a un movimiento “Críticamente Amortiguado”.
- $c > c_{cr}$ o $\xi > 1$, el sistema nuevamente retorna a la posición de equilibrio sin oscilar, este corresponde a un movimiento “Sobreamortiguado”.
- $c < c_{cr}$ o $\xi < 1$, el sistema oscila sobre la posición de equilibrio, de tal forma que la amplitud del movimiento decrece en forma progresiva, este corresponde a un movimiento “Subamortiguado”.

Fig 2.5: Vibración libre de un Sistema Amortiguado



Fuente: Chopra, 2001.

En adelante solo se comentará el caso de movimiento “Subamortiguado” ($c < c_{cr}$ o $\xi < 1$), debido que este es el de mayor interés en dinámica de estructuras, ya que la razón de amortiguamiento crítico presente en estas es muy baja.

Tabla 2.1: Relaciones de Amortiguamiento típico para estructuras

TIPO DE CONSTRUCCIÓN	ξ (%)
Marco de acero soldado	2
Marco de acero soldado o apernado con revestimiento rigido	5
Marco de acero con muros de cortante de hormigón	7
Marco de hormigón	5
Marco de hormigón con revestimiento rigido	7
Marco de hormigón con muros de corte de hormigón	10
Edificios con muros de corte de hormigón y/o mampostería	10
Construcción con muros de madera	15

Fuente: Dowrick, 1984.

2.3.3 SISTEMA SUBAMORTIGUADO:

La solución de la ecuación 2.6 para un sistema “Subamortiguado” ($c < c_{cr}$ o $\xi < 1$), sujeto a las condiciones iniciales de la ecuación 2.2, es:

$$x(t) = e^{-\xi\omega t} \left[X_0 \cos(\omega_D t) + \frac{\dot{X}_0 + \xi \omega X_0 \sin(\omega_D t)}{\omega_D} \right] \quad (2.9.a)$$

$$x(t) = u_0 e^{-\xi\omega t} \sin(\omega_D t + \phi) \quad (2.9.b)$$

Donde:

ω : Frecuencia propia o natural de vibración del sistema, en [rad/seg.]
(definida en la ecuación 2.4.a).

ξ : Razón de amortiguamiento crítico, que corresponde a la razón del coeficiente de amortiguamiento y el amortiguamiento crítico, (definido en la ecuación 2.7).

ω_D : Frecuencia amortiguada del sistema, [rad/seg.]

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.10)$$

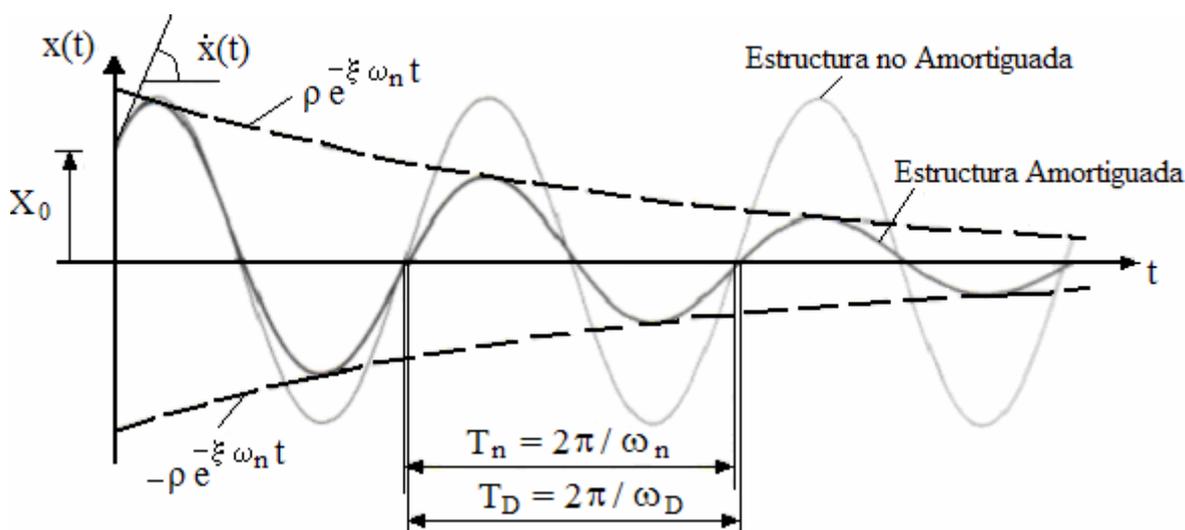
u_0 : Es la amplitud máxima del movimiento.

ϕ : Ángulo de fase.

$$u_0 = \sqrt{X_0^2 + \left[\frac{\dot{X}_0 + \xi \omega X_0}{\omega_D} \right]^2} \quad (2.11)$$

En la figura 2.6 se muestra la gráfica de la respuesta de vibración libre no amortiguada y amortiguada para un sistema de un grado de libertad, con razón de amortiguamiento crítico de 5%.

Fig 2.6: Vibración libre de un Sistema Amortiguado y otro no Amortiguado



Fuente: Chopra, 2001.

Al igual que en el sistema no amortiguado, el tiempo que demora la masa en recorrer un ciclo completo de vibración, se llama periodo amortiguado de vibración y se define como:

$$T_D = \frac{T}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (2.12)$$

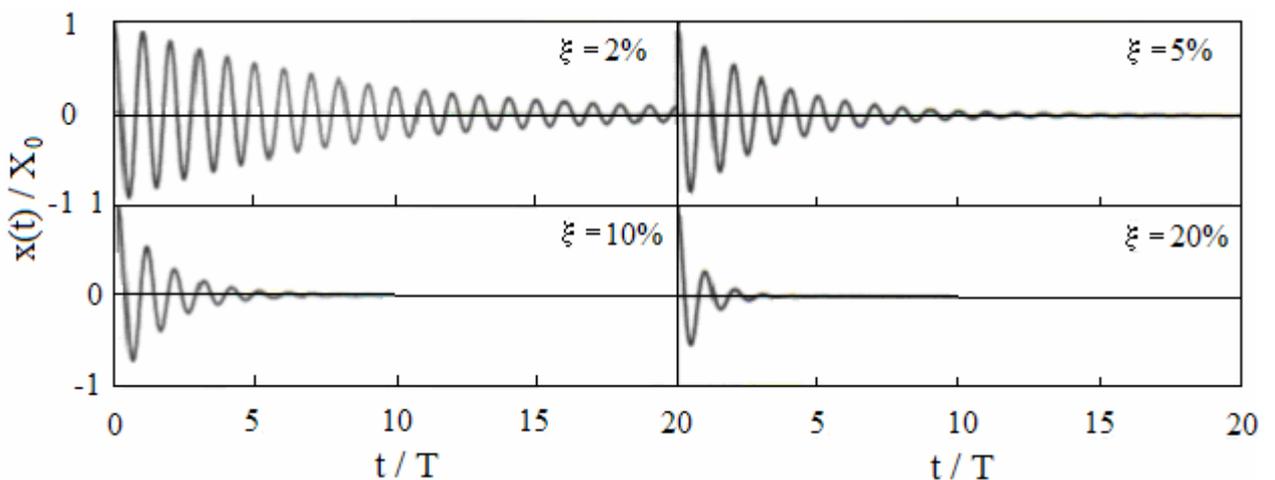
Como se dijo anteriormente el valor del coeficiente de amortiguamiento para estructuras reales, es mucho menor que el coeficiente de amortiguamiento crítico y usualmente la razón de amortiguamiento crítico se encuentra en un rango entre 2% y 10%. Sustituyendo para el valor extremo $\xi=0,1$ en la ecuación 2.10, se obtiene:

$$\omega_D = 0,995\omega \quad (2.13)$$

En la ecuación anterior se puede observar que el amortiguamiento no influye mayormente en la frecuencia propia de la estructura. Es por esto que en la práctica la frecuencia natural para el sistema amortiguado, puede tomarse como igual a la frecuencia natural no amortiguada.

El efecto más importante del amortiguamiento es que este es proporcional al decaimiento de la amplitud del movimiento en vibración libre. Esto se muestra en la figura 2.7, para cuatro sistemas con el mismo periodo y desplazamiento inicial X_0 sometido a vibración libre con diferentes razones de amortiguamiento

Fig 2.7: Vibración libre para diferentes porcentajes de Amortiguamiento crítico



Fuente: Chopra, 2001.

2.4 OSCILADOR DE UN GRADO DE LIBERTAD SOMETIDO A UNA EXCITACIÓN ARMÓNICA

La respuesta de un sistema de un grado de libertad bajo una excitación armónica es un tópico clásico en dinámica de estructuras, no solo porque tal excitación es encontrada en ciertos sistemas mecánicos (por ejemplo en el problema de desbalanceo en máquinas), sino también porque el entendimiento de la respuesta de las estructuras sometidas bajo este tipo de carga, da una visión para la comprensión de sistemas sometidos a otros tipos de fuerza como son los sistemas expuestos a una excitación basal (carga sísmica).

La ecuación diferencial que gobierna el movimiento de un sistema amortiguado de una estructura de un grado de libertad sometido a una carga armónica se puede derivar a partir del modelo simplificado de la figura 2.4, estableciendo el equilibrio dinámico de las fuerzas que actúan sobre masa “M” y haciendo $P(t)=P_0 \text{ sen}(pt)$ (excitación armónica), entonces se obtiene:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = P_0 \text{ sen}(p t) \quad (2.14)$$

Donde:

P_0 : Es la amplitud de la excitación.

p : Es la frecuencia excitadora.

La solución de la ecuación 2.14, está compuesta por dos términos:

- 1) Una componente debida a la vibración libre, propia del sistema, que se denomina “componente transiente” del movimiento por cuanto decae y tiende a desaparecer por efecto del amortiguamiento.

- 2) Una componente debida a la energía entregada al sistema por la excitación externa que se denomina “componente o estado de régimen” del movimiento, por cuanto es la componente de la respuesta que prevalece una vez atenuada la vibración libre.

La solución de la ecuación 2.14, sujeto a las condiciones iniciales de la ecuación 2.2, es:

$$x(t) = \underbrace{e^{-\xi\omega t} (A \cos(\omega_D t) + B \sin(\omega_D t))}_{\text{TRANCIENTE}} + \underbrace{C \sin(p t) + D \cos(p t)}_{\text{ESTADO DE RÉGIMEN}} \quad (2.15)$$

Donde:

A, B, C y D: Son constantes que dependen de las condiciones iniciales.

En la mayoría de los problemas prácticos, el amortiguamiento intrínscico de las estructuras hace desaparecer rápidamente el efecto transiente de la vibración propia, y sólo prevalece en el movimiento la componente de régimen. La respuesta de régimen a una excitación armónica, también es armónica y de la misma frecuencia, aunque no necesariamente en fase con la excitación.

Así que considerando solo el estado de régimen, la solución de la ecuación 2.14, puede describirse como:

$$x(t) = X \text{ sen } (pt - \phi) \quad (2.16)$$

Donde:

X: Es la amplitud del movimiento.

p: Es la frecuencia de la excitación.

ϕ : Ángulo de fase de la respuesta con respecto a la excitación.

$$X = \frac{P_0/K}{\sqrt{\left[1 - \frac{p^2}{\omega^2}\right]^2 + \left[2\xi \frac{p}{\omega}\right]^2}} \quad (2.17)$$

$$\tan \phi = \frac{2\xi \frac{p}{\omega}}{1 - \left(\frac{p}{\omega}\right)^2} \quad (2.18)$$

2.4.1 AMPLIFICACIÓN Y ATRASO DE LA RESPUESTA DINÁMICA:

Las ecuaciones 2.17 y 2.18 definen las características de la respuesta, en estado de régimen, de un sistema solicitado por una excitación armónica. Al hablar de estado de régimen, se supone que la respuesta transiente ha desaparecido lo que implica la existencia de amortiguamiento en el sistema, por lo tanto, es pertinente puntualizar que las expresiones de las ecuaciones 2.17 y 2.18, son válidas sólo para sistemas amortiguados y no son aplicables a casos en que el grado de amortiguamiento sea nulo.

De un análisis de las ecuaciones 2.17 y 2.18, es posible concluir que las características de la respuesta dependen del grado de amortiguamiento de la estructura (ξ) y de la relación entre la frecuencia excitadora y la frecuencia propia.

Si se define como deformación estática la amplitud máxima de la deformación, cuando la sollicitación se aplica en forma estática, esto es:

$$X_{\text{est}} = \frac{P_0}{K} \quad (2.19)$$

Y la razón de frecuencias como:

$$\beta = \frac{p}{\omega} \quad (2.20)$$

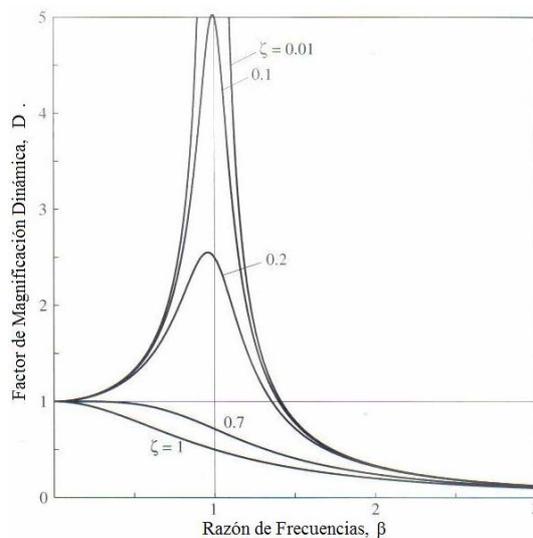
La razón entre la amplitud de movimiento en estado de régimen “X” (definido en la ecuación 2.17) y la amplitud estática (definida en la ecuación 2.19), se obtiene lo que se conoce como “Factor de Magnificación Dinámica” (D), esto es:

$$D = \frac{X}{X_{est}} = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (2.21)$$

Así mismo el ángulo de desfase o de atraso de la respuesta, puede expresarse según la siguiente expresión:

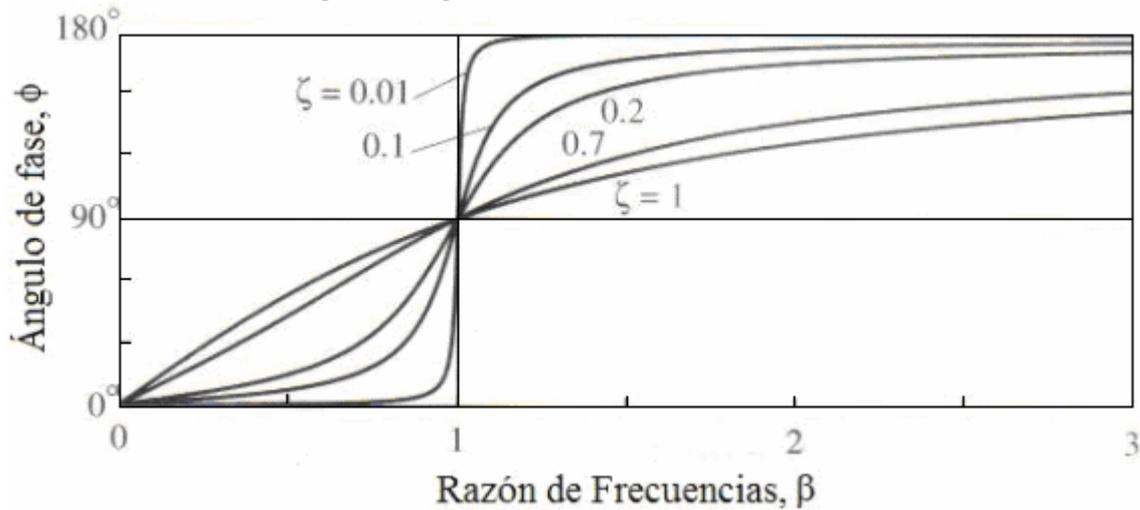
$$\tan \phi = \frac{2\xi\beta}{1-\beta^2} \quad (2.22)$$

Fig 2.8: Factor de Magnificación dinámica, en función de la razón de frecuencias.



Fuente: Chopra, 2001.

Fig 2.9: Ángulo de fase de la razón de frecuencias



Fuente: Chopra, 2001.

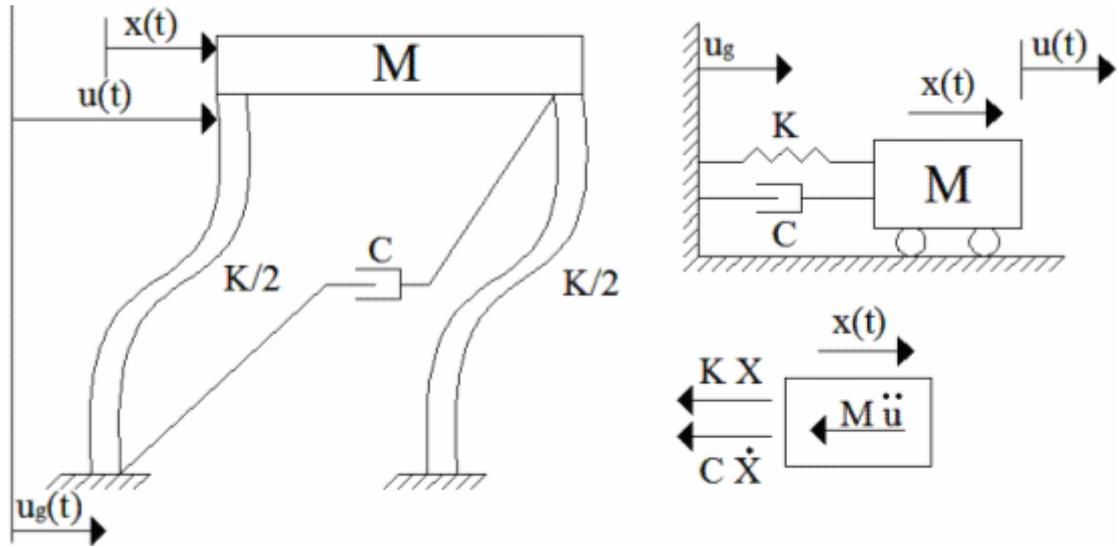
2.5 OSCILADOR DE UN GRADO DE LIBERTAD CON EXCITACIÓN BASAL

Una de las sollicitaciones dinámicas más importantes que actúan sobre las estructuras son las causadas por los movimientos sísmicos. En efecto, las vibraciones del suelo al paso de las ondas sísmicas se transmiten a las estructuras dando origen a fuerzas de inercia que a su vez originan deformaciones y esfuerzos internos de carácter dinámico en las estructuras.

Para fines prácticos es usual descomponer el movimiento del suelo causado por el sismo, en tres componentes traslacionales, una vertical y dos horizontales mutuamente perpendiculares y orientadas según las direcciones principales de la estructura. Debido a que generalmente, las características vibratorias horizontales de las estructuras de edificios son más significativas que las verticales, es usual considerar los efectos sísmicos sobre edificios, solamente como fuerzas laterales.

La manera más común de considerar el efecto dinámico del movimiento del suelo sobre una estructura se ilustra esquemáticamente en la Fig.2.10, que muestra una estructura de un grado de libertad sometida al efecto de una traslación horizontal del suelo $u_g(t)$, medida con respecto a un punto de referencia fijo.

Fig 2.10: Sistema de un grado de libertad sometido a una excitación basal



Fuente: Chopra, 2001.

La ecuación diferencial que gobierna el movimiento de vibración de un sistema amortiguado de una estructura de un grado de libertad, sometido a una excitación basal u_g se puede derivar a partir del modelo simplificado de la figura 2.8(b), estableciendo el equilibrio dinámico de las fuerzas que actúan sobre masa “M”, entonces se obtiene:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = -m \ddot{u}_g \quad (2.23.a)$$

$$\ddot{x} + 2 \xi \omega \dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{u}_g \quad (2.23.b)$$

Donde:

ω : Frecuencia propia o natural de vibración del sistema, en [rad/seg] (definida en la ecuación 2.4.a).

ξ : Razón de amortiguamiento crítico, que corresponde a la razón del coeficiente de amortiguamiento y el amortiguamiento crítico (definido en la ecuación 2.7).

La solución de la ecuación 2.23, esta dado por:

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \text{sen}(\omega_D(t-\tau)) d\tau \quad (2.24)$$

En la mayoría de los casos, la aceleración basal \ddot{u}_g es una función muy difícil de integrar, por lo que hace complicado poder conocer la respuesta de la estructura.

Para poder resolver este problema se han desarrollado diversos métodos numéricos que son aproximados, que para efectos prácticos dan una buena solución a la respuesta estructural. Como a modo de ejemplo podemos mencionar el método de Newmark, el método de Wilson, entre otros.

2.5.1 ESPECTRO DE RESPUESTA:

Como en la mayoría de los problemas de ingeniería, más que la variación en el tiempo de la respuesta, interesa su valor máximo. Para esto, resulta conveniente definir el valor máximo que toma la integral de la ecuación 2.24, esto es:

$$S_v(\omega, \xi) = \text{MÁX} \left| -\int_0^t u_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \text{sen}(\omega_D(t-\tau)) d\tau \right| \quad (2.25)$$

Esta cantidad se denomina velocidad espectral o pseudo velocidad espectral y sirve para calcular los valores máximos de la deformación (deformación espectral) y la aceleración (aceleración espectral) y del esfuerzo interno en la estructura debido a la excitación sísmica, estos son:

$$S_d(\omega, \xi) = \frac{S_v}{\omega_D} \quad (2.26)$$

$$S_a(\omega, \xi) = \omega_D S_v \quad (2.27)$$

$$Q_{\text{máx}} = K S_d = M \frac{\omega^2}{\omega_D} S_v \quad (2.28)$$

Donde:

S_d : Deformación espectral.

S_a : Aceleración espectral.

$Q_{\text{máx}}$: Esfuerzo máximo en la estructura.

Los gráficos del período versus la deformación, velocidad y aceleración, se denominan espectros de deformaciones, velocidades y aceleraciones respectivamente para un determinado acelerograma.

Los espectros definidos se denominan espectros de respuesta y tienen la siguiente interpretación física:

- a) **Espectro de velocidades:** Es una medida de la energía máxima almacenada en el sistema.
- b) **Espectro de deformaciones:** Corresponde a una medida de la deformación máxima que alcanza la estructura.
- c) **Espectro de aceleraciones:** Corresponde a la aceleración máxima del sistema y por lo tanto es una medida de la fuerza sísmica máxima.

CAPITULO III:

BALANCE ENERGÉTICO EN ESTRUCTURAS Y SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

3.1 GENERALIDADES:

El diseño sísmico puede abordarse de dos maneras para asegurar la sobrevivencia de una estructura luego de una excitación telúrica. El primero que se conoce como el diseño sismorresistente convencional, se basa en crear estructuras lo suficientemente rígidas con la capacidad de deformarse para incursionar en el rango inelástico (estructuras dúctiles). Los ingenieros logran esto combinando sistemas estructurales como los muros de corte, marcos rígidos arriostrados y armaduras de acero de tal forma que sean capaces de resistir las cargas laterales debidas a la excitación sísmica. Aquí también debe tomarse en cuenta la forma de la planta de la estructura ya que se privilegian plantas simétricas frente a plantas irregulares, ya que estas últimas tienen problemas de excentricidad. La opción de los materiales a emplear, también es importante ya que existen materiales más dúctiles (como el acero) que otros. El suelo de fundación también es un factor super importante que influye en las características dinámicas de la estructura.

La segunda forma de hacer frente a las amenazas sísmicas que se ven sometidas las estructuras, consiste en el uso de sistemas sismorresistentes avanzados como dispositivos capaces de disipar energía. Estos se anexas a las estructura con el objetivo de reducir la respuesta dinámica de la misma, es decir, disminuir el desplazamiento, velocidad y aceleración que esta pueda experimentar.

Una primera clasificación de los dispositivos de protección sísmica puede ser:

- Sistemas de control pasivo.
- Sistemas de control activo.
- Sistemas de control semiactivo.
- Sistemas de control híbrido.

Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y a diferencia del resto de los sistemas, no precisan de aporte energético para su funcionamiento. Los sistemas activos, semiactivos e híbridos están formados por actuadores de fuerza y/o elementos pasivos, controladores a tiempo reales y dispositivos sensores instalados en la estructura.

3.2 BALANCE ENERGÉTICO DE ESTRUCTURAS:

La ecuación de balance de energía de un sistema estructural sometido a una excitación sísmica es:

$$E_i = E_k + E_s + E_a + E_d \quad (3.1)$$

Donde:

E_i : Corresponde a la energía de entrada por el sismo.

E_k : Energía Cinética.

E_s : Energía de deformación elástica.

E_a : Energía de amortiguamiento.

E_d : Energía por deformación inelástica o ductilidad.

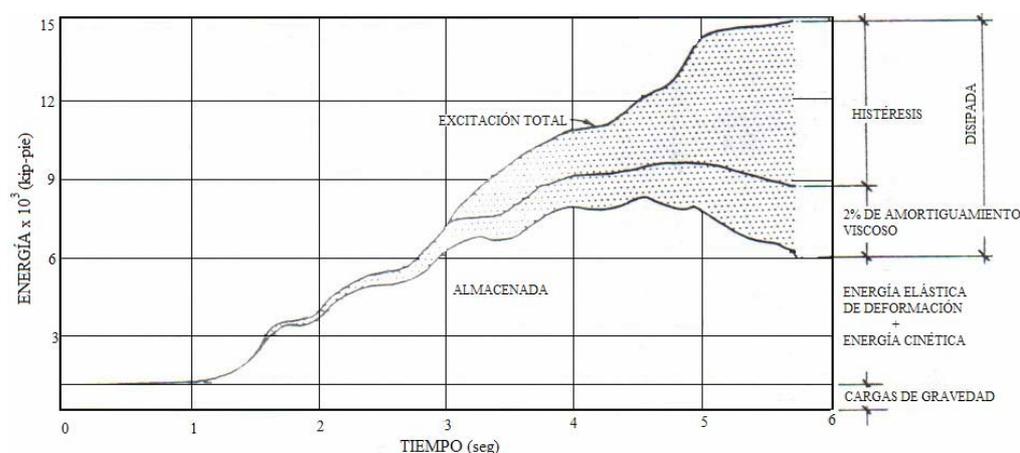
Para que el sistema estructural soporte la excitación sísmica la energía de entrada (E_i), debe ser absorbida por la suma de las energías cinética, elástica, de amortiguamiento e inelástica. O dicho de otra forma la capacidad de la estructura debe ser mayor que la demanda sísmica. Si se supone que para el sistema la energía de entrada (E_i) tiene un valor constante, para lograr un diseño sismorresistente óptimo será necesario en la ecuación anterior disipar parte de la energía total introducida al sistema. Esto es posible de dos maneras:

- 1) Aumentando ductilidad y la rigidez del sistema con el fin de agregar energía por deformación inelástica.
- 2) Aumentando la energía de amortiguamiento, agregando Dispositivos de Disipación de Energía.

La primera opción es lo que se hace en el diseño tradicional sismorresistente, que se basa en proveer una combinación de resistencia y ductilidad para soportar las cargas sísmicas, así el Ingeniero estructural se apoya en la ductilidad inherente de los sistemas estructurales detallados y construidos concientemente, para evitar fallas catastróficas aunque permitiendo cierto grado de daño en la estructura, pero evitando el colapso.

La segunda opción se logra incorporando dispositivos de disipación pasiva de energía al sistema, con el fin de absorber o consumir una porción importante de la energía sísmica, reduciendo así las demandas de disipación de energía por ductilidad en los miembros estructurales principales y minimizar así su posible daño estructural (Oviedo, 2003).

Fig 3.1: Gasto típico de Energía de un sistema con 2% de amortiguamiento debido a un sismo



Fuente: Dowrick, 1984.

El daño estructural debido a eventos sísmicos pasados, ha obligado a cuestionar la efectividad de las estructuras convencionales y los métodos de análisis empleados para valorar su respuesta. Por ejemplo se ha cuestionado lo siguiente:

- La imposibilidad de determinar a priori la demanda de ductilidad ante un evento sísmico y donde se va a producir.
- La presencia de fallas frágiles en sistemas supuestamente dúctiles.
- El elevado costo de reparación que supone un comportamiento dúctil basado en una disipación de la energía en el seno estructural.

Actualmente en los países desarrollados el diseño sismorresistente tiene la tendencia de buscar sistemas que localicen la demanda de ductilidad en elementos predeterminados. Esto obviamente supone claras ventajas:

- Resulta más factible garantizar la demanda de ductilidad.
- El control de calidad en los materiales y en ejecución puede ser más intenso en las zonas donde se establece la oferta de ductilidad.
- El daño resulta más predecible y la reparación más económica que en los sistemas basados en el daño estructural disperso.

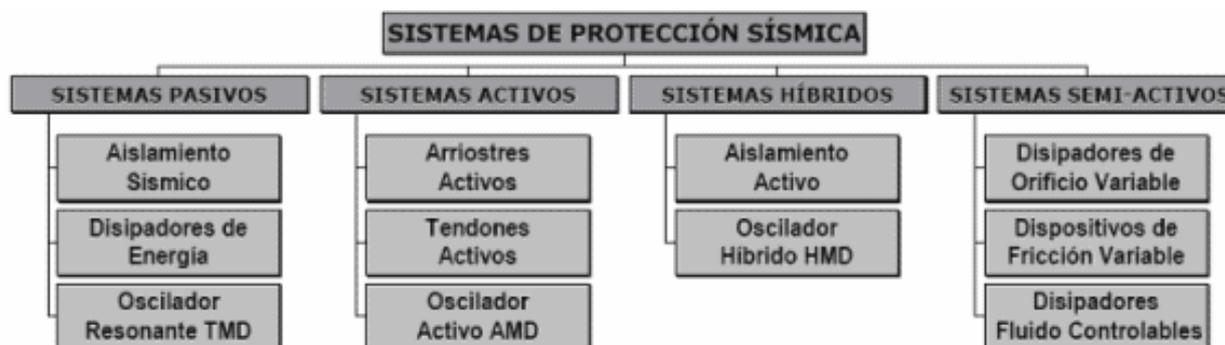
Algunos sistemas proponen que la oferta de ductilidad resida en zonas de la propia estructura, como es el caso de los pórticos excéntricos. Otra posibilidad consiste en el empleo de disipadores de energía externos a la estructura. Si bien forman parte del sistema estructural, se emplean como nexos y ello permite su fácil restitución en caso de sufrir daño.

3.3 SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA:

3.3.1 GENERALIDADES:

Los sistemas de protección sísmica empleados en la actualidad comprenden desde relativamente simples dispositivos de control pasivo hasta avanzados sistemas completamente activos. Los sistemas pasivos son tal vez los más conocidos e incluyen los sistemas de aislamiento sísmico y los sistemas mecánicos de disipación de energía. El aislamiento sísmico es el sistema más desarrollado en la familia, con continuos avances en dispositivos, aplicaciones y especificaciones de diseño, es más nuestro país ya cuenta con una norma de diseño para esta (NCh 2745 Of 2003). Como se dijo anteriormente los sistemas de protección sísmica pueden ser clasificados en cuatro categorías:

Fig 3.2: Sistemas de Protección Sísmica



Fuente: Zevallos et al, 2002

3.3.2 SISTEMAS DE CONTROL PASIVO:

Los sistemas de control pasivo emplean dispositivos bastantes simples que reducen la respuesta dinámica por medios totalmente mecánicos. Los sistemas pasivos más comunes son los aisladores sísmicos, los disipadores de energía y los osciladores resonantes o también conocidos como sistemas inerciales acoplados (Tunes Mass Damper).

3.3.2.1 CONTROL PASIVO CON AISLAMIENTO DE BASE:

El aislamiento sísmico es una estrategia de diseño basada en la premisa de que es posible separar una estructura de los movimientos del suelo mediante la introducción de elementos flexibles entre la estructura y su fundación. Los aisladores reducen notablemente la rigidez del sistema estructural, haciendo que el periodo fundamental de la estructura aislada sea mucho mayor que el de la misma estructura (Farzard, Kelly, 1999). Existen básicamente dos tipos de sistema de aislamiento: Los de apoyos elastoméricos y los de apoyo deslizante.

Los apoyos elastoméricos emplean una goma de caucho o neopreno reforzado con finas láminas de acero intercaladas. La notable flexibilidad lateral en el elastómero permite el desplazamiento lateral de los extremos del aislador, mientras que las láminas de refuerzo evitan el abultamiento del elastómero y le proporcionan una gran rigidez vertical. Existen tres tipos de aisladores ampliamente usados que son: Aislador elastomérico de bajo y alto amortiguamiento (LDR y HDR), Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y el Aislador de péndulo friccionante (FPS).

Fig 3.3: Aislador Basal de Alto Amortiguamiento (HDR)



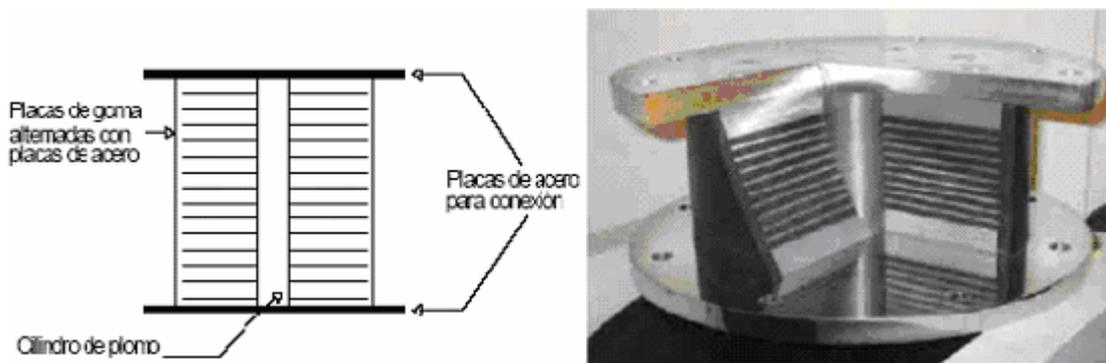
Fuente: Arriagada, 2005.

El aislamiento sísmico es un sistema ampliamente usado para la protección sísmica de diversos tipos de estructuras. Numerosos estudios teóricos, análisis numéricos y ensayos de laboratorio demuestran el excelente comportamiento que puede lograr este sistema en la protección de estructuras sometidas a eventos sísmicos moderados y severos. Adicionalmente, la efectividad de este sistema fue evidenciada

por los registros de la respuesta dinámica de los edificios con aislamiento de base sacudidos por los sismos de Northridge en 1994 y Kobe en 1995 (Zevallos, 2002).

Actualmente existen numerosas aplicaciones de sistemas de aislamiento de base en países como Japón, Estados Unidos, Nueva Zelanda, Italia y Chile. Estas aplicaciones corresponden principalmente a la construcción de nuevos edificios y el mejoramiento sísmico de estructuras existentes. Uno de los edificios en los que se demostró la factibilidad de los sistemas de aislamiento sísmico es el “Fire Command and Control Facility” en Los Ángeles. Este edificio es una central de emergencias que debe permanecer en operación incluso después de un sismo extremo. Para su construcción se realizó una comparación entre los esquemas de diseño convencional y de aislamiento sísmico para proveer el mismo grado de protección. En estos términos se estimó que el costo del edificio con aislamiento sísmico era un 6% menor que el correspondiente al edificio con un diseño convencional (Farzard, 1999).

Fig 3.4: Aislador Basal con Núcleo de Plomo

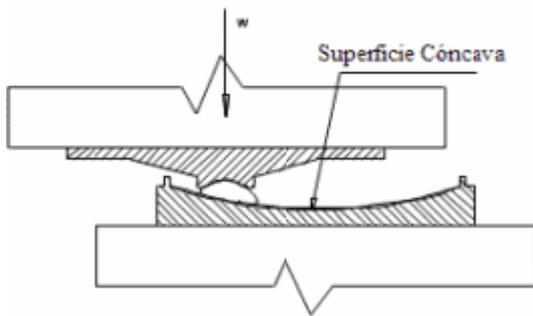


Fuente: Arriagada, 2005.

La prueba más severa a la que fue sometido un edificio con aislamiento sísmico hasta la fecha corresponde al hospital de docencia de la Universidad de Southern California. El edificio está ubicado a 36kms. del epicentro del terremoto de Northridge, ocurrido en 1994. Durante el terremoto el terreno bajo el edificio alcanzó una aceleración máxima de 0,49g mientras que las aceleraciones en el interior del edificio fueron entre 0,1g y 0,13g. Esto significa que la estructura fue aislada en forma efectiva de los movimientos del suelo, teniendo en cuenta que estos movimientos fueron lo

suficientemente intensos como para provocar daños importantes en edificios adyacentes (Kelly, 1999).

Fig 3.5: Aislador basal de Péndulo Friccionante



Fuente: Arriagada, 2005.

Nuestro país no está ajeno al uso de este sistema, es así ya contamos con estructuras donde han sido aplicadas, como son el puente Marga- Marga, el hospital del Centro San Carlos de la Universidad Católica y el edificio San Agustín de la Facultad de Ingeniería de la misma Universidad.

Fig 3.6: Edificio San Agustinas de la Pontificia Universidad Católica de Chile



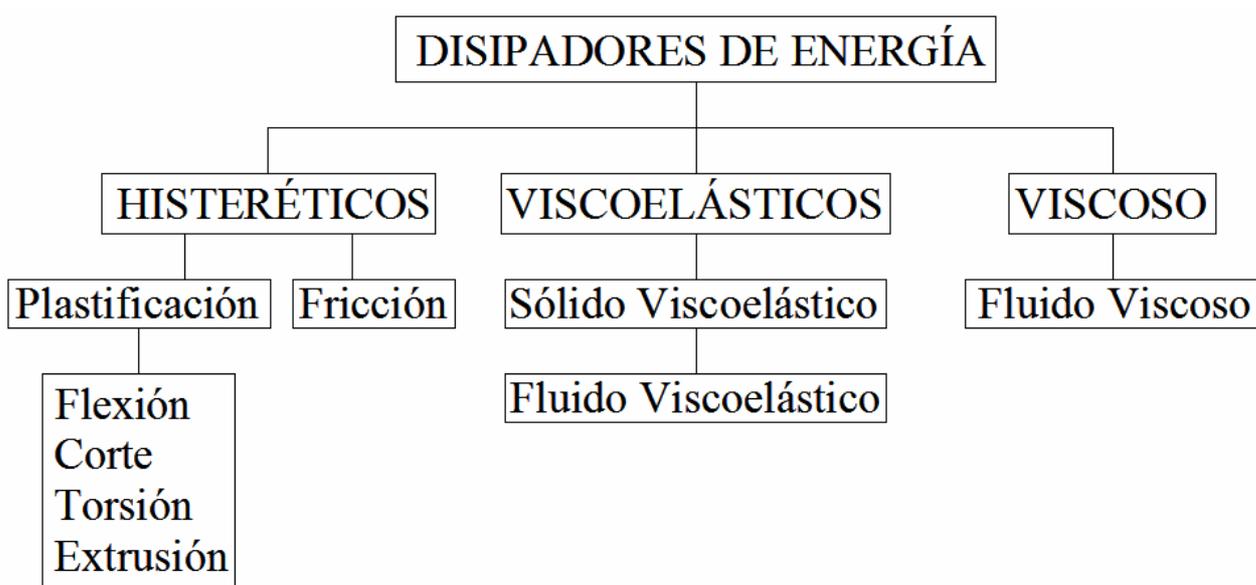
Fuente: Arriagada, 2005.

A diferencia de las técnicas convencionales de reforzamiento de edificios existentes, con el aislamiento sísmico se busca reducir la demanda a niveles en los que la capacidad existente en la estructura sea suficiente para resistir las cargas.

3.3.2.2 CONTROL PASIVO CON DISIPADORES DE ENERGÍA:

Los disipadores de energía son dispositivos diseñados para absorber la mayoría de la energía sísmica, evitando así que esta sea disipada mediante deformaciones inelásticas en los elementos estructurales. Pueden ser clasificadas según su comportamiento como Histeréticos, Viscoelásticos y Viscoso. Los disipadores Histeréticos se basan en la plastificación de metales y la fricción entre superficies. Estos dispositivos dependen básicamente del desplazamiento. Los disipadores Viscoelásticos pueden basarse en sólidos Viscoelásticos, fluidos Viscoelásticos y su comportamiento depende del desplazamiento y de la velocidad. Los dispositivos de fluidos Viscosos tienen un comportamiento que depende netamente de la velocidad.

Fig 3.7: Clasificación de los Disipadores de Energía



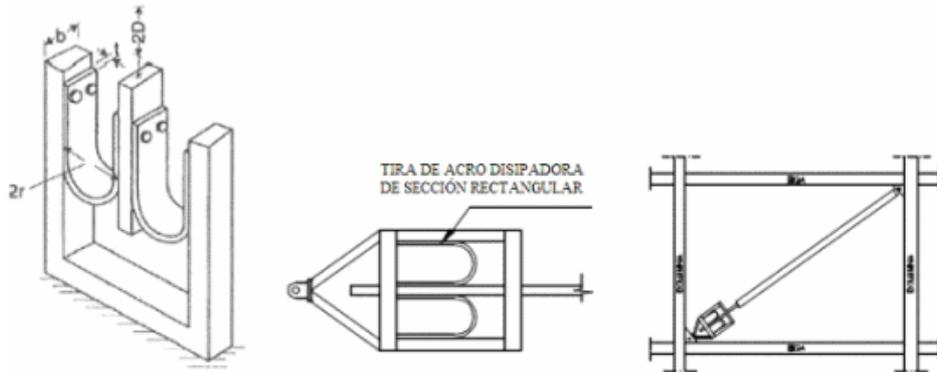
Fuente: Xavier, 2000.

3.3.2.2.1 DISIPADORES HISTERÉTICOS:

La plastificación de metales en disipadores se puede producir a partir de esfuerzos estructurales o bien a partir del proceso de extrusión. Cualquier esfuerzo, sea de flexión, corte, torsión o extrusión puede conducir a procesos de plastificación de

metales. El acero ha sido sin duda el metal más empleado en disipadores. Entre sus virtudes están las posibilidades constructivas que ofrece (fácil mecanizado y soldabilidad), su bajo costo y su elevada ductilidad.

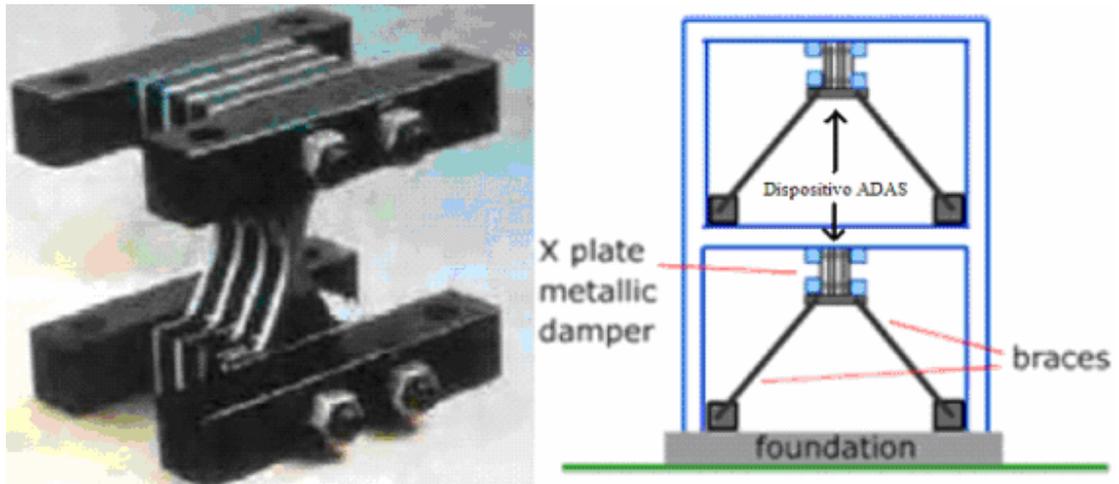
Fig 3.8: Disipador de Energía por Flexión



Fuente: Xavier, 2000.

Uno de los dispositivos metálicos más conocidos es el ADAS (Added Damping and Stiffness). Es un dispositivo compuesto por un conjunto de placas de acero paralelas, de espesor constante y sección transversal en forma de X, tal que frontalmente, es similar a dos trapecios unidos por la base menor (ver figura 3.9). El número de placas es variable, permitiendo ajustar el disipador a las necesidades de la estructura a la cual se incorpora, cada placa del dispositivo se encuentra impedido del giro en ambos extremos, de forma que un desplazamiento relativo entre estos en dirección perpendicular al plano de la placa produce una distribución de momentos flectores lineales, simétrica y con doble curvatura. El ancho del disipador se proporciona linealmente con la distribución de momentos flectores, lo cual deriva en una generalización de la plastificación en un corto intervalo de desplazamiento. La plastificación se produce en forma uniforme y estable, optimizando el proceso de disipación de energía.

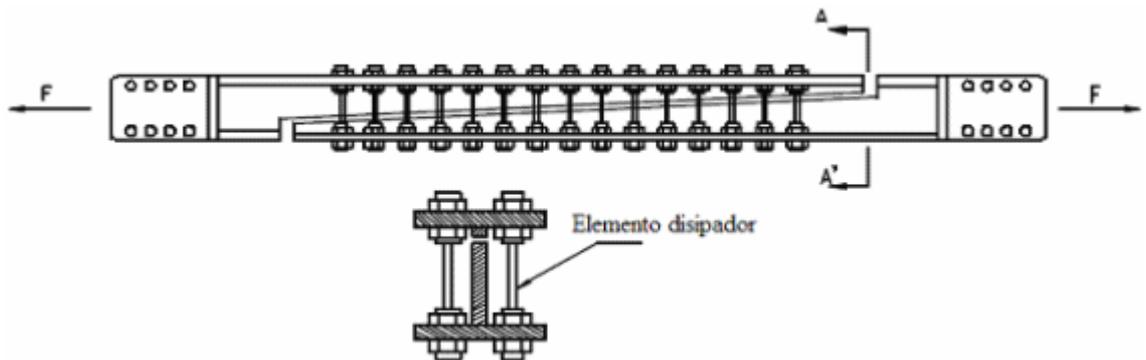
Fig 3.9: Disipador de Energía ADAS



Fuente: Cundumi, 2005.

Otro tipo de dispositivo denominado DUR (Dissipator Using steel Roods), que se basa en la plastificación por cortante en pernos tal como lo indica la figura 3.10. Estos son colocados como diagonales de arrostramiento, logrando así unos elementos prácticamente independientes de las acciones verticales y que resultan muy fáciles de instalar. Los disipadores están avalados por una amplia campaña de ensayo, a partir de los cuales se establecen modelos de predicción del comportamiento y de su capacidad última disipativa bajo la acción sísmica.

Fig 3.10: Disipador de Energía DUR

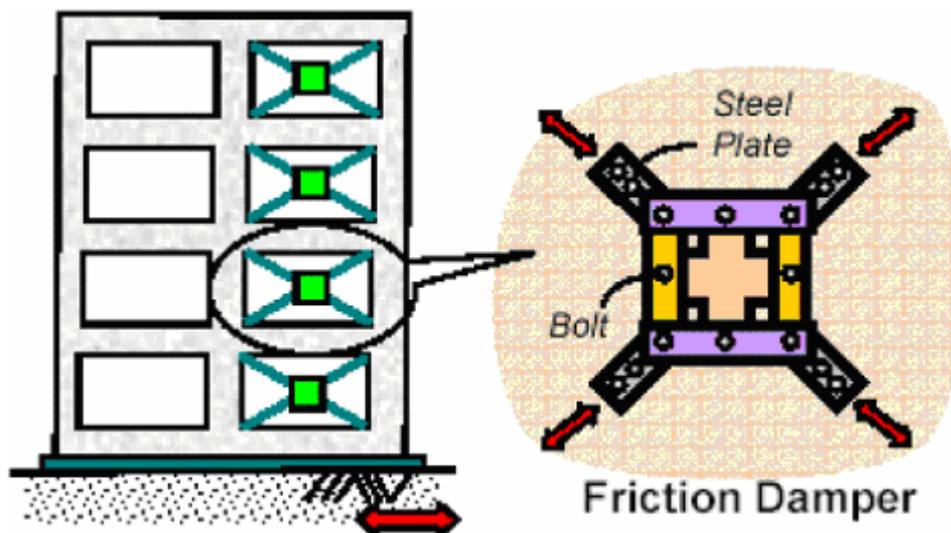


Fuente: Cundumi, 2005.

Los disipadores friccionantes son dispositivos que disipan la energía mediante las fuerzas de fricción que se presentan por el desplazamiento relativo entre dos superficies de contacto bajo presión y en el deslizamiento entre ellas. La fuerza de

fricción en cada conexión es igual al producto de la fuerza normal por el coeficiente de rozamiento. El mayor inconveniente que presentan estos dispositivos es que el coeficiente de fricción, durante el desplazamiento, depende de la velocidad, de la presión normal y de las condiciones de las superficies en contacto. Consecuentemente, resulta difícil garantizar un coeficiente de fricción independiente del tiempo y de las condiciones de los disipadores. Sin embargo, se ha observado que la variación del coeficiente de fricción durante el desplazamiento no afecta significativamente a la respuesta estructural si la estructura permanece en el rango lineal elástico, mientras que esta influencia puede ser significativa si esta entra en el rango no lineal.

Fig 3.11: Disipador de Energía del tipo Friccionante



Fuente: Cundumi, 2005.

3.3.2.2.2 DISIPADORES VISCOELÁSTICOS:

Los disipadores Viscoelásticos han sido empleados con éxito, durante las últimas décadas, para reducir la respuesta de edificios altos ante la acción del viento. De forma más reciente se ha estudiado su utilización con fines sismorresistente. Los disipadores Viscoelásticos sólidos están formados por placas metálicas unidas por capas finas de material viscoelástico (ver Fig.3.12) y presentan ciclos histeréticos característicamente elípticos. Su comportamiento depende del desplazamiento y la velocidad, su acción

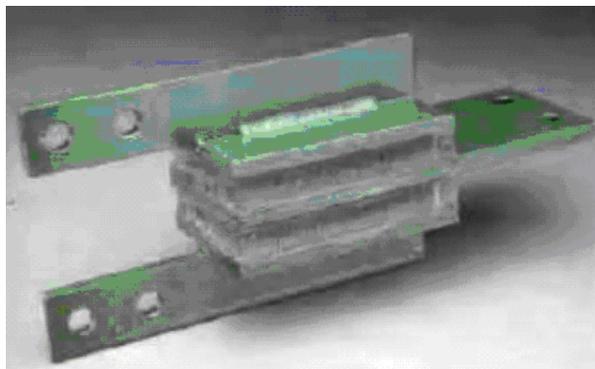
disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural, presentan algunas ventajas con relación a los disipadores Histeréticos, tales como:

- No requieren de una gran fuerza para lograr disipar energía.
- No cambian de forma significativa los períodos de vibración de la estructura, con lo cual resulta posible linealizar el comportamiento estructural y realizar una modelación más sencilla.

Entre sus principales desventajas podemos mencionar:

- La poca variación del período fundamental no evita el comportamiento resonante.
- Los materiales Viscoelásticos, en general son sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación y resulta necesario minimizar la influencia de estas variable en sus rangos de servicio en estructuras sismorresistentes para que su comportamiento resulte predecible.
- Para conseguir un aumento del amortiguamiento estructural a valores que reduzcan significativamente la respuesta estructural ante un sismo severo es necesaria una gran cantidad de dispositivos.
-

Fig 3.12: Disipador de Energía Viscoelástico



Fuente: Cundumi, 2005.

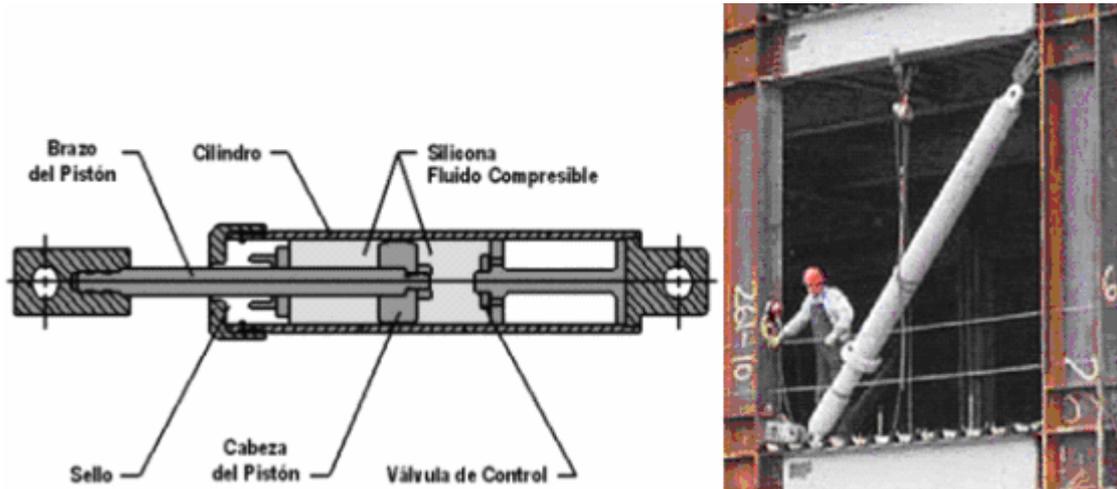
3.3.2.2.3 DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO:

Básicamente un amortiguador viscoso es comparable a los amortiguadores utilizados en los autos con la diferencia que los utilizados en estructuras operan en un rango de fuerzas más alto. Además, los amortiguadores utilizados en estructuras son considerablemente mayores que los usados en los autos y también son construidos en acero inoxidable y otros materiales extremadamente duraderos los cuales tienen una duración de por lo menos 40 años. El fluido de estos amortiguadores tiene las siguientes propiedades generales: es inerte, no inflamable, no tóxico, y estable por largos periodos de tiempo (Arroyo, 2000).

Los dispositivos de fluido viscoso disipan energía forzando el flujo de un fluido a través de un orificio, su comportamiento depende netamente de la velocidad. Los amortiguadores viscosos han sido utilizados con éxito en estructuras civiles, especialmente en áreas geográficas de alta sismicidad. La aplicación principal de estos dispositivos ha sido en edificios multipisos y en la rehabilitación de estructuras históricas. También se han utilizado para renovar estructuras existentes de forma tal que éstas cumplan con los requerimientos modernos que exigen los códigos de diseño estructural. De hecho, la adición de amortiguadores viscosos a una estructura puede elevar el amortiguamiento de la estructura a un 30 % del amortiguamiento crítico o más. Por consiguiente, esta adición puede reducir las aceleraciones y desplazamientos laterales por un 50% respecto a la estructura sin amortiguadores (Constantinou y Symans, 1992).

Dado que la presente tesis se desarrolla en el ámbito del control de la respuesta dinámica de estructuras con la adición de dispositivos viscosos, en el capítulo IV se desarrollará un estado del arte más amplio de este sistema.

Fig 3.13: Disipador de Energía de Fluido Viscoso



Fuente: Arroyo, 2000.

3.3.2.3 CONTROL PASIVO CON SISTEMAS INERCIALES ACOPLADOS:

Dentro de este tipo de disipadores existen principalmente de dos tipos: Amortiguadores de masa sintonizada (“Tunes Mass Damper”) y los Amortiguadores de líquido sintonizado. Estos sistemas transfieren energía de un subsistema principal excitado externamente a otro subsistema secundario no excitado, acoplado al primero. El amortiguador de masa sintonizado es una herramienta ingenieril clásica consistente en una masa, un resorte y un amortiguador viscoso colocado en el sistema vibrante principal para atenuar la vibración no deseada a una frecuencia determinada. La frecuencia natural del amortiguador de sintoniza con la frecuencia natural del sistema principal provocando que el amortiguador vibre en resonancia, disipando la energía absorbida a través de los mecanismos de amortiguamiento del Tunes Mass Damper (Ambrosini et al, 2004).

Fig. 3.14 (a): Amortiguador de masa sintonizada.

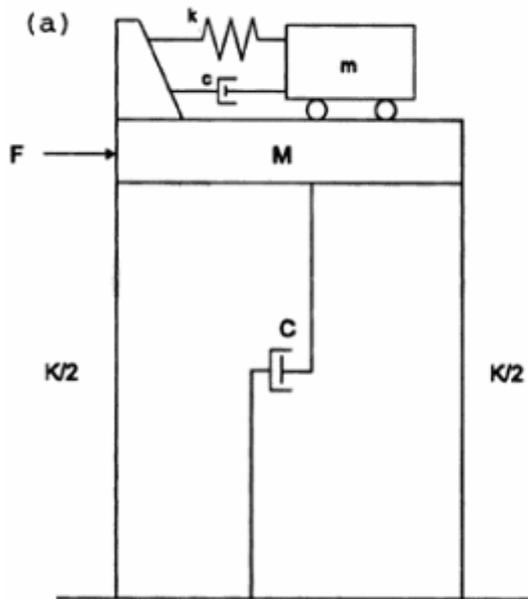
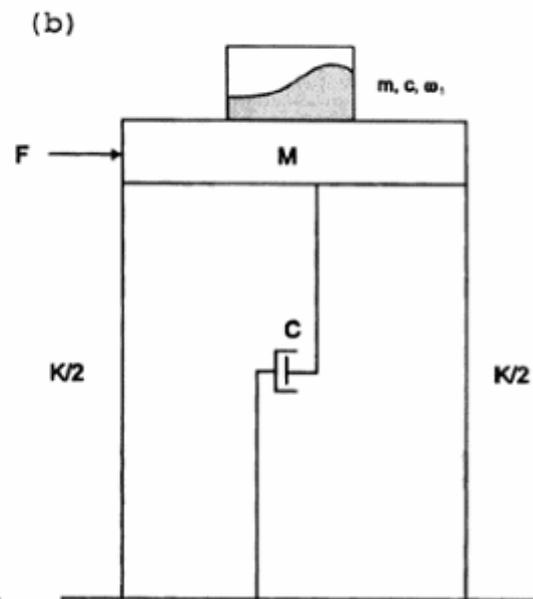


Fig. 3.14 (b): Amortiguador de líquido sintonizado.



Fuente: Ambrosini et al, 2004.

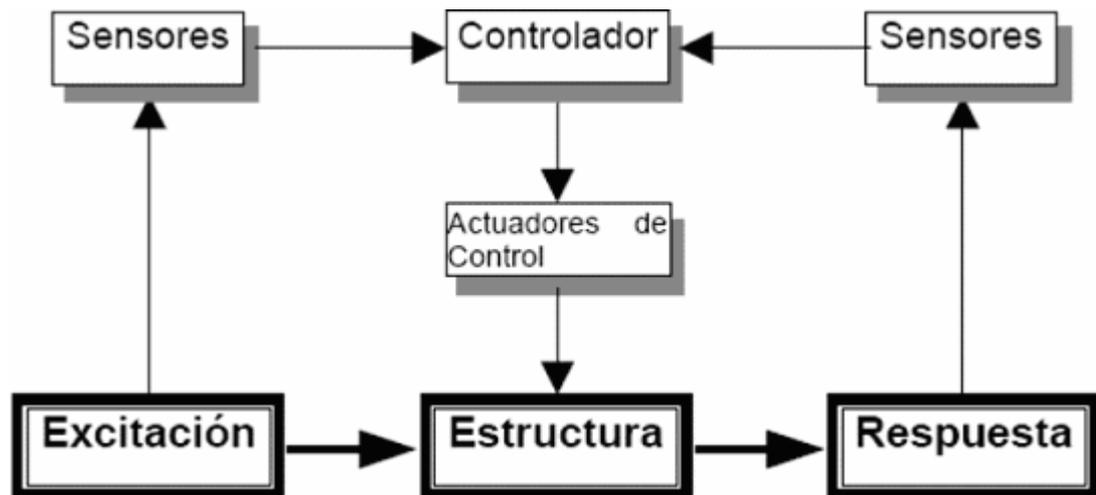
La principal desventaja de este sistema es que se requiere de una gran masa e importante disponibilidad de espacio para su instalación. Otro inconveniente del sistema es que su efectividad se reduce a una banda estrecha de frecuencias cercanas al periodo fundamental del edificio y pueden presentarse situaciones en las que el edificio se sitúe fuera de su periodo fundamental, por ejemplo en un edificio esbelto se puede manifestar con distinta intensidad modos de vibración diferentes al fundamental, en función de las características de la excitación o también durante terremotos severos la estructura puede llegar a comportarse plásticamente, alargando el periodo de la estructura y comportando una pérdida de sintonía con el TMD.

3.3.3 SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO:

Estos sistemas son dispositivos que generan fuerzas de control para modificar la respuesta dinámica de la estructura. Las fuerzas de control son aplicadas mediante actuadores integrados a un conjunto de sensores, controladores y procesadores de información en tiempo real, en la figura 3.15 se describe esquemáticamente el proceso. Los sensores instalados en la estructura miden las excitaciones externas y la respuesta dinámica de la estructura, los dispositivos de procesamiento en tiempo real procesan la

información proveniente de los sensores y calculan las fuerzas de control necesarias para estabilizar la estructura, finalmente los actuadores generan las fuerzas necesarias para contrarrestar los movimientos sísmicos (Zevallos, 2002).

Fig 3.15: Esquema de funcionamiento de una estructura con Sistema de Control Activo



Fuente: Zevallos, 2002.

Un ejemplo de control activo es el amortiguamiento de masa activo (“Active Mass Damper, AMD). Una masa auxiliar, móvil es instalada en uno de los últimos pisos del edificio, con un actuador conectado a ella. Si el algoritmo es adecuado, la fuerza inercial que presenta la masa oscilante debe contrarrestar los efectos de la acción sísmica y reducir así la respuesta estructural.

En comparación con los sistemas pasivos, los sistemas activos presentan numerosas ventajas, entre ellas:

- Mayor efectividad en control de la respuesta estructural.
- Efectividad menos sensible a las condiciones locales del suelo y a las características del terremoto.

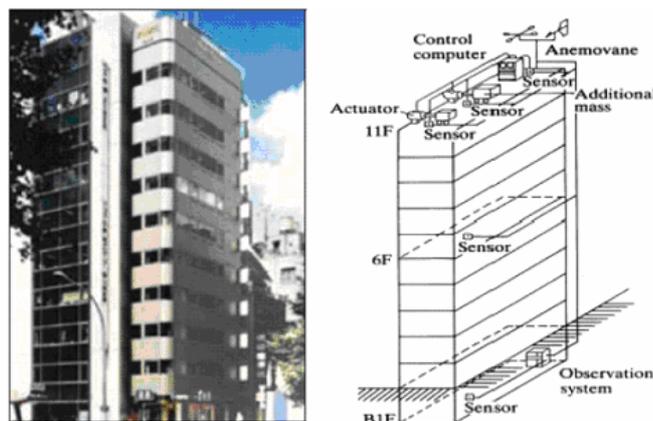
- Un sistema de control activo puede ser usado tanto para control estructural ante sollicitaciones de viento como de terremotos.

Por otro lado, también presenta serios inconvenientes:

- Un elevado costo en mantención.
- Dependencia respecto a fuentes de alimentación externas.
- La respuesta dinámica de edificios con muchos grados de libertad y un posible comportamiento no lineal resulta imprevisible y su control a partir de un número limitado de sensores y actuadores plantea un problema dinámico complejo.

El edificio “Kyobashi Seiwa”, es la primera aplicación a escala natural de la tecnología del control activo. Este edificio ubicado en Tokio (Japón), se terminó de construir en 1989. El sistema activo está formado por dos osciladores AMD, uno principal para controlar el movimiento transversal y otro secundario para reducir los movimientos torsionales. El objetivo del sistema instalado en el edificio es reducir las vibraciones producidas por vientos fuertes y sollicitaciones sísmicas moderadas, con el fin de incrementar el confort de sus ocupantes.

Fig 3.16: Edificio Kyobashi Seiwa, Tokio (Japón)



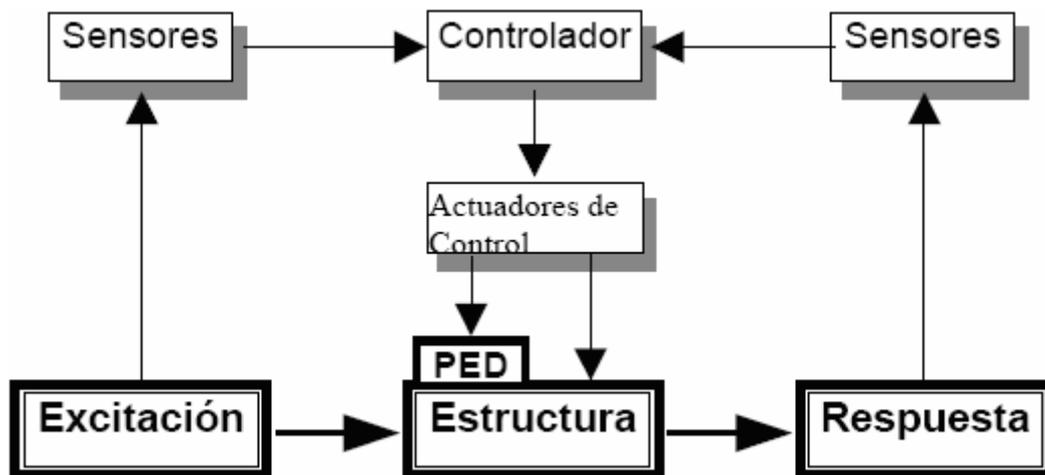
Fuente: Zevallos, 2002.

3.3.4 SISTEMAS DE CONTROL HÍBRIDO:

Los sistemas híbridos emplean una combinación de dispositivos pasivos y activos con el fin de incrementar la confiabilidad y eficiencia del control estructural. Debido a que el control se consigue a partir de la actuación de un dispositivo pasivo, los sistemas híbridos suponen importantes mejoras en relación a los sistemas activos, tales como:

- En caso de fallo del componente activo y aunque menos efectiva, el sistema pasivo sigue ejerciendo funciones de control.
- Los sistemas híbridos tienen requerimientos energéticos inferiores, además que estos operan con múltiples dispositivos de control, logrando mayores niveles de rendimiento.

Fig 3.17: Esquema de funcionamiento de una estructura con Sistema de Control Híbrido



Fuente: Zevallos, 2002.

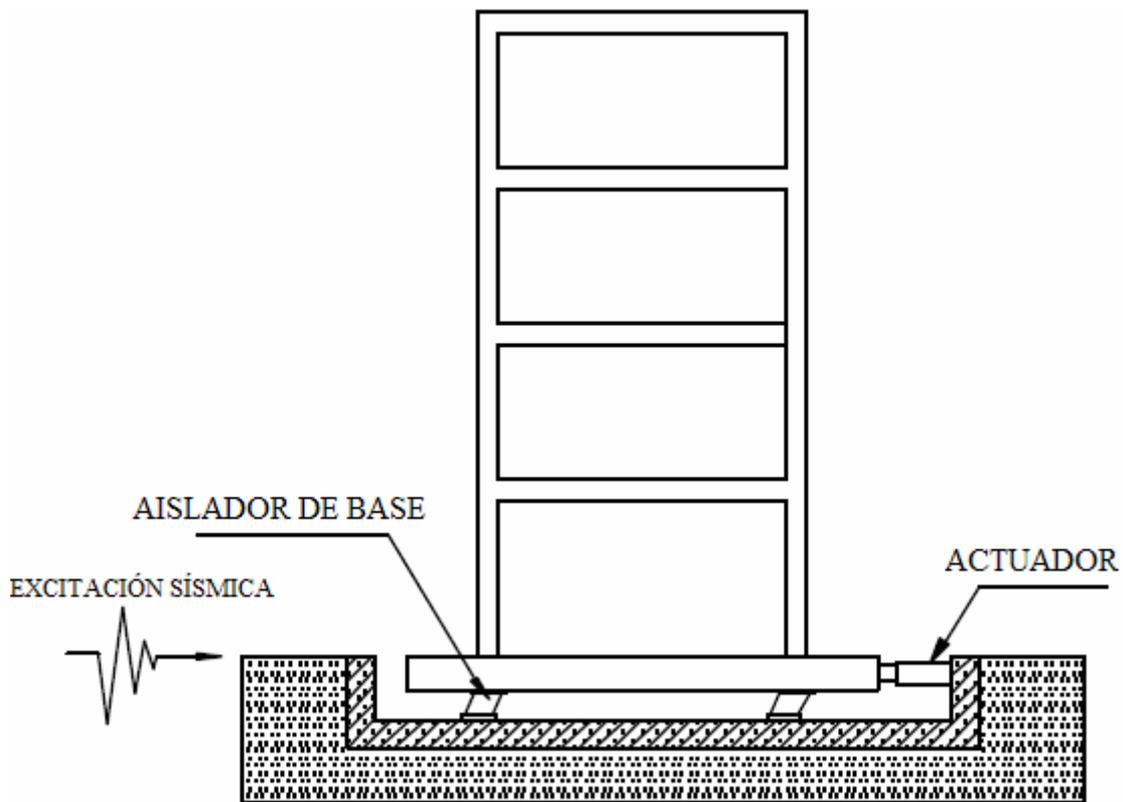
Las investigaciones en el campo de los sistemas de control híbrido han sido enfocadas principalmente en dos tipos:

- Los osciladores híbridos (“Hybrid Mass Damper”, HMD), que combinan los Tunes Mass Damper con actuadores activos.

- Los sistemas de aislamiento de base con control activo.

El oscilador híbrido (HMD) es el resultado de la combinación de un oscilador de masa sintonizado (TMD) y un actuador de control activo. La capacidad de este dispositivo para reducir la respuesta estructural radica principalmente en el movimiento natural del oscilador resonante. Las fuerzas de control generadas por el actuador son empleadas sólo para mejorar el desempeño del oscilador resonante, incrementando la eficiencia del sistema y permitiendo su adaptabilidad a los cambios en las características dinámicas de la estructura (Zevallos, 2002).

Fig 3.18: Aislador de Base con Control Activo



Fuente: Cundumi, 2005.

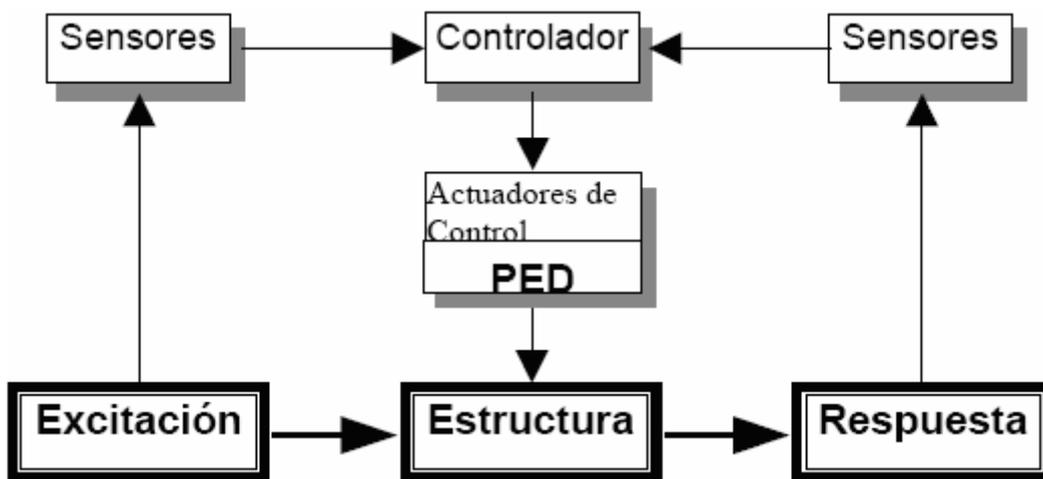
El sistema de aislamiento de base con control activo (ver figura 3.18), su componente pasivo desacopla parcialmente la estructura del terreno, a costa de un desplazamiento significativo entre la subestructura y superestructura. El objetivo del componente activo es el de controlar este movimiento mediante un actuador. Desde un

punto de vista práctico, es importante que el control se consiga con una única fuerza y que la demanda energética de esta se encuentre dentro de unos límites aceptables. Sin embargo la evaluación de dicha fuerza de control entraña una cierta dificultad relacionada tanto con el comportamiento no lineal del aislamiento con las incertidumbres asociadas a la modelación del sistema global estructura, aislamiento y de la excitación.

3.3.5 SISTEMAS DE CONTROL SEMIACTIVO:

Los sistemas de control semiactivos no aplican fuerzas en el sistema estructural, pero poseen propiedades variables que pueden ser controladas para reducir óptimamente la respuesta del sistema estructural, es decir, tienen un esquema de funcionamiento muy similar a los sistemas activos, diferenciándose de estos en que el control estructural se obtiene a partir de dispositivos de carácter reactivo, cuyas características mecánicas (rigidez o amortiguamiento) son controlables, lo cual permite modificar las propiedades dinámicas de la estructura con costos energéticos muy reducidos.

Fig 3.19: Esquema de funcionamiento de una estructura con Sistema de Control Semiactivo



Fuente: Zevallos, 2002.

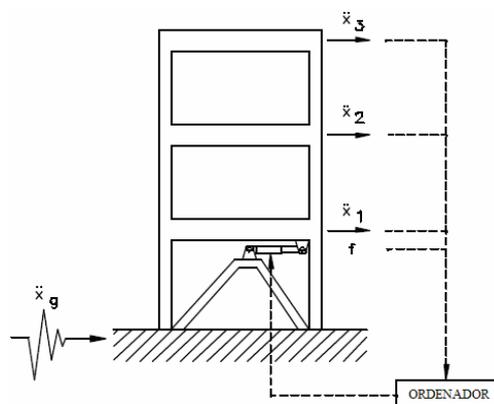
Algunas de las técnicas recontrol empleadas por los sistemas semiactivos son:

- Los dispositivos de fricción variable.
- El movimiento de masas de líquido en el interior de estanques (“Tunes Sloshing Dampers”) o columnas dentro del edificio (“Tunes Liquid Column Dampers”).
- La incorporación de dispositivos hidráulicos u oleodinámicos de rigidez o amortiguamiento variable.
- Amortiguadores con fluidos de viscosidad controlable, a partir de campos eléctricos o magnéticos.

Como a modo de ejemplo de control semiactivo, se puede mencionar el dispositivo de amortiguamiento variable (“Variable Hydraulic Damper”, VHD), que a través de una válvula de flujo variable, permite modificar la pérdida de carga entre ambas cámaras de un cilindro hidráulico.

También existen los llamados líquidos controlables, que tienen la propiedad de variar sus características reológicas ante campos eléctricos (“Electrorheological Fluids” o Fluidos ER) o ante campos magnéticos (“Magnetoreological Fluids” o Fluidos MR). La característica esencial de estos líquidos es su reversibilidad de fluido con viscosidad lineal a estado semisólido en milisegundos cuando están expuestos a un campo eléctrico (para fluidos ER) o un campo magnético (para fluidos MR).

Fig 3.20: Control Semiactivo mediante un amortiguador MR



Fuente: Cundumi, 2005.

CAPITULO IV:

DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO

4.1 GENERALIDADES:

Como punto de partida para la discusión de amortiguamiento en estructuras, considere que a esta se le somete a un pequeño desplazamiento y luego se suelta. La estructura quedará vibrando de un lado a otro con una cierta amplitud que se decaerá en el tiempo. Históricamente los ingenieros estructurales han asumido que la reducción del movimiento esta asociado a la presencia de amortiguamiento viscoso en los materiales que se emplean (ver capítulo II). El decremento logarítmico es a menudo usado para relacionar la reducción en amplitud entre dos o más valores máximos sucesivos de la respuesta para los valores de amortiguamiento.

La cuantificación de los valores del amortiguamiento viscoso en edificios ha sido asunto de investigación por más de 50 años. Este tipo de amortiguamiento es llamado “Amortiguamiento Natural” porque esta asociado al amortiguamiento interno que poseen los materiales con los que se construyen los elementos estructurales. Este Amortiguamiento Natural representa la energía disipada por los elementos estructurales de la edificación (columnas, muros, etc.) en el movimiento del edificio en el tiempo.

En las décadas pasadas, se comenzó a investigar y experimentar con nuevos sistemas antisísmicos, los llamados “Sistemas de Control Pasivo” (ver capítulo III). Los primeros dispositivos de este tipo de tecnología que se introdujeron en edificios para ayudar a mitigar el impacto de los movimientos producidos por los sismos, fue el “Sistema de Aislamiento Basal”, más tarde (en la década de los 90) se comenzó a implementar estructuras con otro tipo de elementos conocidos como, “Dispositivos de Disipación de Energía”. En esta categoría encontramos el “Disipador de Fluido Viscoso” (Hart y Wong, 2000).

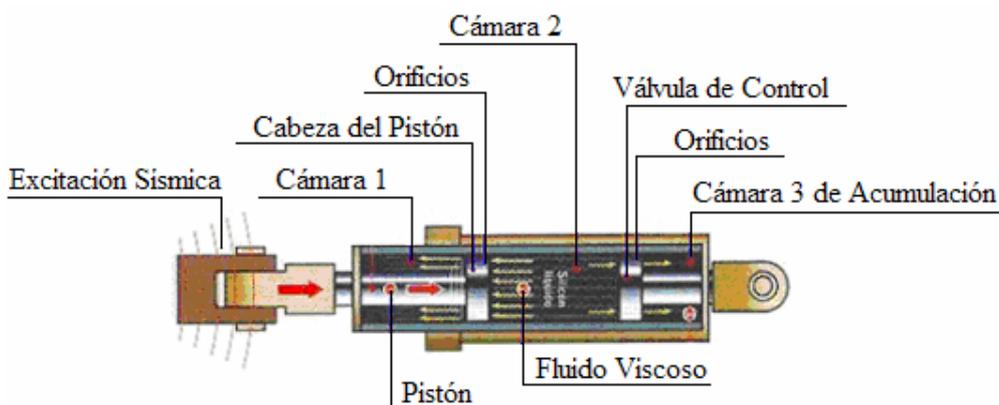
El propósito de emplear Disipadores de Energía es tratar de que la estructura tenga un mejor comportamiento frente a un evento sísmico, asegurando que esta se comporte dentro del rango lineal y así poder limitar las deformaciones inelásticas y la formación de rótulas plásticas, impidiendo el daño estructural.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL DISIPADOR DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO:

Uno de los mecanismos más eficientes para añadir capacidad de disipación de energía a una estructura es mediante el uso de Dispositivos de Fluido Viscoso. Como se muestra en la Figura 4.1, este mecanismo disipa energía transfiriendo un fluido a través de un orificio, produciendo una presión de amortiguamiento.

Por muchos años, los Disipadores de Fluido Viscoso han sido utilizados en muchas aplicaciones, entre los que se encuentra el control de vibraciones en sistemas aeroespaciales y de defensa en los Estados Unidos, donde fue evaluado con éxito durante muchas décadas. Uno de los usos que ha sido bien documentado fue hecho por instituciones militares para examinar su uso en cañones de alto calibre. Básicamente un amortiguador viscoso es comparable a los amortiguadores utilizados en los automóviles, con la diferencia que los utilizados en estructuras operan en un rango de fuerzas mucho mayor y son construidos en acero inoxidable y otros materiales extremadamente duraderos los cuales tienen una duración de por lo menos 40 años (Arroyo, 2004).

Fig. 4.1: Disipador de Energía de Fluido Viscoso



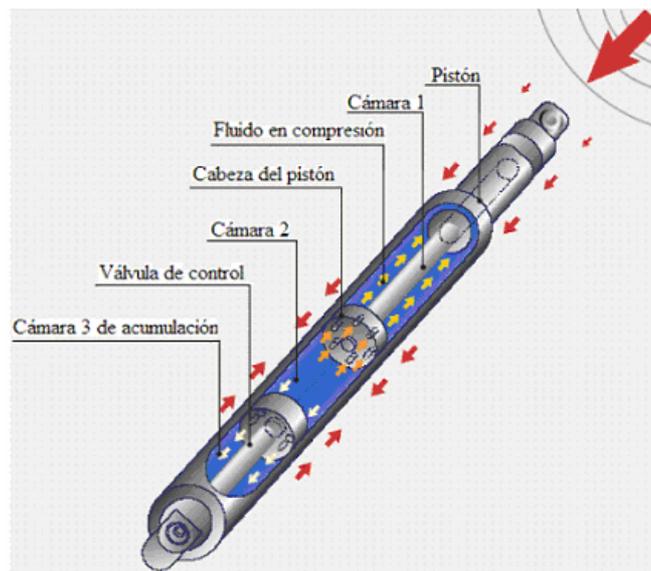
Fuente: Taylor, 2004.

El amortiguador de fluido viscoso, que actúa como un dispositivo disipador de energía en las estructuras, consiste básicamente en un cilindro de acero inoxidable de alta resistencia, el cual contiene un fluido de alta viscosidad, resistente al fuego (no inflamable y no combustible), estable a los cambios de temperatura y a largos periodos de tiempo. En la actualidad, los únicos fluidos que poseen todas estas características son los que pertenecen a la familia de las siliconas (Taylor, 2004).

El cilindro en su interior posee un pistón (también de acero de alta resistencia e inoxidable), que se compone de una vara que en su borde interior tiene una cabeza (“cabeza del pistón”) con orificios. La cabeza del pistón divide el interior del cilindro en dos cavidades llamadas “cámaras”. Cuando existe un desplazamiento del pistón a altas velocidades dentro del cilindro debido a una excitación, este provoca el paso de fluido de una cámara a otra, lo que produce una presión diferencial y esta a su vez origina la fuerza de amortiguamiento.

Además el cilindro en su interior posee una tercera cámara, de “Acumulación”, que su principal función es permitir el desplazamiento de la vara del pistón, desde adentro hacia fuera del amortiguador durante la excitación y compensar la expansión y contracción térmica del fluido.

Fig. 4.2: Funcionamiento de un Disipador de Fluido Viscoso



Fuente: Taylor, 2004

La actividad sísmica, presiona el pistón hacia el cilindro comprimiendo el fluido del interior hacia la cámara 2, luego este pasa de regreso de la cámara 1 a la cámara 2, a través de las perforaciones y se iguala la presión, que es la que provoca la fuerza de amortiguamiento. Estas perforaciones se gradúan en tamaño y cantidad, para proporcionar la respuesta deseada. Para prevenir un efecto de rebote, la válvula de control libera parte del fluido a la cámara 3 de acumulación.

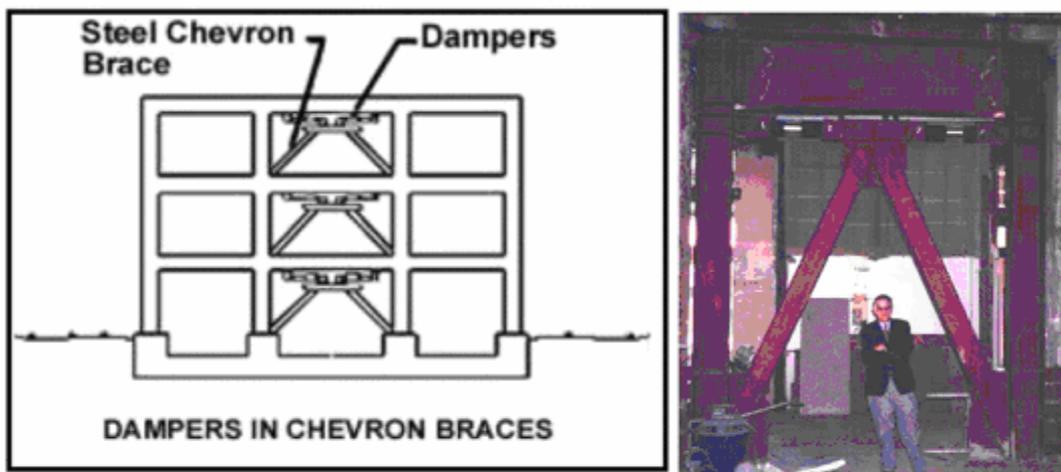
Una de las diferencias de los Amortiguadores de Fluido Viscoso, con respecto a otros dispositivos disipadores de energía utilizados en estructuras, es que estos son estables y funcionales en un gran rango de temperatura. Por ejemplo los dispositivos viscoelásticos (ver capítulo III), al estar compuesto de caucho estos se ven muy afectados a los cambios térmicos y su comportamiento es diferente según la temperatura en que se encuentra operando. Las pruebas que se le han hecho a los Amortiguadores de Fluido Viscoso, han demostrado que su funcionamiento no presenta grandes diferencias en un rango de temperatura de -40°C y 70°C .

En la industria de la construcción, los Amortiguadores de Fluido Viscoso se utilizan para reducir las cargas debido a una excitación sísmica, estos dispositivos se ubican en la estructura en forma estratégica, tal que se activen durante el desplazamiento relativo entre dos pisos contiguos del edificio excitado. La instalación puede hacerse de varias maneras:

- 1) Colocando los amortiguadores horizontalmente, para ligar de manera flexible el vértice de unión de las diagonales en forma de “V” invertida (ver figura 4.3), fijada en un piso inferior, con el nivel inmediato superior.
- 2) Colocando los amortiguadores como una diagonal inclinada, conectando las dos uniones viga columna contrarias de dos pisos continuos (ver figura 4.4).
- 3) Colocando los amortiguadores en forma horizontal, en la base del edificio trabajando en conjunto con el sistema de aislamiento basal (ver figura 4.5).

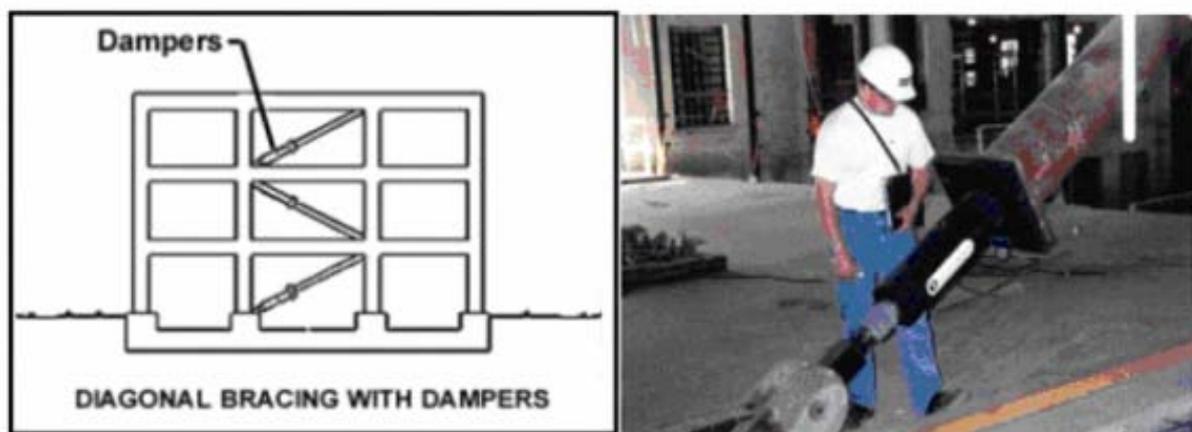
Otra característica que poseen los Amortiguadores de Fluido Viscoso y que lo hacen ser diferentes a otros dispositivos, es que su comportamiento depende sólo de la velocidad y no del desplazamiento. Este punto será discutido con mayor detalle en la sección siguiente.

Fig 4.3: Disipadores Viscosos, uniendo las diagonales con las columnas en forma de V invertida.



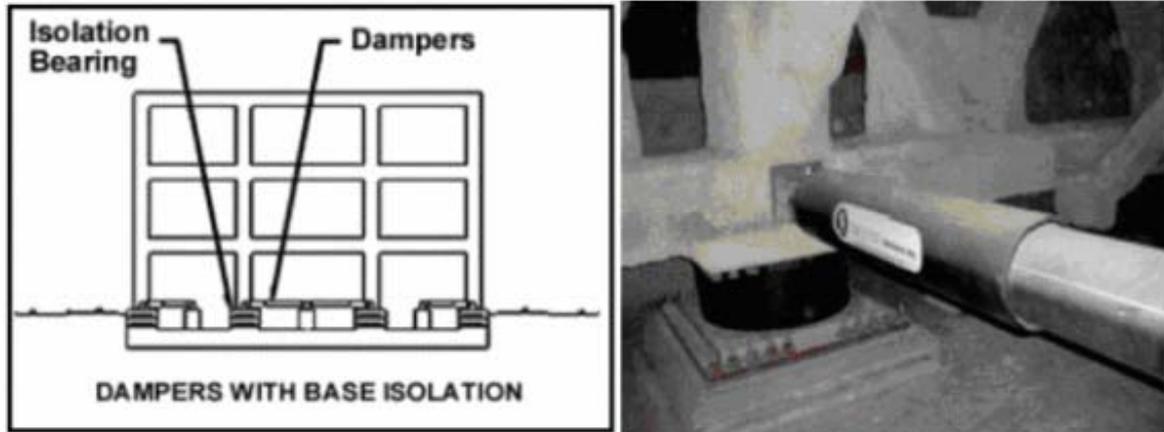
Fuente: Hart y Wong, 2000.

Fig 4.4: Disipadores Viscosos, ubicados en la diagonal.



Fuente: Hart y Wong, 2000.

Fig 4.5: Disipadores Viscosos, ubicados en la base del edificio.



Fuente: Hart y Wong, 2000.

4.3 RESPUESTA DEL DISIPADOR DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO:

Imagine un Dispositivo de Fluido Viscoso instalado en una estructura, como el de la figura 4.4. Esta al recibir una excitación debido a una carga sísmica se producirá desplazamientos relativos entre los pisos, los que provocarán movimientos, velocidades y aceleraciones diferentes de los extremos del dispositivo. Esta diferencia de movimiento producirá en el amortiguador una fuerza y una fuente de disipación de energía. La fuerza inducida a la estructura por el amortiguador en cada uno de los puntos de conexión del dispositivo esta dada por la ecuación 4.1 y la energía disipada por el amortiguador debido a dicha fuerza esta dada por la ecuación 4.2.

La energía mecánica disipada por el dispositivo causa calor en las partes mecánicas y fluidas del amortiguador, esta energía calorífica es transferida al medio ambiente, usualmente por convección y conducción.

$$F_{md} = C_{md} \dot{x}^\eta \quad (4.1)$$

$$E_D = \int |F_{dm}| dx \quad (4.2)$$

Donde:

F_{md} : Fuerza de amortiguamiento del dispositivo.

C_{md} : Coeficiente de amortiguamiento del dispositivo.

x : Desplazamiento relativo entre los extremos del dispositivo.

\dot{x} : Es la velocidad relativa entre los extremos del amortiguador.

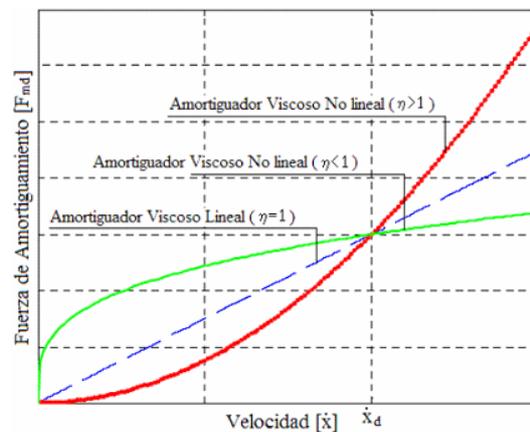
η : Exponente de la velocidad, $0,25 < \eta < 2,0$.

Cuando el exponente de la velocidad (“ η ”) toma el valor unitario, se tendrá un dispositivo con una fuerza lineal proporcional a la velocidad, por lo que se le llamará “Disipador Viscoso Lineal”. Cuando el valor de “ η ” toma un valor distinto de uno, al dispositivo se le llamará “Disipador Viscoso No lineal”.

En la figura 4.6 se muestra la relación fuerza velocidad (F_{dm} v/s \dot{x}) de los tres tipo de amortiguadores descritos anteriormente. En esta figura se puede apreciar la eficiencia del Disipador Viscoso No lineal ($\eta < 1$), para pequeñas velocidades relativas puede desarrollar una mayor fuerza de amortiguamiento que los otros tipos de Disipadores ($\eta = 1$ y $\eta > 1$).

Para los Disipadores Viscoso No lineal utilizados en la práctica, el valor de “ η ” esta en un rango de 0,3 a 1,0. Los valores de “ η ” más comunes en el diseño de amortiguadores para edificios y puentes contra la acción sísmica, están en un rango de 0,25 a 0,5.

Fig. 4.6: Relación Velocidad V/S Fuerza del Disipador



Fuente: Cundumi, 2005.

El Disipador de Energía de Fluido Viscoso tiene la capacidad única de reducir los desplazamientos y no adicionar esfuerzos a la estructura, cuando está sujeta a una excitación sísmica. Esto se debe porque en este dispositivo, la fuerza de salida varía sólo con la velocidad, proporcionando una respuesta que está intrínsecamente desfasada con las tensiones de la estructura flexionada.

En el caso de otros dispositivos como los amortiguadores de fricción, plastificación y de caucho (viscoelásticos), si bien son eficientes para adicionar amortiguamiento a la estructura, pero a cambio de esto, también le agregan esfuerzos, es decir, estos dispositivos de amortiguamiento disminuirán las deflexiones en una estructura, pero a expensas de aumentar los esfuerzos en esta. Esto se explica, debido a que la fuerza de amortiguamiento de estos dispositivos es dependiente de otros parámetros además de la velocidad.

La respuesta desfasada que es única de los Dispositivos de Fluido Viscoso puede comprenderse fácilmente considerando un edificio moviéndose lateralmente debido a una excitación sinusoidal (Taylor, 2004).

$$x(t) = x_0 \text{ sen } (\omega t) \quad (4.3)$$

$$\dot{x}(t) = x_0 \omega \text{ cos } (\omega t) \quad (4.4)$$

$$F_{md} = C_{md} x_0 \omega \text{ cos } (\omega t) \quad (4.5)$$

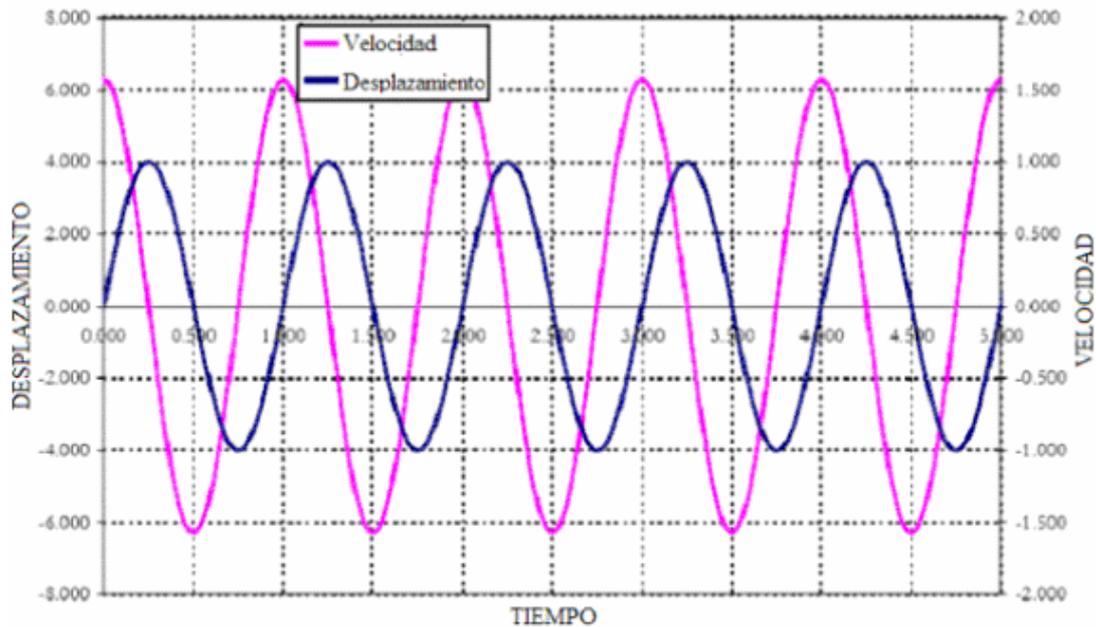
Donde:

x_0 : Amplitud de la excitación.

ω : Frecuencia de la excitación

F_{md} : Fuerza de amortiguamiento para un dispositivo lineal.

Fig. 4.7: Desfase de la Velocidad con respecto al Desplazamiento



Fuente: Kelly, 2001.

El esfuerzo en las columnas es máximo cuando el edificio está en su máxima posición de deflexión (desplazamiento máximo) con respecto a su posición de equilibrio. Éste es el instante donde la estructura comienza a cambiar de dirección. Si agregamos un Dispositivo de Fluido Viscoso al edificio, la fuerza de amortiguamiento en el dispositivo se reducirá a cero en este punto de desplazamiento máximo, debido a que en este instante la velocidad es igual a cero.

Mientras que la máxima fuerza de amortiguamiento ocurre cuando la velocidad es máxima, o sea, cuando el desplazamiento de las columnas es igual a cero (instante donde el edificio se encuentra el punto de equilibrio), este es también el instante donde los esfuerzos en las columnas es el mínimo. Esta respuesta desfasada, es la característica más importante que poseen los Dispositivos de Fluido Viscoso y lo hacen diferente a los otros dispositivos disipadores de energía utilizados en estructuras.

En la ecuación 4.1, los parámetros que definen la fuerza de amortiguamiento (F_{md}) del dispositivo son el coeficiente C_{md} , el exponente η y la velocidad relativa \dot{x} . El

efecto al variar estos parámetros sobre las características del régimen de carga, se ilustra a continuación para una excitación sinusoidal (ecuación 4.3).

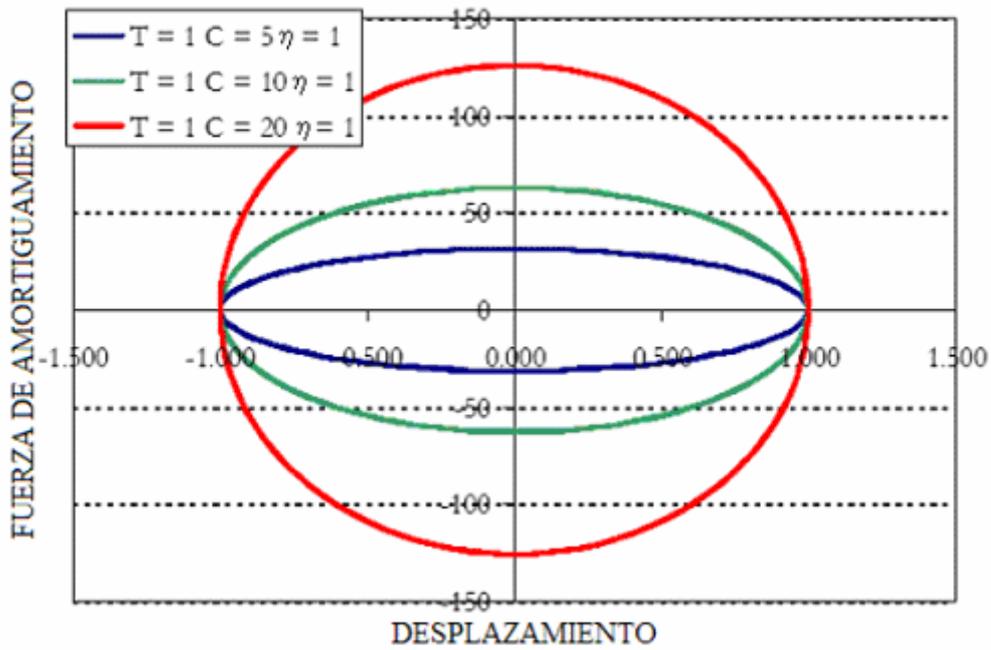
La figura 4.8 muestra el efecto de la variación de C_{md} . Se espera de la ecuación 4.1, que si la fuerza de amortiguamiento es lineal con C_{md} . Entonces si C_{md} es el doble, la fuerza de amortiguamiento F_{md} será el doble para la misma velocidad. La forma de la curva fuerza v/s desplazamiento es elíptica.

En la figura 4.9 se mantiene constante el coeficiente de amortiguamiento C_{md} y se varía el exponente de la velocidad (η) en un rango de 0,3 a 1,0 (rango de los valores de η usados en la práctica para dispositivos en estructuras). Al reducir “ η ” de 1,0 a 0,3 la fuerza de amortiguamiento F_{md} se reduce y tiende de su forma elíptica a una forma más rectangular.

En la figura 4.10, también se varía η pero el coeficiente C_{md} se ajusta tal que la fuerza de amortiguamiento sea siempre la misma. Para mantener la fuerza de amortiguamiento se prueba con $\eta=1$ cuando η es reducida a 0,3 el coeficiente de amortiguamiento debe incrementarse de 5,5 a 20. Esto muestra claramente el cambio de forma de la curva fuerza v/s desplazamiento de elíptica a rectangular al reducir el exponente η .

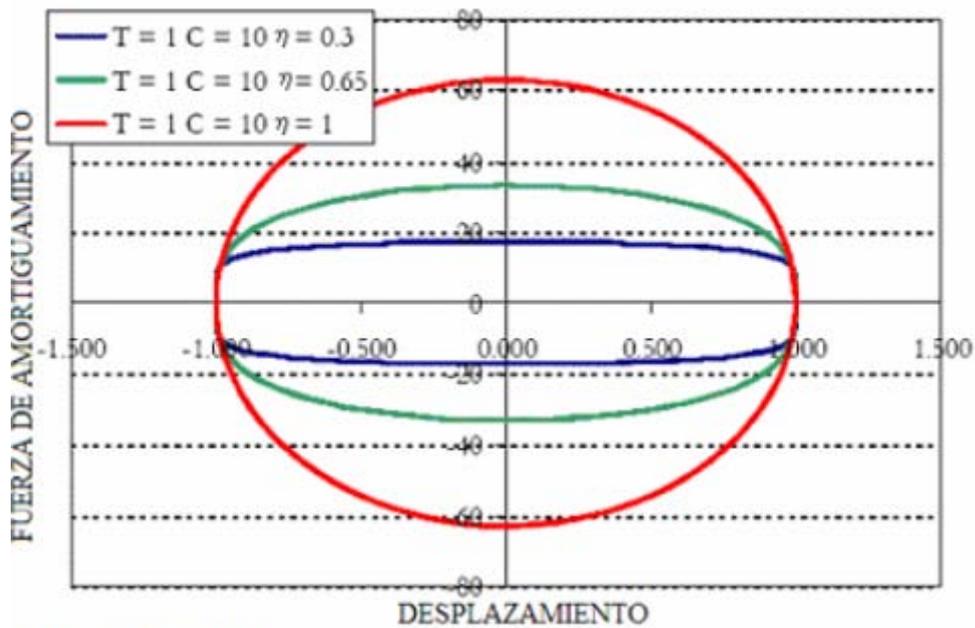
La figura 4.11 muestra, el efecto de la velocidad límite (velocidad máxima), que limita la fuerza del amortiguador a 50 unidades, C_{md} se incrementa de 5 a 20 (ver figura 4.8, la misma curva sin la velocidad límite). El valor de C_{md} incrementa el límite truncando la elipse. El efecto es similar reduciendo el exponente, en que la forma de la elipse se vuelve más rectangular.

Fig 4.8: Respuesta de un Disipador de Energía de Fluido Viscoso Lineal, para diferentes valores de la constante de amortiguamiento C_{md} .



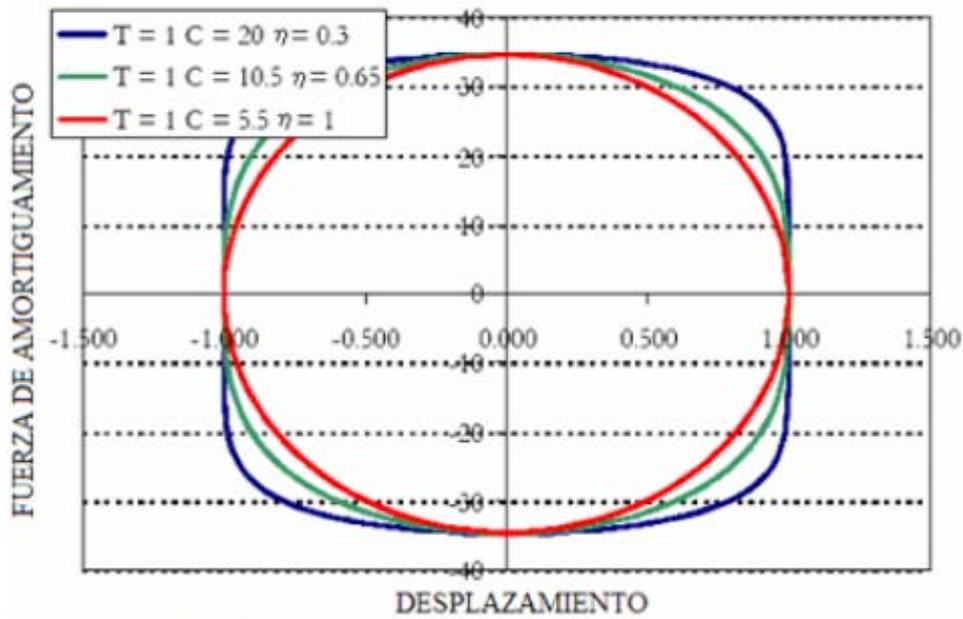
Fuente: Kelly, 2001.

Fig 4.9: Respuesta de un Disipador de Energía de Fluido Viscoso No Lineal, para diferentes valores de " η " y con un mismo valor de C_{md} .



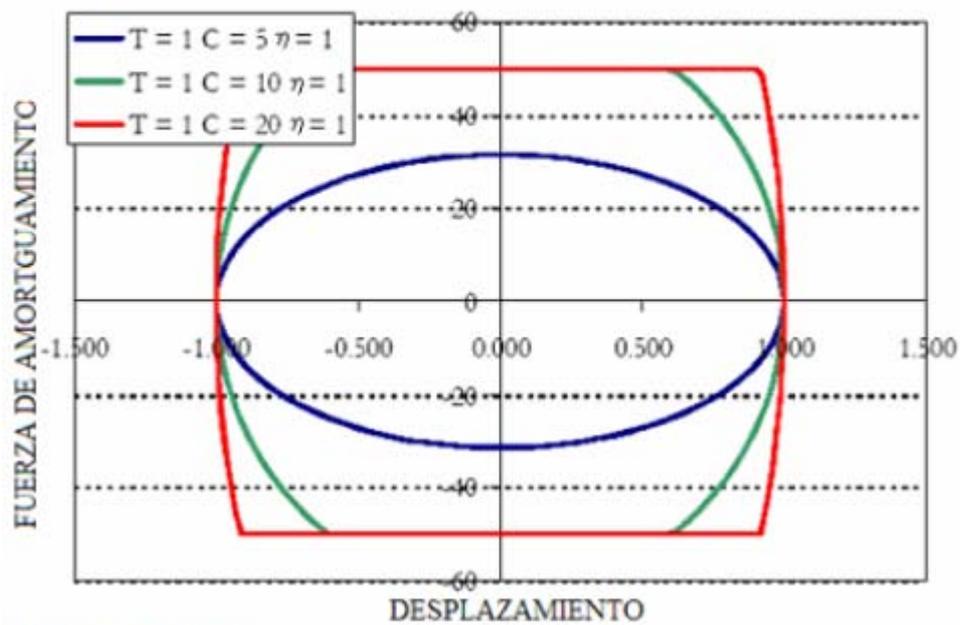
Fuente: Kelly, 2001.

Fig 4.10: Respuesta de un Disipador de Energía de Fluido Viscoso No Lineal, para diferentes valores de " η " y C_{md} , tal que la fuerza de salida sea la misma.



Fuente: Kelly, 2001.

Fig 4.11: Respuesta de un Disipador de Energía de Fluido Viscoso Lineal, considerando una velocidad limite.



Fuente: Kelly, 2001.

4.4 EFECTO DEL DISIPADOR DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOZO SOBRE EL ESPECTRO DE RESPUESTA:

Como ya se ha mencionado para poder resolver al problema de limitar la respuesta dinámica de una estructura sometida a una excitación sísmica se puede optar por dos opciones:

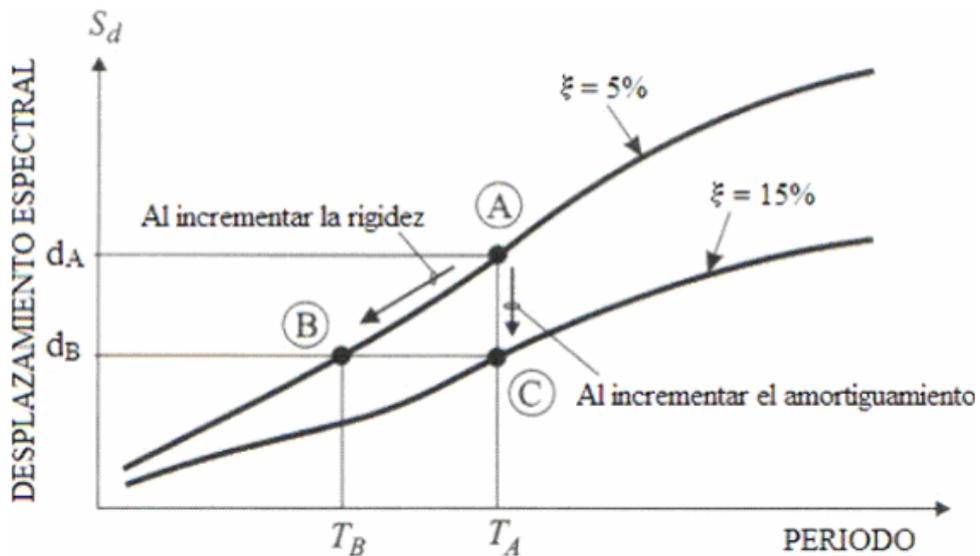
- 1) El método convencional, que consiste en incrementar la rigidez y ductilidad de la estructura. Esto se logra aumentando las secciones de la misma, lo que trae consigo un aumento de la masa y por ende un aumento de la fuerza que actúa sobre ella.
- 2) La segunda alternativa consiste en adicionar dispositivos a la edificación de tal forma de controlar la energía entrante a la estructura debido al sismo, disipándola al ambiente como energía calórica, a esta opción la llamaremos método moderno.

En la figura 4.11 se muestra el espectro de desplazamiento para una cierta estructura. Imagine que se ha determinado el periodo fundamental de esta y su valor es " T_A ", dicho periodo se ha determinado considerando sólo el amortiguamiento propio o natural que la estructura posee debido a las propiedades de los materiales que la componen. Se ha supuesto que dicho amortiguamiento es de un 5% del amortiguamiento crítico y además para este periodo se le asocia un desplazamiento espectral d_A (punto "A").

Ahora suponga que se quiere disminuir el desplazamiento espectral de la estructura de " d_A " a " d_B ". Para conseguir dicho objetivo se debe escoger una de las opciones de diseño descritos anteriormente. Si se aumentan las secciones de los miembros estructurales (columnas, muros, etc.) de la edificación con el fin de aumentar la rigidez de la misma, se disminuirá el desplazamiento espectral pero se incrementará la aceleración sobre la estructura (punto "B").

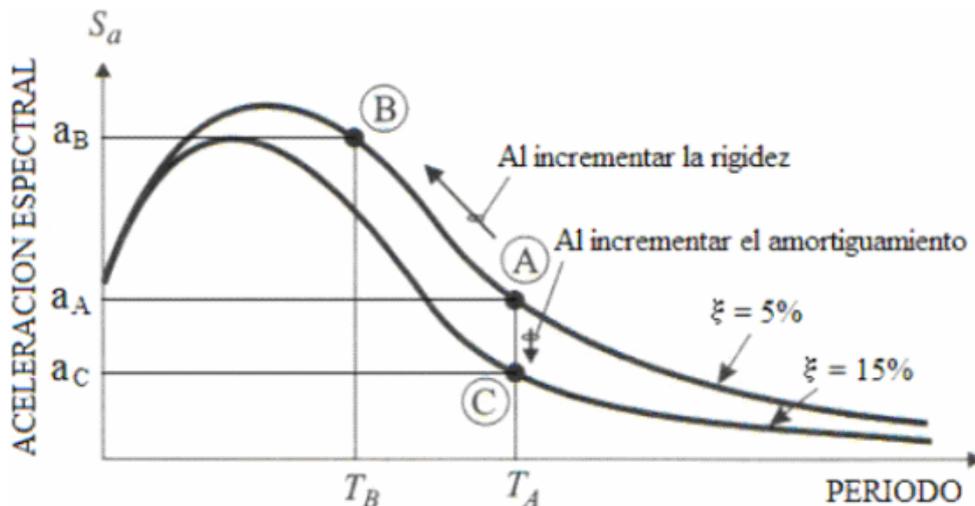
Si se escoge la opción de diseño moderno de incrementar la razón de amortiguamiento crítico de 5% a 15%, mediante la adición de dispositivos de amortiguamiento viscoso, se observa que no sólo se disminuirá el desplazamiento espectral, sino que además la aceleración sobre la estructura disminuirá de a_A a a_c (punto “C”).

Fig 4.12: Efecto en el Espectro de Desplazamiento al incrementar la Rigidez y el Amortiguamiento



Fuente, Hart y Wong, 2000.

Fig 4.13: Efecto en el Espectro de Aceleraciones al incrementar la Rigidez y el Amortiguamiento



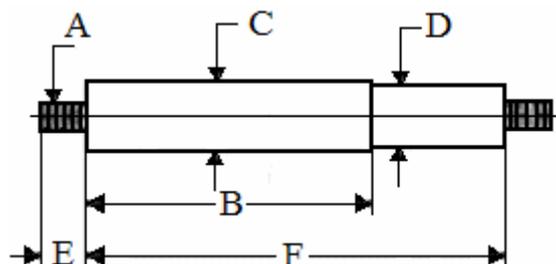
Fuente, Hart y Wong, 2000.

4.5 DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO TAYLOR:

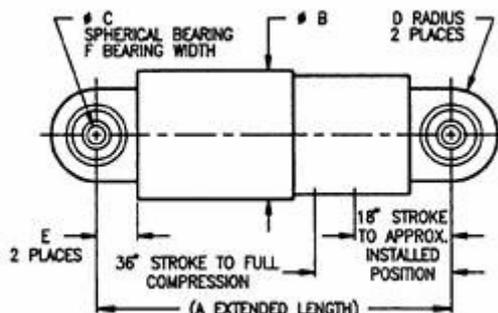
Taylor Device Inc. es una compañía americana ubicada en Tonawanda del norte (New York). Esta empresa se ha dedicado a la fabricación de Disipadores de Energía de Fluido Viscoso desde 1955. Hasta fines de la década de los 80, los dispositivos que ellos desarrollaban eran de uso exclusivo del gobierno americano, en la industria militar y de defensa.

En la década de los 90, el gobierno americano abolió la restricción de esta tecnología del uso exclusivo militar, permitiendo que los Disipadores de Energía de Fluido Viscoso se le den otras aplicaciones. Actualmente más de cien estructuras en el mundo se han construido utilizando los Dispositivos de Fluido Viscoso desarrollados por la compañía (Taylor, 2000).

Fig 4.14: Disipador de Energía de Fluido Viscoso fabricado por la Compañía Taylor Device Inc.



Fuerza del Dispositivo Dispositivo (Libras)	Desplazamiento (cm)	Peso (Libras)	A Hilo (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)
10000	10.16	20	2.54	30.226	7.62	6.35	5.08	44.45
20000	12.7	40	3.81	32.258	10.16	8.636	6.35	52.07
30000	12.7	90	4.445	35.814	12.7	11.176	7.62	57.17



Fuerza del Dispositivo Dispositivo (Kilolibras)	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)
100	332.74	19.05	6.35	8.128	12.065	5.588
200	335.28	22.86	6.985	9.906	12.7	6.096
300	351	29.21	7.62	10.795	13.335	6.858
600	393.7	40.64	15.24	19.05	25.4	12.192
1000	421.64	58.42	15.24	22.86	36.195	12.192
2000	457.2	66.04	20.32	27.94	43.18	15.24

Fuente, Taylor, 2004.

4.5.1 ALGUNAS APLICACIONES DE LOS DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO TAYLOR:

Cuando un edificio ha estado sometido por varios años a sismos intensos, posiblemente hay cierto grado de daño (no siempre visible) en la estructura. Si se necesita rehabilitarlo deberá proporcionarse la resistencia exigida en el reglamento vigente. También puede darse el caso de un inmueble sin daño, donde se requiere incrementar el nivel de resistencia sísmica por cambio de uso. Por ejemplo, si un inmueble perteneciente a la “Categoría C”, destinados al uso privado o al uso público que no pertenecen a la “Categoría A o B” (NCh 433 Of 96) se desea utilizar como edificio gubernamental (Categoría A), se debe aumentar la resistencia sísmica de la estructura, lo cual resulta una tarea compleja y costosa. Sin embargo, con la incorporación de disipadores de energía, se reducirán las aceleraciones sísmicas de diseño y cumplir con las exigencias que impone la normativa vigente. Así, el edificio conservaría prácticamente la misma estructura original y sus reservas de resistencia inelástica. Los Disipadores de Energía de Fluido Viscoso Taylor, se han empleados en edificios nuevos y restaurados, además de puentes, aeropuertos, estadios, etc. A continuación se muestra una tabla con algunas aplicaciones:

Tabla 4.1: Algunas aplicaciones de los Disipadores de Energía de Fluido Viscoso fabricado por la compañía Taylor

Estructura	Datos del Dispositivo	Instalación	Información adicional
Centro Cívico de San Francisco (California, USA)	Total: 292 100 ton 55 ton $\eta=0,4$	1997	Estructura nueva de 14 pisos, destinadas of. Gubernamentales.
Los Ángeles City Hall (California, USA)	Total: 68 140 ton 100 ton $\eta = 0,5$	1999	Restauración del edificio existente, con aisladores y amortiguadores
Puente Amolanas (Chile)	Total: 4 300 ton $\eta = 0,15$	2000	Puente de 268 mt. de longitud y 100,6 mt. de alto
Hospital Rinkai (Tokio, Japón)	Total: 45 89 ton	2001	Estructura nueva aisladores y amortiguadores.
Torre Mayor (México)	Total: 98 570 ton 280 ton $\eta = 0,7$	2002	Estructura nueva de 4 subterráneos, 55 pisos y 1 helipuerto, de altura total de 225mts.

Fuente: Taylor, 2004.

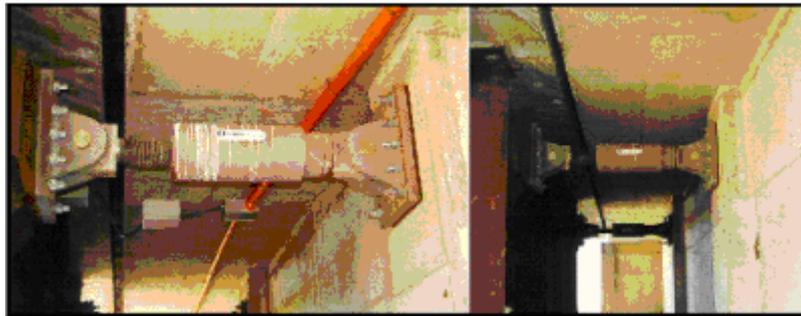
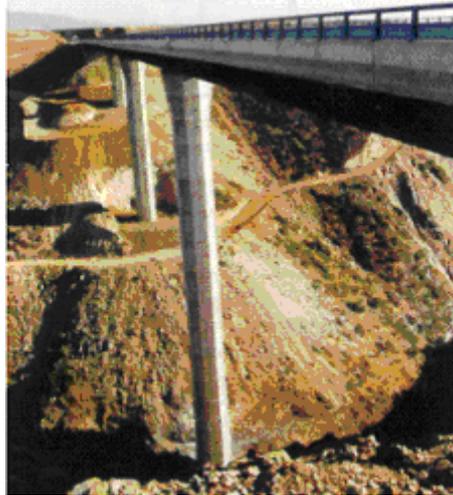
4.5.1.1 PUENTE AMOLANAS:

El Puente Amolanas se encuentra ubicado en el km 310 de la Ruta 5 Norte, en la quebrada del mismo nombre. Es un puente recto de sección continua de 268 m de longitud y con una altura de 100,6 mts. sobre el cauce lo que lo convierte en el puente vial más alto de Chile.

Cada estribo cuenta con dos Disipadores de energía de Fluido Viscoso marca Taylor Devices Inc. de 300 toneladas de capacidad, con un recorrido máximo de +/- 200 mm y velocidad máxima de desplazamiento del émbolo de 1,2 m/seg. El proyecto de ingeniería estuvo a cargo de la oficina española Carlos Fernández Casado S.L., especialista en el proyecto de estructuras de estas características y la construcción de a

cargo de Sacyr Chile S.A. La revisión de la ingeniería fue realizada por el Departamento de Puentes de la Dirección de Vialidad. (Revista Bit, Marzo 2000).

Fig.4.15: Puente Amolanas



Fuente: Revista Bit, Mayo 2005.

4.5.1.2 TORRE MAYOR:

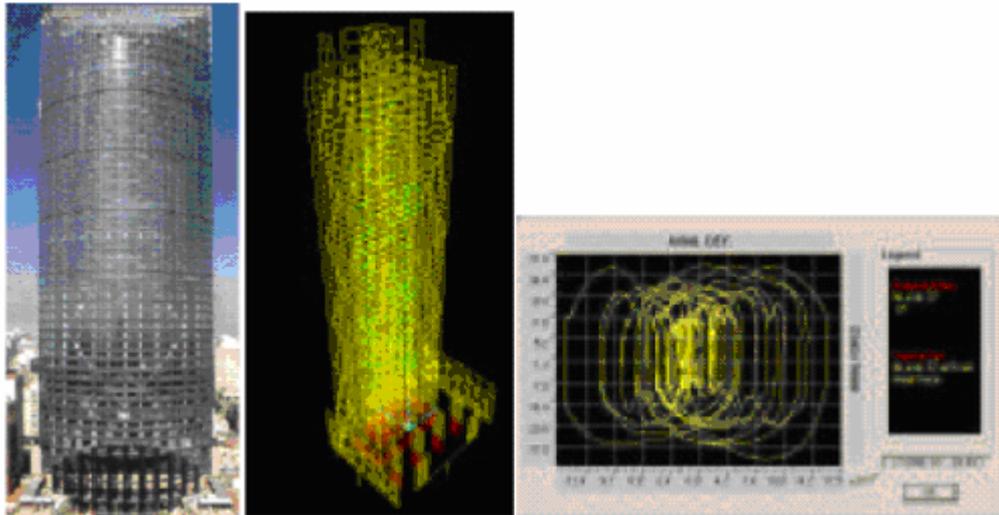
El edificio más alto en Latinoamérica (225 mts) se ubica en Ciudad de México, ocupa un terreno aproximado de 6337 m². En sus 129885 m² de construcción alberga un hotel, oficinas, comercios y restaurantes, además de poseer 13 niveles de estacionamientos (4 subterráneos) y un helipuerto.

A quien se le atribuye la seguridad estructural del edificio es el Ingeniero Enrique Martínez Romero, quien promovió el uso de los dispositivos de Disipación Pasiva de Energía, así como la instalación de los dispositivos de Fluido Viscoso. Los

dispositivos (un total de 98) fueron instalados en forma estratégica desde el piso 13 al 57, con el objeto de reducir las solicitaciones y sin exponer las reservas de resistencia de la estructura por ductilidad.

El diseño fue realizado mediante el programa para el análisis de estructura SAP2000, en el cual se realizaron siete análisis tiempo historia de la estructura con el fin de obtener los parámetros necesarios de los Disipadores Viscosos (Martínez, 2003).

Fig. 4.16: Modelo de la Torre Mayor ingresado al SAP2000 y la respuesta entregado por este de los Disipadores

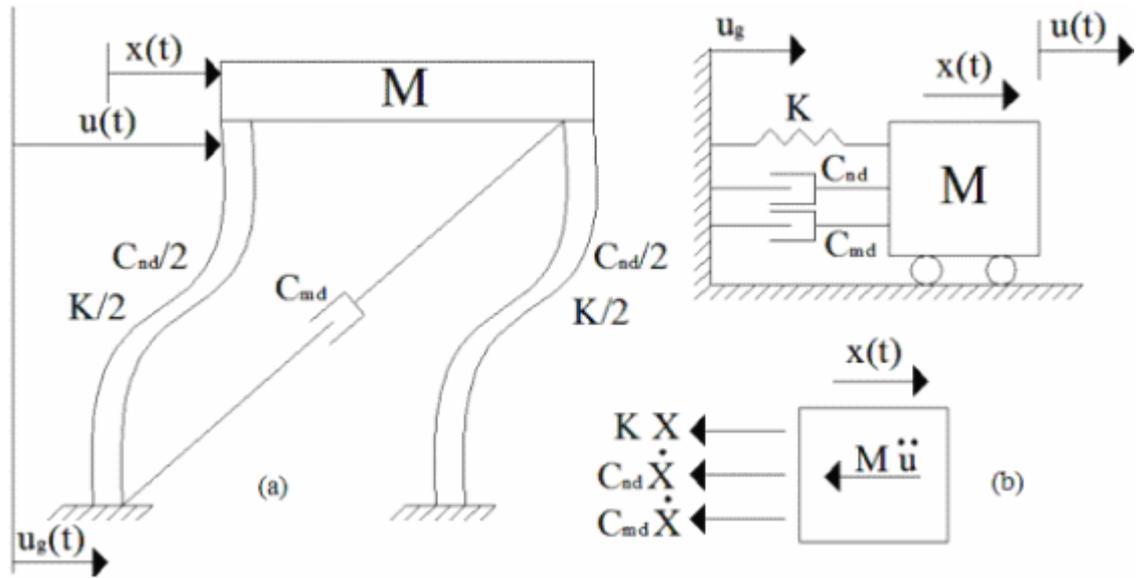


Fuente: Martínez, 2003.

4.6 SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD CON DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO:

Considere un sistema de un grado de libertad, en el cual se ha instalado en la diagonal un Disipador de Energía de Fluido Viscoso con una constante de amortiguamiento " C_{md} " (ver figura 4.15). Este sistema al verse sometido a una excitación basal provocará un desplazamiento, velocidad y aceleración relativo de la masa " M " con respecto a la base del sistema. Este movimiento relativo a su vez provocará una fuerza de amortiguamiento en el dispositivo, dada por la ecuación 4.1.

Fig 4.17: Sistema de un grado de Libertad con Disipador de Fluido Viscoso, sometido a un excitación Basal



Fuente: Hart y Wong, 2000.

La ecuación diferencial que gobierna el movimiento de vibración de un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento suplementario, sometido a una excitación basal u_g se puede derivar a partir del modelo simplificado de la figura 4.18(b), estableciendo el equilibrio dinámico de las fuerzas que actúan sobre masa “M”, entonces se obtiene:

$$m \ddot{x}(t) + c_{nd} \dot{x}(t) + c_{md} \dot{x}(t)^\eta + k x(t) = -m \ddot{u}_g \quad (4.6.a)$$

$$\ddot{x}(t) + 2\xi_{nd}\omega \dot{x}(t) + 2\xi_{md}\omega \dot{x}(t)^\eta + \omega^2 x(t) = -\ddot{u}_g \quad (4.6.b)$$

Donde:

m : masa del sistema.

C_{nd} : Coeficiente de amortiguamiento viscoso, asociado al amortiguamiento natural de la estructura.

C_{md} : Coeficiente de amortiguamiento viscoso, asociado al amortiguamiento suplementario de la estructura.

k : Rigidez de la estructura.

ω : Frecuencia propia o natural de vibración del sistema, en [rad/seg]

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

ξ : Razón de amortiguamiento crítico, que corresponde a la razón del coeficiente de amortiguamiento y el amortiguamiento crítico.

$$\xi_{nd} = \frac{c_{nd}}{c_{cr}}$$

$$\xi_{md} = \frac{c_{md}}{c_{cr}}$$

En la sección 4.3 se dijo que cuando el exponente de la velocidad (“ η ”) toma el valor unitario, se tendrá un dispositivo con una fuerza lineal, por lo que se le llamará “Disipador de Fluido Viscoso Lineal”. Cuando el valor de “ η ” toma un valor distinto de uno, al dispositivo se le llamará “Disipador de Fluido Viscoso No Lineal”.

4.6.1 DISIPADOR DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO LINEAL:

En el caso que el exponente de la velocidad tome el valor unitario ($\eta=1$), la ecuación 4.6 puede describirse como:

$$m \ddot{x}(t) + [c_{nd} \dot{x}(t) + c_{md} \dot{x}(t)] + k x(t) = -m \ddot{u}_g \quad (4.7.a)$$

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega \dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = -\ddot{u}_g \quad (4.7.b)$$

Donde:

ξ : Es la suma de las razones de amortiguamiento crítico o amortiguamiento efectivo.

$$\xi = \xi_{nd} + \xi_{md}$$

Note que la ecuación 4.7, tiene la misma forma de la ecuación 2.23 (ver capítulo II), donde se considera solo el amortiguamiento natural de la estructura, por consiguiente, en el caso que el amortiguador suplementario es lineal la solución de la ecuación puede obtenerse de igual forma que para el caso donde sólo existe amortiguamiento propio.

4.6.2 DISIPADOR DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO NO LINEAL:

En el caso que el exponente de la velocidad tome un valor distinto de uno ($0,3 < \eta < 1$), la ecuación 4.6 puede describirse como:

$$m \ddot{x}(t) + c_{nd} \dot{x}(t) + k x(t) = -m \ddot{u}_g - c_{md} \dot{x}(t)^\eta \quad (4.8.a)$$

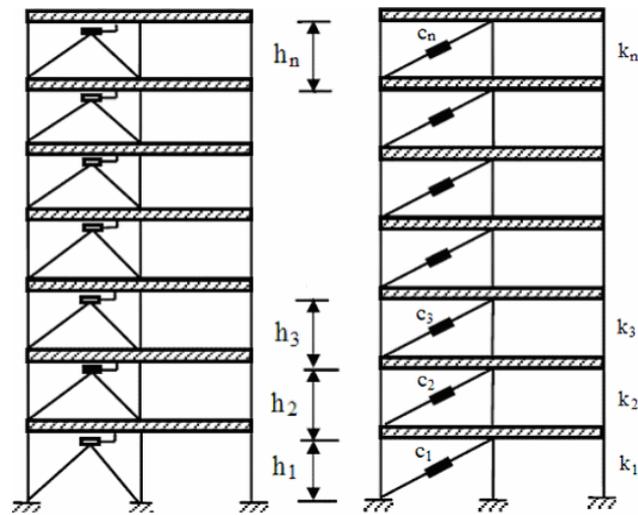
$$\ddot{x}(t) + 2\xi_{nd}\omega \dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = -\ddot{u}_g - 2\xi_{md}\omega \dot{x}(t)^\eta \quad (4.8.b)$$

La excitación sísmica es muy irregular y comúnmente no puede ser expresada como una función matemática, lo que hace necesario la obtención de la solución de cada una de las ecuaciones anteriores (4.7 y 4.8), mediante el uso de métodos numéricos.

4.7 SISTEMA DE “N” GRADOS DE LIBERTAD CON DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO:

Considere un sistema de “n” grados de libertad sometido a una excitación basal y al cual se le adicionado amortiguamiento mediante el uso de dispositivos de fluido viscoso, cuyas constantes de amortiguamiento son “ C_{md} ” (ver figura 4.19).

Fig. 4.18: Estructura de “n” grados de Libertad con Disipadores de Fluido Viscoso



Fuente: Reinhorn, 2003.

Puede deducirse de la sección anterior que la ecuación 4.8 puede extenderse para un sistema de “n” grados de libertad con una excitación externa cualquiera, quedando de la forma:

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = \{L\} \{F_e\} + \{D\} \{F_d\} \quad (4.9)$$

Donde:

[M]: Matriz de masa.

[C]: Matriz de amortiguamiento propio de la estructura.

[K]: Matriz de rigidez de la estructura.

{L} y {D}: Vectores de localización de la fuerza de excitación y de la fuerza de los dispositivos respectivamente.

{F_e}: Fuerza de excitación.

{F_d}: Vector de fuerzas de los dispositivos de amortiguamiento viscoso.

La ecuación diferencial de segundo orden (ecuación 4.9) descrita anteriormente, puede simplificarse en una ecuación diferencial de primer orden, mediante el método de “Ecuación de Estado”:

$$\{\dot{Z}\} = [A] \{Z\} + [B] \{F_d\} + [H] \{F_e\} \quad (4.10)$$

Donde:

$$Z = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$[A]_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} [0] & [1] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$[B]_{2n \times m} = \begin{bmatrix} [0] \\ [M]^{-1}\{D\} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$[H]_{2n \times r} = \begin{bmatrix} [0] \\ [M]^{-1}\{L\} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Resolviendo la ecuación diferencial de primer orden (ecuación 4.10), se obtendrá la respuesta dinámica del sistema.

4.8 PROCESO DE DISEÑO DE LOS DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO:

4.8.1 GENERALIDADES:

El diseño de estructuras con dispositivos viscosos de disipación de energía, es un proceso de prueba y error, es decir, es un proceso iterativo de tanteo donde lo que se busca es obtener un nivel de control de la respuesta de la estructura y sus contenidos. Para este fin es importante definir un esquema de diseño que permita responder de antemano si el nivel de control deseado puede ser alcanzado por la estructura y por el

tipo dispositivo que se pretende utilizar, también debe permitir la posibilidad de definir en forma robusta un prediseño de los dispositivos de tal manera que las posteriores etapas iterativas de afinamiento y validación del diseño lleven a cambios menores.

En la práctica, este tipo de diseño consiste en hacer ensayos para ajustar y calibrar la respuesta del edificio con diversos arreglos y tipos de amortiguadores. Estas pruebas se hacen de manera analítica, basadas en poderosos programas de cálculo estructural, como el ETABS o SAP2000, con los que la estructura del edificio se modela tridimensionalmente mediante la técnica de elemento finito. Se incluyen los Disipadores de fluido Viscoso con un comportamiento Lineal o No Lineal para realizar análisis dinámicos modales y de historia en el tiempo, o paso a paso (Martínez, 2003). A continuación se describen las etapas del algoritmo de diseño que se empleará en este trabajo.

4.8.2 DETERMINACIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL:

Se parte de la base que se conoce un modelo matemático de los componentes estructurales del sistema sin los dispositivos de amortiguamiento viscoso. Este modelo puede corresponder a una edificación existente o a una nueva. Con este modelo se debe determinar los periodos naturales de la estructura y los modos asociados a estos, además de la respuesta de la misma.

El primer paso en el diseño de los amortiguadores es la selección de la localización y distribución de los dispositivos dentro de la estructura. La ubicación de los dispositivos, debe realizarse en conjunto con el arquitecto, de tal forma que estos no interfieran en la estética de la edificación y no bloquee los accesos a esta.

4.8.3 DETERMINACIÓN DEL CONTROL DE LA RESPUESTA:

En base a la respuesta dinámica del modelo de la estructura sin los dispositivos (determinado en el punto anterior), se adopta un parámetro a controlar de la respuesta.

El parámetro a controlar puede ser la reducción de un cierto porcentaje de la deformación máxima relativa entre pisos, la limitación de esta a un cierto valor, la

limitación de la aceleración máxima, limitación de la torsión, limitación de los esfuerzos, etc.

4.8.4 DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA:

La demanda sísmica a la que se ve afectada la estructura, está intrínsecamente definida por el nivel de control de la respuesta. Ya que lo que se busca que el comportamiento de la estructura frente a un cierto registro sísmico, conjunto de registros, espectro de diseño u otras cargas laterales es que esta cumpla con los niveles de serviciabilidad de la estructura y/o de sus contenidos.

4.8.5 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE AMORTIGUAMIENTO SUPLEMENTARIO:

El nivel de amortiguamiento suplementario, corresponde al grado de amortiguamiento que se debe agregar a la estructura, es decir, al valor de la razón de amortiguamiento crítico debido a los dispositivos viscosos (ξ_{md}).

Con este grado de amortiguamiento adicional lo que se desea es lograr alcanzar el control de la respuesta deseado. Este grado de amortiguamiento será tomado como la variable a iterar, es decir, se supondrá un cierto valor inicial con el cual se realizará todo el proceso de diseño, luego se verificará si se cumple con el control de la respuesta, si esto no es así se adoptará otro valor y se repetirá el proceso hasta llegar al control de la respuesta deseada, pero no debe dejarse de lado que este valor debe ser razonable, ya que valores muy altos darán como resultados diseños muy costosos.

4.8.6 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LOS DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO:

Como se dijo anteriormente, el proceso de diseño de los dispositivos es un proceso iterativo que puede compararse a la selección de una columna en el diseño de estructuras metálicas, el calculista selecciona diferentes columnas (tamaños y secciones) y comienza a iterar hasta lograr un diseño práctico y económico.

En el caso de los disipadores de energía del tipo viscoso el calculista debe suponer un cierto amortiguador que es función del coeficiente de amortiguamiento c_{md} y el exponente de la velocidad η . A continuación se mostrará dos métodos para la obtención de estos parámetros de los Dispositivos de Disipación de Energía del tipo Viscoso.

4.8.6.1 MÉTODO DE HART Y WONG:

Este método supone que los amortiguadores tienen un comportamiento lineal ($\eta=1$), por lo que la ecuación que gobierna el movimiento del sistema es:

$$[M] \{\ddot{X}\} + ([C_{nd}] + [C_{md}]) \{\dot{X}\} + [K] \{X\} = -[M] \{I\} a_g \quad (4.15)$$

Donde:

[M]: Matriz de masa.

[C_{nd}]: Matriz de amortiguamiento, correspondiente al amortiguamiento natural.

[C_{md}]: Matriz de amortiguamiento, correspondiente a los dispositivos de amortiguamiento viscoso que depende de c_{md} y la localización de los amortiguadores.

[K]: Matriz de rigidez.

Debido a que el sistema puede tener N tipos de amortiguadores, entonces la matriz de amortiguamiento de los dispositivos puede descomponerse en:

$$[C_{md}] = c_{md1}[C_1] + c_{md2}[C_2] + \dots + c_{mdN}[C_N] \quad (4.16)$$

Donde:

c_{mdi} : Corresponde al coeficiente de amortiguamiento del dispositivo i.

Asumiendo que sólo el modo fundamental de vibración es significativo, es decir, usando la frecuencia natural de vibración fundamental y el vector correspondiente al primer modo de vibración y suponiendo que:

$$2 \xi_{nd1} \omega_1 = \frac{\{\phi_1\}^T [C_{md}] \{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}} \quad (4.17)$$

Donde:

$\{\phi_1\}$: Es el vector de forma modal correspondiente al modo fundamental.

El supuesto anterior asume que existe un desacoplamiento entre el primer modo de vibración y el resto de ellos. Debe dejarse en claro que esto es solo un supuesto para el propósito de obtener los valores de c_{mdi} para el primer ensayo del proceso de iteración y no necesariamente que esto sea real.

Reemplazando la ecuación 4.16 en la 4.17, se obtiene:

$$2\xi_{nd1}\omega_1 = c_{md1} \frac{\{\phi_1\}^T [C_1] \{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}} + c_{md2} \frac{\{\phi_1\}^T [C_2] \{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}} + \dots + c_{mdN} \frac{\{\phi_1\}^T [C_N] \{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}} \quad (4.18)$$

La solución de la ecuación 4.18 no es única, ya que en una ecuación con N incógnitas. Sin embargo, con la ayuda de la experiencia es posible obtener valores razonables para c_{mdi} para el primer ensayo (Hart y Wong, 2000).

4.8.6.2 MÉTODO PROPUESTO POR LA GUÍA PARA LA REABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS (FEMA 273):

En octubre de 1997 “La Agencia de Dirección de Emergencia Federal Americana” (FEMA) publica una guía de diseño y comentarios para la “Rehabilitación Sísmica de Edificios”, también conocido como FEMA 273 y 274, que en el 2000 fue actualizada en la FEMA 356. Estos documentos fueron publicados como parte del “Programa Nacional de la Reducción del Riesgo Sísmico” (NEHRP). Esta guía tiene

más información sobre el diseño sísmico de estructuras con dispositivos pasivos de disipación de energía, que cualquier otro código de diseño publicado anteriormente.

Este documento especifica métodos de análisis, criterio de diseño, criterios de aceptación y fórmulas para la obtención de los parámetros de los dispositivos de amortiguamiento viscoso. El procedimiento presentado es válido para estructuras con comportamiento lineal elástico y que la razón de amortiguamiento efectivo de la estructura no exceda a un 30% del crítico.

La FEMA 273, define como razón de amortiguamiento efectivo a la suma de la razón de amortiguamiento crítico natural (propia de la estructura) y la razón de amortiguamiento crítico atribuible a los dispositivos de disipación de energía suplementario.

$$\xi_{\text{eff}} = \xi_{\text{nd}} + \xi_{\text{md}} \quad (4.19)$$

Donde:

ξ_{eff} : Razón de amortiguamiento efectivo.

ξ_{nd} : Razón de amortiguamiento crítico natural.

ξ_{md} : Razón de amortiguamiento crítico debido a los dispositivos viscosos.

La razón de amortiguamiento crítico debido a los dispositivos viscosos, se determina por medio de la siguiente fórmula:

$$\xi_{\text{md}} = \frac{\sum W_i}{2\pi W_K} \quad (4.20)$$

Donde:

W_j : Es la energía disipada por el dispositivo viscoso j en un ciclo de movimiento.

W_K : Es la energía elástica de deformación del sistema sin amortiguadores.

A continuación se mostrarán las fórmulas sugeridas por la FEMA para la determinación de la razón de amortiguamiento crítico atribuible a los dispositivos de disipación de energía.

4.8.6.2.1 DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO CON COMPORTAMIENTO LINEAL

Para los dispositivos de disipación de energía con comportamiento lineal, es decir, con el exponente de la velocidad igual a la unidad se tiene:

$$\sum W_i = \frac{2\pi^2}{T} \sum c_{mdi} \delta_{ri}^2 \quad (4.21.a)$$

$$\sum W_i = \frac{2\pi^2}{T} \sum c_{mdi} \phi_{ri}^2 \cos^2 \theta_i \quad (4.21.b)$$

Donde:

T: Periodo fundamental de la estructura.

c_{mdi} : Coeficiente de amortiguamiento del dispositivo i.

δ_{ri} : Desplazamiento relativo entre los bordes del dispositivo i, en forma axial.

ϕ_{ri} : Desplazamiento modal relativo entre los bordes del dispositivo i, en forma horizontal.

θ_i : Ángulo de inclinación del dispositivo i, con respecto a la horizontal.

$$W_K = \frac{4\pi^2}{T^2} \sum m_i \phi_i^2 \quad (4.22)$$

Donde:

m_i : Corresponde a la masa del piso i.

ϕ_i : Desplazamiento modal del piso i , correspondiente al modo fundamental de vibración.

Reemplazando la ecuación 4.21 y 4.22 en la ecuación 4.20, se obtiene la razón de amortiguamiento crítico correspondiente a los dispositivos viscosos de amortiguamiento con comportamiento lineal ($\eta=1$).

$$\xi_{\text{md}} = \frac{T \sum c_{\text{mdi}} \phi_{ri}^2 \cos^2 \theta_i}{4\pi \sum \left(\frac{W_i}{g} \right) \phi_i^2} \quad (4.23)$$

Una vez determinado el nivel de amortiguamiento suplementario descrito en 4.8.5,

y los valores necesarios para la utilización de la ecuación 4.23, estos son reemplazados y queda sólo como incógnita el coeficiente de amortiguamiento de los dispositivos, c_{mdi} .

4.8.6.2.2 DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO CON COMPORTAMIENTO NO LINEAL

Para los dispositivos de disipación de energía con comportamiento no lineal, es decir, con el exponente de la velocidad distinto a la unidad, la FEMA sugiere la siguiente fórmula para la determinación de la razón de amortiguamiento crítico (atribuible a los dispositivos):

$$\xi_{\text{md}} = \frac{\sum \lambda c_{\text{mdi}} u_{ri}^{1+\eta} \cos^{1+\eta} \theta_i}{2\pi \omega_i^{2-\eta} \sum m_i u_i^2} \quad (4.24)$$

Donde:

λ : Valor según la tabla 4.2.

c_{mdi} : Coeficiente de amortiguamiento del dispositivo i.

u_{ri} : Desplazamiento relativo entre los bordes del dispositivo i, en la dirección horizontal.

η : Exponente de la velocidad.

θ_i : Ángulo de inclinación del dispositivo i, con respecto a la horizontal.

ω : Es la frecuencia de vibración del modo i.

m_i : Corresponde a la masa del piso i.

u_i : Desplazamiento relativo del piso i.

Tabla 4.2: Valores de los parámetros “ λ ” de la ecuación 4.24

EXPONENTE " η "	PARÁMETRO " λ "
0.25	3.7
0.50	3.5
0.75	3.3
1.00	3.1
1.25	3.0
1.50	2.9
1.75	2.8
2.00	2.7

Fuente: FEMA 274.

Si solo se considera el modo principal de vibración, la respuesta del desplazamiento puede ser expresado como:

$$u_i = A \phi_i \quad (4.25)$$

Donde:

ϕ_i : Desplazamiento modal del piso i, correspondiente al modo fundamental de vibración.

A: Es la amplitud del movimiento.

Finalmente la razón de amortiguamiento crítico atribuible a los dispositivos de disipación de energía del tipo viscosos con comportamiento no lineal es:

$$\xi_{\text{md}} = \frac{\sum \lambda c_{\text{mdi}} \phi_{ri}^{1+\eta} \cos^{1+\eta} \theta_i}{2\pi A^{1-\eta} \omega^{2-\eta} \sum \left(\frac{W_i}{g} \right) \phi_i^2} \quad (4.26)$$

A igual que en el caso anterior, una vez determinado el nivel de amortiguamiento suplementario descrito en 4.8.5 y los valores necesarios para la utilización de la ecuación 4.26, estos son reemplazados y queda sólo como incógnita el coeficiente de amortiguamiento de los dispositivos, c_{mdi} .

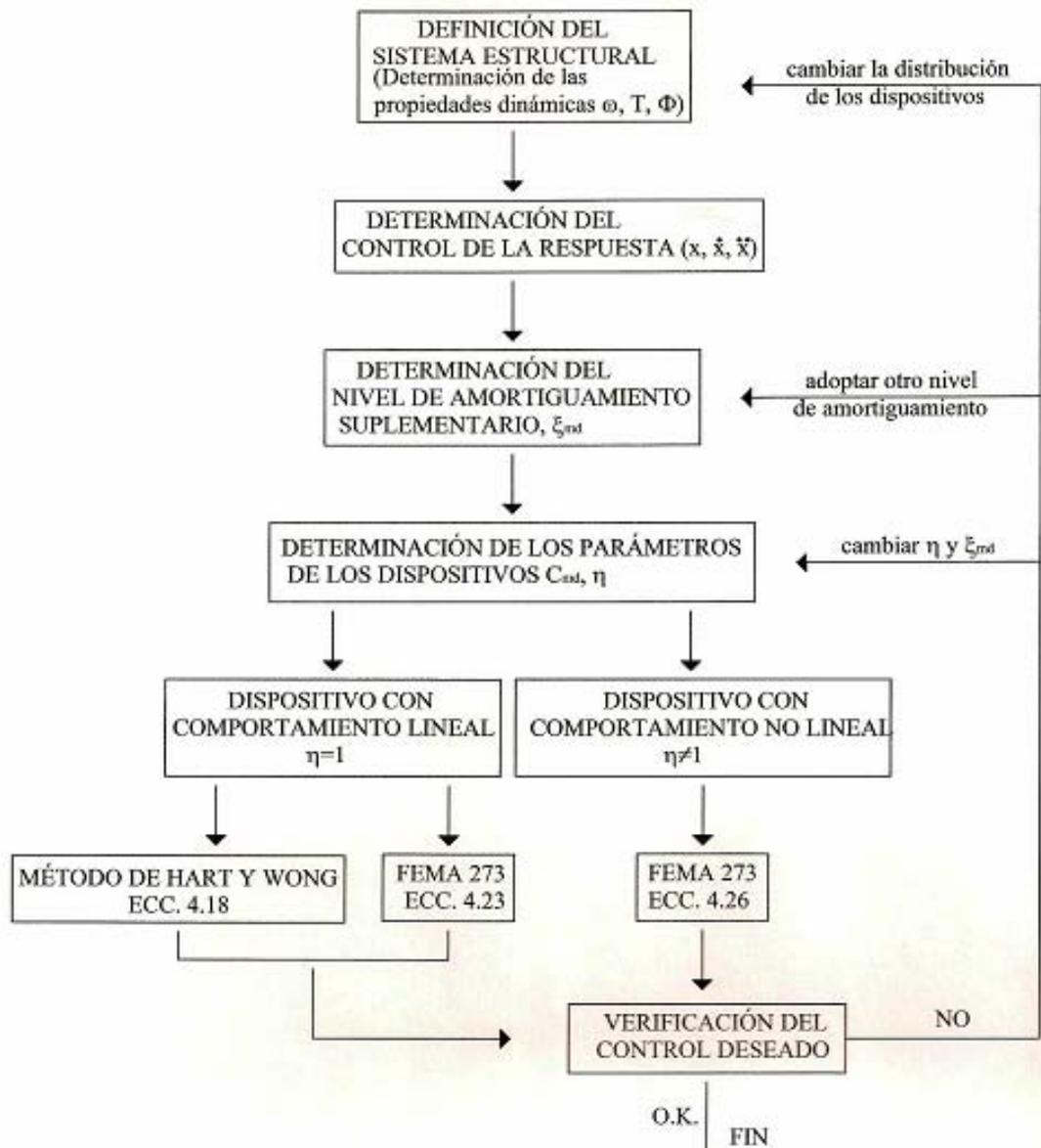
4.8.7 VERIFICACIÓN DEL CONTROL DE LA RESPUESTA:

La respuesta dinámica del sistema debe determinarse sometiendo a la estructura con los dispositivos ya definidos a un análisis tiempo historia (de cierto registro sísmico), espectro de diseño u otras cargas dinámicas que se requiera definido en 4.8.4.

Una vez obtenido los resultados de la respuesta dinámica de la estructura, se verifica que se obtenga el nivel de control deseado (definido en el punto 4.8.3), si esto no es así se debe iterar o bien cambiar el diseño.

En teoría, existen muchas soluciones para llegar al nivel de control deseado, pero solo una combinación de estas es la óptima, que no siempre es posible encontrar. Sin embargo, como en la mayoría de los diseños estructurales, el objetivo es un buen diseño final, es decir, que cumpla con los requerimientos planteados, que sea razonable y económico (Hart y Wong, 2000).

Fig.4.19: Diagrama de Flujo del Proceso de Diseño



CAPITULO V:

MODELACIÓN DEL DISIPADOR DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO EN SAP2000

5.1 GENERALIDADES:

El programa SAP2000 es uno de los software líder en la Ingeniería Estructural. Se pueden analizar cualquier tipo de estructuras con este programa, e incluso diseñar elemento por elemento de manera precisa con los reglamentos más conocidos (ACI en USA, RCDF en México, EUROCODIGO en Europa, etc.).

Se trata de un excelente programa de cálculo estructural en tres dimensiones mediante elementos finitos. Es el descendiente directo de la familia SAP90, muy conocida hace algunos años. En este caso, el programa está totalmente renovado. Tal vez lo más visible sea su nueva interfaz, totalmente integrada en Windows y realmente sencilla de utilizar.

Mediante SAP2000 es posible modelar complejas geometrías, definir diversos estados de carga, generar pesos propios automáticamente, asignar secciones, materiales, así como realizar cálculos estructurales de hormigón y acero basados, en diferentes normativas vigentes.

Además las últimas versiones de SAP2000 traen incorporado los elementos Link, con los cuales es posible modelar los dispositivos de Control Pasivo de estructuras, tanto del tipo de Aislamiento Basal (friccional, péndulo, núcleo de plomo, etc.) y Disipadores de Energía (Friccional, Plastificación Viscoelásticos y Viscosos).

Profesores e investigadores avalan los resultados entregados por SAP2000 al modelar los dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso en dicho programa. Tal es el caso de Scheller y Constantinou (1999) de la Universidad de Buffalo, quienes realizaron una prueba en laboratorio de una estructura de tres niveles sometida a una excitación basal, correspondiente al registro de la componente sísmica

S00E del El Centro 1940, obteniéndose resultados similares a los entregados en el modelo desarrollado en SAP2000.

5.2 ELEMENTOS LINK:

Se decidió la utilización de SAP2000 Advance 9.0.3, para la modelación de los dispositivos por las ventajas y funciones de análisis que posee, en él se puede modelar y analizar estructura tridimensional sin problemas, además de contar con las opciones de aplicar variados tipos de análisis (estático, modal, tiempo historia, etc.).

La principal razón de utilizar el SAP2000 como herramienta de análisis de la respuesta dinámica de estructuras, es que tiene la posibilidad de incluir en el modelo los Dispositivos de disipación de Energía del tipo Viscoso Lineal y No Lineal de muy buena forma, siendo la entrada de datos de los parámetros de los dispositivos muy amigable.

Por otro lado la salida de datos se puede realizar en forma gráfica, por lo que es fácil visualizar el comportamiento de la estructura y de los dispositivos, inclusive Ingenieros como Enrique Martínez Romero (diseñador de la Torre Mayor de México) y fabricantes (Taylor) de este tipo de dispositivos recomiendan el uso de este programa.

Para poder definir e incluir Dispositivos de Protección Pasiva en el sistema a estudiar, se debe realizar por medio de los elementos Link que posee SAP2000. Estos son:

- Linear
- MultiLinear Elastic
- MultiLinear Plastic
- Damper
- Gap
- Hook
- Plastic (Wen)

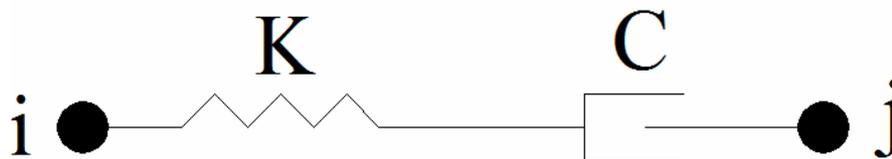
- Rubber Islotar
- Friction Islotar

El elemento a utilizar para poder modelar el comportamiento del dispositivo de disipación de energía del tipo viscoso tanto Lineal como No Lineal es el elemento Damper, el cual se describe a continuación.

5.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DISIPADOR, ELEMENTO DAMPER:

Las propiedades del dispositivo utilizado por Sap2000 para poder modelar el comportamiento de los Disipadores de Energía del tipo Viscoso, tanto Lineal como No Lineal, se basan en el modelo Viscoelástico de Maxwell, formado por un resorte en serie con un amortiguador (ver figura 5.1). La relación fuerza deformación del dispositivo esta dado por la ecuación 5.1

Fig 5.1: Elemento Damper, utilizado por SAP2000 para modelar el Disipador de Energía de Fluido Viscoso



Fuente: Scheller y Contantinou, 1999

$$f = \mathbf{k} d_k = \mathbf{c} \dot{d}_c^{\text{exp}} \quad (5.1)$$

Donde:

- f: Fuerza del dispositivo.
- k: Constante de rigidez del resorte.
- d_k : Deformación axial del resorte.
- c: Coeficiente de amortiguamiento.

\dot{d}_c : Velocidad relativa entre los extremos del amortiguador

cexp: Exponente de la velocidad.

Con el elementos mostrados anteriormente es como ya se dijo es un dispositivo con comportamiento Viscoelástico, por lo que se utiliza para simular dispositivos de disipación de energía compuestos de caucho, cuyo comportamiento es dependiente de la velocidad y del desplazamiento.

Como se ha dicho en capítulos anteriores el dispositivo a analizar y estudiar para controlar la respuesta dinámica de estructuras es un elemento con un comportamiento netamente de amortiguador (Viscoso), es decir, que la fuerza de salida solo depende de la velocidad. Para poder lograr esto mediante el modelo utilizado por Sap2000, se debe considerar que la rigidez del resorte es infinita.

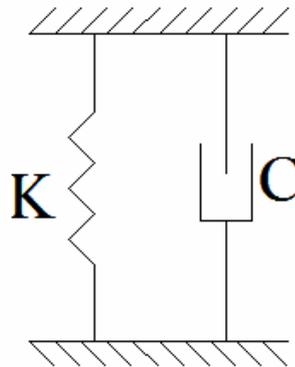
El cociente entre el coeficiente de amortiguamiento y la rigidez del resorte debe ser del orden del valor igual al paso de la fuerza de entrada al sistema. Se debe tener cuidado con la elección del valor de la rigidez del resorte, debido a que valores excesivamente grande de rigidez pueden afectar a los resultados (Scheller y Constantinou, 1999).

5.2.2 MODELO ALTERNATIVO PARA DISPOSITIVOS CON COMPORTAMIENTO LINEAL:

En forma alternativa cuando se quiere modelar dispositivos cuyo exponente de la velocidad sea igual a la unidad, SAP2000 utiliza un elemento que se compone de un amortiguador con un resorte en paralelo, tal como se muestra en la figura 5.2.

Al igual que en el caso anterior, este dispositivo de disipación de energía tiene un comportamiento Viscoelástico que no corresponde al caso de interés de esta tesis. Para poder darle un comportamiento netamente dependiente de la velocidad, la rigidez del resorte debe hacerse igual a cero (Scheller y Constantinou, 1999).

Fig 5.2: Elemento Damper, utilizado por SAP2000 para modelar el Disipador de Energía de Fluido Viscoso con comportamiento Lineal.



Fuente: Scheller y Contantinou, 1999.

5.3 VERIFICACIÓN DEL MODELO DISIPADOR UTILIZADO POR SAP2000:

5.3.1 GENERALIDADES:

Con el objeto de comprender el procedimiento de diseño de estructuras con dispositivos de amortiguamiento Viscoso suplementario que se postula en esta investigación utilizando SAP2000, es que a continuación se modela un sistema de un grado de libertad con un dispositivo de disipación de energía del tipo Viscoso con comportamiento Lineal en dicho programa, sometido a una excitación basal correspondiente a la componente NS del registro sísmico de El Centro (1940) y cuyos resultados son comparados con los obtenidos por el método iterativo de “Newmark” (descrito en el Anexo B).

Si bien puede pensarse que esta comparación no valida los resultados entregados por SAP2000, debido a que la forma de trabajar de estos es diferente, ya que el software trabaja con el método de elementos finitos y el método de Newmark es un procedimiento iterativo aproximado. La idea es mostrar que existe cierta similitud con los resultados obtenidos y así indicar que los resultados entregados por SAP2000 son confiables.

5.3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA:

Se considera un sistema de un grado de libertad, como el mostrado en la figura 5.3, cuya masa se asume concentrada en la parte superior de este y es de $m=1 \text{ kip-seg}^2/\text{in}$, el periodo correspondiente al modo fundamental de vibración es de $T=0,5\text{seg}$. y se asume una razón de amortiguamiento crítico total ($\xi=\xi_{nd}+\xi_{md}$) para la estructura de $\xi=25\%$.

Tabla 5.1: Datos del sistema de 1° de libertad

DATOS DE LA ESTRUCTURA		
m	1	kip-seg ² /in
T	0.5	seg
ξ	25	%

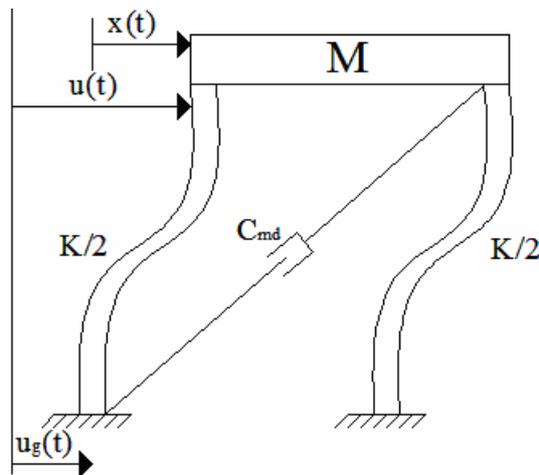
Donde:

m : Masa del sistema.

T : Periodo

ξ : Porcentaje de amortiguamiento crítico.

Fig 5.3: Sistema de un grado de Libertad con Disipador de Fluido Viscoso Lineal

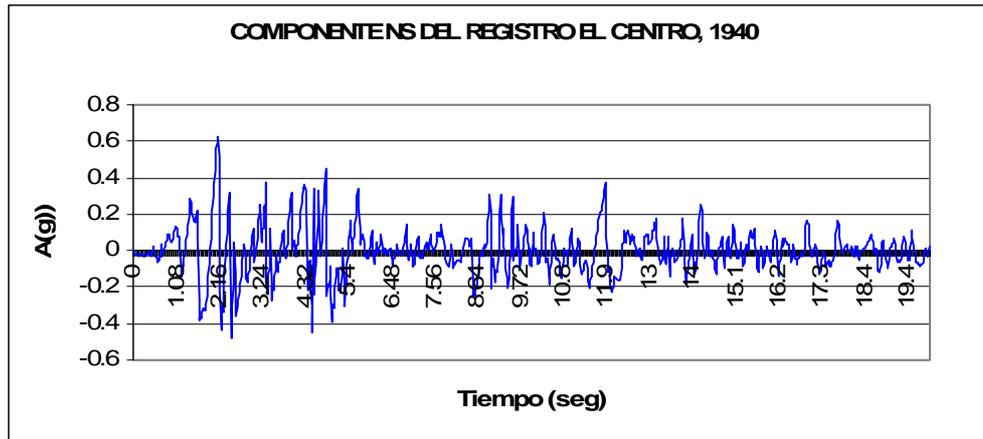


Fuente: Elaboración propia

5.3.3 REGISTRO SÍSMICO DE EL CENTRO, 1940:

La excitación basal a la que será sometido el sistema de un grado de libertad con Disipador de Energía de Fluido Viscoso corresponde a la componente NS del registro sísmico de El centro (1940) con un tamaño del paso Δt igual a 0,02seg.

Fig 5.4: Componente NS del registro de El Centro, 1940



Fuente: Hart y Wong, 2000.

5.3.4 RESPUESTA DEL SISTEMA UTILIZANDO EL MÉTODO DE NEWMARK:

En el Anexo B será descrita la ecuación matricial que gobierna el método de Newmark, reemplazando los valores correspondientes para el sistema en cuestión en la ecuación B.1 y considerando una aceleración promedio entre el instante t_k y t_{k+1} resulta la siguiente ecuación matricial que se utilizará en el proceso de iteración:

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ \dot{x}_{k+1} \\ \ddot{x}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.985187 & 0.019232 & 0.000094 \\ -1.481288 & 0.923223 & 0.009380 \\ -148.128752 & -7.677660 & -0.061964 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \\ \ddot{x}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -9.4E-05 \\ -0.00938 \\ -0.93804 \end{bmatrix} \ddot{u}_{g(k+1)}$$

Considerando para $k=0$, las siguientes condiciones iniciales:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ \dot{x}_0 \\ \ddot{x}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{u}_{g(0)} \end{bmatrix}$$

Se obtiene la siguiente respuesta del sistema (las tablas con los valores del desplazamiento, velocidad y aceleración ver en el Anexo B):

Fig 5.5: Respuesta en el tiempo del desplazamiento obtenido por el método de Newmark

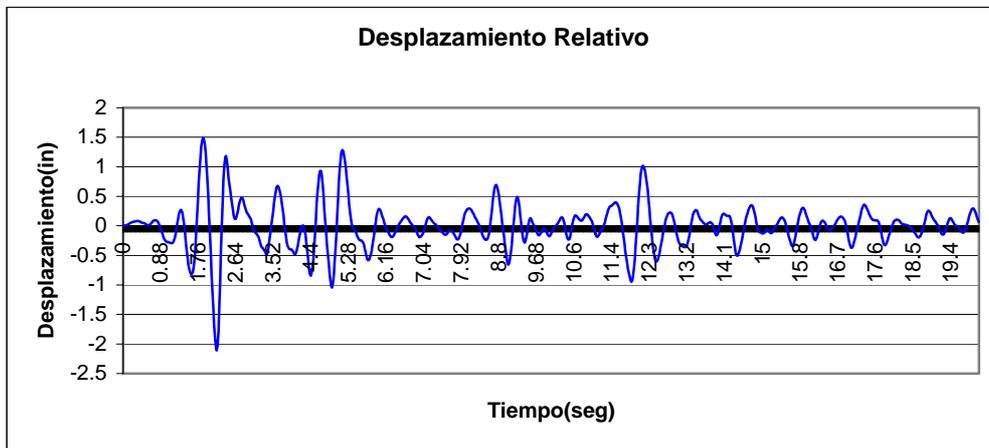


Fig 5.6: Respuesta en el tiempo de la velocidad obtenido por el método de Newmark

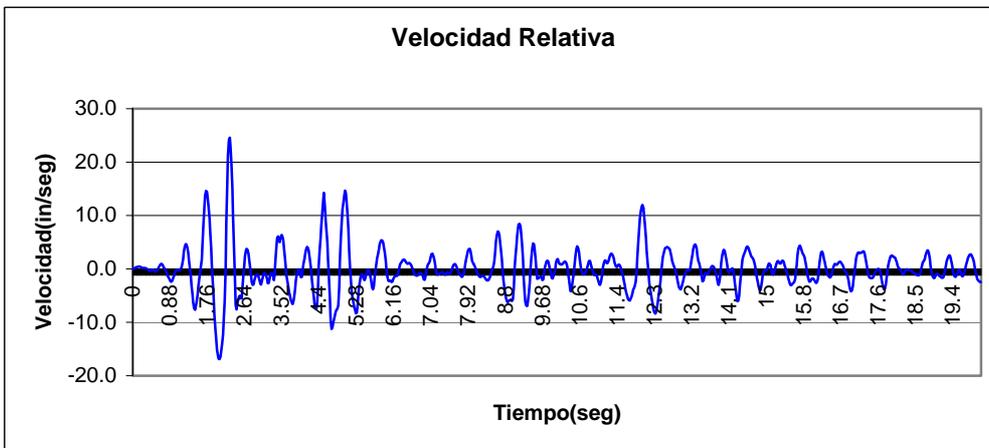
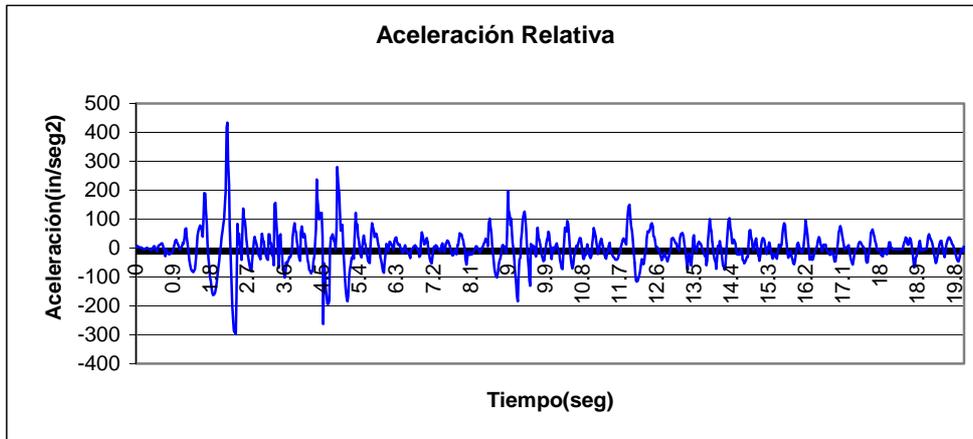


Fig 5.6: Respuesta en el tiempo de la aceleración obtenido por el método de Newmark

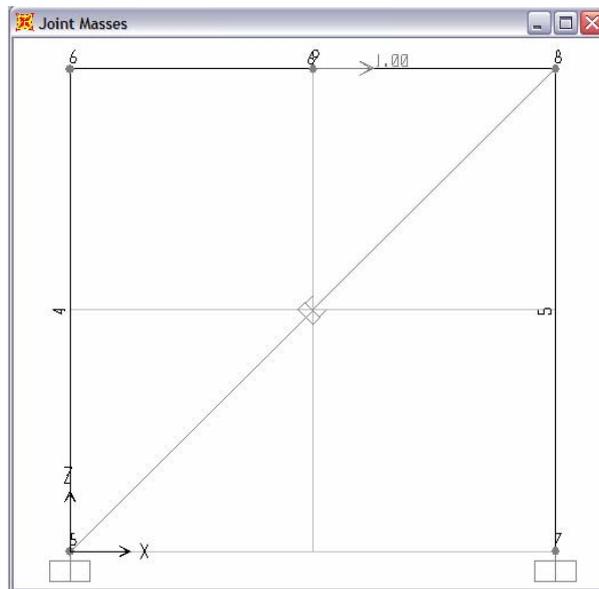


5.3.5 RESPUESTA DEL SISTEMA UTILIZANDO SAP2000:

El modelo ingresado al SAP2000, corresponde a un marco plano compuesto de dos columnas y una viga considerada infinitamente rígida, cuya masa total del sistema se asume concentrada en el centro de la viga.

Las columnas y la viga fueron modeladas con elementos frames y el dispositivo de disipación de energía Lineal Viscoso con el elemento Link del tipo Damper. En la figura siguiente se muestra el modelo considerado.

Fig.5.8: Modelo del Sistema de un Grado de Libertad para el análisis en SAP2000



Primero se debe realizar un análisis modal de la estructura con el fin de determinar los datos necesarios para la obtención del coeficiente de amortiguamiento a utilizar, el período fundamental del sistema entregado por SAP2000 es de $T=0,5185$ seg.

El valor del coeficiente de amortiguamiento para el dispositivo de disipación de energía se determinó utilizando la ecuación 4.17, correspondiente al método de Hart y Wong, descrito en el capítulo IV. Reemplazando los valores correspondiente se obtiene:

$$C_{md} = 2 \cdot \xi_{md} \cdot \omega \cdot m = 2 \cdot 0,25 \cdot 12,118 \cdot 1 = 6,059 \text{ kip-seg/in}$$

Debido a que el Dispositivo de Disipación de Energía de Fluido Viscoso tiene un comportamiento Lineal, se utilizó el elemento Damper descrito en la sección 5.2.2 compuesto por un resorte y un amortiguador en paralelo.

Los parámetros del Dispositivo corresponden al coeficiente de amortiguamiento determinado anteriormente y una rigidez nula del resorte.

Fig. 5.9: Respuesta en el tiempo del desplazamiento obtenido por SAP2000

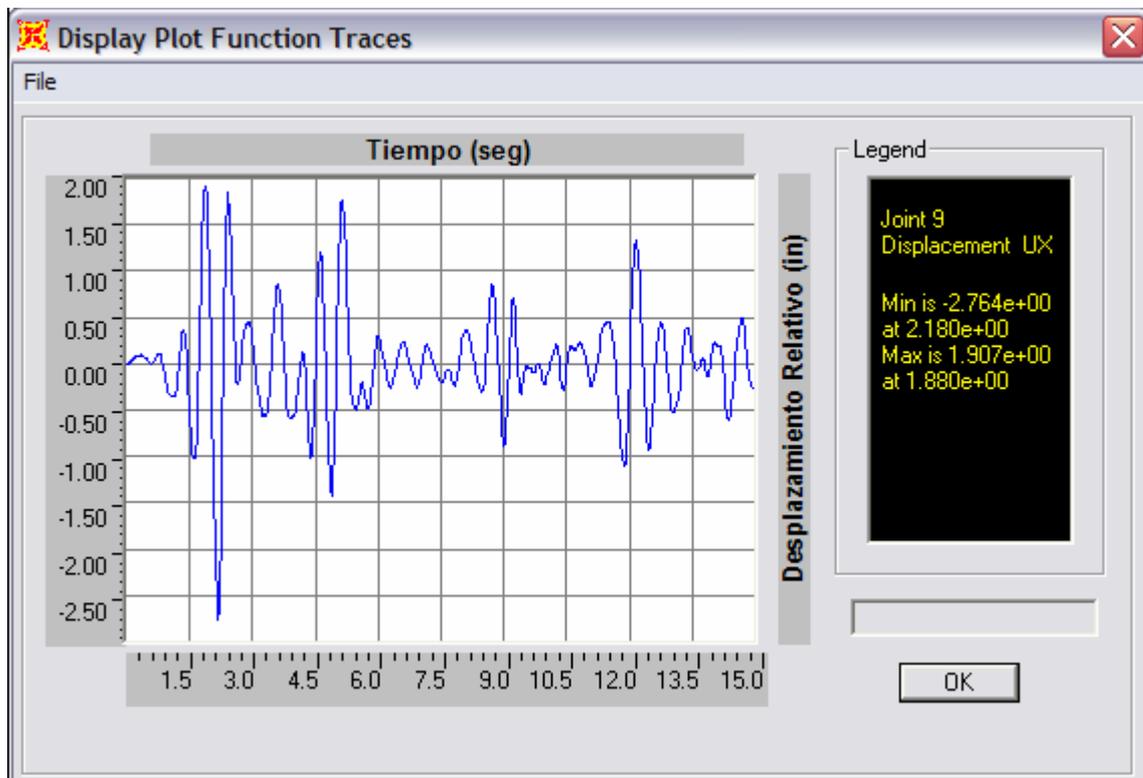


Fig. 5.10: Respuesta en el tiempo de la velocidad obtenido por SAP2000

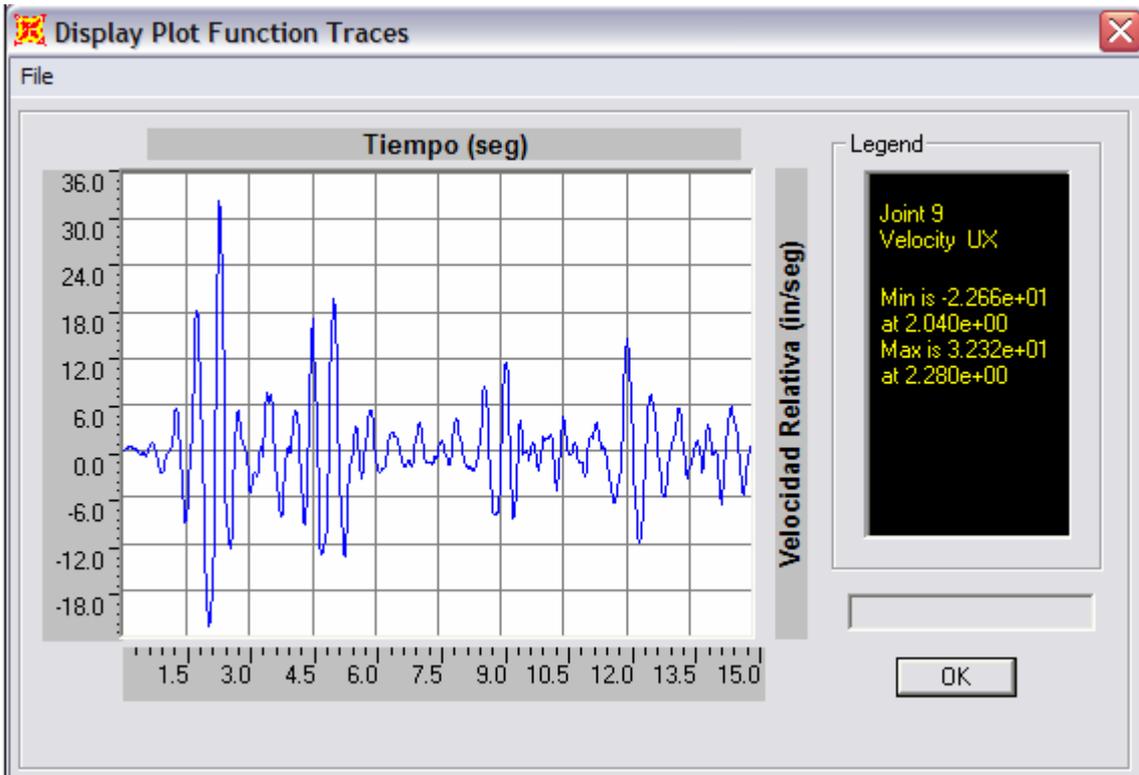


Fig. 5.11: Respuesta en el tiempo de la aceleración obtenido por SAP2000

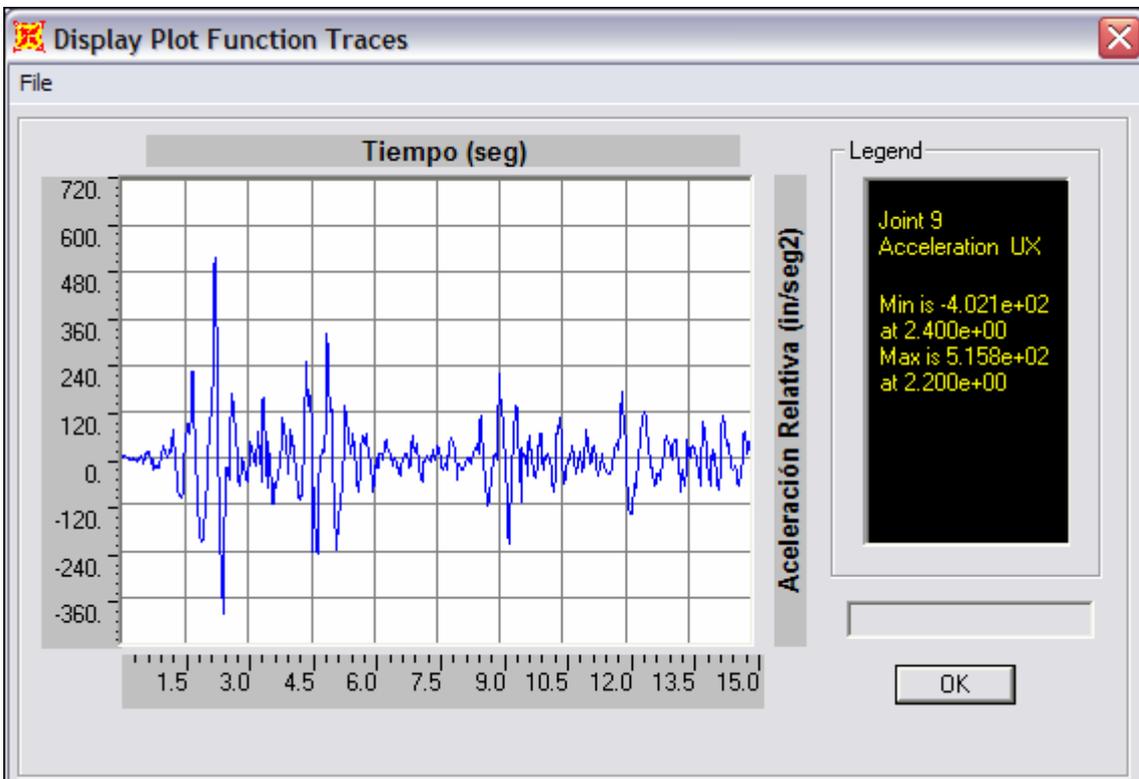


Tabla 5.2: Comparación de la respuesta obtenida por el Método de Newmark y SAP2000

UNIDADES kip - in - seg	VALOR	MÉTODO DE NEWMARK		RESULTADO SAP2000		DIFERENCIA
		t(seg)	valor	t(seg)	valor	
Desplazamiento	mín	2.18	-2.11	2.18	-2.764	31%
	máx	1.86	1.489	1.86	1.907	28%
Velocidad	mín	2.04	-16.87	2.04	-22.66	34.30%
	máx	2.28	24.589	2.28	32.32	31.40%
Aceleración	mín	2.4	-298.766	2.4	-402.1	34.58%
	máx	2.2	434.186	2.2	515.8	18.80%

CAPITULO VI:

CONTROL DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE UNA ESTRUCTURA DE CINCO PISOS CON DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO LINEALES

6.1 GENERALIDADES:

Existen edificios que durante su vida han estado sometidos a cargas dinámicas quedado vulnerables a fallas tales como falla en nudos, falla al corte en columnas, deslizamiento de armaduras longitudinales por insuficiencia de largos de desarrollo, pandeo local de la armadura longitudinal de las columnas, entre otras, las cuales se presentan a bajos niveles de deformaciones.

En el presente capítulo se analiza una estructura de cinco pisos, que tiene un comportamiento flexible en una de sus direcciones, por lo que es necesario reforzarla en dicho sentido. Como alternativa al reforzamiento a la estructura, se postula la utilización de “Disipadores de Fluido Viscoso Lineales”, para disminuir las demandas de deformación y, por lo tanto, disminuir los esfuerzos en los elementos estructurales.

6.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA:

La estructura analizada, es un edificio de cinco pisos de hormigón armado. En la dirección transversal se compone por cinco marcos y dos muros de 15cm de espesor, en dirección longitudinal posee cuatro marcos, lo que la hacen una estructura flexible en dicho sentido y es necesario reforzarla.

Los pilares son de sección rectangular de 40x70 cms. en los dos primeros pisos, 30x50 cms. en los pisos 3, 4 y de 30x30 cms. en el último piso. Las vigas del primer y segundo nivel son de sección rectangular de 40x70 cms. y de 30/60 cm. en los pisos siguientes.

Fig 6.1: PLANTA 1º Y 2º PISO

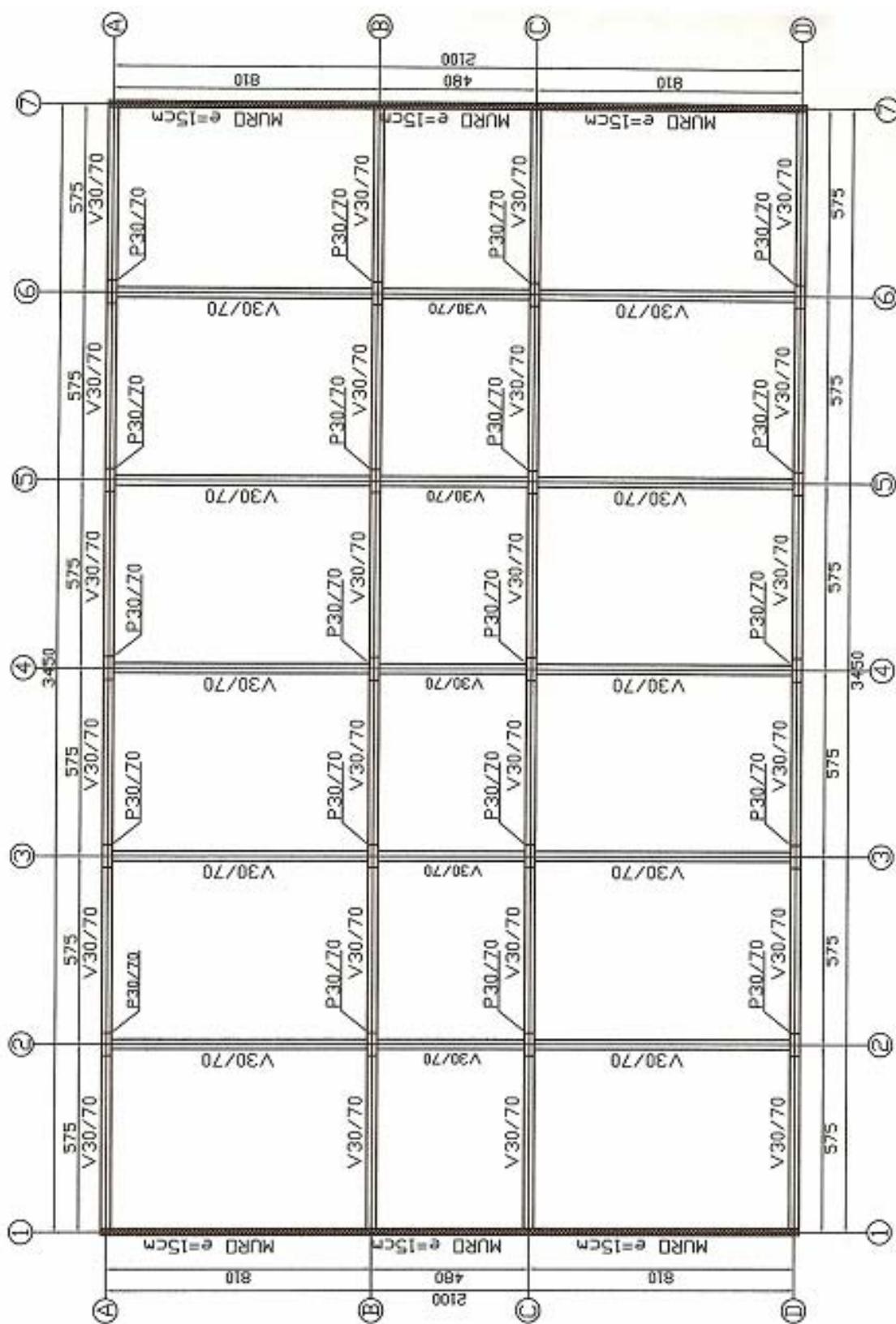


Fig 6.2: PLANTA 3º Y 4º PISO

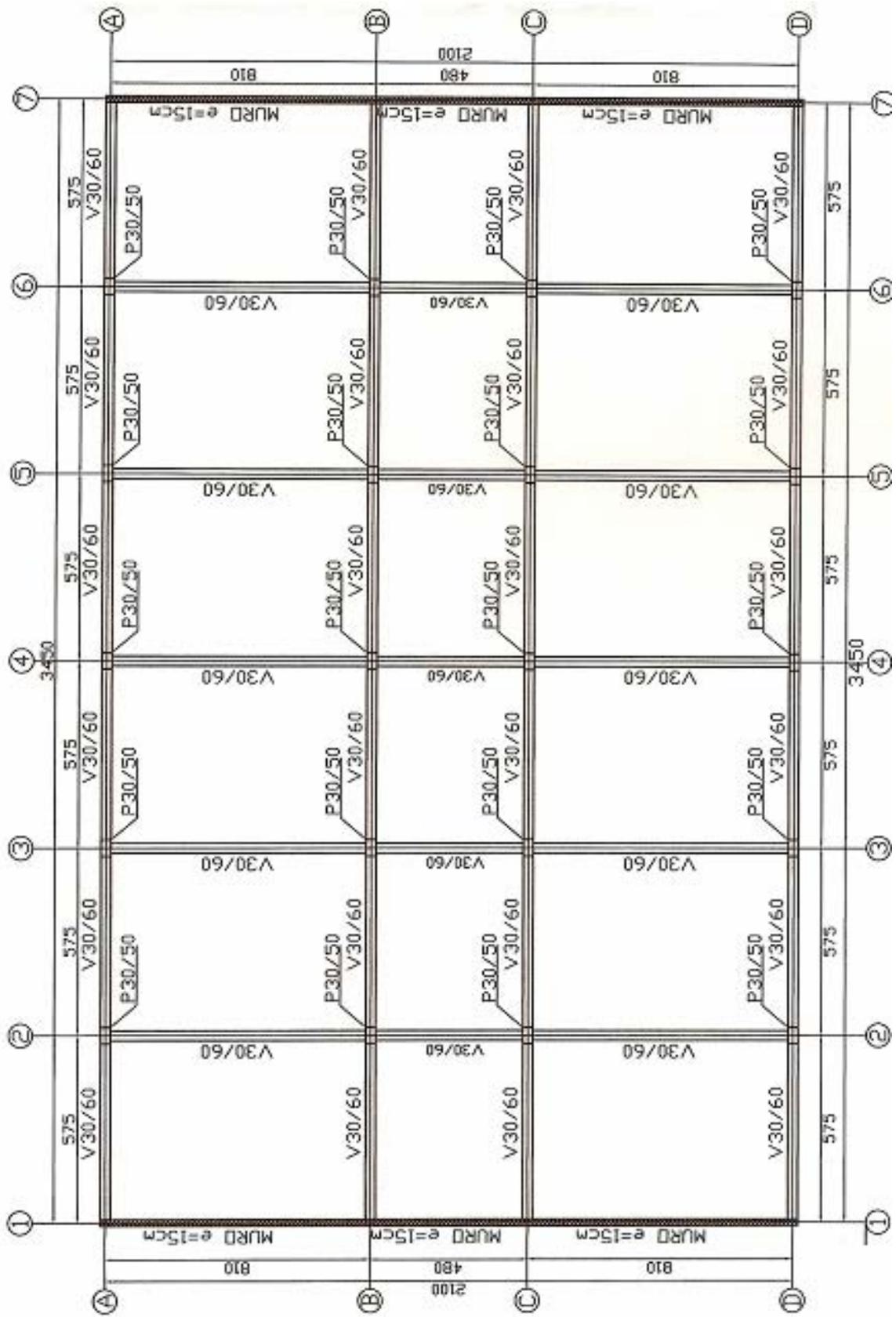


Fig 6.3: PLANTA 5º PISO

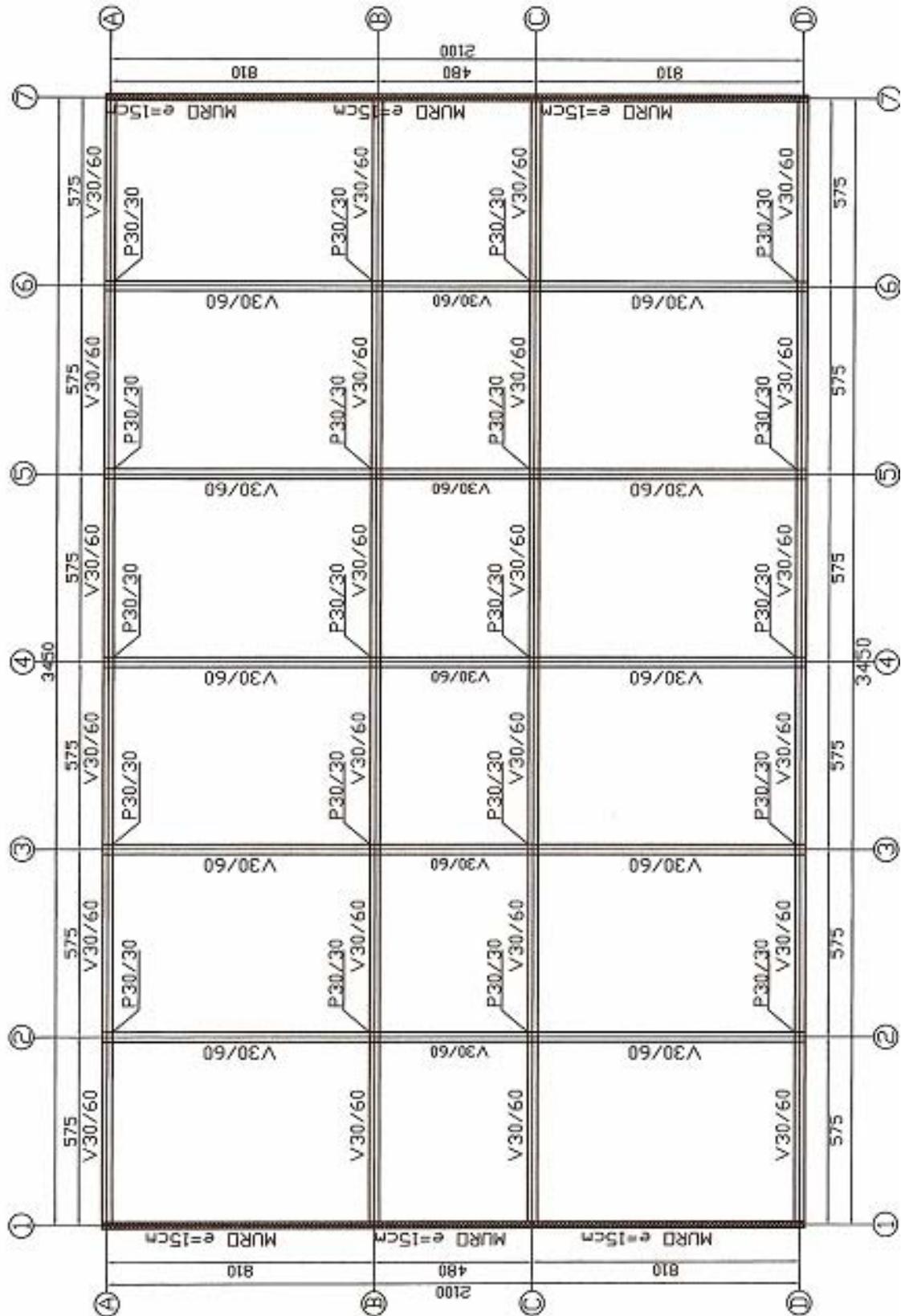


Fig 6.4: MARCO TIPO EJES 2, 3, 4, 5, 6

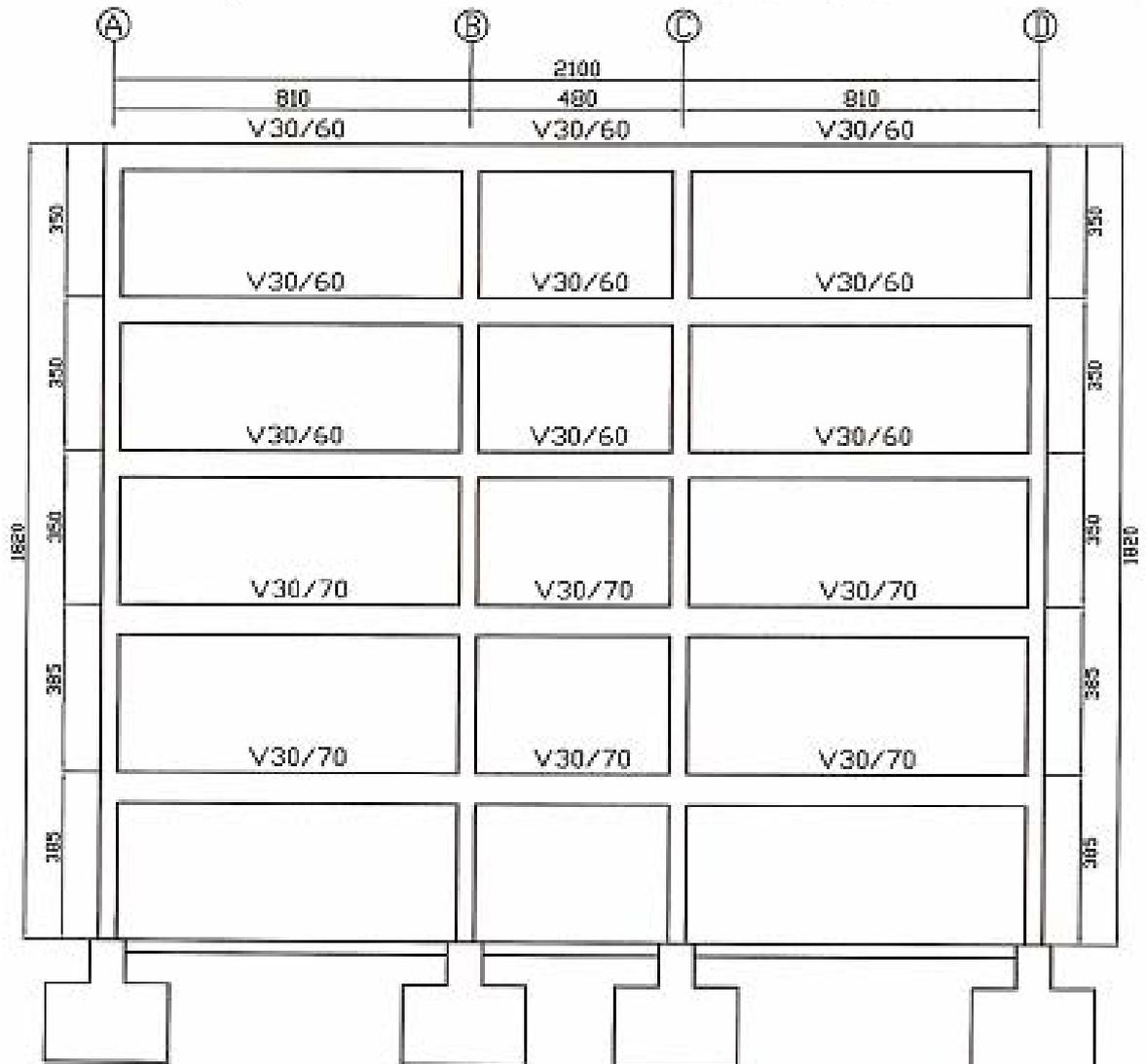
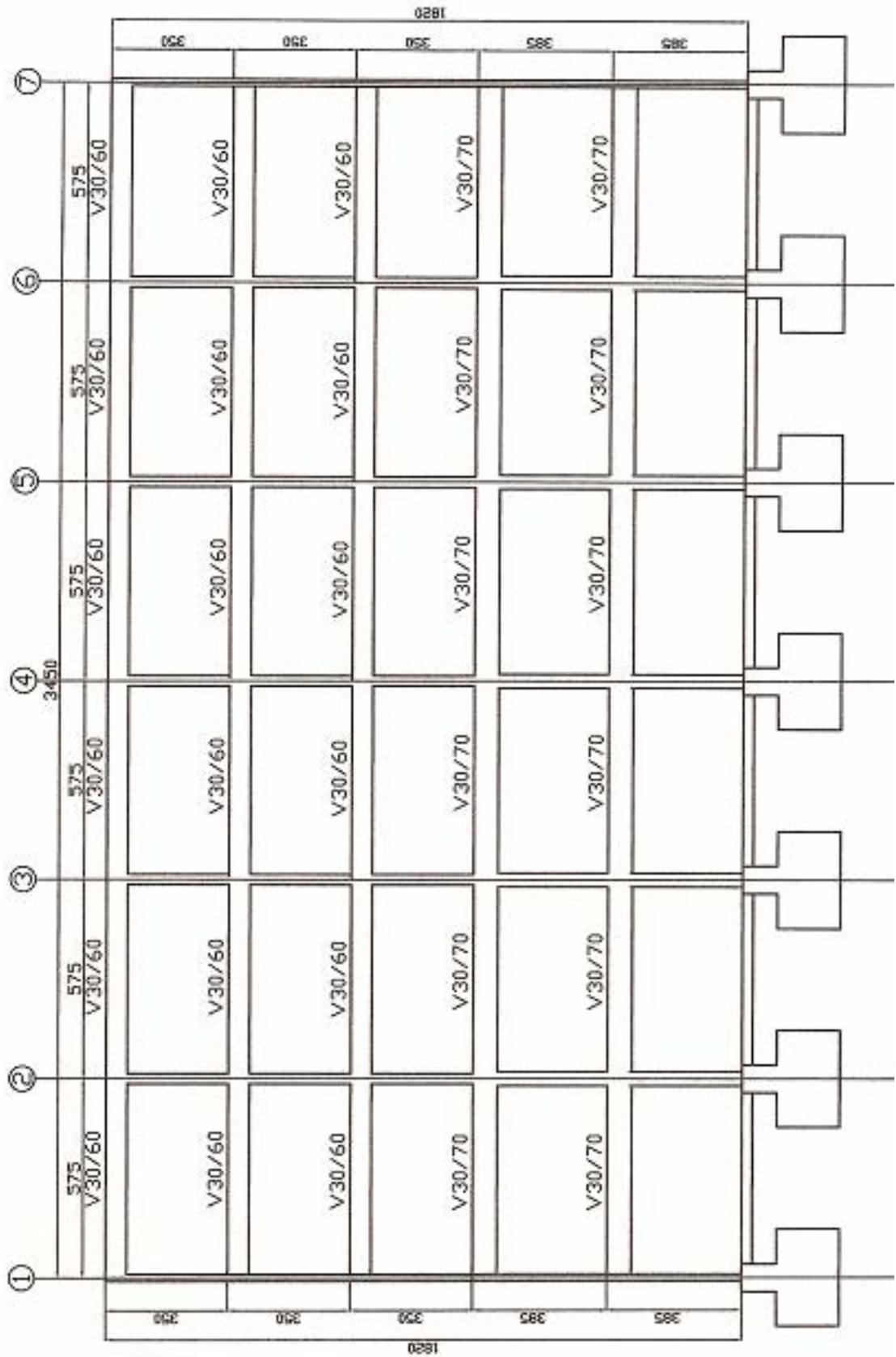


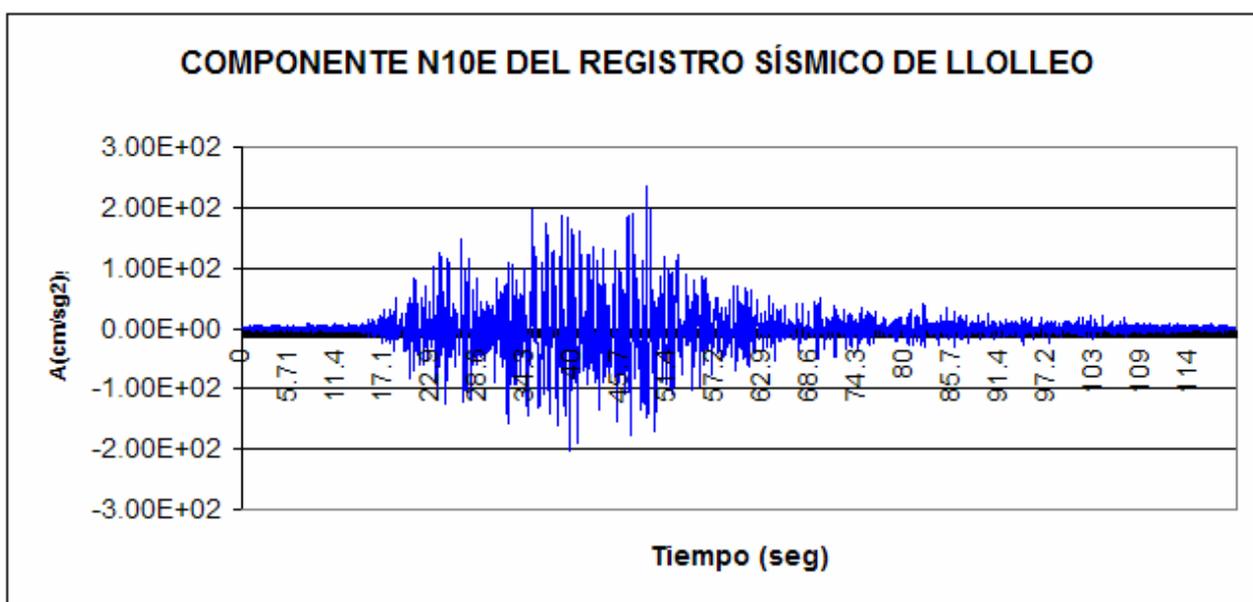
Fig 6.5: MARCO TIPO EJES A, B, C, D



6.3 COMPONENTE N10E DEL REGISTRO SÍSMICO DE LLOLLEO, 1985:

El terremoto del 3 de marzo de 1985 en la zona central, corresponde al evento sísmico de mayor magnitud registrado por la red de acelerogramas de Chile, por lo que el análisis de la respuesta de la estructura se realizará sometiendo a esta a la componente N10E del registro sísmico de Llolleo, para el análisis de la estructura.

Fig.6.6: Componente N10E del registro sísmico de Llolleo, 1985



Fuente: Farias, 2004.

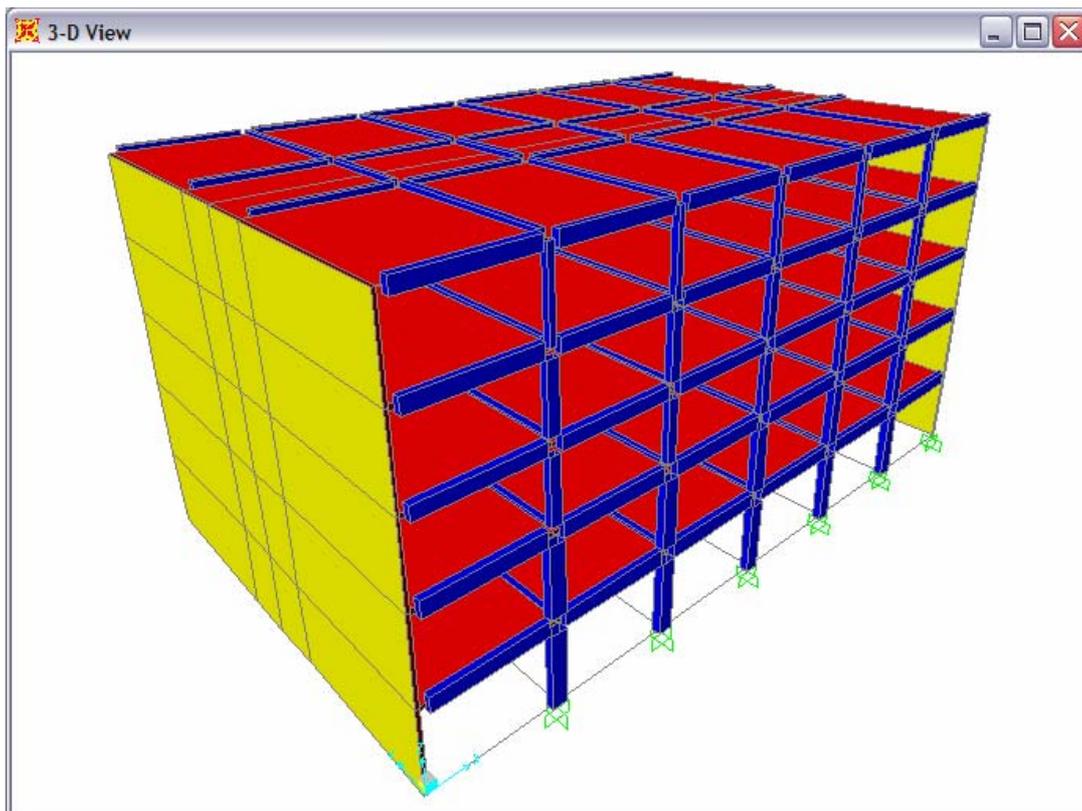
6.4 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA SIN DISIPADORES DE ENERGÍA:

Para el estudio de la respuesta de la estructura sin Disipadores de Energía, se realizará mediante el software SAP2000 realizando un análisis tiempo historia paso a paso, lineal del edificio sometido a una excitación basal correspondiente a la componente N10E del registro sísmico de Llolleo, el tamaño de paso es de 0,005 seg. la idea es conocer la respuesta de la estructura en cada instante de tiempo. El análisis se hará en el plano XZ (dirección débil de la estructura, ya que esta es la dirección de interés), en el análisis se ha considerado diafragmas rígidos a nivel de piso, la estructura esta empotrada a nivel basal (pilares y muros) y todos los elementos que conforman la

estructura aportan rigidez por flexión, corte y esfuerzo axial, se ha asumido un amortiguamiento natural de la estructura constante de 5% para todos los modos.

A continuación se muestra el modelo considerado en SAP2000, para la obtención de la respuesta.

Fig.6.7: Modelo del Edificio considerado en SAP2000



6.4.1 RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA PARA UN AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO DEL 5% DEL CRÍTICO:

A continuación se muestran los valores máximos de de la respuesta de la estructura para un amortiguamiento efectivo de 5% del crítico. En el Anexo B se muestra la variación en el tiempo de la respuesta.

Tabla 6.1: Valores máximos del Desplazamiento, Velocidad y Aceleración de los centros de masa de cada piso, para un amortiguamiento efectivo de 5%

CENTRO DE MASA	VALOR	DESPLAZAMIENTO (cm)	VELOCIDAD (cm/seg)	ACELERACIÓN (cm/seg ²)
Piso 1	min	-0.8159	-12.03	-195.1
	máx	0.8301	12.05	196.2
Piso 2	min	-1.415	-20.53	-330.9
	máx	1.469	20.82	303.6
Piso 3	min	-2.548	-35.48	-607.2
	máx	2.72	36.58	571.2
Piso 4	min	-3.292	-48.35	-801.6
	máx	3.545	51.12	776.9
Piso 5	min	-4.252	-68.58	-1084
	máx	4.559	71.92	1130

Tabla 6.2: Esfuerzos máximos y mínimos en las columnas más solicitadas de cada piso, para un amortiguamiento efectivo de 5%

COLUMNAS	VALOR	AXIAL (ton)	CORTE (ton)	MOMENTO (ton-mt)
Piso1	min	-1.5523	-63.0143	-115.78873
	máx	1.2701	64.1961	117.9604
Piso2	min	-1.2701	-53.3554	-89.62202
	máx	1.2701	56.9029	89.62202
Piso3	min	-0.6048	-39.4242	-61.28175
	máx	0.6264	43.6076	61.05057
Piso4	min	-0.6264	-26.0116	-40.42338
	máx	0.6264	28.8738	40.42338
Piso5	min	-0.4536	-6.1385	-11.54197
	máx	0.4536	6.5954	11.54197

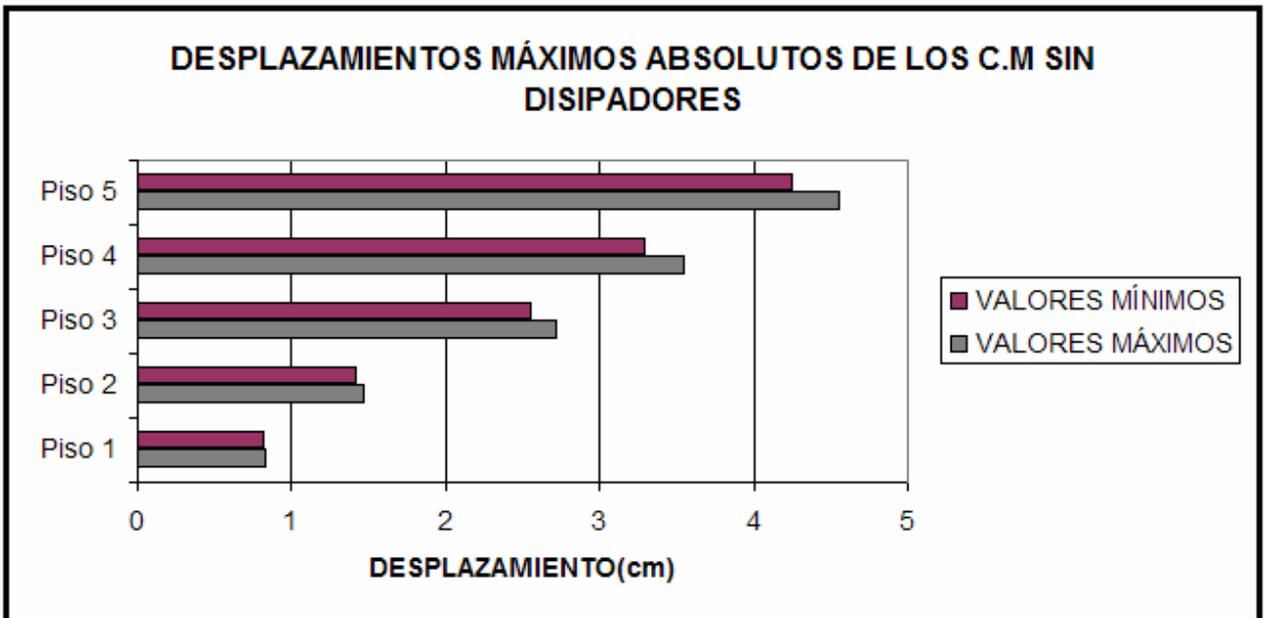
Tabla 6.3: Esfuerzos máximos y mínimos en la base, para un amortiguamiento efectivo de 5%

VALOR	CORTE (ton)	MOMENTO (ton-mt)
min	-1319	-2423
máx	1299	2378

Tabla 6.4: Desplazamientos máximos entre los C.M de cada piso, para un amortiguamiento efectivo de 5%

C.M Piso	Valor	Desplazamiento en X (cm)	Desp.entre piso en sentido positivo(cm)	Desp.entre piso en sentido negativo(cm)
5	Max	4.558755		
5	Min	-4.252173		
			1.013533	0.960175
4	Max	3.545222		
4	Min	-3.291998		
			0.825043	0.74378
3	Max	2.720179		
3	Min	-2.548218		
			1.250976	1.132998
2	Max	1.469203		
2	Min	-1.41522		
			0.639126	0.59929
1	Max	0.830077		
1	Min	-0.81593		
			0.830077	0.81593

Fig 6.8: Desplazamientos máximos absolutos de los centros de masa de cada piso sin disipadores, para un amortiguamiento efectivo de 5%



La norma sísmica NCh 433 of 96 recomienda que el desplazamiento máximo entre dos pisos consecutivos, medido en el centro de masas, no debe ser mayor que la altura de entre piso multiplicada por 0.002. Al comparar los desplazamientos entre piso, con los desplazamientos admisibles de la tabla 6.2, puede observarse que no se cumple con los valores permitidos.

Tabla 6.5: Desplazamientos admisibles entre piso según la NCh 433

Piso	Altura "h" entre piso(cm)	Desplazamiento admisible (cm)
1	385	0.77
2	385	0.77
3	350	0.7
4	350	0.7
5	350	0.7

6.5 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA CON DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO LINEALES:

Para la realización del análisis de la estructura con “Disipadores de Fluido Viscoso Lineales”, se hará según el procedimiento descrito en la sección 4.8 del Capítulo IV. La masa de los Dispositivos será despreciada.

Como se mostró en la sección anterior, los desplazamientos de los centros de masa de cada piso no cumplen con lo permitido, por lo que este será el parámetro a controlar de la respuesta.

6.5.1 DETERMINACIÓN DEL PERIODO Y MODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN:

Para la determinación del periodo y modo fundamental de vibración, se resuelve el problema de las vibraciones libres mediante el software de análisis estructural ETAB, considerándose un grado de libertad por piso en la dirección de análisis, todos ellos referidos al centro de gravedad de cada nivel, además se considera diafragma rígido a nivel de cada piso, las masas se asumen concentradas en el centro de masa de cada piso

y corresponde al peso propio, más el 50% de la sobrecarga. El resultado obtenido es el siguiente:

Tabla 6.6: Datos entregados por Etab para el modo fundamental

Modo	Piso	Frecuencia(rad/seg)	Periodo(seg)	Φ
1	1	10.549	0.59562	0.1604
	2			0.3113
	3			0.6069
	4			0.8050
	5			1.0000

Tabla 6.7: Datos entregados por Etab para las masas de cada piso

Piso	Masa X (kg-seg/cm)	XCM(cm)	YCM(cm)
1	660.6454	1725	1050
2	643.7458	1725	1050
3	629.7892	1725	1050
4	624.4384	1725	1050
5	271.2856	1725	1050

6.5.2 DETERMINACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO SUPLEMENTARIO Y DE LOS PARÁMETROS DE LOS DISIPADORES:

Como primera instancia para un diseño preliminar se adoptará un nivel de amortiguamiento suplementario para la estructura de 20% del crítico, luego se verificará si este valor es suficiente, en caso contrario será reemplazado. Debido a que los disipadores a emplear son del tipo Lineal el exponente de la velocidad será igual a la unidad.

Los coeficientes de amortiguamiento de los Dispositivos se determinarán mediante el método propuesto por la Agencia de Dirección de Emergencia Federal Americana” (FEMA 273), descrito en la sección 4.8.6 del Capítulo IV, estos se ubicarán en forma simétrica en los ejes A y D, entre los ejes 3 y 4 para no inducir problemas de excentricidad a la estructura y para el prediseño se considerarán dos casos para los Disipadores, estas son:

- 1) Dispositivo con coeficiente igual a C_1 en el 1° piso, coeficiente C_2 en el 3° piso y coeficiente C_3 en el 5° piso.
- 2) Dispositivo con coeficiente igual a C_1 en el 1° piso, coeficiente C_2 en el 2° piso, coeficiente C_3 en el 3° piso, coeficiente C_4 en el 4° piso y coeficiente C_5 en el 5° piso.

Tabla 6.8: Valores de los coeficientes de amortiguamiento de los Dispositivos para un amortiguamiento suplementario del 20% del crítico

CASO	PISO	CANTIDAD	C_i	COEFICIENTE DE AMORT.(ton-seg/cm)	
				FEMA 273	ξ_{md}
1	1	2	C_1	25	20%
	3	2	C_2	21.5	
	5	2	C_3	10	
2	1	2	C_1	25	20%
	2	2	C_2	20	
	3	2	C_3	15	
	4	2	C_4	8	
	5	2	C_5	5	

6.5.3 DESPLAZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA PARA UN AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO DEL 25% DEL CRÍTICO:

6.5.3.1 CASO 1:

Fig 6.9: Desplazamientos máximos absolutos de los centros de masa de cada piso para el caso 1, para un amortiguamiento suplementario de 20%

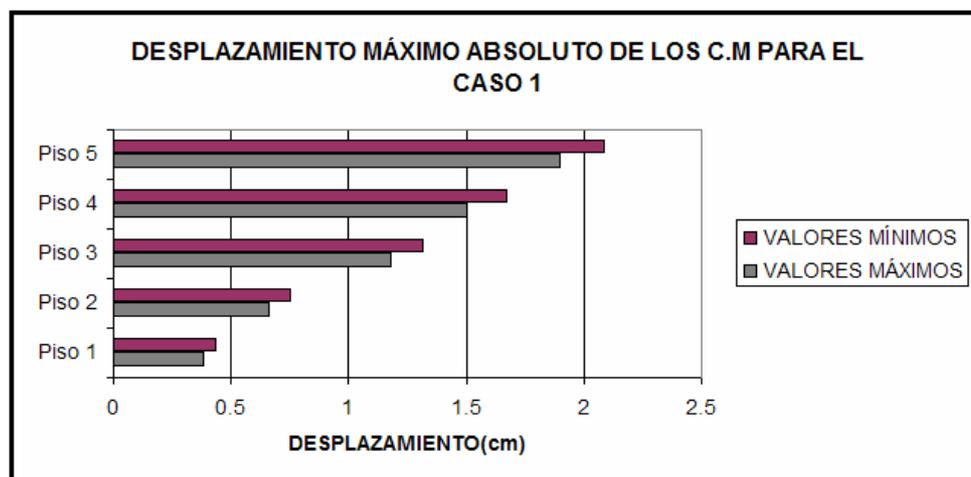


Tabla 6.9: Desplazamientos máximos entre los C.M de cada piso para el caso 1, para un amortiguamiento suplementario de 20%

C.M Piso	Valor	Desplazamiento en X (cm)	Desp.entre piso en sentido positivo(cm)	Desp.entre piso en sentido negativo(cm)
5	Max	1.895199	0.393173	0.414037
5	Min	-2.083047		
4	Max	1.502026	0.326091	0.353763
4	Min	-1.66901		
3	Max	1.175935	0.514765	0.566043
3	Min	-1.315247		
2	Max	0.66117	0.278693	0.313726
2	Min	-0.749204		
1	Max	0.382477	0.382477	0.435478
1	Min	-0.435478		

6.5.3.2 CASO 2:

Fig 6.10: Desplazamientos máximos absolutos de los centros de masa de cada piso para el caso 2, para un amortiguamiento suplementario de 20%

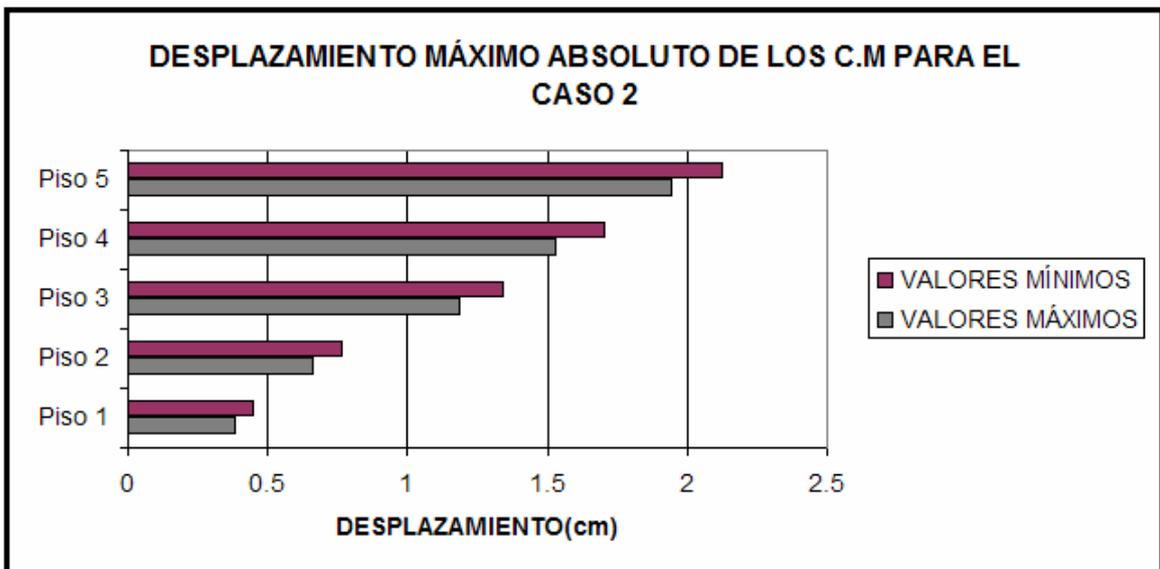


Tabla 6.10: Desplazamientos máximos entre los C.M de cada piso para el caso 2, para un amortiguamiento suplementario de 20%

C.M Piso	Valor	Desplazamiento en X (cm)	Desp.entre piso en sentido positivo(cm)	Desp.entre piso en sentido negativo(cm)
5	Max	1.944347	0.418377	0.422597
5	Min	-2.126297		
4	Max	1.52597	0.337787	0.364102
4	Min	-1.7037		
3	Max	1.188183	0.525136	0.576998
3	Min	-1.339598		
2	Max	0.663047	0.280261	0.317745
2	Min	-0.7626		
1	Max	0.382786	0.382786	0.444855
1	Min	-0.444855		

Como puede observarse en los dos casos considerados anteriormente los desplazamientos máximos absolutos de los centros de masa entre piso, cumplen con el nivel de respuesta esperado. Ahora con el objeto de determinar un diseño que sea más uniforme y económico, se determinarán nuevos coeficientes de amortiguamiento para los Dispositivos, pero con un porcentaje de amortiguamiento suplementario de un 15%. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.11: Valores de los coeficientes de amortiguamiento de los Dispositivos para un amortiguamiento suplementario del 15% del crítico

CASO	PISO	CANTIDAD	C _i	COEFICIENTE DE AMORT.(ton-seg/cm)	
				FEMA 273	ξ_{md}
1	1	2	C ₁	17	15%
	3	2	C ₂	16	
	5	2	C ₃	8.5	
2	1	2	C ₁	16.5	15%
	2	2	C ₂	16.5	
	3	2	C ₃	8.4	
	4	2	C ₄	8.4	
	5	2	C ₅	8.4	

6.5.4 DESPLAZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA PARA UN AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO DEL 20% DEL CRÍTICO:

6.5.4.1 CASO 1:

Fig 6.11: Desplazamientos máximos absolutos de los centros de masa de cada piso para el caso 1, para un amortiguamiento suplementario de 15%

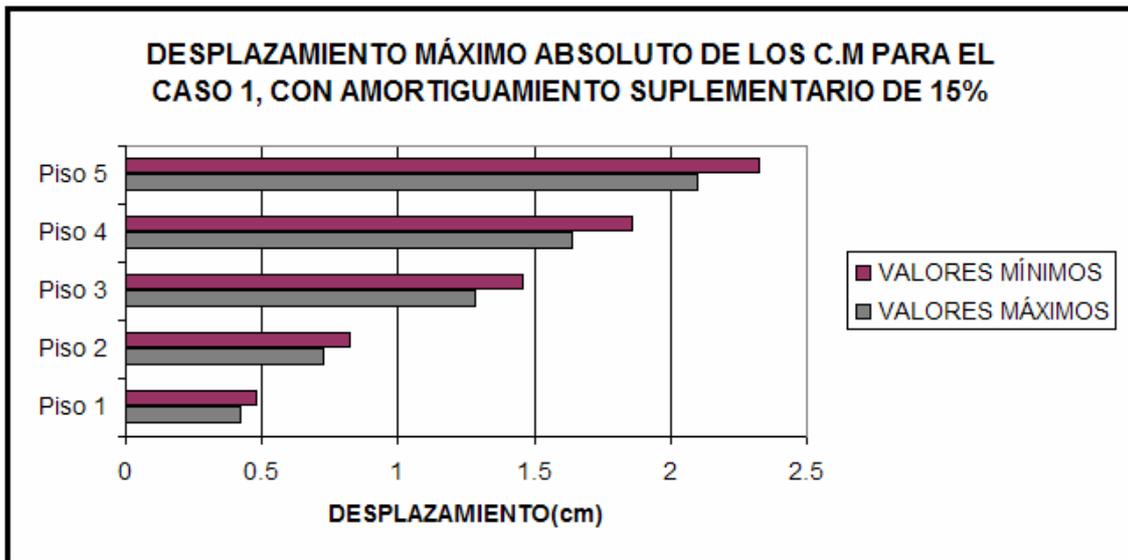


Tabla 6.12: Desplazamientos máximos entre los C.M de cada piso para el caso 1, para un amortiguamiento suplementario de 15%

C.M Piso	Valor	Desplazamiento en X (cm)	Desp.entre piso en sentido positivo(cm)	Desp.entre piso en sentido negativo(cm)
5	Max	2.098359		
5	Mín	-2.323494		
			0.460314	0.465518
4	Max	1.638045		
4	Mín	-1.857976		
			0.355163	0.398301
3	Max	1.282882		
3	Mín	-1.459675		
			0.558546	0.634611
2	Max	0.724336		
2	Mín	-0.825064		
			0.304428	0.347607
1	Max	0.419908		
1	Mín	-0.477457		
			0.419908	0.477457

6.5.4.2 CASO 2:

Fig 6.12: Desplazamientos máximos absolutos de los centros de masa de cada piso para el caso 2, para un amortiguamiento suplementario de 15%

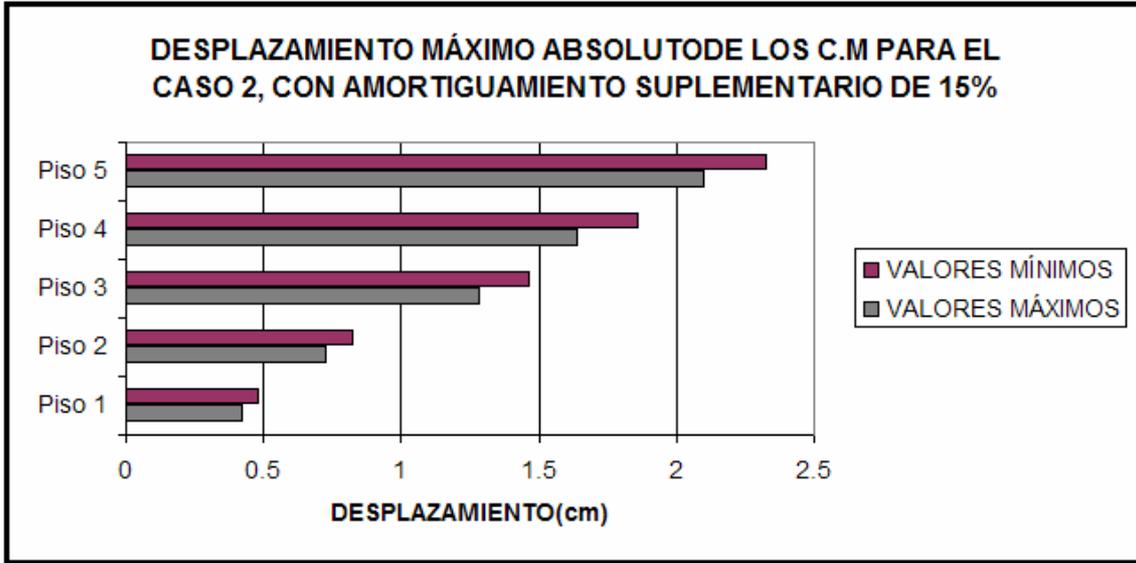


Tabla 6.13: Desplazamientos máximos entre los C.M de cada piso para el caso 2, para un amortiguamiento suplementario de 15%

C.M Piso	Valor	Desplazamiento en X (cm)	Desp.entre piso en sentido positivo(cm)	Desp.entre piso en sentido negativo(cm)
5	Max	2.100987		
5	Min	-2.325542		
			0.46081	0.46453
4	Max	1.640177		
4	Min	-1.861012		
			0.355767	0.400371
3	Max	1.28441		
3	Min	-1.460641		
			0.559428	0.635787
2	Max	0.724982		
2	Min	-0.824854		
			0.304506	0.346411
1	Max	0.420476		
1	Min	-0.478443		
			0.420476	0.478443

Nuevamente en ambos casos los desplazamientos máximos absolutos de los centros de masa entre piso, cumplen con el nivel de respuesta esperado. Ahora con el objeto de determinar un diseño seguro, se considerará que uno de los Dispositivos falle durante un evento sísmico.

Bajo el supuesto anterior, en el caso 1 considerando que falla uno de los Dispositivos ubicados en el 3° piso no cumpla su función durante un evento, se producen desplazamientos sobre el permitido entre el 2° y 3° piso, por lo que esta configuración será descartada. Sin embargo para el caso 2 bajo el supuesto anterior, los desplazamientos aún están por debajo del admisible, por lo que el diseño final será este.

Fig 6.13: Desplazamientos máximos absolutos de los centros de masa de cada piso para el caso 1, para un amortiguamiento suplementario de 15%, bajo el supuesto que falla uno de los Dispositivos del 3° piso

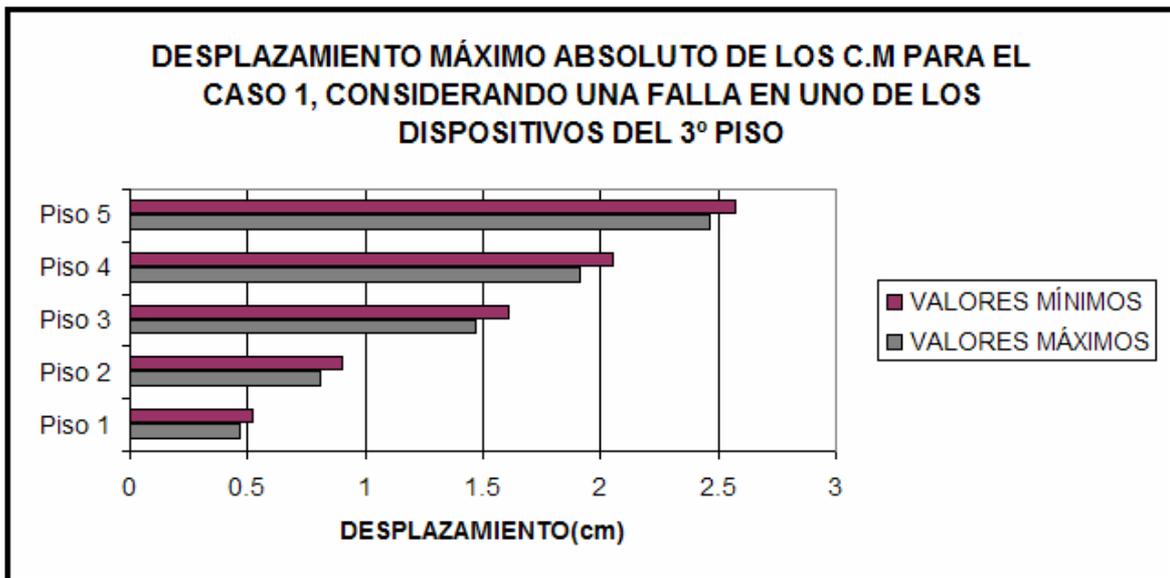


Tabla 6.14: Desplazamientos máximos entre los C.M de cada piso del caso 2, considerando la falla de uno de los Dispositivos del 3° piso durante un sismo

C.M Piso	Valor	Desplazamiento en X (cm)	Desp.entre piso en sentido positivo(cm)	Desp.entre piso en sentido negativo(cm)
5	Max	2.465114	0.556276	0.521255
5	Min	-2.57285		
4	Max	1.908838	0.438378	0.443619
4	Min	-2.051595		
3	Max	1.47046	0.66591	0.705954
3	Min	-1.607976		
2	Max	0.80455	0.3394	0.382567
2	Min	-0.902022		
1	Max	0.46515	0.46515	0.519455
1	Min	-0.519455		

6.5.5 RESPUESTA FINAL DE LA ESTRUCTURA PARA UN AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO DEL 20% DEL CRÍTICO:

El modelo de la estructura con los Disipadores de Energía de Fluido Viscoso analizada en SAP2000, se muestra en la figura 6.14, donde los valores de los coeficientes de amortiguamiento escogidos, corresponden a los considerados en el caso 2 de la tabla 6.9.

Fig 6.14: Modelo de la estructura con Disipadores de Fluido Viscoso utilizada en SAP2000

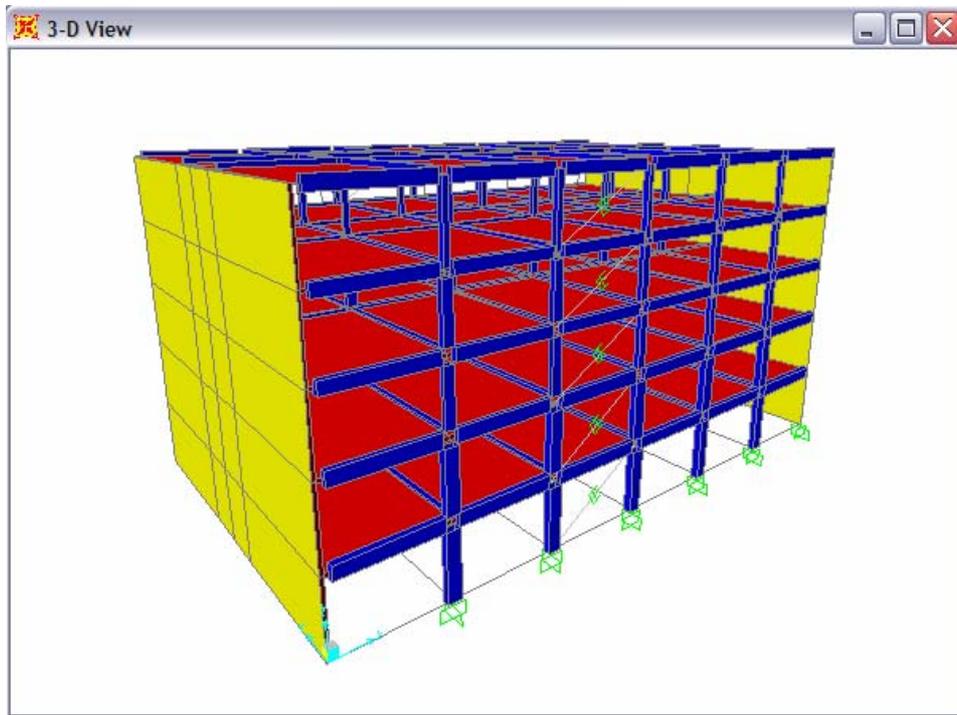
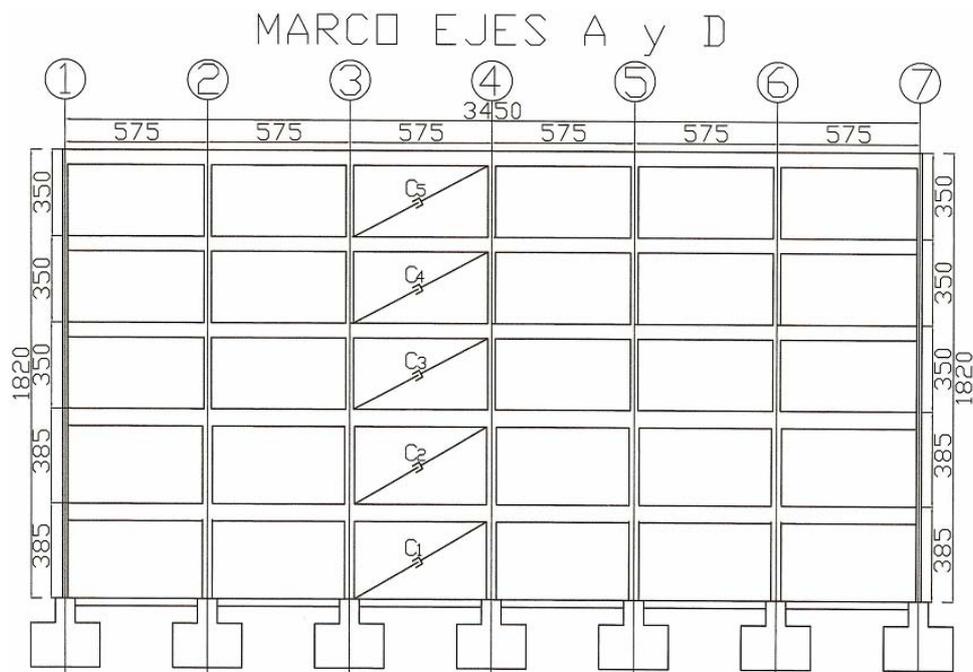


Fig 6.15: Ejes A y D con la ubicación de los Disipadores de Fluido Viscoso Lineal



A continuación se muestran los valores máximos de de la respuesta de la estructura para un amortiguamiento efectivo de 20% del crítico. En el Anexo C se muestra la variación en el tiempo de la respuesta

Tabla 6.15: Valores máximos del Desplazamiento, Velocidad y Aceleración de los centros de masa de cada piso, para un amortiguamiento efectivo de 20%

CENTRO DE MASA	VALOR	DESPLAZAMIENTO (cm)	VELOCIDAD (cm/seg)	ACELERACIÓN (cm/seg ²)
Piso 1	mín	-0.4784	-5.508	-84.62
	máx	0.4205	6.579	139.2
Piso 2	mín	-0.8249	-9.419	-143.3
	máx	0.725	11.65	232.6
Piso 3	mín	-1.461	-16.37	-265.3
	máx	1.284	21.74	397.6
Piso 4	mín	-1.861	-20.72	-347.1
	máx	1.640	28.38	501.6
Piso 5	mín	-2.326	-25.91	-460.4
	máx	2.101	36.05	620.1

Tabla 6.16: Esfuerzos máximos y mínimos en las columnas más solicitadas de cada piso, para un amortiguamiento efectivo de 20%

COLUMNAS	VALOR	AXIAL (ton)	CORTE (ton)	MOMENTO (ton-mt)
Piso1	mín	-1.5523	-37.0229	-68.02964
	máx	1.2701	32.5341	61.55063
Piso2	mín	-1.2701	-30.9815	-48.79584
	máx	1.2701	27.0882	48.79584
Piso3	mín	-0.6048	-22.2124	-31.09736
	máx	0.6264	19.7123	31.21512
Piso4	mín	-0.6264	-14.0073	-19.61016
	máx	0.6264	12.908	19.61016
Piso5	mín	-0.4536	-2.721	-4.76166
	máx	0.4536	2.7147	4.76166

Tabla 6.17: Esfuerzos máximos y mínimos en la base, para un amortiguamiento efectivo de 20%

VALOR	CORTE (ton)	MOMENTO (ton-mt)
min	-671.9	-1228
máx	760.6	1397

6.6 COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA CON Y SIN DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO LINEAL:

Fig. 6.16: Comparación de los Desplazamientos mínimos de los C.M de cada piso con y sin Disipadores

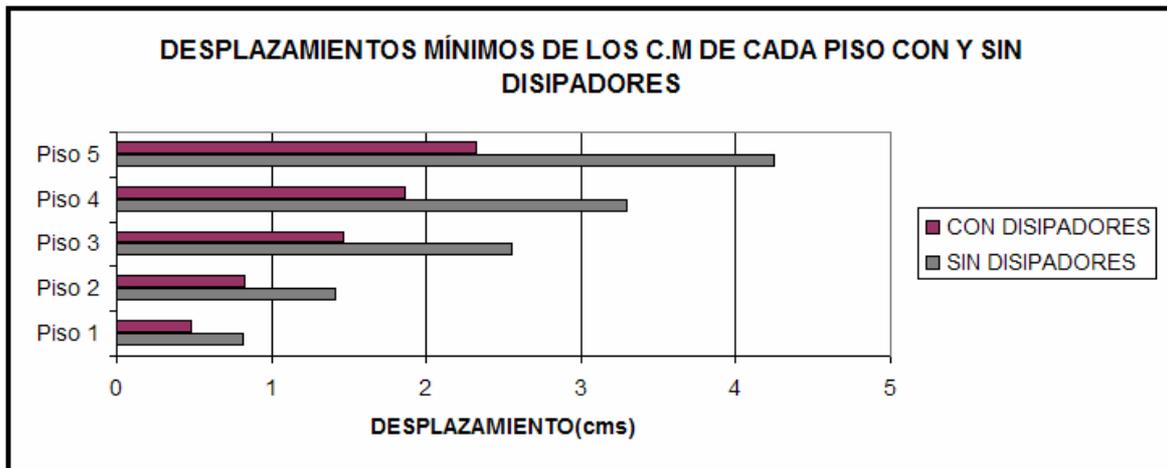


Fig. 6.17: Comparación de los Desplazamientos máximos de los C.M de cada piso con y sin Disipadores

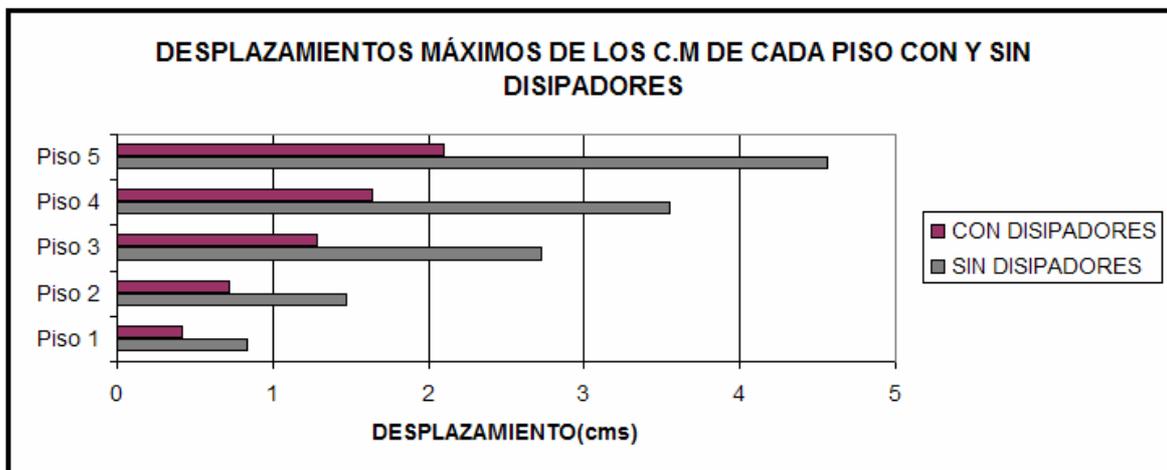


Fig. 6.18: Comparación de las Velocidades mínimas de los C.M de cada piso con y sin Disipadores

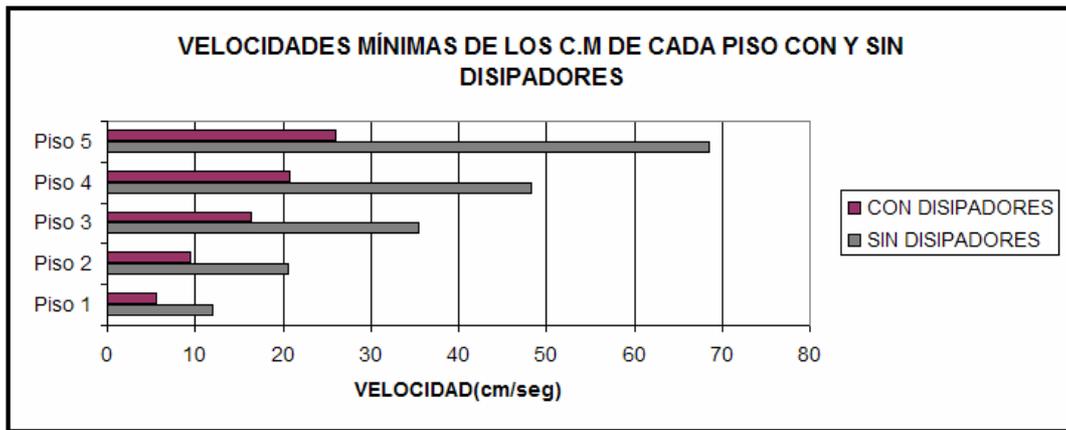


Fig. 6.19: Comparación de las Velocidades máximas de los C.M de cada piso con y sin Disipadores

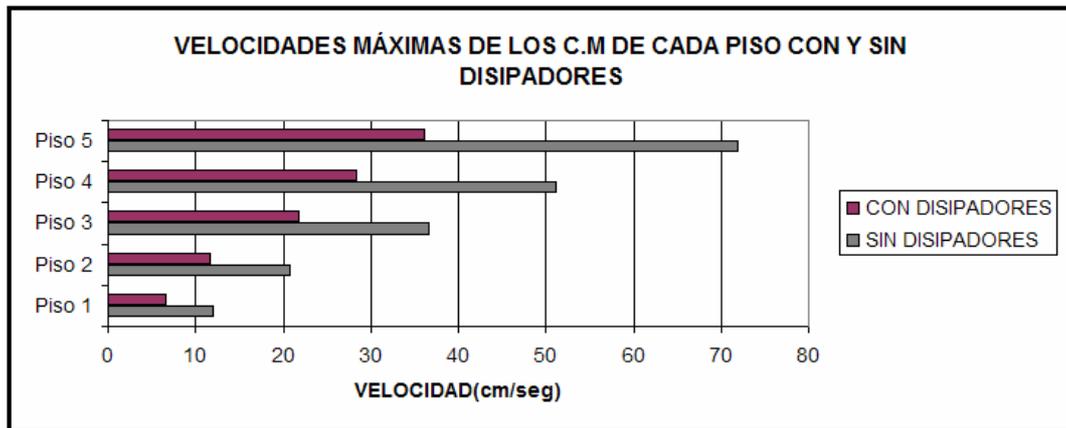


Fig. 6.20: Comparación de las Aceleraciones mínimas de los C.M de cada piso con y sin Disipadores

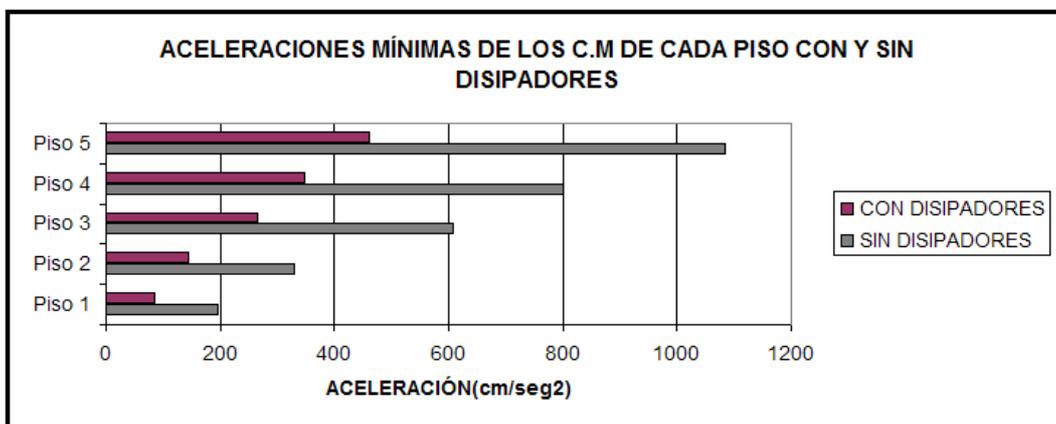


Fig. 6.20: Comparación de las Aceleraciones máximas de los C.M de cada piso con y sin Disipadores

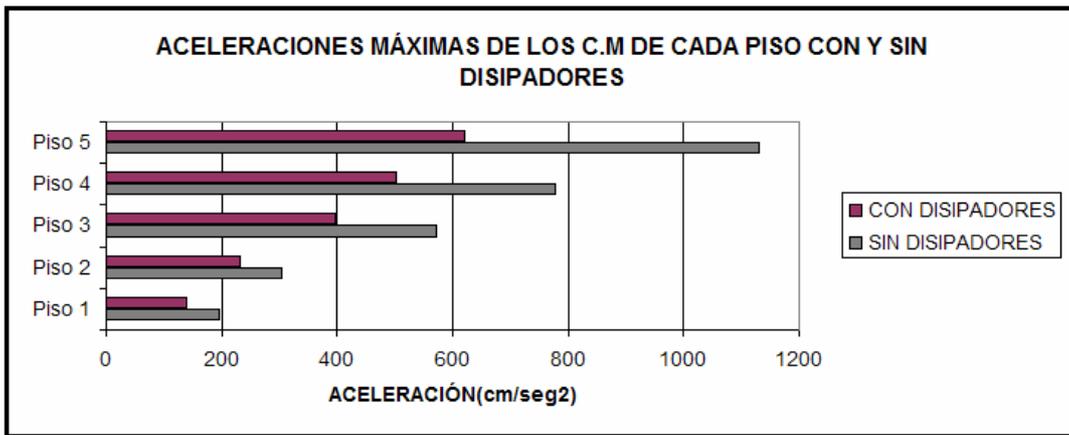


Fig. 6.21: Comparación del Esfuerzo de Corte mínimo en las columnas con y sin Disipadores

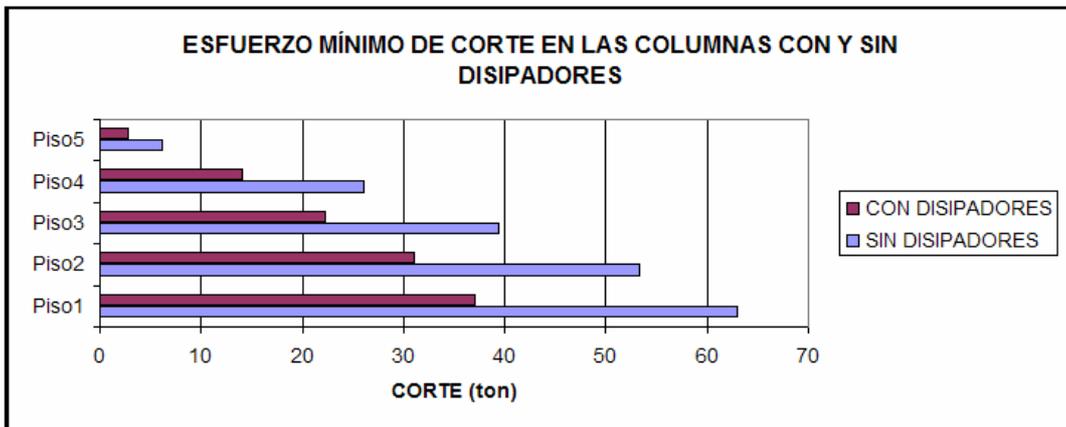


Fig. 6.22: Comparación del Esfuerzo de Corte máximo en las columnas con y sin Disipadores

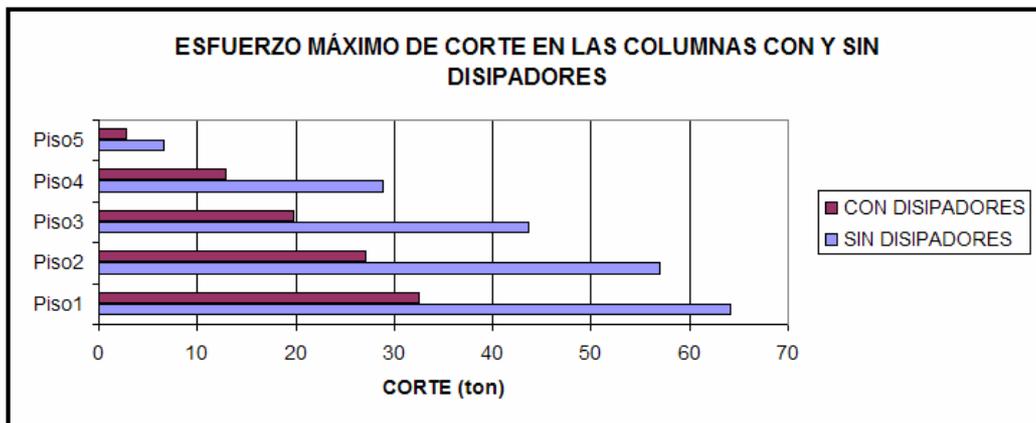


Fig. 6.23: Comparación del Momento mínimo en las columnas con y sin Disipadores

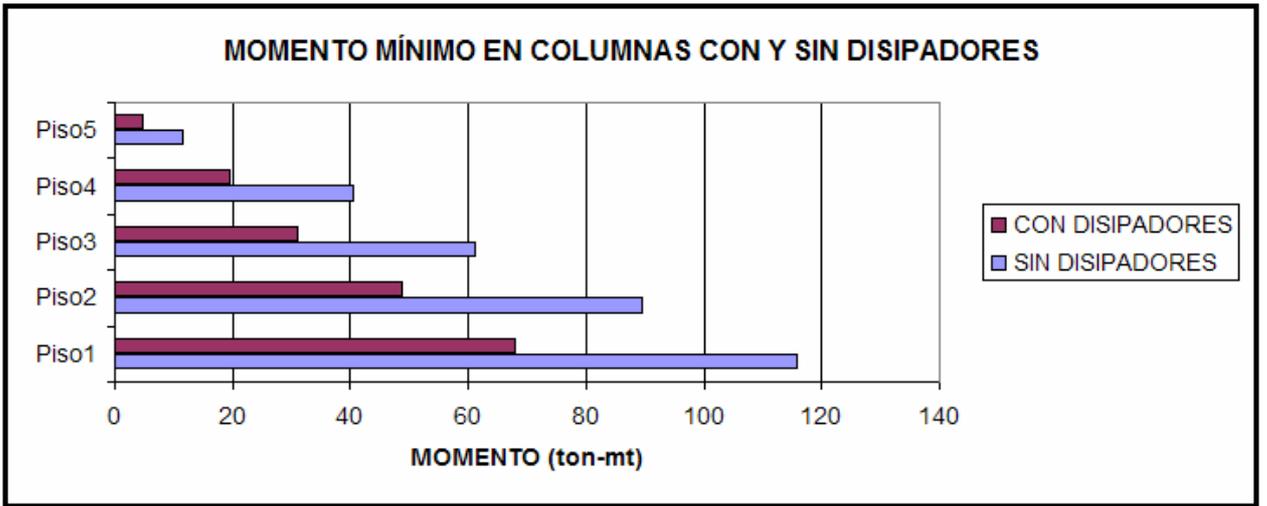


Fig. 6.24: Comparación del Momento máximo en las columnas con y sin Disipadores

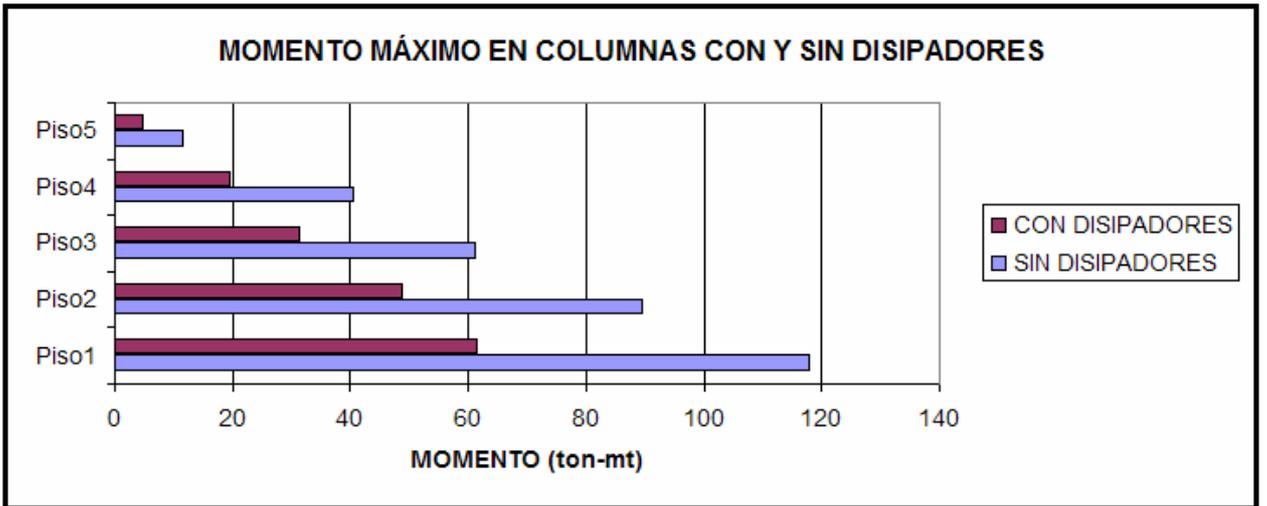


Fig. 6.25: Comparación de los picks del Corte Basal con y sin Disipadores

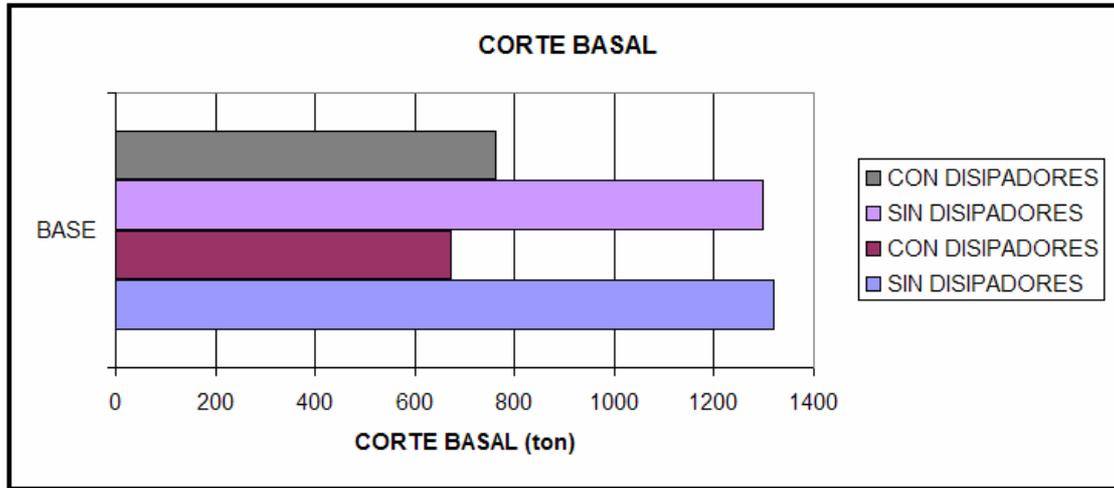
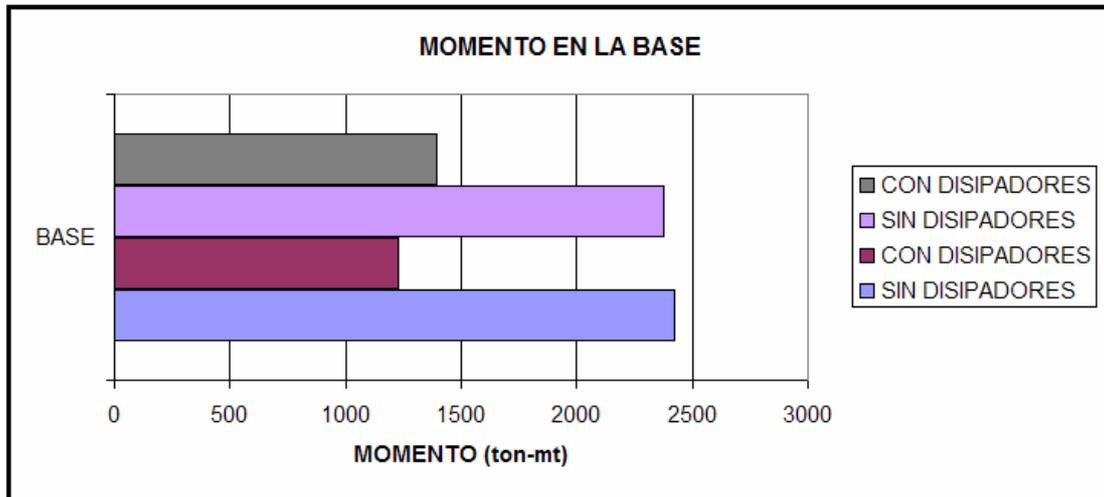


Fig. 6.26: Comparación de los picks del Momento en la Base con y sin Disipadores



6.7 COMPORTAMIENTO DE LOS DISIPADORES:

En la tabla siguiente se muestra el valor de la fuerza máxima experimentada por los Dispositivos de Disipación de Energía de Fluido Viscoso de la estructura sometida al registro sísmico de Llolleo.

Tabla 6.18: Fuerza máxima desarrollada por los Disipadores

UBICACIÓN DISPOSITIVO	COEFICIENTE (kg-seg/cm)	FUERZA MÁX. (kg)
Piso 1	16500	90098.74
Piso 2	16500	71085.11
Piso 3	8400	74239.78
Piso 4	8400	48494.63
Piso 5	8400	57116.74

En las figuras siguientes se muestran las gráficas Desplazamiento V/S Fuerza para los Disipadores de cada piso, donde se puede apreciar claramente el comportamiento elíptico de estos, que corresponde al comportamiento típico de los Disipadores cuya conducta es dependiente de la velocidad visto en el Capítulo IV.

Fig. 6.24: Gráfico Desplazamiento V/S Fuerza Axial para los Dispositivos del 1º piso

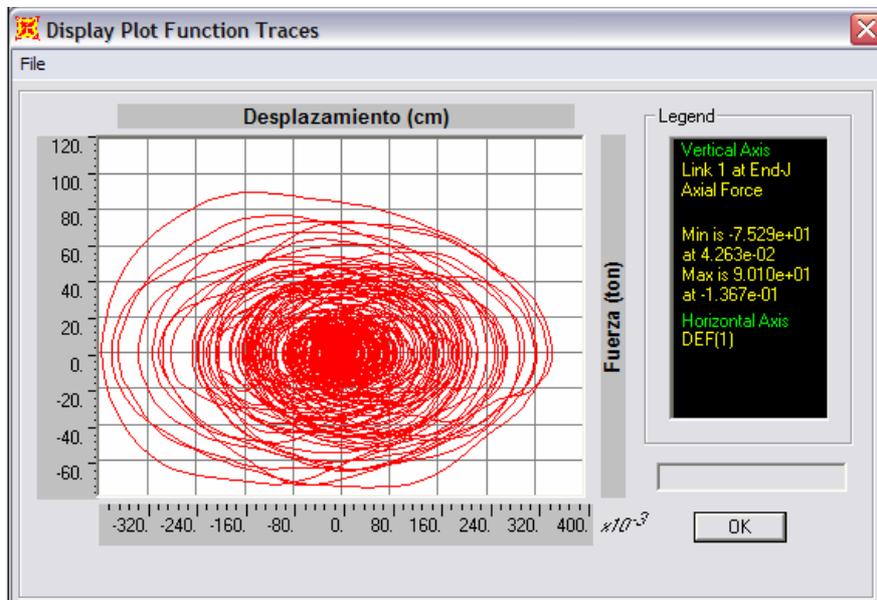


Fig. 6.25: Gráfico Desplazamiento V/S Fuerza Axial para los Dispositivos del 2º piso

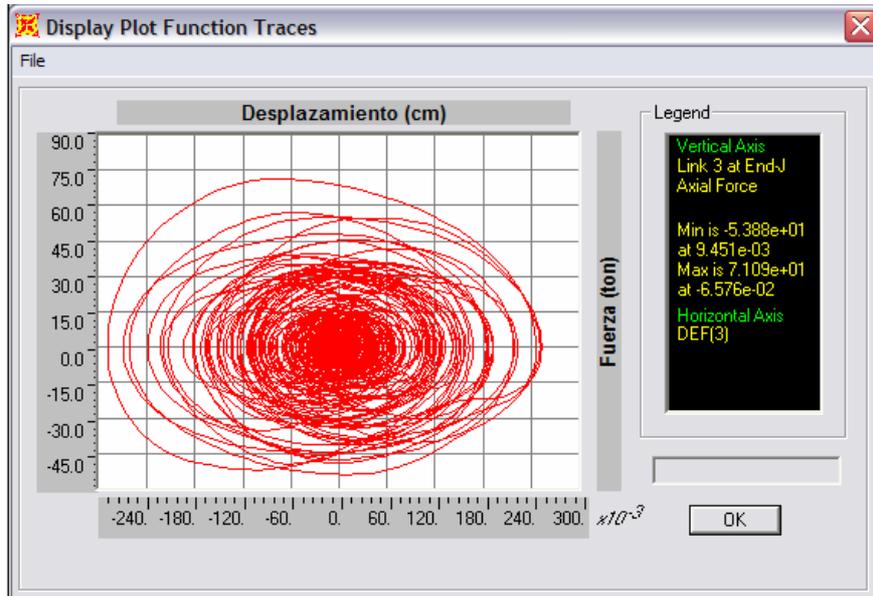


Fig. 6.26: Gráfico Desplazamiento V/S Fuerza Axial para los Dispositivos del 3º piso

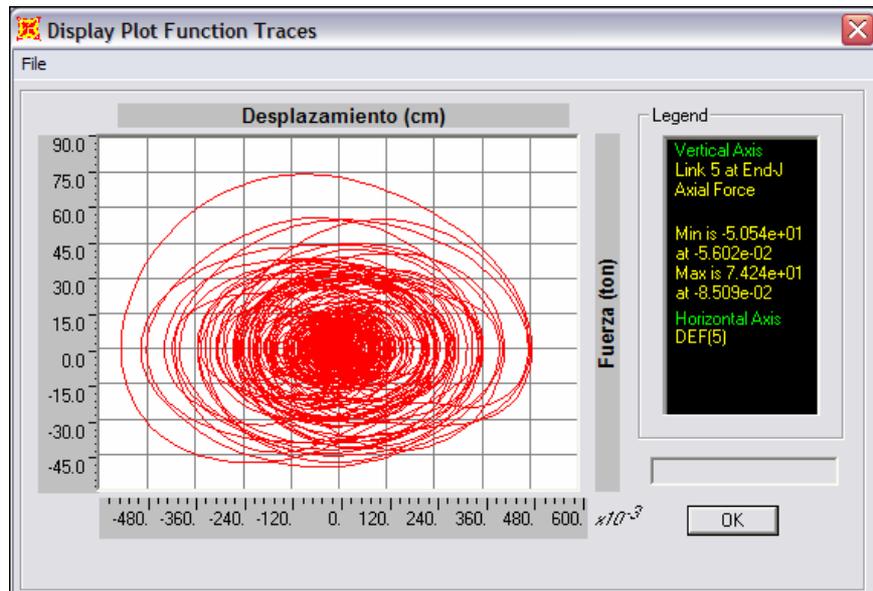


Fig. 6.27: Gráfico Desplazamiento V/S Fuerza Axial para los Dispositivos del 4º piso

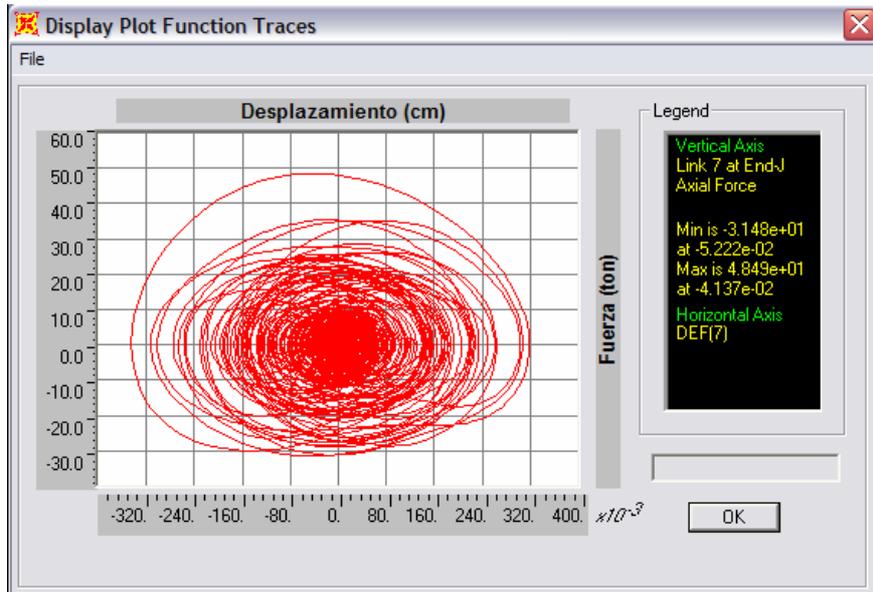
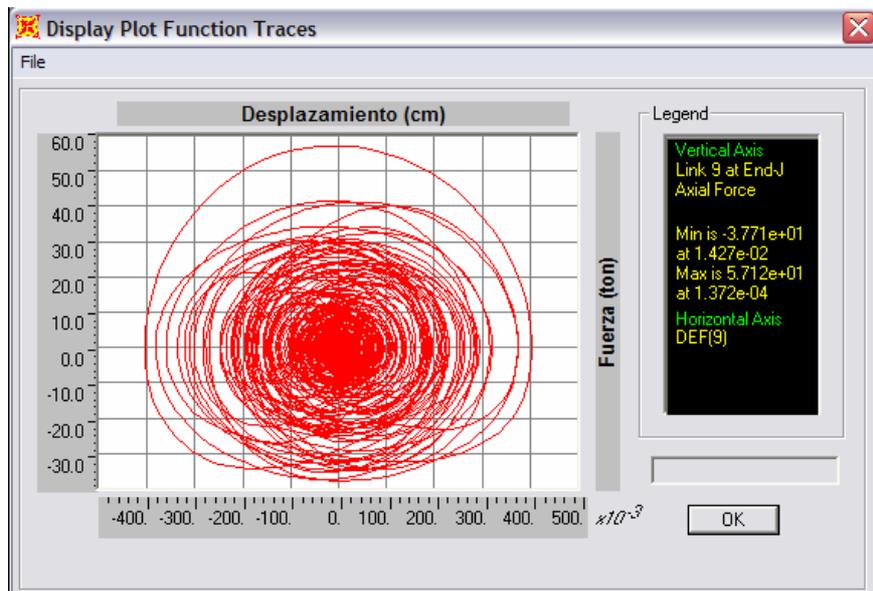


Fig. 6.28: Gráfico Desplazamiento V/S Fuerza Axial para los Dispositivos del 5º piso



CAPITULO VII: CONCLUSIONES

En el Capítulo anterior se presentaron los resultados de la respuesta de la estructura con y sin Disipadores de Energía de Fluido Viscoso Lineal, obtenidos mediante un análisis paso a paso sometiendo a la estructura a una excitación basal correspondiente a la componente sísmica N10E del registro de Llolleo. A partir de esto se pueden efectuar los siguientes comentarios:

- 1) Mediante el uso de los Disipadores de Energía de Fluido Viscoso, se puede proveer a la estructura del amortiguamiento suplementario que se requiera para poder alcanzar el nivel de la respuesta deseada.
- 2) La adición de los Disipadores de Energía de Fluido Viscoso es un método efectivo de control de la respuesta dinámica de estructuras, ya que las distorsiones entre piso se lograron disminuir a los valores permitidos por la normativa vigente.
- 3) Al lograr disminuir los desplazamientos de los Centros de Masa de cada piso, se evita la posibilidad que la estructura trabaje en el rango inelástico, reduciendo la incertidumbre del comportamiento no lineal, además de impedir la formación de rótulas plásticas y limitando posibles mecanismos de falla. En las siguientes tablas se muestran los porcentajes de reducción alcanzado de la respuesta:

Tabla 7.1: Porcentaje de reducción del Desplazamiento de los C.M

CENTRO DE MASA	VALOR	REDUCCIÓN DEL DESPLAZAMIENTO
Piso 1	mín	41.36%
	máx	49.34%
Piso 2	mín	41.70%
	máx	50.65%
Piso 3	mín	42.66%
	máx	52.79%
Piso 4	mín	43.47%
	máx	53.74%
Piso 5	mín	45.29%
	máx	53.92%

Tabla 7.2: Porcentaje de reducción de la Velocidad de los C.M

CENTRO DE MASA	VALOR	REDUCCIÓN DE LA VELOCIDAD
Piso 1	mín	54.21%
	máx	45.40%
Piso 2	mín	54.12%
	máx	44.04%
Piso 3	mín	53.86%
	máx	40.57%
Piso 4	mín	57.14%
	máx	44.48%
Piso 5	mín	62.22%
	máx	49.87%

Tabla 7.3: Porcentaje de reducción de la Aceleración de los C.M

CENTRO DE MASA	VALOR	REDUCCIÓN DE LA ACELERACIÓN
Piso 1	mín	56.63%
	máx	29.05%
Piso 2	mín	56.69%
	máx	23.39%
Piso 3	mín	56.31%
	máx	69.61%
Piso 4	mín	56.70%
	máx	35.43%
Piso 5	mín	57.53%
	máx	45.12%

- 4) Al utilizar los Disipadores de Energía de Fluido Viscoso, además de reducir los desplazamientos de los centros de masa, se disminuyen las aceleraciones que experimentan estas, lo que conlleva a una reducción de los esfuerzos en las columnas y en la base de la estructura.

Tabla 7.4: Porcentaje de reducción del Corte y el Momento en la Base

VALOR	REDUCCIÓN DEL CORTE BASAL	REDUCCIÓN DEL MOMENTO
min	49.06%	49.32%
máx	41.44%	41.25%

Tabla 7.5: Porcentaje de reducción del Corte en las columnas

COLUMNAS	VALOR	REDUCCIÓN DEL CORTE
Piso 1	min	3.46%
	máx	10.40%
Piso 2	min	3.46%
	máx	10.40%
Piso 3	min	4.37%
	máx	9.22%
Piso 4	min	4.37%
	máx	9.22%
Piso 5	min	1.38%
	máx	4.13%

Tabla 7.6: Porcentaje de reducción del Momento en las columnas

COLUMNAS	VALOR	REDUCCIÓN DEL MOMENTO
Piso 1	mín	31.29%
	máx	7.90%
Piso 2	mín	31.29%
	máx	7.90%
Piso 3	mín	26.91%
	máx	7.48%
Piso 4	mín	26.91%
	máx	7.48%
Piso 5	mín	11.54%
	máx	5.11%

- 5) La disminución de los esfuerzos en la base del edificio conlleva a un diseño de fundaciones más pequeñas. Lo anterior trae consigo fundaciones más económicas y la posibilidad de emplazar edificaciones sobre suelos de mala calidad.

- 6) Desde el punto de vista constructivo en el caso de la rehabilitación sísmica, los Disipadores de Energía de Fluido Viscoso presentan una clara ventaja frente a otros tipos de Dispositivos de Control Pasivo, como los Aisladores Basales, ya que estos requieren sistemas especiales para su colocación.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Ambrosini D, Cuitiño G, Rebeco J, 2004, “Eficiencia de Amortiguadores de Masa Sintonizada en Estructuras Sismorresistentes”, Fac. de Ingeniería, Universidad del Cuyo.
- Arraigada J, 2005, “Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos. (Análisis Comparativo de Comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional)”, Universidad Austral de Chile.
- Arroyo J, 2004, “Metodología para Calcular la Respuesta de Estructuras con Amortiguamiento Viscoso”, Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.
- Constantinou M, Symans M.D, 1992 “Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures whit Supplemental Fluid Viscous Dampers”, University of Buffalo, New York.
- Cundumi O, 2005, “A Variable Damping Semiactive Device for Control of the Seismic Response of Building, Universidad de Puerto Rico, (Disponible www.uprm.edu, consultado 15/07/2006)
- Chopra A, 2001, “Dynamics of Structures”, segunda edición, Estados Unidos, Prentice Hall
- Dowrick D.J, 1984, “Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos para Ingenieros y Arquitectos”, pág. 118
- Farias G., 2004, “Procedimiento de Análisis de un Edificio con Disipadores Superelásticos”, Universidad de Chile.

- Farzard N, Kelly J.M, 1999, “Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice”.

- FEMA 273, 274, 1997, “Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building”, Chapter 9, Seismic Isolation and Energy Dissipation, NEHRP.

- Hart G, Wong K, 2000, “Structural Dynamics for Structural Engineers”, Estados Unidos, Wiley, Capítulo 9, págs. 483.
- Kelly J.M, 1999, “Base Isolation: Origins and Development”, National Information Service for Earthquake Engineering”, pág. 156.

- Kelly T., 2001, “In Structure Camping and Energy Dissipation”, Holmes Coultig Group Ltd., (Disponible en www.holmesgroup.com, consultado el 20/08/2006).

- Ruiz P, 1974, “Dinámica de Estructuras”, Escuela de Ingeniería, Universidad Católica de Chile, pág. 79.

- Martínez. E, “La Disipación Pasiva de Energía y su Aplicación a la Rehabilitación Post-Sísmica de Edificios, Seminario Sistema Innovativos de Protección Sísmica de Estructuras Existentes y Estructuras Nuevas”, Mayo 2003, Stgo. Chile.

- Oviedo R, 2003, “Balance Energético en Estructuras Tridimensionales de Concreto Armado” (Disponible en www.oviedos.tripod.com/balanc.htm, consultado el 30/07/2006).

- Sarrazin M., et al, “Puente Amolanas: Alto Nivel en Protección Sísmica”, Revista Bit; Mayo 2005, págs. 42.

- Scheller J., Constantinou M.C.,1999, “Response History Analysis of Structures with Seismic Isolation and Energy Dissipation Systems”, Verification Examples for Program SAP2000”.

- Taylor D, Constantinou M., 2004, “Fluid Dampers for Applizations of Seismic Isolation, (Disponible en www.taylordevices.com/dampers.htm, consultado 10/07/2006).
- Taylor D., 2000, “History, Design and Applications of Fluid Dampers in Structural Engineering” (Disponible en www.seismicdamper.com, consultado el 10/07/2006).
- Taylor D., 2004, “Fluid Viscous Damping as an Alternative to Base Isolation”. (Disponible en www.taylordevices.com/fvd_alt1.htm, consultado 20/08/2006).
- Xavier C, 2000, “Desarrollo de un Nuevo Disipador de Energía para Diseño Sismorresistente, Análisis Numérico y Validación Experimental de su Comportamiento”, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona (Disponible www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC, consultado 30/07/2006).
- Zevallos J, Blondet M, Muñoz M, 2002, “Estado del Arte en Protección Sísmica” (Disponible en www.icg.com, consultado 20/07/2006).

ANEXO A

OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA MEDIANTE EL MÉTODO DE NEWMARK PARA UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD CON DISIPADOR DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOZO SOMETIDO A UNA EXCITACIÓN BASAL

La excitación basal a la cual es sometida una estructura durante un evento sísmico es muy irregular y aleatoria, por lo que comúnmente no puede ser expresada como una función matemática. Lo anterior hace necesario la aplicación de métodos numéricos.

Por muchos años se han investigado y postulado diversos procesos para la obtención de la respuesta de estructuras sometidas a diferentes cargas dinámicas (que varían en el tiempo) mediante este tipo de métodos. Para esto es necesario que la excitación sea discretizada en pequeños instantes de tiempo Δt (tamaño del paso de la carga) y por lo que la respuesta del sistema (desplazamiento, velocidad y aceleración) sea obtenida en forma discreta.

El método de Newmark es un proceso iterativo y aproximado que ocupa los datos de la respuesta en un instante de tiempo “t” para la obtención de la respuesta en el instante de tiempo siguiente “t + Δt ” que para el caso de una excitación basal esta gobernado por la siguiente ecuación matricial.

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{F}_N \mathbf{q}_k + \mathbf{H}_N \ddot{\mathbf{u}}_{g(k+1)} \quad (\text{B.1})$$

Donde:

$$\mathbf{q}_{k+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ \dot{\mathbf{x}}_{k+1} \\ \ddot{\mathbf{x}}_{k+1} \end{bmatrix} \quad \text{Respuesta del sistema en el instante } k+1$$

$$\mathbf{q}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \\ \ddot{x}_k \end{bmatrix} \quad \text{Respuesta del sistema en el instante } k$$

$$\mathbf{F}_N = \frac{1}{\beta} \begin{bmatrix} \beta - \omega_n^2 \alpha (\Delta t)^2 & \beta \Delta t - 2\zeta \omega_n \alpha (\Delta t)^2 - \omega_n^2 \alpha (\Delta t)^3 & \frac{1}{2} \beta (\Delta t)^2 - \alpha (\beta + \gamma) (\Delta t)^2 \\ -\omega_n^2 \delta \Delta t & \beta - 2\zeta \omega_n \delta \Delta t - \omega_n^2 \delta (\Delta t)^2 & \beta \Delta t - \delta (\beta + \gamma) \Delta t \\ -\omega_n^2 & -2\zeta \omega_n - \omega_n^2 \Delta t & -\gamma \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_N = -\left(\frac{1}{\beta}\right) \begin{bmatrix} \alpha (\Delta t)^2 \\ \delta \Delta t \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\beta = 1 + 2\zeta \omega_n \delta \Delta t + \omega_n^2 \alpha (\Delta t)^2$$

$$\gamma = 2\zeta \omega_n (1 - \delta) \Delta t + \omega_n^2 \left(\frac{1}{2} - \alpha\right) (\Delta t)^2$$

Donde Δt corresponde al tamaño del paso y los valores de α y β dependen de cómo se considera la variación de la aceleración basal entre el instante t_k y t_{k+1} . Pueden considerarse tres casos:

1) Aceleración Constante:

$$\ddot{x}(t) = \ddot{x}(t_k) = \ddot{x}_k, \quad t_k \leq t < t_{k+1}$$

$$\delta = \alpha = 0$$

2) El promedio de la aceleración:

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{2} (\ddot{x}(t_k) + \ddot{x}(t_{k+1})) = \frac{1}{2} (\ddot{x}_k + \ddot{x}_{k+1}), \quad t_k \leq t < t_{k+1}$$

$$\delta = \frac{1}{2}; \quad \alpha = \frac{1}{4}$$

3) La aceleración varía en forma lineal:

$$\ddot{x}(t) = \ddot{x}(t_k) + \left[\frac{\ddot{x}(t_{k+1}) - \ddot{x}(t_k)}{t_{k+1} - t_k} \right] (t - t_k) = \ddot{x}_k + \left[\frac{\ddot{x}_{k+1} - \ddot{x}_k}{t_{k+1} - t_k} \right] (t - t_k), \quad t_k \leq t < t_{k+1}$$

$$\delta = \frac{1}{2}; \quad \alpha = \frac{1}{6}$$

A continuación se presenta una tabla con la respuesta para el sistema de un grado de libertad sometido a una excitación basal correspondiente a la componente NS del registro de El Centro (1940), mostrado en el capítulo V.

k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s2)
0	0	-0.00257	0	0	0.9925854
1	0.02	-0.0198	0.000800997	0.080099716	7.017386237
2	0.04	-0.0185	0.003634164	0.20321694	5.294336171
3	0.06	-0.0162	0.008538328	0.28719948	3.103917746
4	0.08	-0.0174	0.014816725	0.340640245	2.240158762
5	0.1	-0.022	0.022109873	0.388674576	2.563274356
6	0.12	-0.0261	0.030391653	0.439503355	2.51960355
7	0.14	-0.0235	0.039427122	0.464043559	-0.065583192
8	0.16	-0.0202	0.048441795	0.437423801	-2.596392521
9	0.18	-0.0156	0.056416053	0.360001947	-5.145792931
10	0.2	-0.0156	0.06255654	0.254046779	-5.449723858
11	0.22	-0.0241	0.06685695	0.175994251	-2.355528936
12	0.24	-0.0323	0.070182153	0.15652599	0.408702838
13	0.26	-0.0356	0.073460786	0.171337277	1.072425858
14	0.28	-0.0297	0.076824954	0.16507952	-1.698201604
15	0.3	-0.0264	0.079645162	0.116941343	-3.115616018
16	0.32	-0.0198	0.081135721	0.032114533	-5.367065052
17	0.34	-0.0151	0.080605147	-0.085171934	-6.361581562
18	0.36	-0.00771	0.077482461	-0.22709668	-7.830893054
19	0.38	-0.0121	0.071712198	-0.349929627	-4.452401664
20	0.4	-0.0241	0.064420176	-0.379272495	1.518114849
21	0.42	-0.0349	0.057613984	-0.301346749	6.274459775
22	0.44	-0.036	0.052878093	-0.17224238	6.63597708
23	0.46	-0.0121	0.04985835	-0.129731848	-2.384923882
24	0.48	0.00551	0.046228926	-0.233210552	-7.962946541
25	0.5	0.0259	0.039426399	-0.447042183	-13.42021652
26	0.52	-0.009	0.02937771	-0.557826685	2.341766347
27	0.54	-0.0235	0.019337924	-0.44615199	8.825703123
28	0.56	-0.0264	0.012285835	-0.259056869	9.883808999
29	0.58	-0.0373	0.009403516	-0.029175035	13.10437441
30	0.6	-0.0477	0.011630782	0.25190161	15.00329006

31	0.62	-0.0597	0.01980667	0.565687234	16.37527229
32	0.64	-0.0562	0.033865783	0.84022406	11.0784104
33	0.66	-0.0316	0.051597572	0.932954787	-1.805337738
34	0.68	-0.0362	0.069813455	0.888633566	-2.626784325
35	0.7	0.0299	0.08447204	0.577224932	-28.51407913
36	0.72	-0.0301	0.092708804	0.246451482	-4.563265901
37	0.74	-0.0123	0.096082183	0.090886418	-10.99324044
38	0.76	0.00459	0.09523014	-0.176090783	-15.70447967
39	0.78	0.0275	0.088027603	-0.544162932	-21.10273527
40	0.8	0.0433	0.072825029	-0.976094402	-22.09041165
41	0.82	0.0463	0.049385489	-1.367859659	-17.08611406
42	0.84	0.0617	0.018709255	-1.699763707	-16.10429076
43	0.86	0.085	-0.018608698	-2.032031623	-17.12250089
44	0.88	0.0903	-0.062018996	-2.308998184	-10.57415516
45	0.9	0.0769	-0.109003737	-2.389475913	2.526382226
46	0.92	0.0659	-0.155231283	-2.233278621	13.09334705
47	0.94	0.0498	-0.19623866	-1.867459122	23.48860284
48	0.96	0.0431	-0.228445841	-1.353258935	27.93141587
49	0.98	0.0622	-0.2506196	-0.864116939	20.9827837
50	1	0.0756	-0.26423807	-0.497730084	15.65590182
51	1.02	0.0973	-0.271920998	-0.270562739	7.060832687
52	1.04	0.117	-0.276649193	-0.202256751	-0.230233883
53	1.06	0.134	-0.281286511	-0.261475072	-5.691598254
54	1.08	0.12	-0.286993501	-0.309223968	0.916708705
55	1.1	0.11	-0.292559393	-0.247365191	5.269168921
56	1.12	0.0734	-0.295146722	-0.011367706	18.3305796
57	1.14	0.0734	-0.291971863	0.328853614	15.69155236
58	1.16	0.0116	-0.280368671	0.831465555	34.5696418
59	1.18	-0.0945	-0.253773764	1.828025133	65.08631595
60	1.2	-0.144	-0.203907678	3.158583534	67.96952417
61	1.22	-0.111	-0.130239467	4.208237536	36.99587602
62	1.24	-0.0889	-0.04123841	4.69186819	11.36718938
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s ²)
63	1.26	-0.0459	0.051793178	4.61129062	-19.42494637
64	1.28	-0.0108	0.137810156	3.990407164	-42.66339925
65	1.3	0.0246	0.207271611	2.955738326	-60.80348451
66	1.32	0.0565	0.253104407	1.627541287	-72.01621945
67	1.34	0.0916	0.270568502	0.118868209	-78.85108827
68	1.36	0.13	0.25691539	-1.48417945	-81.45367767
69	1.38	0.183	0.210665351	-3.140824398	-84.21081714
70	1.4	0.224	0.131685937	-4.757116991	-77.41844213
71	1.42	0.281	0.021540476	-6.257429103	-72.61276909
72	1.44	0.266	-0.114702764	-7.366894985	-38.33381912
73	1.46	0.212	-0.265057945	-7.66862305	8.16101263
74	1.48	0.172	-0.413239489	-7.149531374	43.74815498
75	1.5	0.164	-0.545738386	-6.100358292	61.16915319
76	1.52	0.17	-0.654832091	-4.809012221	67.96545393
77	1.54	0.154	-0.736429059	-3.350684601	77.86730801
78	1.56	0.165	-0.788417247	-1.848134211	72.38773108
79	1.58	0.182	-0.812025255	-0.51266662	61.15902798
80	1.6	0.222	-0.812220544	0.493137773	39.42141131

81	1.62	0.0602	-0.789399069	1.789009696	90.16578105
82	1.64	-0.271	-0.72556483	4.594414204	190.3746697
83	1.66	-0.379	-0.59585512	8.376556805	187.8395904
84	1.68	-0.365	-0.396448475	11.56410773	130.915502
85	1.7	-0.373	-0.14399135	13.68160479	80.83420431
86	1.72	-0.333	0.139190824	14.6366126	14.66657676
87	1.74	-0.317	0.42978398	14.42270296	-36.05754112
88	1.76	-0.322	0.707508174	13.3497164	-71.24111455
89	1.78	-0.322	0.957383986	11.63786485	-99.94404074
90	1.8	-0.331	1.168524127	9.476149284	-116.2275159
91	1.82	-0.299	1.332575536	6.928991601	-138.4882523
92	1.84	-0.247	1.441585859	3.97204066	-157.2068418
93	1.86	-0.2	1.489031179	0.772491387	-162.7480855
94	1.88	-0.144	1.472072635	-2.468345853	-161.3356385
95	1.9	-0.0788	1.391178758	-5.621041843	-153.9339604
96	1.92	-0.00312	1.249151265	-8.581707415	-142.1325969
97	1.94	0.0661	1.051196901	-11.21372904	-121.0695654
98	1.96	0.144	0.804967513	-13.40920974	-98.47850491
99	1.98	0.214	0.519943104	-15.09323115	-69.92363577
100	2	0.293	0.206703786	-16.23070064	-43.82331373
101	2.02	0.36	-0.12368262	-16.80794	-13.90062178
102	2.04	0.443	-0.460469391	-16.87073703	7.620918659
103	2.06	0.501	-0.793607988	-16.44312267	35.14051704
104	2.08	0.557	-1.113145165	-15.51059508	58.11224195
105	2.1	0.587	-1.409114412	-14.08632958	84.31430797
106	2.12	0.627	-1.672515022	-12.25373139	98.94551104
107	2.14	0.518	-1.891752116	-9.669978041	159.4298242
108	2.16	0.427	-2.049500108	-6.104821129	197.085867
109	2.18	-0.22	-2.110098061	0.045025787	417.8988245
110	2.2	-0.436	-2.023989018	8.565878557	434.1864525
111	2.22	-0.301	-1.77950597	15.8824262	297.4683124
112	2.24	-0.342	-1.4098828	21.07989081	222.2781477
113	2.26	-0.201	-0.958290894	24.07929978	77.66274986
114	2.28	-0.138	-0.471610939	24.58869571	-26.72315716
115	2.3	-0.0318	0.00420553	22.99295125	-132.8512882
116	2.32	0.0207	0.430818734	19.66836908	-199.6069292
117	2.34	0.0979	0.778651389	15.11489647	-255.7403323
118	2.36	0.164	1.026736988	9.693663442	-286.3829701
119	2.38	0.218	1.162736752	3.906312974	-292.3520766
120	2.4	0.323	1.181751132	-2.004874971	-298.7667179
121	2.42	0.106	1.094612948	-6.708943482	-171.6401332
122	2.44	-0.483	0.951662896	-7.586061709	83.92831054
123	2.46	-0.284	0.81059948	-6.520279924	22.64986793
124	2.48	-0.317	0.687484455	-5.791222538	50.2558707
125	2.5	-0.186	0.577983546	-5.158868401	12.979543
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s2)
126	2.52	-0.106	0.475858872	-5.053598992	-2.452602103
127	2.54	0.0435	0.37045874	-5.48641414	-40.82891272
128	2.56	-0.123	0.260728177	-5.486642204	40.80610629
129	2.58	-0.364	0.168797615	-3.706413992	137.216715
130	2.6	-0.301	0.118941707	-1.279176807	105.5070034

131	2.62	-0.309	0.113582449	0.743250977	96.73577502
132	2.64	-0.272	0.144841888	2.382692971	67.20842435
133	2.66	-0.226	0.202612861	3.394404297	33.96270827
134	2.68	-0.184	0.274300579	3.774367559	4.033617919
135	2.7	-0.138	0.347783582	3.573932704	-24.07710341
136	2.72	-0.096	0.412247469	2.872456025	-46.0705645
137	2.74	-0.0498	0.458658769	1.768673979	-64.3076401
138	2.76	-0.00808	0.48009649	0.375098059	-75.04995187
139	2.78	0.0345	0.472048089	-1.179938124	-80.45366648
140	2.8	-0.0174	0.435735346	-2.451336192	-46.68614026
141	2.82	-0.0795	0.380993371	-3.022861331	-10.46637367
142	2.84	-0.154	0.322148168	-2.861658931	26.58661371
143	2.86	-0.175	0.271434574	-2.209700513	38.609228
144	2.88	-0.131	0.233471063	-1.586650563	23.69576704
145	2.9	-0.11	0.205844396	-1.176016066	17.36768268
146	2.92	-0.0613	0.184144973	-0.993926238	0.841300085
147	2.94	-0.0198	0.163227491	-1.097822009	-11.2308771
148	2.96	0.034	0.137583649	-1.466562153	-25.6431373
149	2.98	0.0771	0.102383763	-2.05342651	-33.04329849
150	3	0.124	0.054110211	-2.773928639	-39.00691439
151	3.02	-0.0178	-0.002711463	-2.908238818	25.57589654
152	3.04	-0.0683	-0.053474126	-2.168027455	48.44523977
153	3.06	-0.00734	-0.089399852	-1.424545112	25.90299445
154	3.08	0.00202	-0.113005816	-0.93605134	22.94638285
155	3.1	0.0632	-0.129388665	-0.702233527	0.435398374
156	3.12	0.104	-0.144607901	-0.819690055	-12.18105111
157	3.14	0.162	-0.165097113	-1.229231182	-28.77306159
158	3.16	0.207	-0.196268261	-1.887883561	-37.09217633
159	3.18	0.25	-0.241890528	-2.674343176	-41.55378514
160	3.2	0.0402	-0.294787038	-2.6153078	47.45732267
161	3.22	0.0442	-0.337671032	-1.673091644	46.76429293
162	3.24	0.125	-0.364865052	-1.046310305	15.91384105
163	3.26	0.126	-0.382569929	-0.724177465	16.29944295
164	3.28	0.242	-0.397972751	-0.816104687	-25.4921652
165	3.3	0.248	-0.418997522	-1.286372411	-21.53460719
166	3.32	0.375	-0.452888751	-2.102750521	-60.10320382
167	3.34	-0.171	-0.485922004	-1.200574751	150.3207808
168	3.36	-0.24	-0.479238583	1.868916789	156.6283732
169	3.38	-0.127	-0.417411364	4.313805156	87.86046341
170	3.4	-0.1	-0.317073927	5.719938529	52.75287392
171	3.42	0.0132	-0.198621794	6.125274825	-12.21924432
172	3.44	0.124	-0.084142914	5.322613102	-68.04692799
173	3.46	-0.196	0.01959165	5.050843286	40.86994639
174	3.48	-0.273	0.129464888	5.936480522	47.69377721
175	3.5	-0.197	0.252578402	6.374870916	-3.854737809
176	3.52	-0.213	0.378067376	6.174026538	-16.22969994
177	3.54	-0.14	0.494116886	5.430924385	-58.08051537
178	3.56	-0.103	0.589050936	4.062480687	-78.76385443
179	3.58	-0.0395	0.652232786	2.255704234	-101.9137909
180	3.6	-0.0231	0.677202142	0.241231373	-99.53349526
181	3.62	-0.124	0.667113381	-1.250107439	-49.60038592

182	3.64	-0.0595	0.630970754	-2.364155223	-61.80439243
183	3.66	-0.0619	0.573005958	-3.432324405	-45.01252578
184	3.68	-0.02	0.495517879	-4.316483478	-43.40338154
185	3.7	-0.00312	0.401799761	-5.055328333	-30.48110398
186	3.72	0.0549	0.294444063	-5.680241482	-32.01021092
187	3.74	0.0896	0.175324564	-6.231708381	-23.13647895
188	3.76	0.112	0.047423005	-6.558447564	-9.537439407
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s2)
189	3.78	0.0408	-0.081044599	-6.288312867	36.55090916
190	3.8	-0.00587	-0.196521173	-5.259344503	66.34592726
191	3.82	-0.045	-0.286465012	-3.73503937	86.08458596
192	3.84	0.0141	-0.346226398	-2.241099295	63.30942154
193	3.86	0.0387	-0.379534092	-1.089670019	51.83350611
194	3.88	0.104	-0.393735562	-0.330476998	24.08579596
195	3.9	0.152	-0.397501035	-0.046070284	4.3548755
196	3.92	0.221	-0.400072129	-0.211039164	-20.85176349
197	3.94	0.271	-0.409887823	-0.770530249	-35.09734504
198	3.96	0.319	-0.433299341	-1.570621544	-44.91178444
199	3.98	0.0773	-0.463925004	-1.49194479	52.77945984
200	4	0.00532	-0.48096323	-0.211877735	75.22724562
201	4.02	0.0475	-0.472700321	1.038168592	49.77738708
202	4.04	0.0538	-0.443236713	1.908192212	37.22497496
203	4.06	-0.0101	-0.396441234	2.771355673	49.09137116
204	4.08	-0.027	-0.332117857	3.660982001	39.87126157
205	4.1	0.0263	-0.254485684	4.102235389	4.254077239
206	4.12	0.0378	-0.173265115	4.019821472	-12.49546895
207	4.14	0.0916	-0.098289046	3.477785401	-41.70813809
208	4.16	0.118	-0.038430541	2.508065119	-55.26389012
209	4.18	0.176	-0.001327524	1.202236606	-75.31896123
210	4.2	0.207	0.007289418	-0.340542479	-78.95894718
211	4.22	0.266	-0.016175009	-2.005900175	-87.57682245
212	4.24	0.299	-0.073125927	-3.689191618	-80.7523219
213	4.26	0.357	-0.162879555	-5.28617122	-78.94563823
214	4.28	0.341	-0.281120472	-6.537920486	-46.22928842
215	4.3	0.364	-0.419360002	-7.286032477	-28.58191063
216	4.32	0.325	-0.566850496	-7.463016972	10.88346109
217	4.34	0.229	-0.708470143	-6.698947659	65.52347017
218	4.36	-0.222	-0.812189292	-3.672967294	237.0745664
219	4.38	-0.0995	-0.845000763	0.391820202	169.4041831
220	4.4	-0.0705	-0.806906295	3.417626663	133.1764631
221	4.42	-0.0571	-0.715340486	5.738954204	98.95629102
222	4.44	-0.205	-0.578597353	7.935359113	120.6841999
223	4.46	-0.305	-0.396255563	10.29881988	115.6618766
224	4.48	-0.452	-0.166584922	12.66824415	121.280551
225	4.5	-0.372	0.102694111	14.25965921	37.86095471
226	4.52	0.337	0.365345228	12.00545247	-263.2816285
227	4.54	-0.242	0.573853031	8.845327863	-52.73083256
228	4.56	-0.176	0.736028944	7.372263442	-94.57560952
229	4.58	-0.0597	0.859614887	4.986330858	-144.0176488
230	4.6	0.0283	0.928026505	1.854830928	-169.1323442
231	4.62	0.15	0.928861553	-1.771326179	-193.4833665

232	4.64	0.242	0.854783475	-5.636481619	-193.0321775
233	4.66	0.334	0.704617689	-9.380096974	-181.329358
234	4.68	-0.0106	0.498478934	-11.2337785	-4.038794149
235	4.7	-0.031	0.27707426	-10.9066889	36.74775401
236	4.72	0.0523	0.065965149	-10.20422221	33.49891427
237	4.74	0.0821	-0.129987058	-9.390998518	47.82345538
238	4.76	0.18	-0.30969527	-8.579822641	33.29413233
239	4.78	0.261	-0.475506396	-8.001290033	24.55912838
240	4.8	0.34	-0.631464313	-7.594501662	16.11970876
241	4.82	0.451	-0.78211624	-7.470690957	-3.738638217
242	4.84	0.309	-0.92495126	-6.812811107	69.52662316
243	4.86	-0.253	-1.026197518	-3.311814657	280.5730219
244	4.88	-0.183	-1.041946278	1.736938696	224.3023134
245	4.9	-0.2	-0.96551689	5.906000061	192.6038232
246	4.92	-0.167	-0.814594923	9.186196675	135.4158382
247	4.94	-0.0861	-0.611348513	11.13844426	59.80892033
248	4.96	-0.229	-0.375634382	12.43296883	69.64353696
249	4.98	-0.388	-0.112008766	13.92959283	80.01886233
250	5	-0.297	0.17408323	14.67960674	-5.017471178
251	5.02	-0.311	0.462948035	14.20687378	-42.25582409
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s2)
252	5.04	-0.24	0.732548232	12.75314595	-103.1169594
253	5.06	-0.204	0.963467803	10.33881112	-138.3165233
254	5.08	-0.142	1.139349875	7.249396091	-170.6249798
255	5.1	-0.0936	1.248844534	3.700069734	-184.3076559
256	5.12	-0.0999	1.287813495	0.196826427	-166.0166748
257	5.14	-0.22	1.265209713	-2.457204693	-99.38643718
258	5.16	-0.222	1.198428328	-4.220933737	-76.98646725
259	5.18	-0.213	1.100648356	-5.557063435	-56.62650253
260	5.2	-0.21	0.980527035	-6.455068758	-33.17402983
261	5.22	-0.132	0.844371635	-7.160471222	-37.3662165
262	5.24	-0.1	0.695184521	-7.758240173	-22.41067866
263	5.26	0.0117	0.534136339	-8.346578033	-36.42310731
264	5.28	-0.148	0.368613416	-8.205714249	50.50948572
265	5.3	-0.3	0.221709988	-6.484628544	121.5990848
266	5.32	-0.158	0.111378688	-4.548501492	72.01362037
267	5.34	-0.176	0.035737886	-3.015578698	81.27865905
268	5.36	-0.0727	-0.012318731	-1.790082976	41.27091308
269	5.38	-0.027	-0.041580095	-1.136053448	24.13203978
270	5.4	0.0586	-0.062558979	-0.96183492	-6.710186989
271	5.42	0.119	-0.084920988	-1.274365966	-24.54291761
272	5.44	0.161	-0.116089835	-1.842518755	-32.27236129
273	5.46	0.0867	-0.155724259	-2.120923651	4.431871644
274	5.48	0.0364	-0.194898868	-1.796537291	28.00676439
275	5.5	-0.00496	-0.223629552	-1.07653106	43.99385871
276	5.52	0.0536	-0.238784392	-0.438952966	19.76395065
277	5.54	0.0817	-0.244776431	-0.160250893	8.106256685
278	5.56	0.144	-0.248662212	-0.228327274	-14.91389475
279	5.58	0.19	-0.257574371	-0.662888561	-28.54223402
280	5.6	0.248	-0.278007182	-1.380392536	-43.20816341
281	5.62	0.295	-0.314905488	-2.309438081	-49.69639113

282	5.64	0.342	-0.371315732	-3.331586347	-52.51843544
283	5.66	0.235	-0.442878678	-3.82470822	3.206248092
284	5.68	0.117	-0.51343324	-3.230747982	56.18977571
285	5.7	0.0375	-0.563836784	-1.809606438	85.92437871
286	5.72	0.0576	-0.584286533	-0.235368427	71.49942243
287	5.74	0.0685	-0.576057743	1.05824738	57.86215824
288	5.76	0.0911	-0.545282998	2.019227155	38.23581924
289	5.78	0.0431	-0.496681227	2.840949934	43.93645872
290	5.8	-0.0154	-0.430452613	3.78191142	50.15968988
291	5.82	-0.0308	-0.346069639	4.656385989	37.28776695
292	5.84	-0.0207	-0.24775303	5.175274984	14.60113254
293	5.86	-0.042	-0.142292833	5.370744702	4.945839301
294	5.88	-0.0455	-0.035408136	5.317724968	-10.24781266
295	5.9	-0.0288	0.066891163	4.91220497	-30.30418721
296	5.92	-0.0127	0.157501401	4.148818819	-46.03442782
297	5.94	0.027	0.229305675	3.03160855	-65.68659908
298	5.96	0.0696	0.275345093	1.572333283	-80.24092769
299	5.98	0.106	0.290149606	-0.091881973	-86.18059785
300	6	0.0468	0.27447889	-1.475189698	-52.15017468
301	6.02	-0.00753	0.237682654	-2.204433821	-20.77423757
302	6.04	-0.0786	0.192932244	-2.270607206	14.15689902
303	6.06	-0.0244	0.148869215	-2.135695662	-0.665744624
304	6.08	0.0174	0.105160481	-2.235177801	-9.282469198
305	6.1	0.0422	0.058502221	-2.430648206	-10.26457132
306	6.12	-0.0237	0.011057358	-2.313838121	21.94557978
307	6.14	-0.00918	-0.03099263	-1.891160603	20.32217203
308	6.16	0.0147	-0.065348995	-1.54447594	14.34629422
309	6.18	0.0386	-0.093981951	-1.318819684	8.21933137
310	6.2	0.0698	-0.119565316	-1.239516813	-0.289044203
311	6.22	0.0936	-0.144898511	-1.293802603	-5.139534847
312	6.24	0.0288	-0.169028432	-1.119189557	22.60083951
313	6.26	-0.00587	-0.185652415	-0.543208696	34.99724653
314	6.28	-0.0204	-0.189348018	0.173648403	36.68846336
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s ²)
315	6.3	0.00092	-0.179886463	0.772507077	23.19740409
316	6.32	0.014	-0.160829569	1.133182254	12.87011355
317	6.34	0.00643	-0.135840273	1.365747367	10.38639776
318	6.36	-0.0174	-0.106146088	1.603671176	13.40598317
319	6.38	-0.000661	-0.07265584	1.745353623	0.762261533
320	6.4	-0.00294	-0.038036874	1.716542956	-3.643328279
321	6.42	0.00698	-0.005239384	1.563206085	-11.6903588
322	6.44	0.0156	0.023090723	1.269804593	-17.6497904
323	6.46	-0.0103	0.045769752	0.998098289	-9.520840023
324	6.48	-0.0558	0.065303307	0.955257218	5.236732983
325	6.5	-0.0773	0.085869595	1.101371563	9.374701483
326	6.52	-0.0448	0.10814909	1.126577959	-6.854061843
327	6.54	-0.0433	0.129026179	0.961130984	-9.690635661
328	6.56	-0.0325	0.145783808	0.714631917	-14.95927105
329	6.58	-0.0237	0.156778327	0.384819983	-18.0219224
330	6.6	-0.0033	0.160289939	-0.033658858	-23.82596171
331	6.62	0.0373	0.153755016	-0.619833441	-34.79149651

332	6.64	-0.0198	0.13713331	-1.042337117	-7.458871088
333	6.66	-0.0167	0.115097734	-1.161220508	-4.429467988
334	6.68	-0.00624	0.091017479	-1.24680503	-4.128984262
335	6.7	-0.0195	0.066155645	-1.239378342	4.871653095
336	6.72	-0.0204	0.042666511	-1.109535042	8.112676919
337	6.74	-0.0182	0.022226179	-0.934498157	9.391011583
338	6.76	-0.00037	0.004912704	-0.796849337	4.373870322
339	6.78	0.0134	-0.01047301	-0.741722031	1.138860358
340	6.8	0.0431	-0.025942561	-0.805233108	-7.489968131
341	6.82	0.0652	-0.043991577	-0.999668492	-11.95357022
342	6.84	0.129	-0.068193159	-1.420489676	-30.12854815
343	6.86	0.143	-0.102274801	-1.987674587	-26.58994297
344	6.88	0.0338	-0.142466541	-2.031499363	22.20746533
345	6.9	-0.0483	-0.175444215	-1.26626808	54.31566299
346	6.92	-0.0228	-0.191240583	-0.313368728	40.97427224
347	6.94	-0.00771	-0.190359012	0.401525847	30.51518521
348	6.96	0.0292	-0.178109519	0.823423512	11.67458131
349	6.98	0.00881	-0.158987333	1.088795064	14.86257393
350	7	-0.0402	-0.133019506	1.507987575	27.05667712
351	7.02	-0.0857	-0.096655204	2.128442669	34.98883232
352	7.04	-0.0786	-0.048476115	2.689466182	21.11351892
353	7.06	-0.0397	0.007047735	2.862918875	-3.768249538
354	7.08	-0.00789	0.061630105	2.595318129	-22.99182506
355	7.1	0.0292	0.10718529	1.96020039	-40.51994891
356	7.12	0.0587	0.137245768	1.0458474	-50.91535004
357	7.14	0.0769	0.147763999	0.005975701	-53.07181992
358	7.16	0.0226	0.139985411	-0.783834542	-25.90920436
359	7.18	-0.0294	0.121596058	-1.055100767	-1.217418155
360	7.2	-0.0375	0.100867281	-1.017776869	4.949808032
361	7.22	-0.0151	0.080925485	-0.976402776	-0.812398786
362	7.24	-0.0378	0.062345503	-0.881595403	10.29313605
363	7.26	-0.0252	0.046429136	-0.710041342	6.862270093
364	7.28	-0.0101	0.033167944	-0.616077827	2.534081374
365	7.3	0.00973	0.020786604	-0.622056167	-3.131915372
366	7.32	0.0246	0.007414451	-0.715159102	-6.178378069
367	7.34	0.0488	-0.008691456	-0.895431618	-11.84887352
368	7.36	0.0426	-0.028312935	-1.066716315	-5.27959621
369	7.38	0.0145	-0.049307702	-1.03276033	8.675194678
370	7.4	-0.00147	-0.067480108	-0.784480285	16.1528099
371	7.42	0.0367	-0.081311678	-0.598676704	2.427548141
372	7.44	0.0799	-0.094206648	-0.690820307	-11.64190846
373	7.46	0.0903	-0.110351829	-0.923697785	-11.64583933
374	7.48	0.0351	-0.128738177	-0.914937029	12.52191493
375	7.5	0.0169	-0.143795502	-0.590795527	19.89223535
376	7.52	-0.00404	-0.151000182	-0.129672399	26.22007744
377	7.54	-0.00386	-0.148700338	0.359656731	22.71283554
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s2)
378	7.56	0.00955	-0.137881233	0.722253844	13.54687578
379	7.58	0.0171	-0.121406094	0.925260001	6.753739896
380	7.6	0.0468	-0.102982987	0.917050663	-7.574673703
381	7.62	0.0676	-0.087059781	0.675270033	-16.60338926

382	7.64	0.0964	-0.077861964	0.244511627	-26.47245135
383	7.66	0.0993	-0.078055729	-0.263888102	-24.36752154
384	7.68	0.078	-0.087011803	-0.631719292	-12.4155975
385	7.7	0.0731	-0.101587884	-0.825888807	-7.001354006
386	7.72	0.103	-0.120232659	-1.038588691	-14.26863437
387	7.74	0.139	-0.144635083	-1.401653763	-22.03787282
388	7.76	0.067	-0.173765956	-1.511433523	11.05989681
389	7.78	0.0755	-0.201805684	-1.292539256	10.8295299
390	7.8	0.018	-0.223211089	-0.848001244	33.62427127
391	7.82	-0.0375	-0.231700874	-0.000977273	51.07812584
392	7.84	-0.0457	-0.221955532	0.97551146	46.57074747
393	7.86	-0.0744	-0.193068064	1.913235358	47.20164232
394	7.88	-0.0758	-0.146561232	2.737447842	35.21960601
395	7.9	-0.0865	-0.08570021	3.348654388	25.9010486
396	7.92	-0.0795	-0.015155662	3.705800334	9.813546058
397	7.94	-0.0841	0.059859618	3.795727691	-0.820810431
398	7.96	-0.0105	0.131875187	3.40582918	-38.16904062
399	7.98	0.0327	0.190370308	2.443682964	-58.04558098
400	8	-0.0382	0.230304239	1.549710156	-31.35169982
401	8.02	-0.0903	0.256896929	1.109558812	-12.6634346
402	8.04	-0.0973	0.276665793	0.867327616	-11.55968502
403	8.06	-0.0665	0.290512124	0.517305448	-23.44253177
404	8.08	-0.0744	0.296642885	0.095770692	-18.71094382
405	8.1	-0.0565	0.294419903	-0.318068866	-22.67301198
406	8.12	-0.058	0.284001303	-0.723791131	-17.89921445
407	8.14	-0.0487	0.266085508	-1.067788404	-16.50051284
408	8.16	-0.0487	0.241982844	-1.342478002	-10.96844704
409	8.18	-0.0494	0.213517648	-1.504041625	-5.187915233
410	8.2	-0.0633	0.18341297	-1.506426126	4.949465151
411	8.22	-0.0567	0.154406951	-1.394175771	6.275570294
412	8.24	-0.0398	0.127490151	-1.297504286	3.391578215
413	8.26	-0.0143	0.101635781	-1.287932643	-2.434413844
414	8.28	0.016	0.074717905	-1.403854959	-9.157817843
415	8.3	0.0516	0.044079086	-1.660026989	-16.45938507
416	8.32	0.0569	0.008122911	-1.935590471	-11.09696314
417	8.34	0.0657	-0.032394861	-2.11618679	-6.96266881
418	8.36	0.0626	-0.075278993	-2.17222637	1.358710877
419	8.38	0.0657	-0.117946546	-2.094528946	6.411031494
420	8.4	0.0527	-0.157569603	-1.867776753	16.26418781
421	8.42	0.056	-0.191480673	-1.523330253	18.18046216
422	8.44	0.0206	-0.216862629	-1.014865344	32.66602875
423	8.46	0.0393	-0.231475378	-0.446409514	24.1795542
424	8.48	0.025	-0.235277409	0.066206352	27.08203248
425	8.5	0.0705	-0.230580283	0.403506315	6.647963798
426	8.52	-0.158	-0.213213785	1.333143398	86.31574444
427	8.54	-0.248	-0.167713862	3.216848975	102.0548133
428	8.56	-0.246	-0.085467246	5.007812625	77.04155176
429	8.58	-0.249	0.027615274	6.300439369	52.22112261
430	8.6	-0.219	0.160387975	6.976830658	15.41800636
431	8.62	-0.191	0.299737971	6.958169035	-17.2841687
432	8.64	-0.152	0.432262638	6.294297571	-49.10297771

433	8.66	-0.12	0.546055014	5.084940071	-71.83277227
434	8.68	-0.0815	0.63156701	3.466259495	-90.03528535
435	8.7	-0.0474	0.681961764	1.573215992	-99.26906494
436	8.72	-0.011	0.693255446	-0.443847799	-102.4373141
437	8.74	-0.0167	0.665718464	-2.309850475	-84.16295351
438	8.76	-0.0334	0.605190139	-3.742981997	-59.15019867
439	8.78	-0.027	0.520229581	-4.753073777	-41.85897932
440	8.8	0.0156	0.417272909	-5.54259344	-37.09298697
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s2)
441	8.82	0.0299	0.300654069	-6.119290597	-20.57672874
442	8.84	0.00918	0.176986569	-6.247459415	7.759846954
443	8.86	0.0485	0.053897595	-6.061437938	10.84230075
444	8.88	0.107	-0.065640637	-5.892385303	6.062962753
445	8.9	0.159	-0.182500765	-5.793627469	3.812820677
446	8.92	0.22	-0.298154139	-5.77170989	-1.621062807
447	8.94	0.311	-0.41545734	-5.958610259	-17.06897405
448	8.96	0.204	-0.532218461	-5.717501855	41.17981437
449	8.98	-0.202	-0.622721211	-3.332773082	197.2930629
450	9	-0.0672	-0.65664518	-0.059623832	130.0218621
451	9.02	-0.0817	-0.633192144	2.404927437	116.4332648
452	9.04	-0.0433	-0.565583514	4.355935531	78.66754454
453	9.06	-0.176	-0.460402032	6.162212682	101.9601706
454	9.08	-0.12	-0.322061676	7.671822949	49.00085609
455	9.1	-0.11	-0.162143825	8.319962136	15.81306267
456	9.12	-0.123	0.005216854	8.41610572	-6.198704323
457	9.14	-0.101	0.16913756	7.975964893	-37.81537832
458	9.16	-0.00496	0.31587078	6.697357121	-90.04539892
459	9.18	0.0694	0.428497947	4.565359611	-123.1543521
460	9.2	0.197	0.491063961	1.691241715	-164.2574375
461	9.22	0.306	0.490033782	-1.794259541	-184.292688
462	9.24	0.174	0.425228616	-4.686257117	-104.9070696
463	9.26	0.0749	0.316972055	-6.139398984	-40.40711709
464	9.28	0.122	0.186802879	-6.877518599	-33.40484443
465	9.3	0.0242	0.048574208	-6.945348483	26.62185607
466	9.32	-0.0174	-0.081873295	-6.0994018	57.97281227
467	9.34	-0.0955	-0.188529472	-4.566215957	95.34577199
468	9.36	-0.152	-0.258814533	-2.462290062	115.0468175
469	9.38	-0.211	-0.283894601	-0.045716828	126.6105058
470	9.4	-0.211	-0.261319234	2.303253537	108.2865307
471	9.42	-0.147	-0.198141545	4.014515389	62.83965454
472	9.44	-0.0677	-0.110214361	4.778203064	13.52911292
473	9.46	0.00532	-0.016155406	4.627692395	-28.58017981
474	9.48	0.1	0.066353861	3.623234258	-71.86563393
475	9.5	0.216	0.120278619	1.769241607	-113.5336311
476	9.52	0.296	0.131229283	-0.674175204	-130.8080501
477	9.54	-0.0496	0.106063364	-1.842416682	13.98390226
478	9.56	0.00624	0.070347969	-1.729122854	-2.654519482
479	9.58	-0.0103	0.036371848	-1.668489239	8.717881039
480	9.6	0.00367	0.00460687	-1.508008604	7.33018241
481	9.62	0.0268	-0.024580785	-1.410756853	2.394992702
482	9.64	0.0986	-0.054509686	-1.582133237	-19.53263112

483	9.66	0.147	-0.09104391	-2.071289227	-29.38296788
484	9.68	-0.0376	-0.130701517	-1.89447147	47.06474366
485	9.7	-0.108	-0.15678862	-0.714238819	70.95852138
486	9.72	-0.031	-0.160464144	0.346686461	35.13400666
487	9.74	-0.0321	-0.147077937	0.991934249	29.39077214
488	9.76	-0.00514	-0.123045363	1.411323084	12.54811132
489	9.78	0.0136	-0.093576474	1.535565872	-0.123832463
490	9.8	0.0701	-0.065360822	1.285999283	-24.83282644
491	9.82	0.104	-0.045835775	0.666505405	-37.11656142
492	9.84	0.138	-0.040800465	-0.16297432	-45.83141102
493	9.86	0.147	-0.052832624	-1.040241588	-41.89531581
494	9.88	0.109	-0.079740505	-1.650546494	-19.13517477
495	9.9	0.0558	-0.113911299	-1.766532949	7.5365292
496	9.92	0.00422	-0.145480359	-1.390373051	30.07946059
497	9.94	0.0117	-0.167571164	-0.8187075	27.08709458
498	9.96	-0.0745	-0.175596518	0.016172128	56.40086823
499	9.98	-0.0828	-0.164522678	1.091211904	51.10310933
500	10	-0.0145	-0.135987936	1.762262237	16.00192399
501	10.02	0.0308	-0.099913637	1.845167703	-7.711377442
502	10.04	0.104	-0.067601469	1.386049059	-38.20048692
503	10.06	0.0171	-0.044257918	0.948306047	-5.573814283
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s2)
504	10.08	-0.0101	-0.025629029	0.914582924	2.201501996
505	10.1	0.00808	-0.007847926	0.863527297	-7.30706475
506	10.12	-0.0226	0.008913437	0.812609097	2.215244829
507	10.14	-0.0518	0.026383994	0.934446563	9.968501737
508	10.16	-0.0802	0.047664601	1.193614113	15.94825327
509	10.18	-0.0646	0.07358595	1.398520835	4.542418925
510	10.2	-0.0468	0.101351774	1.378061519	-6.588350511
511	10.22	-0.0204	0.126342579	1.12101899	-19.11590243
512	10.24	0.0376	0.142813425	0.526065645	-40.37943211
513	10.26	0.0953	0.143627436	-0.444664592	-56.69359154
514	10.28	0.157	0.122142853	-1.703793658	-69.21931501
515	10.3	0.21	0.07383335	-3.127156709	-73.11699016
516	10.32	0.135	0.001333906	-4.122787643	-26.44610327
517	10.34	0.0435	-0.081542029	-4.164805893	22.24427833
518	10.36	-0.0676	-0.155515967	-3.232587928	70.9775182
519	10.38	-0.0498	-0.206697803	-1.88559563	63.72171151
520	10.4	-0.0398	-0.23240029	-0.684653103	56.37254118
521	10.42	-0.16	-0.231136225	0.811059626	93.19873176
522	10.44	-0.179	-0.197191133	2.583449575	84.04026319
523	10.46	-0.108	-0.133237994	3.811864316	38.80121084
524	10.48	-0.0617	-0.052580116	4.253923462	5.404703778
525	10.5	0.0141	0.029540775	3.958165674	-34.98048261
526	10.52	0.0475	0.099863032	3.074060077	-53.43007711
527	10.54	0.0933	0.148897093	1.829345983	-71.04133228
528	10.56	0.0663	0.172742557	0.555200417	-56.37322433
529	10.58	0.0149	0.175071655	-0.32229057	-31.37587434
530	10.6	-0.0103	0.163804779	-0.804397037	-16.83477232
531	10.62	-0.0384	0.145837011	-0.992379795	-1.963503563
532	10.64	-0.0582	0.126624888	-0.92883253	8.318230094

533	10.66	-0.0437	0.109343386	-0.799317635	4.633259368
534	10.68	-0.069	0.095356096	-0.599411422	15.35736198
535	10.7	-0.101	0.087536781	-0.182520071	26.33177309
536	10.72	-0.133	0.089968117	0.425653694	34.4856034
537	10.74	-0.147	0.105252226	1.102757196	33.22474688
538	10.76	-0.096	0.131318916	1.503911782	6.890711627
539	10.78	-0.0624	0.161031376	1.467334288	-10.54846093
540	10.8	-0.00202	0.185830494	1.012577452	-34.92722271
541	10.82	0.0119	0.198810864	0.285459559	-37.78456654
542	10.84	-0.00679	0.198099626	-0.356583365	-26.41972586
543	10.86	-0.00092	0.185963396	-0.857039635	-23.62590116
544	10.88	-0.0308	0.165762704	-1.163029554	-6.973090787
545	10.9	-0.0753	0.143143094	-1.098931419	13.38290435
546	10.92	-0.0147	0.121797829	-1.035595098	-7.049272321
547	10.94	0.0145	0.099036511	-1.240536692	-13.44488706
548	10.96	0.0687	0.070155316	-1.647582853	-27.25972902
549	10.98	0.113	0.0310453	-2.263418723	-34.32385799
550	11	0.122	-0.020246976	-2.865808877	-25.91515745
551	11.02	0.0466	-0.078829427	-2.992436217	13.25242345
552	11.04	-0.0105	-0.133300097	-2.454630804	40.52811784
553	11.06	-0.087	-0.171419979	-1.357357367	69.19922594
554	11.08	-0.0654	-0.186112082	-0.111852884	55.35122231
555	11.1	-0.0446	-0.178797859	0.843275178	40.16158391
556	11.12	-0.00881	-0.156013971	1.435113544	19.02225272
557	11.14	0.0231	-0.125347368	1.631546774	0.621070269
558	11.16	0.0696	-0.094744014	1.428788667	-20.89688099
559	11.18	0.0442	-0.069551839	1.090428816	-12.93910414
560	11.2	-0.0417	-0.047385935	1.126161566	16.51237914
561	11.22	-0.0786	-0.02080943	1.531488925	24.02035679
562	11.24	-0.125	0.015487245	2.098178569	32.64860758
563	11.26	-0.121	0.062746986	2.627795515	20.31308703
564	11.28	-0.108	0.117834458	2.880951731	5.002534635
565	11.3	-0.0942	0.175043377	2.839940191	-9.103688675
566	11.32	-0.0749	0.228631539	2.518875984	-23.00273208
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s ²)
567	11.34	-0.0567	0.273354631	1.953433241	-33.54154219
568	11.36	-0.0488	0.305349121	1.246015699	-37.20021195
569	11.38	-0.0993	0.324815114	0.700583606	-17.34299744
570	11.4	-0.115	0.335968051	0.414710143	-11.2443488
571	11.42	-0.167	0.343917831	0.380267851	7.800119578
572	11.44	-0.203	0.354147197	0.642668741	18.43996944
573	11.46	-0.162	0.368763485	0.8189601	-0.810833584
574	11.48	-0.141	0.384000603	0.704751664	-10.61000999
575	11.5	-0.107	0.394704526	0.365640677	-23.30108866
576	11.52	-0.0868	0.396866458	-0.149447571	-28.20773621
577	11.54	-0.0611	0.387770709	-0.760127268	-32.8602335
578	11.56	-0.0365	0.365816892	-1.435254485	-34.65248818
579	11.58	0.00367	0.329668377	-2.17959696	-39.78175928
580	11.6	0.0387	0.27808393	-2.978847712	-40.14331597
581	11.62	0.0793	0.21048201	-3.781344328	-40.10634564
582	11.64	0.113	0.127319055	-4.534951191	-35.25434058

583	11.66	0.141	0.030408388	-5.156115506	-26.86209095
584	11.68	0.171	-0.077259194	-5.610642708	-18.59062923
585	11.7	0.196	-0.192171491	-5.880586969	-8.403796854
586	11.72	0.207	-0.310013479	-5.903611804	6.101313273
587	11.74	0.218	-0.425619661	-5.657006445	18.5592227
588	11.76	0.229	-0.534055979	-5.186625338	28.478888
589	11.78	0.245	-0.631562119	-4.563988669	33.7847789
590	11.8	0.293	-0.716959827	-3.975782141	25.03587383
591	11.82	0.33	-0.791993996	-3.527634783	19.778862
592	11.84	0.374	-0.859421849	-3.215150511	11.46956517
593	11.86	0.227	-0.915393146	-2.381979178	71.84756822
594	11.88	0.0811	-0.943788978	-0.457603992	120.5899503
595	11.9	-0.0257	-0.92662293	2.174208766	142.5913255
596	11.92	-0.122	-0.85388768	5.099316304	149.9194284
597	11.94	-0.102	-0.726312305	7.658221179	105.9710591
598	11.96	-0.127	-0.554845766	9.488432677	77.05009068
599	11.98	-0.181	-0.35163507	10.83263697	57.37033902
600	12	-0.229	-0.125797769	11.75109308	34.47527202
601	12.02	-0.216	0.111710273	11.99971113	-9.613467895
602	12.04	-0.193	0.345584809	11.38774243	-51.58340153
603	12.06	-0.169	0.559581221	10.01189882	-86.00096009
604	12.08	-0.136	0.739759598	8.005938904	-114.5950311
605	12.1	-0.149	0.876751288	5.693230058	-116.6758534
606	12.12	-0.156	0.967565306	3.388171727	-113.8299797
607	12.14	-0.158	1.013301744	1.185472142	-106.4399789
608	12.16	-0.158	1.016927807	-0.822865885	-94.39382376
609	12.18	-0.16	0.983280393	-2.541875532	-77.50714093
610	12.2	-0.159	0.918779857	-3.908178066	-59.12311254
611	12.22	-0.162	0.830905354	-4.879272219	-37.98630274
612	12.24	-0.0986	0.725434962	-5.667766998	-40.86317517
613	12.26	0.00955	0.602289764	-6.646752835	-57.03540848
614	12.28	0.0395	0.459652909	-7.616932609	-39.98256895
615	12.3	0.045	0.301933973	-8.154961006	-13.82027072
616	12.32	0.106	0.136475786	-8.390857698	-9.769398471
617	12.34	0.0576	-0.028962885	-8.153009362	33.55423207
618	12.36	0.0433	-0.182902107	-7.240912895	57.65541461
619	12.38	0.089	-0.316545994	-6.123475818	54.08829314
620	12.4	0.108	-0.427873713	-5.009296048	57.32968385
621	12.42	0.0964	-0.515547364	-3.758069079	67.79301302
622	12.44	0.0652	-0.575920904	-2.279284859	80.08540894
623	12.46	0.0362	-0.604951255	-0.623750292	85.46804783
624	12.48	0.0365	-0.601406747	0.978201163	74.72709761
625	12.5	0.0903	-0.570199535	2.142519992	41.70478532
626	12.52	0.063	-0.519265987	2.950834806	39.12669605
627	12.54	0.0529	-0.453496732	3.626090721	28.3988955
628	12.56	0.0793	-0.377716189	3.951963523	4.188384694
629	12.58	0.0439	-0.297789901	4.040665267	4.68178971
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s ²)
630	12.6	0.0162	-0.216299775	4.108347361	2.086419629
631	12.62	0.0141	-0.134873715	4.034258626	-9.495293106
632	12.64	-0.0272	-0.055651611	3.887951819	-5.135387618

633	12.66	-0.0141	0.01954773	3.63198225	-20.46156929
634	12.68	-0.00349	0.086949983	3.108243054	-31.91235024
635	12.7	0.0138	0.141668395	2.363598176	-42.55213761
636	12.72	-0.00808	0.181141651	1.583727417	-35.43493825
637	12.74	-0.0266	0.206445214	0.946628892	-28.27491428
638	12.76	-0.058	0.220982167	0.507066378	-15.68133711
639	12.78	-0.0442	0.227573231	0.152040047	-19.82129602
640	12.8	-0.00514	0.225495606	-0.359802534	-31.36296207
641	12.82	0.0334	0.211209546	-1.068803479	-39.53713236
642	12.84	0.0782	0.181211249	-1.931026221	-46.68514191
643	12.86	0.0806	0.134413773	-2.748721422	-35.08437816
644	12.88	0.094	0.073258976	-3.36675828	-26.7193076
645	12.9	0.0856	0.002256058	-3.733533473	-9.95821177
646	12.92	0.0879	-0.073250233	-3.817095647	1.601994436
647	12.94	0.0354	-0.146297578	-3.487638892	31.34368102
648	12.96	0.0408	-0.209410717	-2.823674962	35.05271197
649	12.98	0.0503	-0.258898063	-2.125059634	34.80882085
650	13	0.0722	-0.295106887	-1.495822827	28.11485979
651	13.02	0.0925	-0.320099134	-1.003401841	21.12723889
652	13.04	0.106	-0.336439315	-0.630616197	16.15132547
653	13.06	0.108	-0.3459438	-0.319832332	14.92706101
654	13.08	0.151	-0.351018689	-0.187656613	-1.709489103
655	13.1	0.146	-0.354854817	-0.19595615	0.87953542
656	13.12	0.174	-0.359556067	-0.274168874	-8.700807858
657	13.14	0.0633	-0.362608676	-0.031091977	33.00849757
658	13.16	0.00826	-0.35513012	0.778947518	47.99545198
659	13.18	-0.0226	-0.329774862	1.756578279	49.76762409
660	13.2	-0.0637	-0.284457985	2.775109437	52.08549168
661	13.22	-0.0782	-0.219591394	3.71154968	41.55853261
662	13.24	-0.0764	-0.138805769	4.367012859	23.98778536
663	13.26	-0.0505	-0.049223741	4.591189863	-1.570085019
664	13.28	-0.0496	0.040932374	4.424421703	-15.10673091
665	13.3	0.0136	0.123061211	3.788461917	-48.4892477
666	13.32	0.0786	0.186402773	2.545694365	-75.78750755
667	13.34	-0.0424	0.226851246	1.499152887	-28.86664027
668	13.36	-0.071	0.252066918	1.022414371	-18.80721125
669	13.38	-0.0152	0.266730557	0.443949515	-39.03927439
670	13.4	0.0255	0.266783498	-0.438655411	-49.2212182
671	13.42	0.0817	0.246999816	-1.5397128	-60.88452073
672	13.44	0.00496	0.208114905	-2.348778311	-20.02203036
673	13.46	-0.128	0.162875426	-2.175169639	37.38289763
674	13.48	-0.146	0.127585052	-1.353867686	44.74729764
675	13.5	-0.0461	0.105624138	-0.842223763	6.417094674
676	13.52	-0.0248	0.089453455	-0.774844569	0.320824672
677	13.54	0.0145	0.072835725	-0.886928432	-11.52921091
678	13.56	-0.0211	0.05449381	-0.947263006	5.495753427
679	13.58	-0.0461	0.037740114	-0.728106567	16.4198905
680	13.6	-0.0611	0.02697288	-0.348616864	21.52907986
681	13.62	-0.0494	0.023675636	0.018892498	15.22185629
682	13.64	-0.0553	0.027081675	0.321711335	15.0600274
683	13.66	-0.0367	0.035548151	0.524936242	5.262463385

684	13.68	-0.0123	0.04599526	0.519774724	-5.778615268
685	13.7	-0.00698	0.05497659	0.378358228	-8.363034328
686	13.72	0.0193	0.05994128	0.118110827	-17.66170579
687	13.74	0.0543	0.057740816	-0.338157284	-27.96510526
688	13.76	0.0632	0.045572671	-0.878657194	-26.08488576
689	13.78	0.176	0.019381101	-1.74049983	-60.09937778
690	13.8	0.165	-0.025669113	-2.764521556	-42.30279489
691	13.82	0.0329	-0.083263853	-2.994952465	19.25970403
692	13.84	-0.0665	-0.135155607	-2.194222857	60.81325674
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s2)
693	13.86	-0.182	-0.162985813	-0.588797756	99.72925334
694	13.88	-0.148	-0.15731484	1.155894991	74.74002144
695	13.9	-0.137	-0.121070857	2.468503397	56.52081907
696	13.92	-0.099	-0.06330406	3.308176304	27.44647165
697	13.94	-0.0606	0.005605001	3.58272973	0.00887095
698	13.96	-0.0235	0.074883765	3.345146673	-23.76717659
699	13.98	0.00569	0.135355073	2.701984154	-40.54907535
700	14	0.0272	0.180314723	1.793980824	-50.25125768
701	14.02	0.0933	0.203984558	0.573002665	-71.84655816
702	14.04	-0.00404	0.205440361	-0.427422308	-28.19593915
703	14.06	-0.0898	0.194859719	-0.630641877	7.873982248
704	14.08	-0.0657	0.183028601	-0.552469983	-0.056792882
705	14.1	-0.127	0.174325391	-0.317850971	23.51869415
706	14.12	-0.0947	0.171265755	0.011887365	9.45513944
707	14.14	-0.0681	0.172300749	0.091611992	-1.482676794
708	14.16	0.0162	0.170812734	-0.240413452	-31.71986756
709	14.18	0.116	0.156619798	-1.178880173	-62.12680458
710	14.2	0.154	0.120507072	-2.432392435	-63.22442163
711	14.22	0.234	0.057983731	-3.819941675	-75.53050235
712	14.24	0.255	-0.032053526	-5.183784041	-60.85373427
713	14.26	0.219	-0.144205915	-6.031454846	-23.91334615
714	14.28	0.138	-0.264602669	-6.008220494	26.23678135
715	14.3	0.0413	-0.374680457	-4.999558361	74.62943188
716	14.32	-0.0162	-0.45731093	-3.263488875	98.97751677
717	14.34	-0.0417	-0.5023595	-1.241368179	103.2345528
718	14.36	0.0136	-0.509661585	0.511159639	72.01822892
719	14.38	0.0332	-0.486936143	1.761384569	53.00426404
720	14.4	0.0999	-0.444784373	2.453792433	16.2365224
721	14.42	0.0733	-0.392463949	2.778250026	16.20923693
722	14.44	0.00826	-0.332378023	3.230342551	29.00001554
723	14.46	-0.0151	-0.262503362	3.757123583	23.67808765
724	14.48	-0.034	-0.183393823	4.15383032	15.99258604
725	14.5	-0.00367	-0.099654131	4.220138809	-9.361737103
726	14.52	0.0011	-0.018393703	3.905904003	-22.06174346
727	14.54	-0.0215	0.055299215	3.463387777	-22.18987915
728	14.56	-0.0386	0.120050683	3.011759063	-22.97299229
729	14.58	-0.0556	0.17575303	2.558475634	-22.35535057
730	14.6	-0.094	0.223403221	2.206543486	-12.83786426
731	14.62	-0.133	0.265904048	2.043539243	-3.462560031
732	14.64	-0.106	0.304567657	1.822821617	-18.60920263
733	14.66	-0.0488	0.334991662	1.219578917	-41.71506732

734	14.68	-0.0327	0.350714779	0.352732751	-44.96954929
735	14.7	0.00734	0.347894125	-0.634798129	-53.78353878
736	14.72	0.018	0.325029708	-1.651643629	-47.90101117
737	14.74	0.0252	0.283340757	-2.5172514	-38.65976598
738	14.76	0.0406	0.226013018	-3.215522589	-31.16735288
739	14.78	0.0802	0.155447043	-3.841074839	-31.38787216
740	14.8	0.0167	0.076203977	-4.083231779	7.172178203
741	14.82	-0.101	0.001279268	-3.409239124	60.22708727
742	14.84	-0.102	-0.054704062	-2.189093838	61.78744139
743	14.86	-0.0446	-0.088443543	-1.18485427	38.63651539
744	14.88	-0.0149	-0.105693113	-0.540102801	25.83863146
745	14.9	0.0459	-0.113723036	-0.262889418	1.88270689
746	14.92	0.0753	-0.119607473	-0.32555428	-8.149193126
747	14.94	0.0334	-0.126033967	-0.317095152	8.995105913
748	14.96	-0.00496	-0.129241589	-0.003667038	22.34770554
749	14.98	-0.0446	-0.12375073	0.552752964	33.29429462
750	15	-0.00275	-0.108182552	1.00406475	11.83688404
751	15.02	0.0453	-0.087920955	1.022095014	-10.0338577
752	15.04	0.0885	-0.071185675	0.651432913	-27.03235241
753	15.06	0.144	-0.065347417	-0.067607032	-44.87164207
754	15.08	0.114	-0.073925729	-0.790224172	-27.39007193
755	15.1	0.0608	-0.09267262	-1.084464972	-2.034008025
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s2)
756	15.12	-0.00257	-0.112152456	-0.86351866	24.12863921
757	15.14	-0.0358	-0.123506158	-0.271851469	35.03807985
758	15.16	-0.0453	-0.122026608	0.419806466	34.12771371
759	15.18	-0.0389	-0.10765455	1.017399348	25.63157444
760	15.2	-0.0202	-0.083521403	1.3959153	12.22002083
761	15.22	0.00918	-0.054797977	1.476427343	-4.168816554
762	15.24	0.0442	-0.027728678	1.230502555	-20.42366229
763	15.26	-0.00624	-0.00545982	0.996383255	-2.98826767
764	15.28	-0.0397	0.014820103	1.031609042	6.510846314
765	15.3	-0.0865	0.03803323	1.289703664	19.29861588
766	15.32	-0.0666	0.066315496	1.538522866	5.5833044
767	15.34	-0.0358	0.096567881	1.486715683	-10.7640227
768	15.36	-0.0033	0.122707274	1.127223608	-25.18518485
769	15.38	0.0312	0.139016479	0.503696886	-37.16748733
770	15.4	-0.00147	0.143221085	-0.083236332	-21.52583445
771	15.42	0.00092	0.137503798	-0.488492317	-18.9997641
772	15.44	0.0422	0.122875916	-0.974295854	-29.58058957
773	15.46	0.0687	0.097241521	-1.589143701	-31.90419512
774	15.48	0.11	0.058529413	-2.282067092	-37.38814399
775	15.5	0.0947	0.007171549	-2.853719259	-19.77707276
776	15.52	0.0793	-0.052182921	-3.081727812	-3.023782445
777	15.54	0.0632	-0.112899315	-2.989911541	12.20540947
778	15.56	0.0927	-0.170615235	-2.781680468	8.61769784
779	15.58	0.12	-0.224813969	-2.638192948	5.731054204
780	15.6	0.125	-0.275921722	-2.472582355	10.83000503
781	15.62	0.0316	-0.319296915	-1.864936906	49.93453994
782	15.64	-0.0312	-0.344541984	-0.65956997	70.60215359
783	15.66	-0.0968	-0.342100172	0.903751107	85.72995417

784	15.68	-0.122	-0.307491262	2.557139945	79.60892962
785	15.7	-0.071	-0.244162141	3.775772084	42.25428424
786	15.72	-0.0408	-0.162998777	4.340564337	14.2249411
787	15.74	-0.00606	-0.07606475	4.352838415	-12.99753337
788	15.76	0.0218	0.006309882	3.884624781	-33.82383003
789	15.78	-0.0235	0.078215315	3.305918518	-24.0467962
790	15.8	-0.0644	0.140371395	2.909689435	-15.5761121
791	15.82	-0.0944	0.195899265	2.643097557	-11.08307569
792	15.84	-0.0615	0.244754218	2.242397727	-28.98690733
793	15.86	-0.04	0.282800942	1.562274693	-39.02539613
794	15.88	-0.0022	0.304999347	0.657565828	-51.44549033
795	15.9	0.0261	0.30740569	-0.416931523	-56.00424482
796	15.92	0.0129	0.289277394	-1.395898042	-41.89240707
797	15.94	-0.0116	0.254877671	-2.044074302	-22.92521892
798	15.96	-0.022	0.210716263	-2.37206654	-9.874004818
799	15.98	-0.0591	0.163467064	-2.352853278	11.79533101
800	16	-0.0635	0.119443587	-2.049494484	18.54054842
801	16.02	-0.0167	0.080815863	-1.813277941	5.081105831
802	16.04	0.0134	0.044945606	-1.773747759	-1.128087681
803	16.06	0.0567	0.00823041	-1.8977718	-11.27431636
804	16.08	0.0867	-0.032334051	-2.158674309	-14.8159346
805	16.1	0.111	-0.078492762	-2.457196823	-15.0363168
806	16.12	0.106	-0.129526241	-2.646150981	-3.859098974
807	16.14	0.0606	-0.180764385	-2.477663431	20.70785394
808	16.16	-0.0134	-0.223102796	-1.756177699	51.44071931
809	16.18	-0.143	-0.243533356	-0.286878346	95.48921599
810	16.2	-0.112	-0.232591174	1.381096614	71.30828
811	16.22	-0.0804	-0.193283036	2.549717175	45.55377613
812	16.24	-0.0384	-0.136092496	3.16933677	16.40818339
813	16.26	0.00569	-0.072170051	3.222907793	-11.05108109
814	16.28	0.0643	-0.012803324	2.713764848	-39.86321349
815	16.3	0.0538	0.033661838	1.93275136	-38.2381353
816	16.32	0.0222	0.065792263	1.280291126	-27.00788807
817	16.34	0.0621	0.084586674	0.599149999	-41.10622462
818	16.36	0.0582	0.088911905	-0.166626865	-35.47146183
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s2)
819	16.38	0.0466	0.079466342	-0.777929471	-25.6587987
820	16.4	0.0378	0.05969294	-1.199410731	-16.48932735
821	16.42	0.0364	0.033048573	-1.465026	-10.07219955
822	16.44	0.0319	0.002470548	-1.592776416	-2.702841989
823	16.46	0.00386	-0.028415749	-1.495853338	12.39514976
824	16.48	-0.0264	-0.054512981	-1.113869807	25.80320327
825	16.5	-0.063	-0.070369231	-0.47175528	38.40824948
826	16.52	-0.0622	-0.072573132	0.25136521	33.90379949
827	16.54	-0.0266	-0.062607654	0.745182568	15.47793635
828	16.56	-0.00514	-0.045820667	0.933516185	3.355425316
829	16.58	0.0312	-0.028102732	0.838277335	-12.87931032
830	16.6	-0.0176	-0.01222337	0.749658867	4.017463591
831	16.62	-0.0468	0.004340785	0.906756575	11.69230716
832	16.64	-0.0512	0.024535968	1.112761756	8.908210915
833	16.66	-0.0712	0.048833289	1.316970376	11.51265112

834	16.68	-0.0444	0.075962153	1.395915957	-3.618092981
835	16.7	-0.0395	0.102625414	1.270410146	-8.932488129
836	16.72	-0.0334	0.125786936	1.045742066	-13.53431992
837	16.74	-0.0319	0.143832313	0.758795627	-15.16032397
838	16.76	-0.00698	0.15508269	0.366242105	-24.09502823
839	16.78	-0.00496	0.157760227	-0.09848842	-22.37802429
840	16.8	-0.034	0.152709757	-0.406558614	-8.428995067
841	16.82	-0.0226	0.142726513	-0.591765779	-10.09172144
842	16.84	0.016	0.127811106	-0.899774879	-20.70918858
843	16.86	0.063	0.10455622	-1.425713697	-31.88469317
844	16.88	0.128	0.068219855	-2.207922823	-46.33621948
845	16.9	0.167	0.014719694	-3.142093283	-47.08082656
846	16.92	0.157	-0.055573881	-3.887264182	-27.43626333
847	16.94	0.14	-0.13665951	-4.221298745	-5.967192935
848	16.96	0.0942	-0.21931596	-4.044346262	23.66244124
849	16.98	0.0341	-0.292479163	-3.271974092	53.57477578
850	17	0.00275	-0.345904131	-2.070522696	66.5703638
851	17.02	-0.0349	-0.373016619	-0.64072604	76.40930184
852	17.04	-0.0277	-0.371733408	0.769047131	64.56801523
853	17.06	-0.0134	-0.345117381	1.892555517	47.7828234
854	17.08	0.00386	-0.299578482	2.66133446	29.09507084
855	17.1	0.0237	-0.2424466	3.051853728	9.956855944
856	17.12	0.0395	-0.181022657	3.090540521	-6.088176563
857	17.14	0.00441	-0.119989196	3.012805636	-1.685312009
858	17.16	-0.0228	-0.059953442	2.99076975	-0.51827651
859	17.18	-0.0604	0.000236472	3.028221664	4.263467907
860	17.2	-0.0953	0.061954419	3.14357299	7.271664679
861	17.22	-0.13	0.12649624	3.310609079	9.431944178
862	17.24	-0.106	0.192628579	3.302624824	-10.23036966
863	17.26	-0.0848	0.255058012	2.940318555	-26.00025727
864	17.28	-0.0564	0.30716552	2.270432249	-40.98837332
865	17.3	-0.0266	0.3432422	1.337235683	-52.33128322
866	17.32	-0.00165	0.358998636	0.238407945	-57.55149061
867	17.34	-0.033	0.354148242	-0.723447314	-38.63403531
868	17.36	-0.0584	0.333637034	-1.327673489	-21.78858214
869	17.38	-0.0854	0.304399025	-1.596127457	-5.056814717
870	17.4	-0.0718	0.271519217	-1.691853326	-4.515772203
871	17.42	-0.0633	0.237035856	-1.756482744	-1.947169539
872	17.44	-0.058	0.201869687	-1.760134179	1.582025968
873	17.46	-0.0799	0.168259891	-1.600845425	14.34684946
874	17.48	-0.0901	0.139737164	-1.251427299	20.59496318
875	17.5	-0.0872	0.118789954	-0.843293698	20.21839694
876	17.52	-0.0771	0.10555828	-0.479873708	16.12360202
877	17.54	-0.063	0.098586104	-0.217343903	10.12937852
878	17.56	-0.0509	0.095747809	-0.066485603	4.956451459
879	17.58	-0.0474	0.095231273	0.014832066	3.175315469
880	17.6	-0.0255	0.095328176	-0.005141829	-5.172705051
881	17.62	-0.0125	0.093802226	-0.147453162	-9.058428224
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s ²)
882	17.64	0.0931	0.085435516	-0.689217793	-45.11803484
883	17.66	0.133	0.062058421	-1.648491685	-50.80935438

884	17.68	0.161	0.019147537	-2.642596756	-48.60115274
885	17.7	0.144	-0.041333617	-3.405518608	-27.69103241
886	17.72	0.14	-0.11343812	-3.804931722	-12.25027902
887	17.74	0.0806	-0.188567192	-3.707975487	21.94590252
888	17.76	0.0147	-0.255212076	-2.956512864	53.20035978
889	17.78	0.0039	-0.303225441	-1.844823728	57.96855378
890	17.8	-0.0231	-0.327866338	-0.619265973	64.58722178
891	17.82	-0.00275	-0.328823137	0.523586096	49.69798506
892	17.84	0.00551	-0.30958541	1.400186591	37.96206445
893	17.86	0.0191	-0.27543929	2.014425426	23.46181906
894	17.88	0.0191	-0.23139029	2.390474551	14.14309348
895	17.9	0.0354	-0.18224196	2.524358455	-0.754703092
896	17.92	0.0376	-0.132712652	2.428572418	-8.823900609
897	17.94	0.0136	-0.085629083	2.279784439	-6.054897297
898	17.96	-0.0103	-0.040967856	2.186338285	-3.289718116
899	17.98	-0.0132	0.001612592	2.071706484	-8.173462048
900	18	0.0129	0.039990021	1.766036431	-22.39354317
901	18.02	0.0195	0.070405073	1.275468796	-26.66322035
902	18.04	0.027	0.090328498	0.716873647	-29.19629459
903	18.06	-0.00165	0.100068307	0.257107268	-16.78034325
904	18.08	-0.0292	0.103010208	0.037082888	-5.222094773
905	18.1	-0.0343	0.102955334	-0.042570371	-2.743231102
906	18.12	-0.00129	0.100425756	-0.21038741	-14.03847283
907	18.14	0.0285	0.092609892	-0.571199024	-22.04268857
908	18.16	0.0193	0.077595394	-0.930250728	-13.86248177
909	18.18	-0.0211	0.058138952	-1.015393428	5.348211696
910	18.2	-0.0554	0.040348243	-0.763677547	19.82337644
911	18.22	-0.0567	0.029020531	-0.369093594	19.63501884
912	18.24	-0.0174	0.023980282	-0.134931287	3.78121186
913	18.26	-0.0106	0.021778798	-0.085217193	1.19019754
914	18.28	0.00073	0.019914404	-0.10122221	-2.790699265
915	18.3	0.00367	0.01729687	-0.160531131	-3.140192816
916	18.32	0.00918	0.013353697	-0.233786152	-4.185309252
917	18.34	0.0105	0.007923117	-0.309271902	-3.363265788
918	18.36	0.0178	0.000943224	-0.388717367	-4.581280733
919	18.38	0.0246	-0.007810259	-0.486630907	-5.21007323
920	18.4	0.0325	-0.018649322	-0.597275391	-5.85437521
921	18.42	0.04	-0.031774022	-0.715194617	-5.937547304
922	18.44	0.0479	-0.047252323	-0.832635556	-5.806546678
923	18.46	0.0554	-0.065006443	-0.942776451	-5.207542762
924	18.48	0.0635	-0.084841547	-1.040733935	-4.58820568
925	18.5	0.0709	-0.106467215	-1.121832848	-3.521685599
926	18.52	0.087	-0.129804878	-1.211933433	-5.48837293
927	18.54	0.0722	-0.154176408	-1.225219562	4.15976003
928	18.56	0.0437	-0.176530246	-1.010164222	17.34577405
929	18.58	0.0211	-0.192412235	-0.578034688	25.86717931
930	18.6	-0.0145	-0.197732623	0.045995844	36.5358739
931	18.62	-0.0228	-0.189754439	0.75182254	34.04679568
932	18.64	0.00991	-0.169796356	1.243985819	15.16953217
933	18.66	0.00496	-0.142290884	1.506561345	11.08802049
934	18.68	-0.0459	-0.108723698	1.8501573	23.27157502

935	18.7	-0.104	-0.065866865	2.435526021	35.26529703
936	18.72	-0.116	-0.010900853	3.061075107	27.28961161
937	18.74	-0.109	0.054233783	3.4523885	11.8417276
938	18.76	-0.0758	0.1232776	3.451993222	-11.88125539
939	18.78	-0.0125	0.186837091	2.903955927	-42.92247411
940	18.8	0.0499	0.233872821	1.799616981	-67.51142049
941	18.82	0.0509	0.256784342	0.491535152	-63.29676239
942	18.84	-0.00386	0.256695314	-0.50043793	-35.90054579
943	18.86	-0.011	0.240432012	-1.125892303	-26.6448915
944	18.88	-0.0202	0.213632719	-1.554037019	-16.16958015
k	tiempo (seg)	a(g)	Xk (in)	Vk(in/seg)	Ak(in/s2)
945	18.9	-0.0406	0.180739279	-1.735306976	-1.957415579
946	18.92	-0.0764	0.147460182	-1.592602662	16.22784703
947	18.94	-0.0953	0.119760193	-1.177396259	25.29279323
948	18.96	-0.0408	0.099295377	-0.869085302	5.5383025
949	18.98	0.00551	0.081536854	-0.906766989	-9.306471147
950	19	0.0145	0.061619498	-1.084968623	-8.513692249
951	19.02	0.0255	0.038265315	-1.250449734	-8.034418912
952	19.04	0.0314	0.011921445	-1.383937252	-5.314332914
953	19.06	0.0464	-0.016874568	-1.495664067	-5.8583485
954	19.08	0.0593	-0.047898081	-1.606687255	-5.243970387
955	19.1	0.0718	-0.080981309	-1.701635454	-4.250849442
956	19.12	0.0301	-0.113810826	-1.581316283	16.2827665
957	19.14	-0.025	-0.139982004	-1.035801565	38.26870529
958	19.16	-0.0593	-0.152070732	-0.173071194	48.00433184
959	19.18	-0.0534	-0.146791701	0.700974257	39.40021321
960	19.2	-0.0527	-0.125696881	1.408507737	31.3531348
961	19.22	-0.0558	-0.092014598	1.959720597	23.76815126
962	19.24	-0.0622	-0.048757713	2.365967897	16.85657872
963	19.26	-0.045	0.000378572	2.547660629	1.312694458
964	19.28	-0.014	0.049719207	2.386402837	-17.43847367
965	19.3	0.0229	0.092193772	1.861053698	-35.0964402
966	19.32	0.069	0.12071159	0.99072811	-51.93611858
967	19.34	0.0738	0.130434113	-0.018475858	-48.98427825
968	19.36	0.045	0.122018499	-0.823085541	-31.47669002
969	19.38	0.0286	0.100548566	-1.323907717	-18.60552762
970	19.4	-0.00734	0.072295089	-1.501440015	0.852297814
971	19.42	-0.0281	0.043607302	-1.367338685	12.55783525
972	19.44	-0.0531	0.019884555	-1.004935955	23.6824377
973	19.46	-0.058	0.004646775	-0.518842063	24.9269515
974	19.48	-0.0204	-0.002302486	-0.176084042	9.34885065
975	19.5	0.0173	-0.005389044	-0.132571824	-4.997628871
976	19.52	0.0615	-0.01051099	-0.379622723	-19.70746108
977	19.54	0.106	-0.023239877	-0.893266031	-31.65686964
978	19.56	0.0778	-0.04570376	-1.353122225	-14.32874981
979	19.58	0.0263	-0.073182813	-1.394783109	10.16266142
980	19.6	-0.00129	-0.09779779	-1.066714527	22.64419679
981	19.62	-0.0248	-0.113779201	-0.531426571	30.88459883
982	19.64	-0.0496	-0.117637449	0.145601725	36.81823077
983	19.66	-0.0626	-0.107475666	0.870576582	35.67925493
984	19.68	-0.0655	-0.083599502	1.517039848	28.96707169

985	19.7	-0.0727	-0.048073975	2.03551284	22.88022747
986	19.72	-0.0738	-0.003677854	2.404099295	13.97841799
987	19.74	-0.0896	0.046857844	2.649470511	10.55870361
988	19.76	-0.0881	0.100975575	2.762302542	0.724499577
989	19.78	-0.0745	0.155060173	2.646157263	-12.3390275
990	19.8	-0.0747	0.204927747	2.340600156	-18.21668325
991	19.82	-0.0644	0.247307833	1.897408438	-26.10248849
992	19.84	-0.0343	0.278782682	1.250076429	-38.6307124
993	19.86	-0.0105	0.295403013	0.411956664	-45.18126407
994	19.88	0.00808	0.294478653	-0.504392675	-46.45366987
995	19.9	-0.00349	0.276339261	-1.30954653	-34.06171562
996	19.92	-0.0132	0.24456368	-1.868011506	-21.78478196
997	19.94	-0.031	0.204348407	-2.153515807	-6.765648146
998	19.96	-0.0211	0.160299669	-2.251357967	-3.018567867
999	19.98	0.0231	0.113789355	-2.399673481	-11.81298354
1000	20	0	0.065135278	-2.465734177	5.206913879

ANEXO B

OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE AMORTIGUAMIENTO Y RESPUESTA EN EL TIEMPO DE LA ESTRUCTURA

C.1 PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE AMORTIGUAMIENTO DE LOS DISIPADORES:

La determinación de los coeficientes de amortiguamiento de los dispositivos se obtuvo mediante la ecuación 4.23 descrita en el Capítulo IV sugerida por la FEMA 273. A continuación se muestran los datos necesarios para la utilización de dicha ecuación.

Tabla C.1: Datos utilizados para la obtención de los coeficientes de amortiguamiento de los Disipadores

PISO	MASA (kgs)	cos θ	Periodo(seg)	ϕ_1	ϕ_{ri}
1	660.6454	0.83094	0.595618	0.1604	0.1604
2	643.7458	0.83094		0.3113	0.1509
3	629.7892	0.85420		0.6069	0.2956
4	624.4384	0.85420		0.8050	0.1981
5	271.2856	0.85420		1.0000	0.1950

Para el caso 1 reemplazando los valores anteriores y considerando dos Disipadores por piso, la ecuación 4.23 queda:

$$\xi_{md} = \frac{2 \cdot 0,595618 \cdot (C_1 \cdot 0,1604^2 \cdot 0,83094^2 + C_2 \cdot 0,2956^2 \cdot 0,8542^2 + C_3 \cdot 0,195^2 \cdot 0,8542^2)}{4\pi \cdot (660,6454 \cdot 0,1604^2 + 629,7892 \cdot 0,6069^2 + 271,2856 \cdot 1^2)}$$

Para el caso 1 reemplazando los valores anteriores y considerando dos Disipadores por piso, la ecuación 4.23 queda:

$$\xi_{md} = \frac{2 \cdot 0,595618 \cdot (C_1 \cdot 0,1604^2 \cdot 0,83094^2 + C_2 \cdot 0,1509^2 \cdot 0,83094^2 + C_3 \cdot 0,2956^2 \cdot 0,8542^2 + C_4 \cdot 0,1981^2 \cdot 0,8542^2 + C_5 \cdot 0,195^2 \cdot 0,8542^2)}{4\pi \cdot (660,6454 \cdot 0,1604^2 + 643,7458 \cdot 0,3113^2 + 629,7892 \cdot 0,6069^2 + 624,4384 \cdot 0,805^2 + 271,2856 \cdot 1^2)}$$

En ambas ecuaciones anteriores, se itera hasta que la igualdad al lado izquierdo de la ecuación se llega al valor de amortiguamiento suplementario requerido. Los valores obtenidos se presentaron en las tablas 6.8 y 6.11 del Capítulo 6.

C.2 RESPUESTA EN EL TIEMPO DE LA ESTRUCTURA PARA UN AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO DE 5% DEL CRÍTICO:

Fig. C.1: Desplazamiento del Centro de Masa del 1º piso

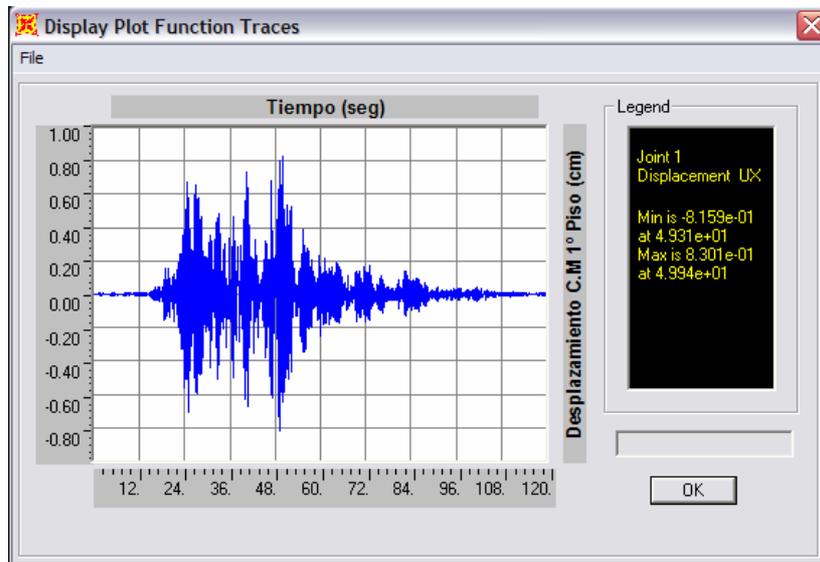


Fig. C.2: Desplazamiento del Centro de Masa del 2º piso

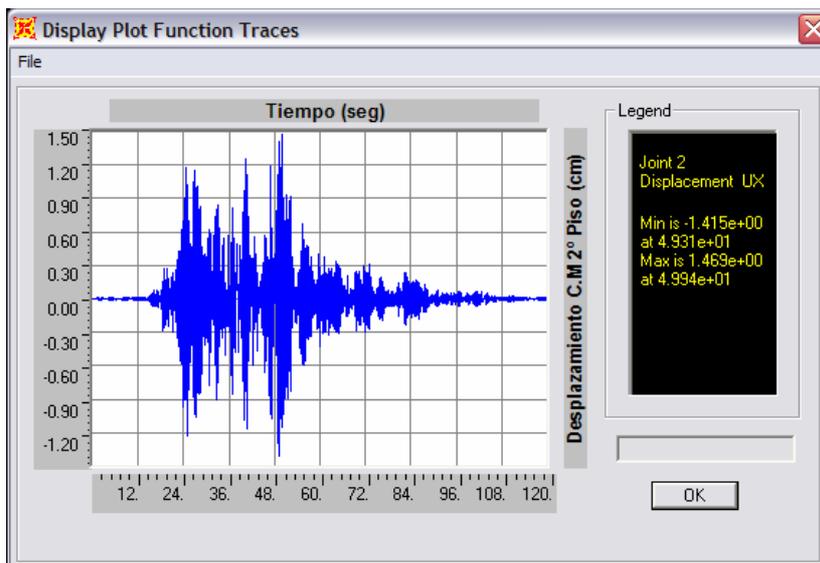


Fig. C.3: Desplazamiento del Centro de Masa del 3° piso

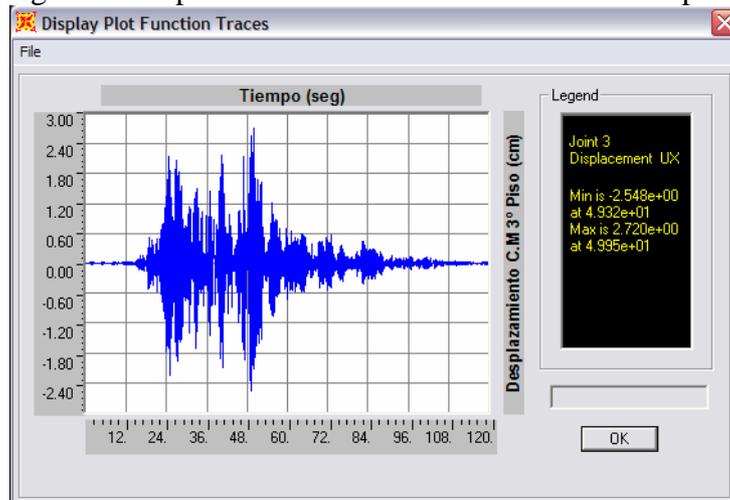


Fig. C.4: Desplazamiento del Centro de Masa del 4° piso

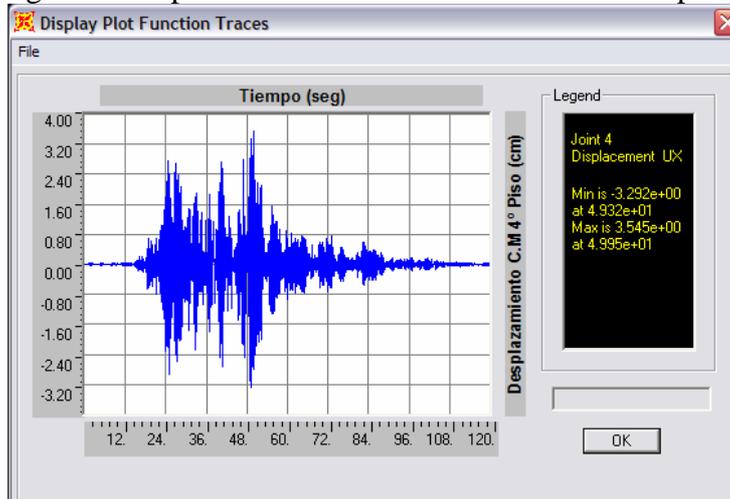


Fig. C.5: Desplazamiento del Centro de Masa del 5° piso

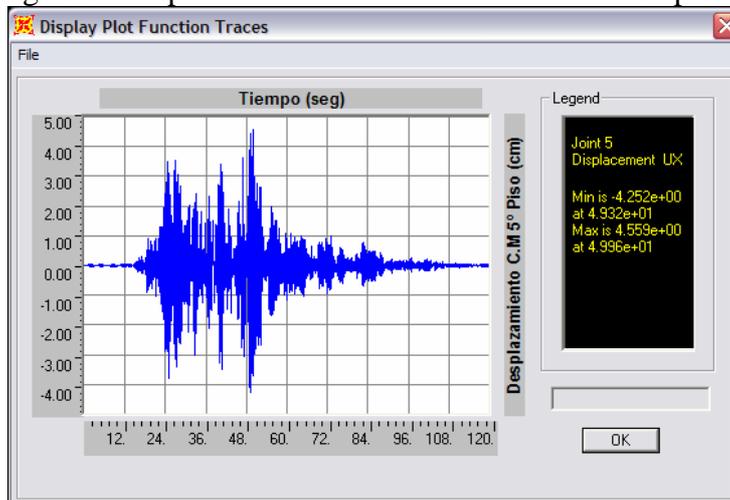


Fig. C.6: Velocidad del Centro de Masa del 1° piso

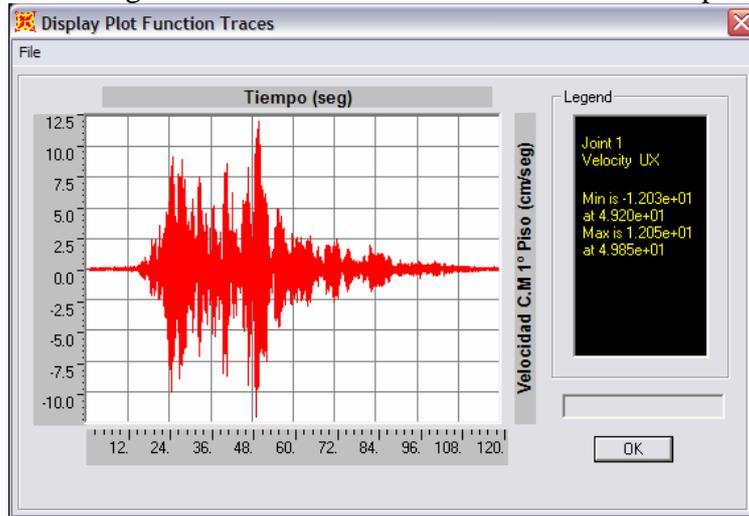


Fig. C.7: Velocidad del Centro de Masa del 2° piso

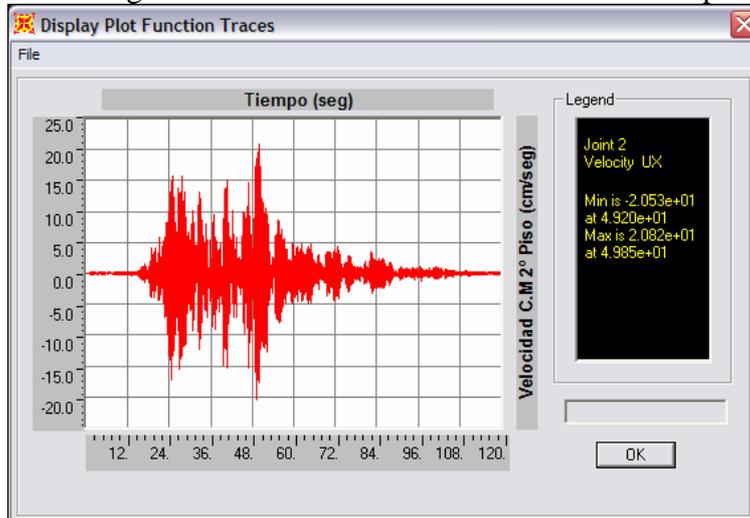


Fig. C.8: Velocidad del Centro de Masa del 3° piso

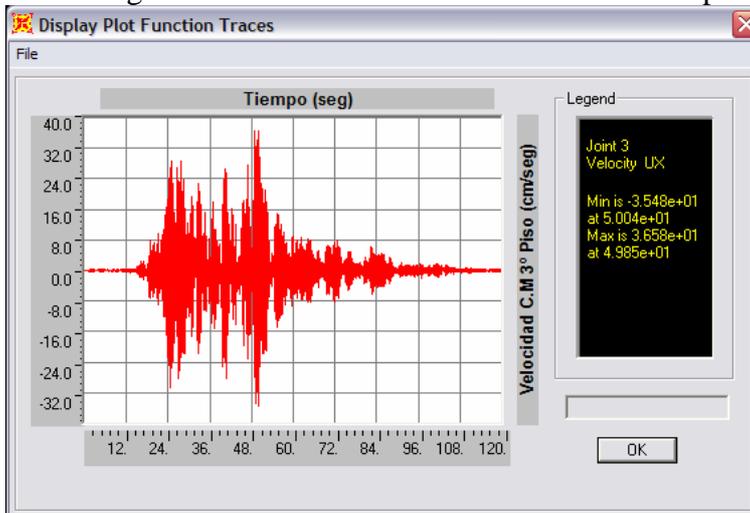


Fig. C.9: Velocidad del Centro de Masa del 4° piso

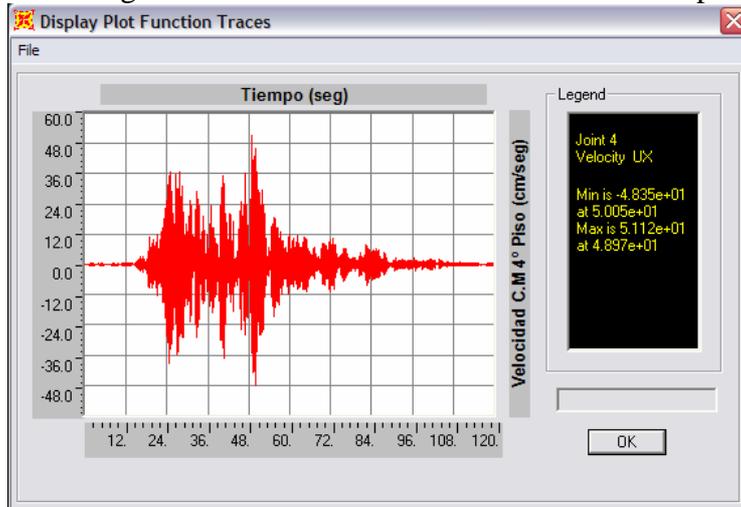


Fig. C.10: Velocidad del Centro de Masa del 5° piso

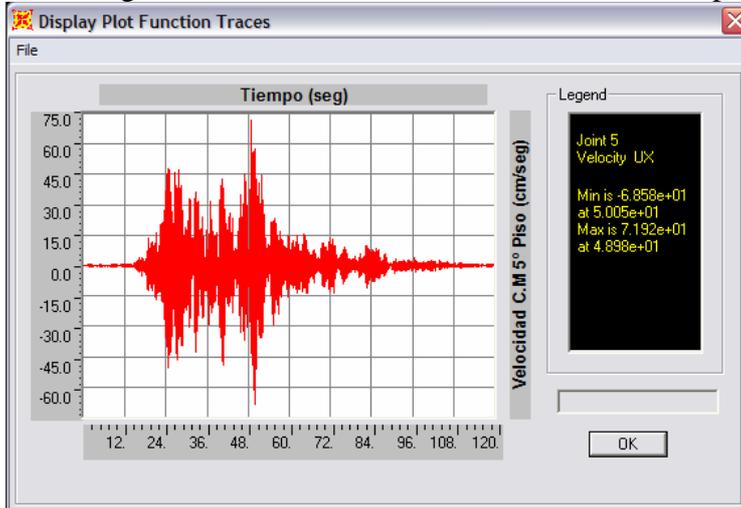


Fig. C.11: Aceleración del Centro de Masa del 1° piso

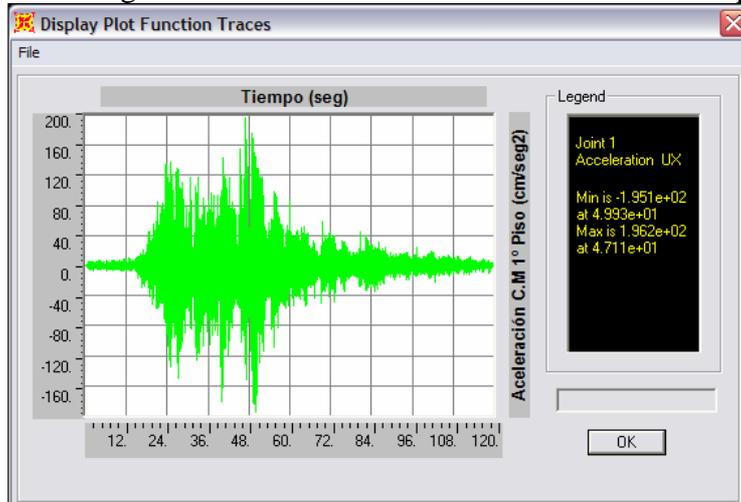


Fig. C.12: Aceleración del Centro de Masa del 2º piso

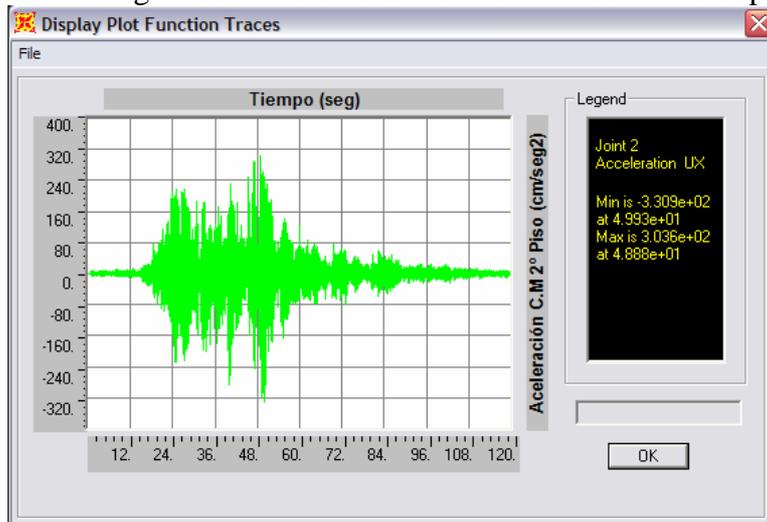


Fig. C.13: Aceleración del Centro de Masa del 3º piso

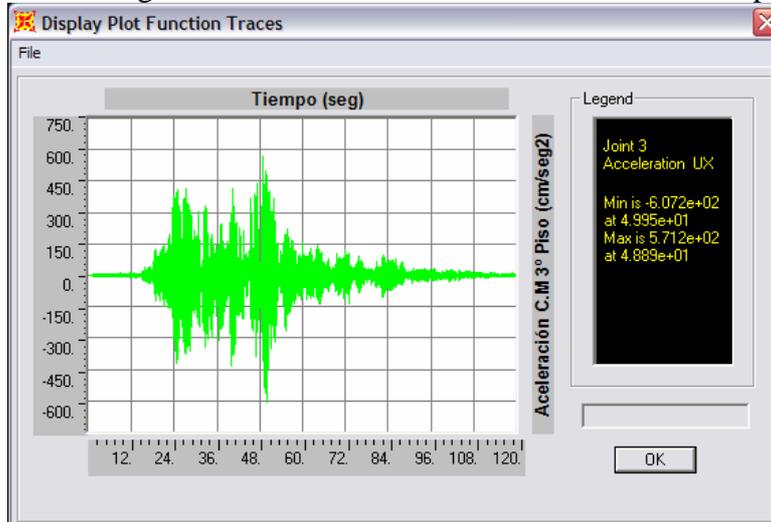


Fig. C.14: Aceleración del Centro de Masa del 4º piso

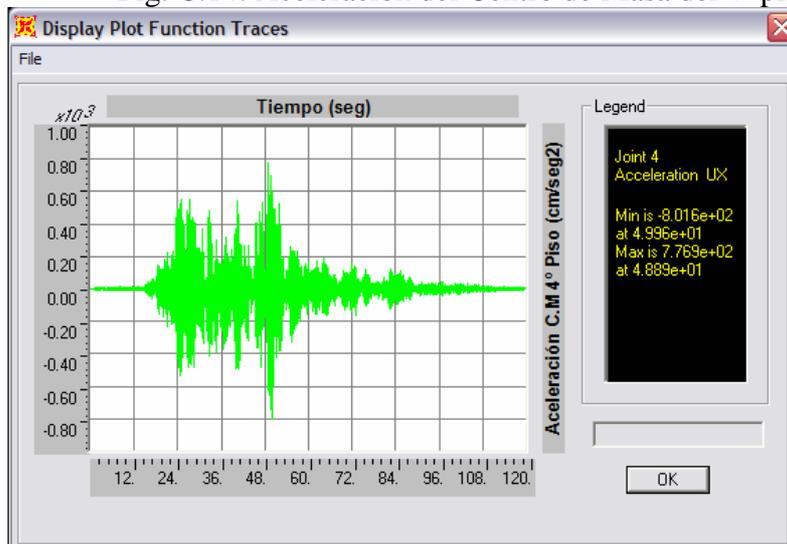


Fig. C.15: Aceleración del Centro de Masa del 5° piso

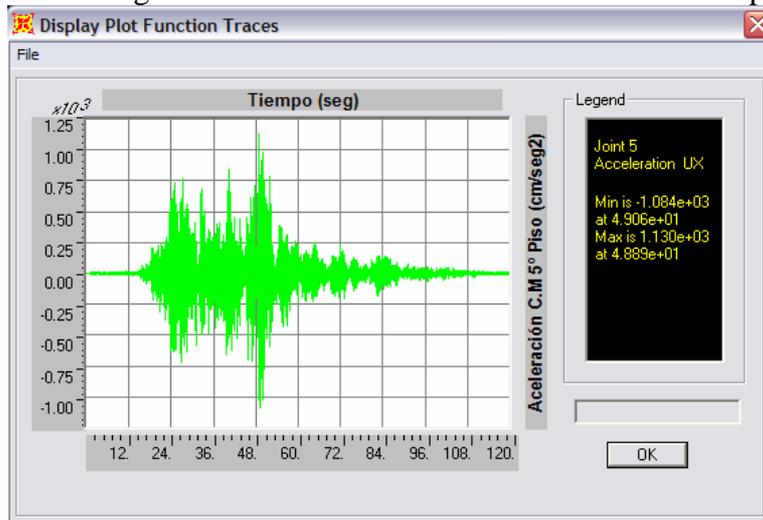


Fig. C.16: Variación del Corte Basal en el tiempo

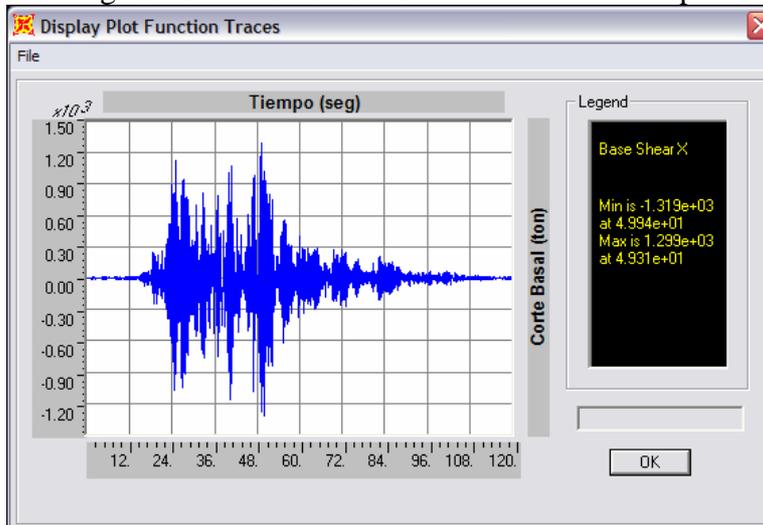
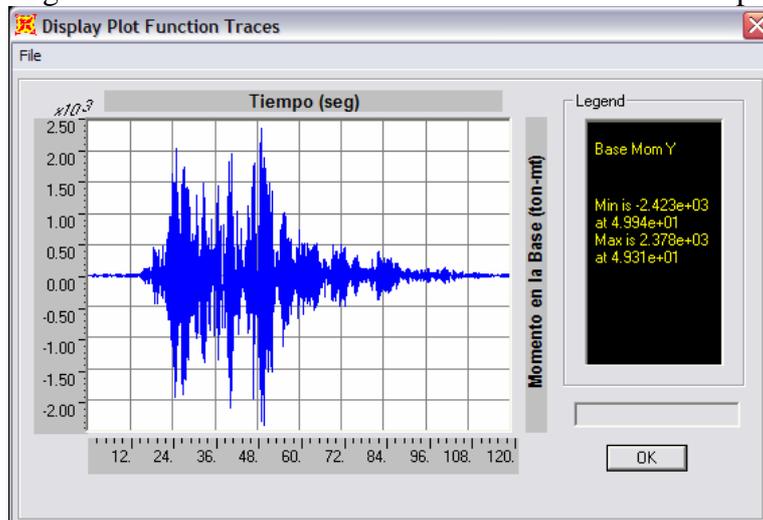


Fig. C.17: Variación del Momento en la Base en el tiempo



6.5.6 RESPUESTA FINAL DE LA ESTRUCTURA PARA UN AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO DEL 20% DEL CRÍTICO:

Fig. C.18: Desplazamiento del Centro de Masa del 1º piso

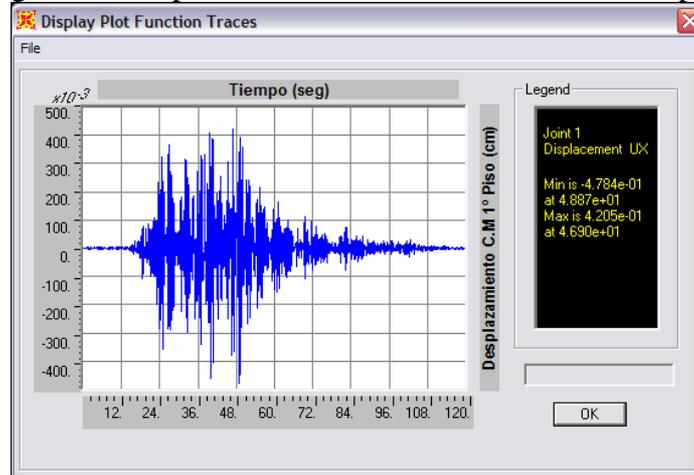


Fig. C.19: Desplazamiento del Centro de Masa del 2º piso

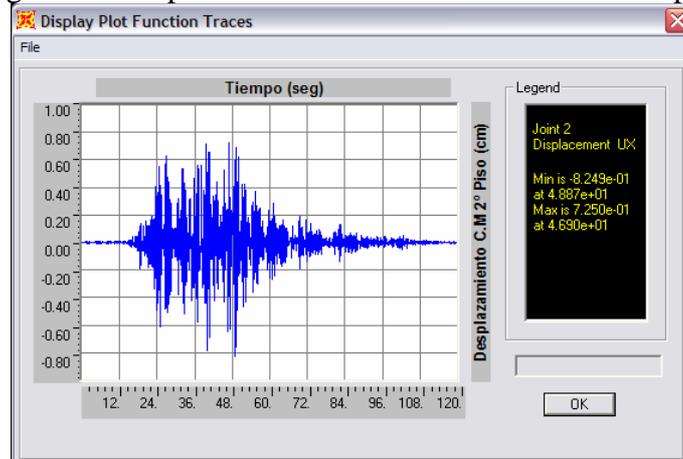


Fig. C.20: Desplazamiento del Centro de Masa del 3º piso

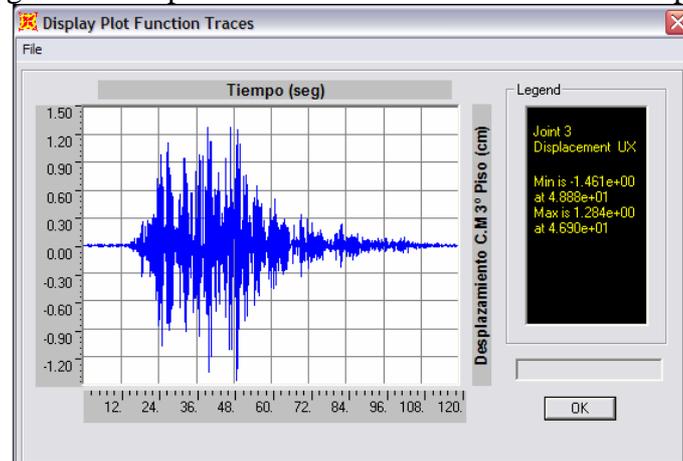


Fig. C.21: Desplazamiento del Centro de Masa del 4º piso

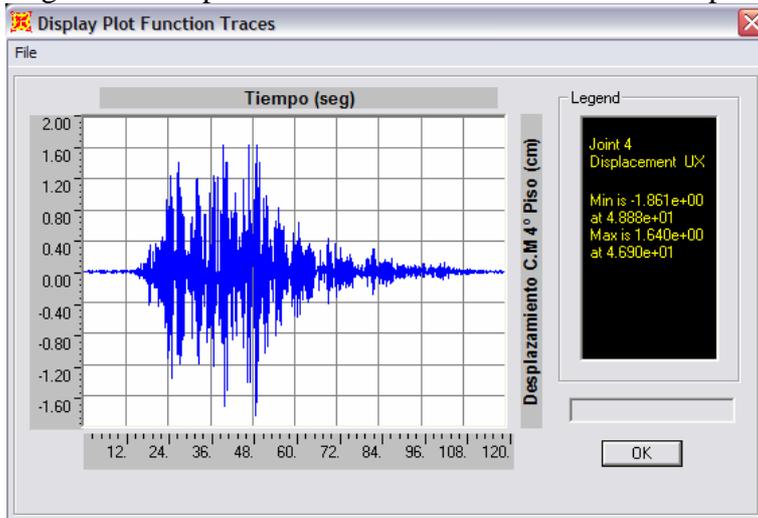


Fig. C.22: Desplazamiento del Centro de Masa del 5º piso

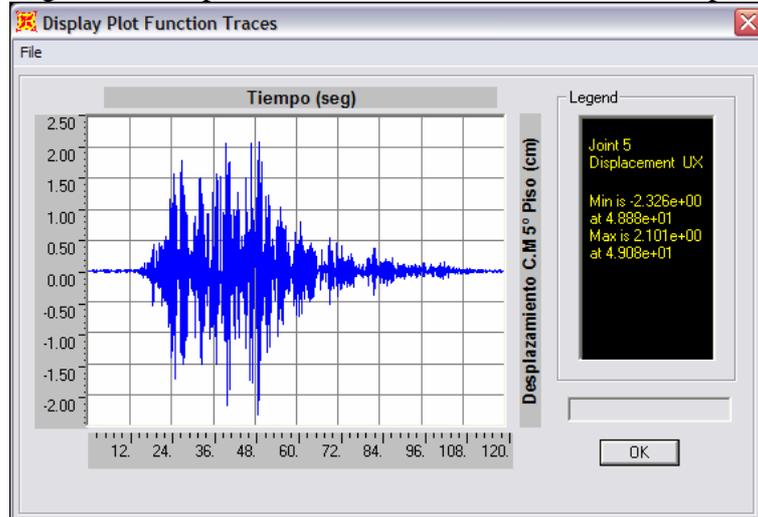


Fig. C.23: Velocidad del Centro de Masa del 1º piso

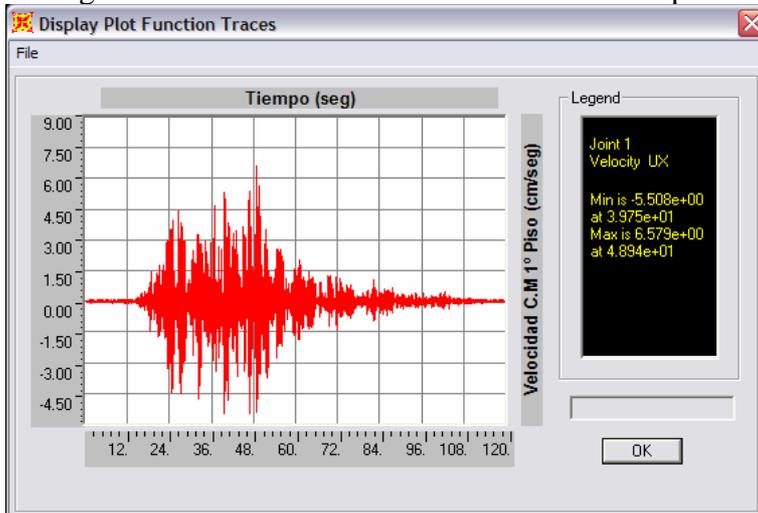


Fig. C.24: Velocidad del Centro de Masa del 2° piso

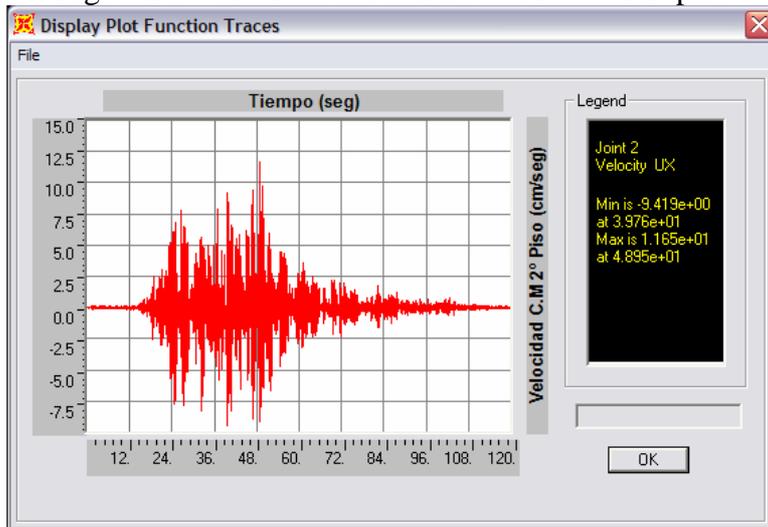


Fig. C.25: Velocidad del Centro de Masa del 3° piso

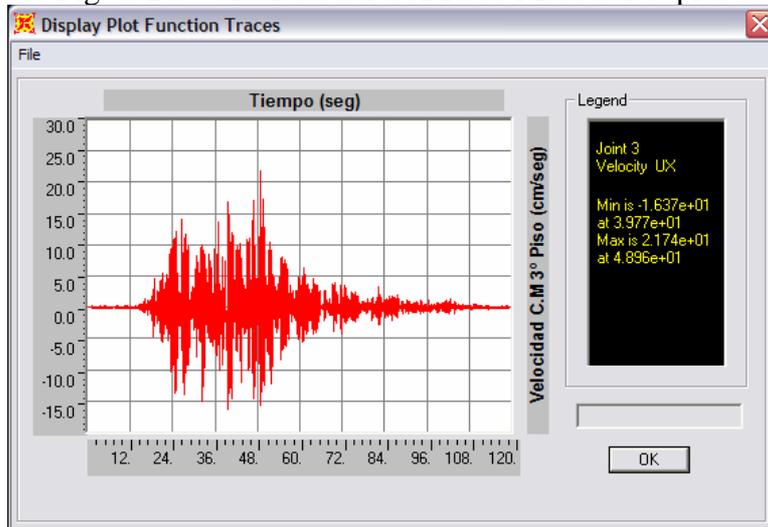


Fig. C.26: Velocidad del Centro de Masa del 4° piso

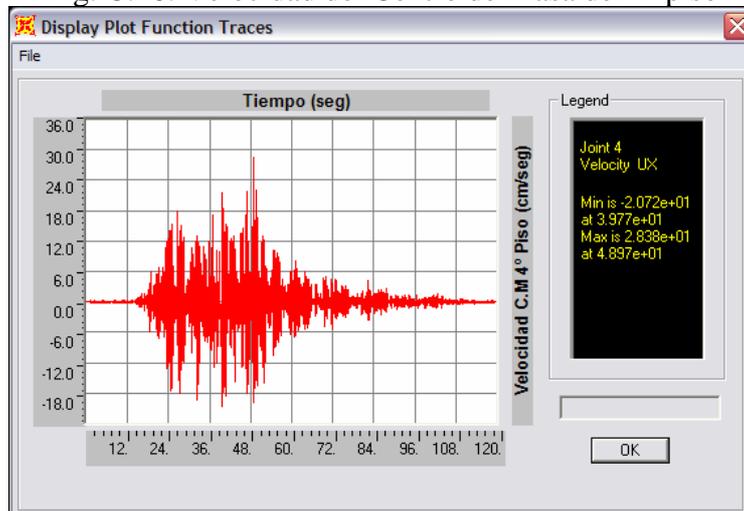


Fig. C.27: Velocidad del Centro de Masa del 5° piso

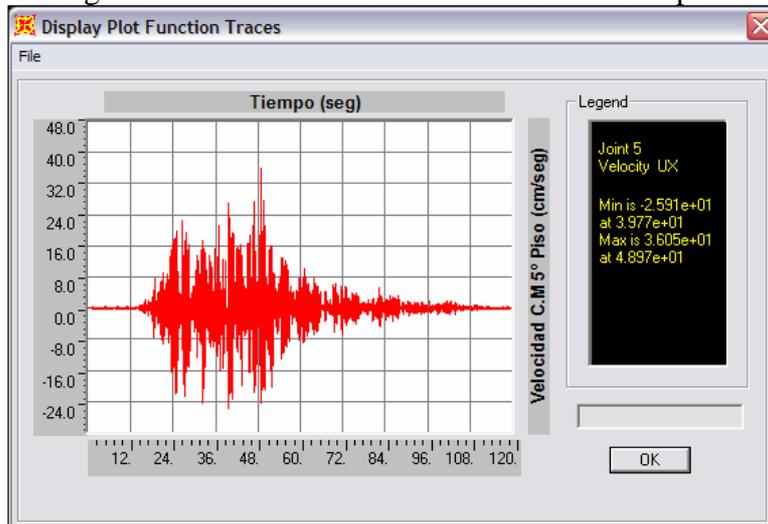


Fig. C.28: Aceleración del Centro de Masa del 1° piso

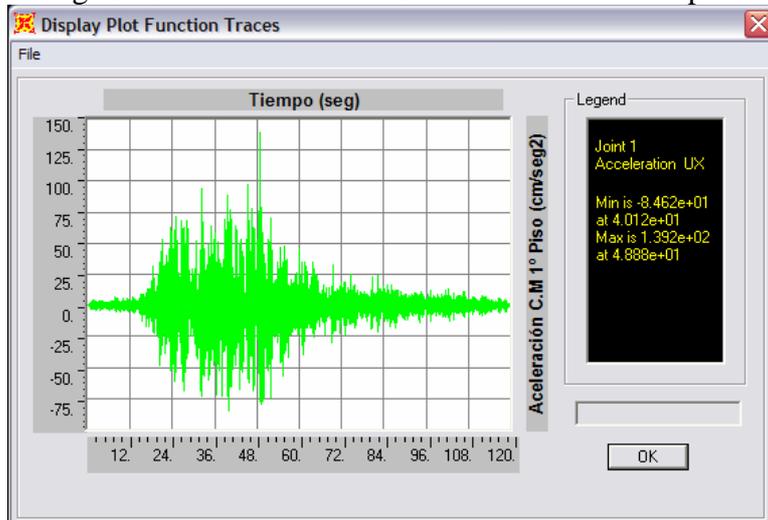


Fig. C.29: Aceleración del Centro de Masa del 2° piso

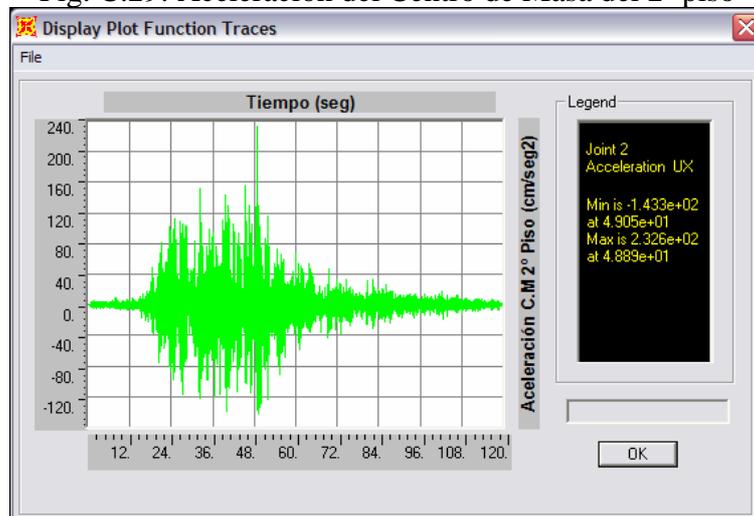


Fig. C.30: Aceleración del Centro de Masa del 3° piso

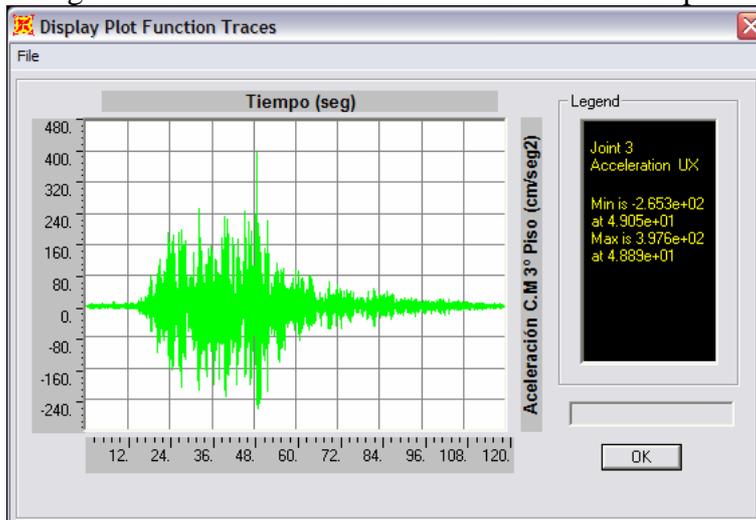


Fig. C.31: Aceleración del Centro de Masa del 4° piso con

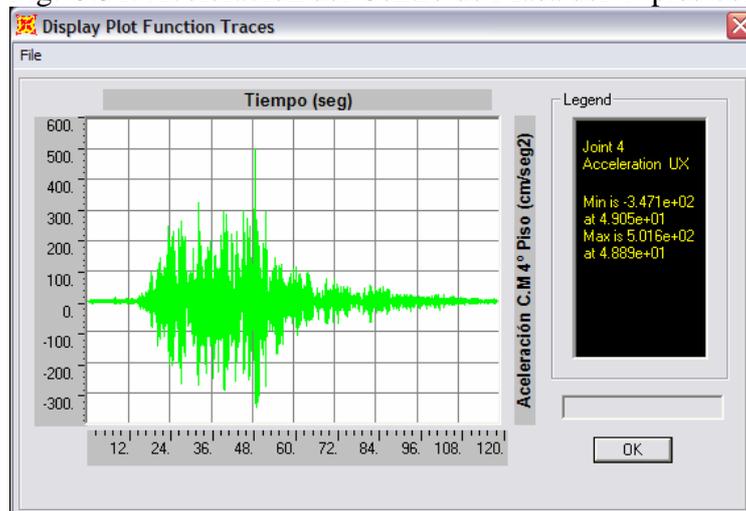


Fig. C.32: Aceleración del Centro de Masa del 5° piso

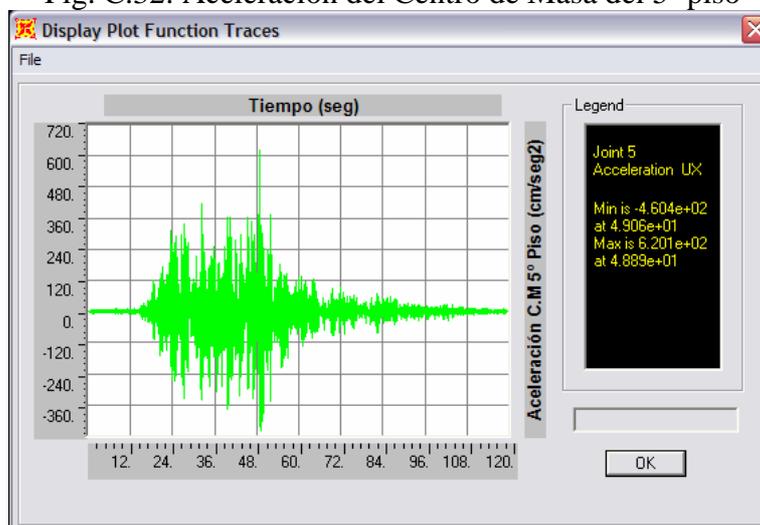


Fig. C.33: Variación del Corte Basal en el tiempo

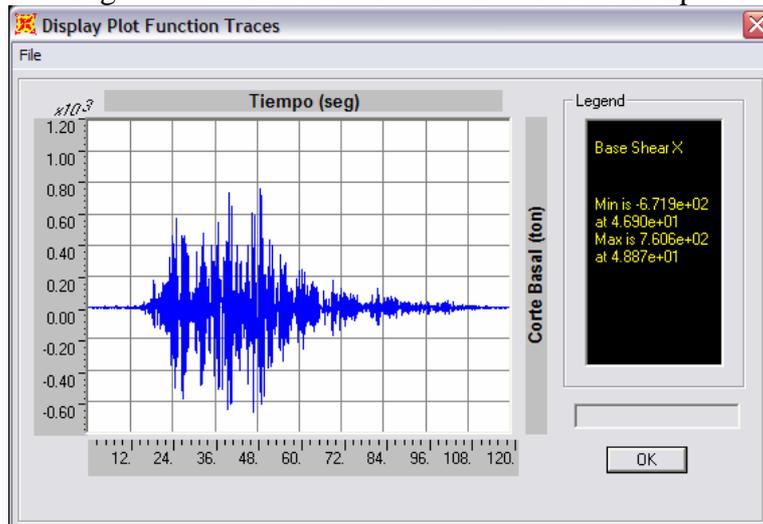


Fig. C.34: Variación del Momento en la Base en el tiempo

