



## RESUMEN

La monografía se divide en cuatro capítulos, el primero generalidades, expone una introducción a los sistemas de protección así como su justificación, objetivos y alcance del trabajo. En el segundo capítulo se describe a manera de resumen los principales sistemas de protección sísmica empleados mundialmente. En el capítulo tercero, se plantean los fundamentos de la dinámica estructural, necesaria para la comprensión de los conceptos sobre protección mediante sistemas suplementarios, se incluye un ejemplo de un sistema de un grado de libertad resuelto mediante el método de Newmark, y además resuelto con la ayuda del programa computacional SAP 2000, y se comparan los resultados arrojados por el programa con los resultados obtenidos manualmente.

En el capítulo cuarto se desarrollan los fundamentos teóricos de los sistemas pasivos de protección así como los modelos matemáticos empleados para predecir su comportamiento y finalmente se presentan ejemplos de aplicación de los sistemas antes mencionados, en un edificio, en el cual se observa la respuesta de los sistemas con y sin sistemas pasivos de protección sísmica.

En el ejemplo se ha utilizado el programa computacional SAP 2000 v10, con el cual se ha realizado un análisis tiempo-historia, la estructura de ejemplo ha sido sometida a una excitación basal correspondiente a la componente NS del registro sísmico de la ciudad chilena de El Centro.

En las conclusiones se puede observar la ventaja del uso de los sistemas pasivos de protección sísmica, se presentan comparaciones de los resultados de la respuesta del edificio sin disipadores, y con disipadores de energía.



## ÍNDICE DE LA MONOGRAFÍA

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
1.1. GENERALIDADES	6
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.3. OBJETIVOS	11
1.4. METODOLOGÍA	12
<b>CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE EN SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA</b>	<b>14</b>
2.1. SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO	15
2.2. SISTEMAS DE CONTROL PASIVO	17
2.2.1. CONTROL PASIVO CON AISLAMIENTO EN LA BASE	18
2.2.2. DISIPADORES DE ENERGÍA	22
2.2.2.1. DISIPADORES HISTERÉTICOS	22
2.2.2.1.1. DISIPADORES POR PLASTIFICACIÓN DE METALES	22
2.2.2.1.2. DISIPADORES POR FRICCIÓN	32
2.2.2.2. DISIPADORES CON COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO	34
2.2.2.2.1. DISIPADORES VISCOELÁSTICOS	34
2.2.2.2.2. DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO	36
2.2.3. SISTEMAS INERCIALES ACOPLADOS	39
2.3. SISTEMAS DE CONTROL HÍBRIDO	40
2.4. SISTEMAS DE CONTROL SEMIACTIVO	41
<b>CAPÍTULO III: ECUACIONES DEL MOVIMIENTO</b>	<b>43</b>
3.1. GENERALIDADES	43
3.2. EXCITACIÓN ARBITRARIA	44
3.3. EXCITACIÓN EN LA BASE	45
3.4. OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA EN SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD	46
3.4.1. MÉTODO DE LA ACELERACIÓN LINEAL	47
3.4.2. MÉTODO DE NEWMARK	48
3.5. EJEMPLO DE APLICACIÓN	49
<b>CAPÍTULO IV: MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS SISTEMAS PASIVOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA</b>	<b>65</b>
4.1. DISIPADORES VISCOELÁSTICOS	65
4.2. DISIPADORES VISCOELÁSTICOS DE FLUIDO	68
4.3. DISIPADORES POR PLASTIFICACIÓN DE METALES	70



<b>4.4. DISIPADORES POR FRICCIÓN</b>	<b>75</b>
<b>4.5. AISLADORES SÍSMICOS</b>	<b>78</b>
<b>4.6. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LOS DISIPADORES PASIVOS</b>	<b>80</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>103</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>106</b>



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DENUNCIA DE MODALIDAD DE GRADUACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE ESPECIALISTA

**MONOGRAFÍA**

TEMA:

**“ESTUDIO DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA EN EL DISEÑO  
SISMORESISTENTE”**

AUTOR

ING. PABLO TORRES RODAS

DIRECTOR

M.Sc. ING. ÁNGEL PINO

MAYO DE 2011

CUENCA – ECUADOR



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios sobre todo, por lo que me ha permitido vivir y me ha dado, a mis padres, hermanos y familiares por el apoyo incondicional que siempre he recibido de parte de ellos. Un agradecimiento especial al Msc. Ing. Ángel Pino, Director de la Monografía y Director de la Especialidad de Estructuras, quién supo sacarla adelante con mucho acierto. Así mismo, un agradecimiento especial al Dr. Ing. Nelson Navarro por el tiempo que dedico al presente trabajo y por sus aportes tan valiosos al mismo.



# “ESTUDIO DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA EN EL DISEÑO SISMORESISTENTE”

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1. GENERALIDADES

El diseño estructural está basado en proveer una combinación de resistencia y ductilidad a los elementos que conforman la edificación, previniendo de esta manera las fallas catastróficas, garantizando su estabilidad, salvaguardando la vida de las personas que se encuentran en su interior, se acepta un determinado nivel de daño estructural y no estructural. Dentro de la ingeniería sismoresistente, el desempeño aceptable de una estructura durante un sismo severo se basa en que el sistema estructural resistente ante fuerzas laterales sea capaz de absorber y disipar la energía proveniente del sismo de manera estable y durante un buen número de ciclos. En un sismo, una cantidad limitada de energía entra a la estructura, dicha energía es transformada en energía cinética y energía potencial de deformación, las cuales tienen que ser absorbidas o disipadas a través del calor, la energía de entrada representa el trabajo realizado por la fuerza de corte basal en la cimentación debida al desplazamiento del terreno y contiene el efecto de las fuerzas de inercia de la estructura. La disipación de la energía ocurre en las rotulas plásticas dúctiles, debidamente detalladas, y que son regiones de daño concentrado.

Como se dijo anteriormente, un movimiento sísmico introduce a la estructura una cantidad finita de energía, la cual es dividida en dos por el edificio: energía disipada, y energía absorbida. La energía absorbida a su vez se divide en energía cinética, la cual se traduce en el movimiento de la masa del edificio, y la energía de deformación elástica que corresponde a la deformación temporal de los elementos estructurales del edificio. La estructura disipa energía básicamente por dos medios, por el amortiguamiento propio, la cual se denomina energía de amortiguamiento; y a través del comportamiento no lineal en los elementos estructurales, la que recibe el nombre de energía histerética.

En algunas estructuras se deben tomar precauciones adicionales que en las edificaciones comunes, tales como hospitales, centros de salud, escuelas, colegios, retenes policiales, etc. debido a que son centros de atención en caso de un evento sísmico extremo, y deben permanecer funcionales luego del sismo. Experiencias recientes con dos de las instalaciones más nuevas de hospitales en el sismo de Northridge (1994) y Kobe (1995) ha llevado a cuestionar la efectividad de las estructuras convencionales y de los métodos de análisis empleados para valorar su respuesta (Xavier Cahís, 2000) [25], destacando:

- La opacidad de los sistemas de cálculo empleados.
- La imposibilidad de determinar la demanda de ductilidad ante un evento sísmico y dónde se va a producir.
- La presencia de fallos frágiles en sistemas presumiblemente dúctiles.
- La complejidad de detectar el daño en estructuras metálicas cuando éstas no manifiestan desplome.
- El elevado costo en la reparación que supone el comportamiento dúctil basado en una disipación de la energía en el seno estructural y de forma dispersa.

Una tendencia actual en el diseño sismoresistente consiste en buscar sistemas que localicen la demanda de ductilidad en elementos predeterminados (Bozzo y Barbat, 1999)[25], ello supone ventajas como:

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

Procedimientos de análisis y diseño han sido desarrollados con la incorporación de sistemas de protección sismoresistente en las edificaciones, el desempeño estructural puede ser mejorado si una fracción de la energía de entrada puede ser absorbida por algún tipo de dispositivo suplementario, que tienen por objeto el control de desplazamientos de una estructura mediante la modificación de sus propiedades dinámicas, la disipación de la energía introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos, y el control con dispositivos que ejercen fuerzas que contrarresten la acción sísmica.

## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Cinturón de Fuego del Pacífico está situado en las costas del océano Pacífico y se caracteriza por concentrar algunas de las zonas de subducción más importantes del mundo, lo que ocasiona una intensa actividad sísmica y volcánica en las zonas que abarca.

Incluye países como Argentina, Chile, Perú, **Ecuador**, Colombia, Centroamérica, México, los Estados Unidos, Canadá, luego dobla a la altura de las Islas Aleutianas y baja por las costas e islas de Rusia, China, Japón, Taiwán, Filipinas, Indonesia, Papúa Nueva Guinea, Australia y Nueva Zelanda.



El lecho del océano Pacífico reposa sobre varias placas tectónicas, las cuales están en permanente fricción, las placas de la corteza terrestre se hunden a gran velocidad (varios centímetros por año) y por ende, acumulan tensión, cuando esa tensión se libera, origina terremotos en los países del cinturón.

El Cinturón de Fuego es el resultado directo de la tectónica de placas, el movimiento y la colisión de las placas de la corteza terrestre, la sección oriental del Cinturón es el resultado de la subducción de la placa de Nazca y la placa de Cocos debajo de la placa Sudamericana que se desplaza hacia el oeste. La placa de Cocos se hunde debajo de la placa del Caribe en Centroamérica. Una porción de la placa del Pacífico, junto con la pequeña placa Juan de Fuca se hunden debajo de la placa Norteamericana.

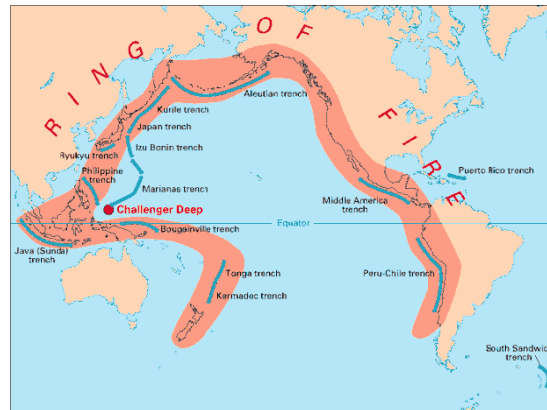
La placa de Nazca es una placa tectónica oceánica que se encuentra en el océano Pacífico oriental, junto a la costa occidental de América del Sur, el borde oriental de la placa se encuentra en una zona de subducción bajo la placa Sudamericana, lo que ha dado origen a la cordillera de los Andes y a la fosa peruano-chilena. El límite austral de la placa de Nazca es divergente con respecto a la placa Antártica, al igual que el límite occidental con la placa del Pacífico y en el norte con la placa de Cocos.

Existen tres microplacas, específicamente en las zonas de unión entre las placas. La de las islas Galápagos se encuentra en la unión de las de Nazca, del Pacífico y de Cocos. La de Juan Fernández en el borde entre la del Pacífico, la de Nazca y la Antártica, y la de Isla de Pascua en el límite entre Nazca y del Pacífico, un poco más al norte que la de Juan Fernández.

La zona de subducción que ocurre en las costas sudamericanas ha provocado que esta zona sea altamente sísmica y volcánica. Cabe destacar el gran terremoto de Valdivia de 1960, cuya magnitud superó los 9,5° en la escala de Richter, que ha sido el más fuerte movimiento telúrico medido con instrumentos en la historia de la humanidad.



## GRÁFICO N° 1: CINTURÓN DE FUEGO DEL PACÍFICO



FUENTE:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%B3n\\_de\\_Fuego\\_del\\_Pac%C3%ADfico](http://es.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%B3n_de_Fuego_del_Pac%C3%ADfico)

[26]

Debido a que el Ecuador, se encuentra ubicado en el cinturón de Fuego del Pacífico, una zona de alta sismicidad, resulta entonces importante el estudio de dispositivos suplementarios que mejoran el desempeño estructural de los edificios.

Nuestro país no ha estado libre de actividad sísmica, basta recordar un poco el historial sísmico del Ecuador, para comprender que es necesario profundizar los conocimientos en el área de la ingeniería sismoresistente y tomar medidas que permitan salvaguardar nuestras vidas en caso de un evento extremo, por lo que se resume a continuación los principales sismos ocurridos, obtenidos de la información recibida en el módulo de diseño sismoresistente de la especialidad, a cargo del Ing. Enrique García:

1645-03-15. Riobamba. Coordenadas: 1.68°S - 8.78°W. Ms=7.0. Intensidad: 9 K en el epicentro y 5 K en Quilo. Falla asociada Huambaló-Sumaco.

1653-07-09. Guayaquil. Coordenadas: 2.19°S - 78.89°. Ms=5.7. Intensidad -7K. Asociación con la falla regional de Pallatanga.

1674-08-29. San Miguel de Chimbo. Coordenadas: 1.70°S -79.03°W. Ms=7.7. Intensidad: 10 K, en el epicentro, y 8 K en Riobamba. Asociación con falla regional de Pallatanga.

1687-11-22. Ambato. Coordenadas: 1.30°S-78.60°W. Ms=5.7. Intensidad: 8 K. Asociación con sistema de fallas regionales de Baeza- Reventador.



1698-06-20. Ambato. Coordenadas:  $1.18^{\circ}\text{S}$ - $78.70^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=7.7$ . Intensidad: 10 K. Asociación con sistema de fallas regionales Pallatanga- Naranjal-Bucay.

1749-01-20. Loja. Coordenadas:  $4.0^{\circ}\text{S}$ - $79.2^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=6.3$ . Intensidad: 8 K. Asociación con sistema de fallas del Sur.

1797-02-04. Riobamba. Coordenadas:  $1.68^{\circ}\text{S}$  y  $78.78^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=8.3$ . Intensidades: 7 - 11 K. Asociación con falla de Pallatanga. Se estima 44.000 muertos.

1856-02-10. Cuenca. Coordenadas:  $2.9^{\circ}\text{S}$  y  $79.0^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=5.7$ . Intensidad = 7 K. Asociación con sistema de fallas regionales: Girón. Azogues-Atilo.

1868-05-17. Pillaro. Coordenadas:  $1.16^{\circ}\text{S}$ - $78.54^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=5.7$ . Intensidad = 7 K en el epicentro y 8 K en Ambato. Asociación con sistema de fallas Baeza-Reventador

1904-05-04. Loja. Coordenadas:  $4.0^{\circ}\text{S}$ - $79.2^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=5.7$ . Intensidad = 7 K. Asociación con sistema de fallas de la región sur.

1906-09-28. Pallatanga. Coordenadas:  $2.00^{\circ}\text{S}$ - $79.0^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=7.5$ . Profundidad 150km. Intensidad: 6 k en Guayaquil. Asociación con fallas regionales de Pallatanga.

1913-02-28. Girón. Coordenadas:  $3.15^{\circ}\text{S}$ - $79.15^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=6.5$ . Intensidad: 7 k en Girón. Asociación con falla de Girón.

1918-09-07. Baños. Coordenadas:  $1.40^{\circ}\text{S}$ - $78.39^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=5.7$ . Intensidad: 7 K. Asociación con fallas regionales de Pallatanga-Huambaló.

1924-03-03. Guano. Coordenadas:  $1.60^{\circ}\text{S}$ - $78.63^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=5.7$ . Intensidad: 7 K. Asociado con sistema de fallas Pallatanga.

1924-07-22. Guayaquil. Coordenadas:  $2.00^{\circ}\text{S}$ - $80.00^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=6.5$ . Profundidad 250km. Intensidad: Sin reportes.

1933-10-02. Guayaquil. Coordenadas:  $2.00^{\circ}\text{S}$ - $81.00^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=6.9$ . Intensidad: 7 K en el epicentro y 6 K en Guayaquil. Asociación con la Fosa Ecuador.

1946-03-29. Guayaquil. Coordenadas:  $1.70^{\circ}\text{S}$ - $80.80^{\circ}\text{W}$ . Sin Magnitud. Intensidad: 7 K. Asociada con la parte central de la Fosa Ecuador.

1949-08-05. Ambato. Coordenadas:  $1.50^{\circ}\text{S}$ - $78.25^{\circ}\text{W}$ .  $M_s=6.8$ . Profundidad: 60 km. Intensidad: 11 K. Asociada con la Falla Baños-Píllaro.



1956-1956 03-02. Morona-Santiago. Coordenadas:  $3.50^{\circ}\text{S}-79.00^{\circ}\text{W}$ . Ms=6.5. Profundidad: 100 km. Intensidad: 7 K en el epicentro y 5 K en Azogues. Asociada con la Falla Yacumbí-Mendez.

1958-05-25. Cumbaratza. Coordenadas:  $3.12^{\circ}\text{S}-78.09^{\circ}\text{W}$ . Ms=6.5. Profundidad: 29 km. Intensidad: 7 K en el epicentro. Asociado con las Fallas de Cabalgamiento Oriental.

1961-04-08. La Moya. Coordenadas:  $2.11^{\circ}\text{S}-79.11^{\circ}\text{W}$ . Ms=6.6. Profundidad: 47 km. Intensidad: 8 K. Asociada con la Falla Pallatanga.

1963-05-10. Sucua. Coordenadas:  $2.12^{\circ}\text{S}-77.51^{\circ}\text{W}$ . Ms=6.8. Profundidad: 25 km. Intensidad: 7 K. Asociado con las Fallas de Cabalgamiento Oriental.

1970-12-10. Tumbes. Coordenadas:  $3.97^{\circ}\text{S}-80.66^{\circ}\text{W}$ . Ms=7.1. Profundidad: 15 km. Intensidad: 10 K en Tumbes y 5 K en Azogues. Asociado con la zona de subducción.

1971-07-27. Gualaquiza. Coordenadas:  $2.79^{\circ}\text{S}-77.35^{\circ}\text{W}$ . Ms=7.5. Profundidad: 88 km. Intensidad: 7 K. Asociado con las Fallas de Cabalgamiento Oriental.

1980-08-18. Pascuales. Coordenadas:  $1.98^{\circ}\text{S}-80.03^{\circ}\text{W}$ . Ms=5.4. Profundidad: 74 km. Intensidad: 7 K en Guayaquil. Asociado con las fallas del Golfo y la zona de subducción.

1995-10-03. Macas. Coordenadas:  $2.75^{\circ}\text{S}-77.88^{\circ}\text{W}$ . Ms=7.0. Profundidad: 24 km. Intensidad: 7 K en Macas. Asociado con las falla Santiago- Upano.

1998-10-03. Macas. Coordenadas:  $2.75^{\circ}\text{S}-77.88^{\circ}\text{W}$ . Ms=7.0. Profundidad: 24 km. Intensidad: 7 K en Macas. Asociado con las falla Santiago- Upano.

Considerando lo antes mencionado, se plantea como criterio el uso de sistemas suplementarios en edificios para mejorar su desempeño y comportamiento estructural ante eventos sísmicos severos.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVOS GENERALES**

El objetivo general de la presente monografía es realizar un estudio descriptivo y analítico de diferentes tipos de disipadores de energía durante eventos sísmicos empleados en las edificaciones, recopilados en la literatura técnica

disponible, incluyendo los fundamentos teóricos de los mismos y su modelación matemática, así como desarrollar ejemplos prácticos de aplicación.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir los diferentes tipos sistemas empleados en la protección sísmica de edificaciones.
- Plantear los fundamentos teóricos y modelos matemáticos de los disipadores de energía histeréticos y viscoelásticos.
- Determinar los parámetros necesarios para el análisis de estructuras con disipadores de energía.
- Desarrollar ejemplos prácticos de aplicación de los disipadores de energía.
- Verificar la validez de los resultados entregados por el programa computacional SAP 2000 en el análisis dinámico.

### **1.4. METODOLOGÍA**

Para la realización de la presente monografía se empleó información de las investigaciones realizadas hasta el momento, recopiladas de diversas fuentes, así como de diferentes recomendaciones dadas por los fabricantes de los disipadores de energía de edificios mundialmente reconocidos, las que han sido citadas a lo largo del documento.

La monografía se divide en cuatro capítulos, el primero generalidades, expone una introducción a los sistemas de protección así como su justificación, objetivos y alcance del trabajo. En el segundo capítulo se describe a manera de resumen los principales sistemas de protección sísmica empleados mundialmente. En el capítulo tercero, se plantean los fundamentos de la dinámica estructural, necesaria para la comprensión de los conceptos sobre protección mediante sistemas suplementarios, se incluye un ejemplo de un sistema de un grado de libertad resuelto mediante el método de Newmark, y además resuelto con la ayuda del programa computacional SAP 2000, y se comparan los resultados arrojados por el programa con los resultados obtenidos manualmente, con lo que se verifica su validez.

En el capítulo cuarto se desarrollan los fundamentos teóricos de los sistemas pasivos de protección así como los modelos matemáticos empleados para predecir su comportamiento y finalmente se presentan ejemplos de aplicación de los sistemas antes mencionados, en un edificio, en el cual se observa la respuesta de los sistemas con y sin sistemas pasivos de protección sísmica.

En el desarrollo de la parte analítica del trabajo se ha utilizado el programa computacional SAP 2000 v10, con el cual se ha realizado un análisis tiempo-



historia (paso a paso), para ello la estructura de ejemplo ha sido sometida a una excitación basal correspondiente a la componente NS del registro sísmico de la ciudad chilena de El Centro producido en 1940.

Finalmente se emiten las conclusiones en las que se puede observar la ventaja del uso de los sistemas pasivos de protección sísmica, se presentan comparaciones de los resultados de la respuesta del edificio sin disipadores, y con disipadores de energía.

## CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE EN SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

Los sistemas de protección sísmica empleados en la actualidad comprenden desde dispositivos relativamente sencillos como los disipadores de energía hasta avanzados sistemas de protección activos que demandan gran cantidad de energía para su funcionamiento y contrarrestan directamente los efectos del sismo mediante actuadores. Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y a diferencia del resto de sistemas no precisan de aporte energético para funcionar.

El control estructural ante sollicitaciones sísmicas se está planteando como una alternativa al diseño sismoresistente convencional, los sistemas sismoresistentes avanzados tienen por objeto el control de desplazamientos de una estructura haciendo uso de alguno de los siguientes recursos:

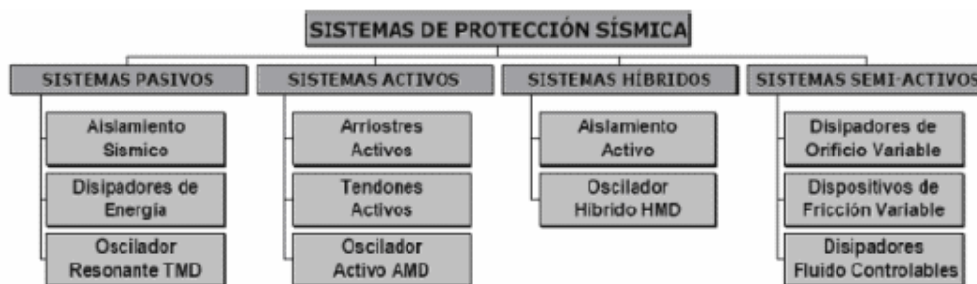
- Modificación de las propiedades dinámicas del edificio
- Disipación de la energía introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos
- Control con dispositivos que ejerzan fuerzas que contrarresten la acción sísmica

Se pueden clasificar los sistemas de protección sísmica de una manera general en cuatro categorías básicas:

1. Sistemas de control activo
2. Sistemas de control pasivo
3. Sistemas de control semi-activo
4. Sistemas de control híbrido

En el siguiente cuadro sinóptico se puede observar una sub clasificación de los mismos, que a continuación será descrita a detalle:

**GRÁFICO N°2: SISTEMAS DE CONTROL SÍSMICO**



**FUENTE:** Juan Pablo Pardo. Control de la Respuesta dinámica de Estructuras [16]

Los sistemas pasivos se clasifican en sistemas de aislamiento de base, de disipación de energía y en sistemas inerciales acoplados, las propiedades más valiosas de los sistemas pasivos son su robustez, no dependen de fuentes de energía, son mecánicamente simples y su costo es competitivo, existen en el mundo en la actualidad cientos de edificios construidos con estos sistemas. Los sistemas activos contrarrestan directamente los efectos del sismo mediante actuadores. La gran demanda de energía que comporta su actuación ante un sismo severo y la complejidad de los algoritmos de control los convierte en sistemas poco robustos. Los sistemas híbridos y semi-activos nacen ante la necesidad de respuesta en una banda amplia de frecuencias y de menor consumo energético.

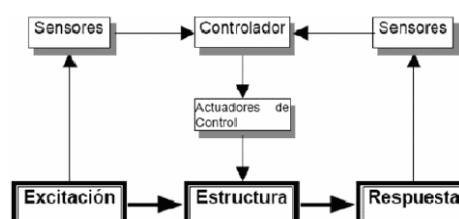
## 2.1. SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO

Los sistemas de control activo contrarrestan directamente los efectos del sismo mediante actuadores de fuerza situados en el seno estructural, requieren una gran demanda de energía para su funcionamiento, y consisten en:

1. Sensores situados en la propia estructura y que son empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa, variables de la respuesta estructural, o de ambos tipos.
2. Sistemas controladores que se basan en las medidas de los sensores y calculan a través de un algoritmo de control la fuerza a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos.
3. Actuadores que por lo general son alimentados por fuentes de energía externa para ejercer fuerzas.

Estos sistemas son dispositivos que generan fuerzas de control para modificar la respuesta dinámica de la estructura, las que son aplicados mediante los actuadores. En el gráfico N° 3 se describe esquemáticamente el proceso.

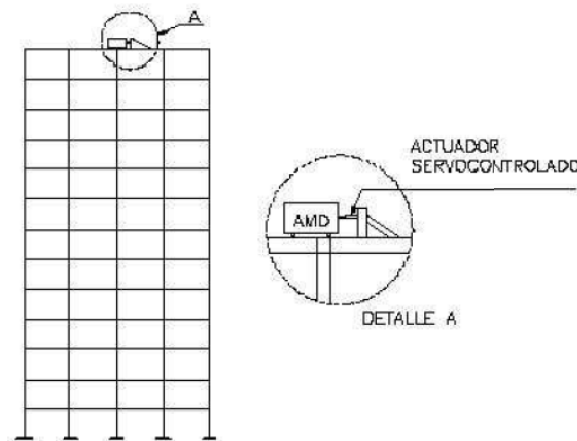
### GRÁFICO N°3: ESQUEMA FUNCIONAMIENTO SISTEMAS CONTROL ACTIVO



**FUENTE:** Juan Pablo Pardo. Control de la Respuesta dinámica de Estructuras [16]

Un ejemplo de control activo es el amortiguamiento de masa activo (“Active Mass Damper, AMD”), el cual consiste en una masa auxiliar móvil, usualmente inferior al uno por ciento de la masa total de la estructura y es instalada en una de las últimas plantas 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.

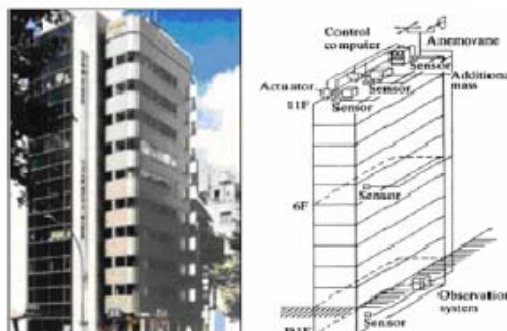
#### GRÁFICO N°4: EDIFICIO CON CONTROL DE DESPLAZAMIENTOS MEDIANTE AMD



**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

El edificio “Kyobashi Seiwa” es la primera aplicación a escala natural de la tecnología del control activo, que está formado por dos osciladores AMD, uno principal para controlar el movimiento transversal y otro secundario para reducir los movimientos traslacionales. El objetivo del sistema instalado es reducir las vibraciones producidas por vientos fuertes y sollicitaciones sísmicas moderadas.

#### GRÁFICO N°5: EDIFICIO KYOBASHI SEIWA, TOKIO



**FUENTE:** Juan Pablo Pardo. Control de la Respuesta dinámica de Estructuras [16]



En comparación con los sistemas pasivos, los sistemas activos presentan numerosas ventajas, entre las que podemos describir:

1. Mayor efectividad en control de la respuesta estructural
2. Efectividad menos sensible a las condiciones locales del suelo y a las características del sismo.
3. Aplicación ante diversos eventos: vientos y sismos.
4. Selección de los objetivos de control.

Esto permite enfatizar el confort humano sobre aspectos del movimiento estructural en momentos no críticos e incrementar la seguridad estructural ante una acción dinámica severa, pero también presenta serios inconvenientes como:

1. Elevado costo de mantenimiento
2. Dependencia respecto de las fuentes de alimentación
3. La respuesta dinámica de edificios con varios 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.

## **2.2. SISTEMAS DE CONTROL PASIVO**

Los sistemas de control pasivo emplean dispositivos relativamente simples que reducen la respuesta dinámica por medios mecánicos, son elementos de carácter reactivo cuya respuesta no es controlable y dependen únicamente de las condiciones de trabajo (o de contorno) en que se encuentren. Se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y a diferencia del resto de sistemas, no precisan de aporte energético para su funcionamiento. Intervienen alterando las propiedades dinámicas del edificio, provocando una reducción de su respuesta estructural, teniendo ventajas económicas.

Los sistemas pasivos se clasifican en sistemas de aislamiento de la base, disipación de energía y en sistemas inerciales acoplados. Los aisladores de base, se encuentra situados sobre la cimentación, soportando el edificio, y desacoplan parcialmente al edificio del movimiento del terreno, disminuyendo el ingreso energético transmitido a la superestructura y consecuentemente su respuesta estructural. Los disipadores de energía no alteran el ingreso de energía, la que depende principalmente del período fundamental y de la masa del edificio, manifestando su eficiencia maximizando la energía disipada y disminuyendo la respuesta estructural. Los sistemas inerciales acoplados introducen masas adicionales, normalmente situadas en la parte alta de los

edificios, cuya excitación absorbe parte de la energía cinética introducida por el terremoto.

Las propiedades más valiosas de los sistemas pasivos son su robustez (no dependen de fuentes de energía y son mecánicamente simples) y el costo competitivo de los edificios que los utilizan en comparación con los construidos de forma convencional. Existen en la actualidad unos centenares de edificios construidos en el mundo con estos sistemas, algunos sometidos a terremotos severos como el de Kobe. (Xavier Cahís, 2000)[25].

### **2.2.1. CONTROL PASIVO CON AISLAMIENTO EN LA BASE**

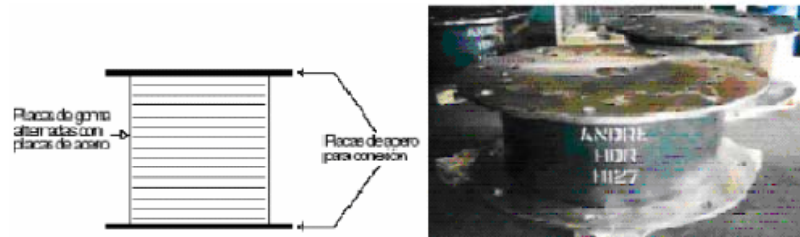
El aislamiento de base es una estrategia de diseño que se fundamenta en el desacoplamiento de la estructura del movimiento del suelo para proteger a ésta del efecto de los terremotos, se consigue a partir de dispositivos flexibles al movimiento horizontal y rígidos al desplazamiento vertical, ubicados entre los cimientos y la superestructura. Su presencia alarga el período fundamental, con lo cual desacopla de forma parcial la estructura del movimiento del terreno y limita la entrada de energía. Es frecuente la introducción del amortiguamiento estructural para limitar los desplazamientos de la superestructura a valores aceptables.

El aislamiento de la base es más recomendable en estructuras rígidas sobre terrenos rígidos, el principal inconveniente que se presenta en estructuras con una elevada relación altura-ancho son los elevados momentos de volteo que pueden suponer la pérdida de equilibrio. Además, al incrementarse la altura las ventajas obtenidas al variar el período de vibración disminuyen.

Los primeros aisladores de base utilizados en edificios fueron de neopreno, hacia el año de 1969 en Macedonia, su principal inconveniente fue su elevada flexibilidad vertical, razón por la cual no se ha vuelto a emplear.

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).

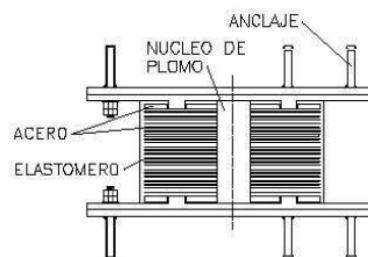
## GRÁFICO N°6: AISLADOR BASAL DE ALTO AMORTIGUAMIENTO



**FUENTE:** Juan Pablo Pardo. Control de la Respuesta dinámica de Estructuras [16]

Los aisladores de neopreno zunchado intercalan placas delgadas de acero en un bloque cúbico o cilíndrico de neopreno, su rigidez vertical aumenta considerablemente manteniendo su estabilidad lateral, estos dispositivos dotan de flexibilidad al edificio pero su capacidad disipativa resulta baja. Se han realizado pruebas con disipador de neopreno zunchado con núcleo de plomo logrando un aumento de la capacidad disipativa, que permite un mejor control en el desplazamiento de la base.

## GRÁFICO N°7: AISLADOR BASAL DE ALTO AMORTIGUAMIENTO



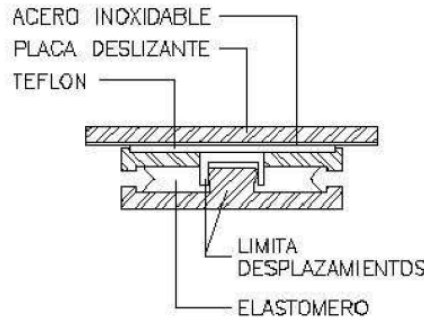
**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

Estos aisladores se han combinado con algunos de los sistemas disipadores de energía para tener en conjunto una estructura flexible con disipación en la base. (Skinner et al 1975a y b; Skinner y Mc Verry 1975, Kelly et al. 1977). En el año 1978 se fabricaron los primeros sistemas de neopreno reforzado de uso práctico.

Los aisladores de fricción trabajan en forma distinta a los aisladores de neopreno, al limitar la fuerza máxima transmitida a la estructura mediante el coeficiente de fricción, su principal ventaja es el costo y no tener prácticamente limitación en la carga vertical que puede transmitir, un inconveniente es la modelación de la fricción a lo largo del tiempo y en función de la velocidad de deslizamiento y de la presión actuante. En este sentido Constantinou (1987) determinó experimentalmente la variación de la fricción en una interfase de teflón y acero, posteriormente Mokha realizó estudios experimentales de

aisladores con superficies de teflón determinando que este material reduce la transferencia de frecuencias altas a la estructura. Kelly (1981) Ikonolmou (1982) proponen el uso de placas de teflón en los aisladores de base, tal como se indica en la figura n°8:

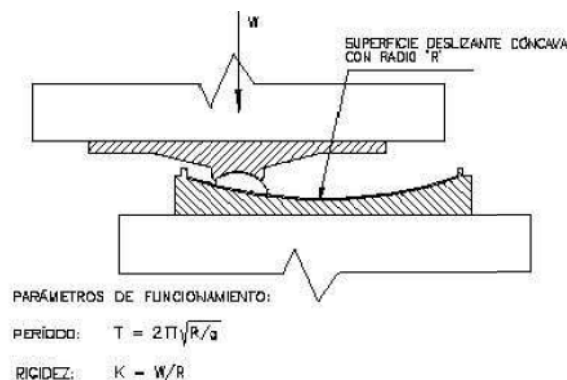
### GRÁFICO N°8: AISLAMIENTO DE BASE DE FRICCIÓN



**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

Zayas (1987) propone un sistema de aislamiento en el movimiento pendular del edificio sobre las superficies cóncavas de los aisladores de base, el período del péndulo es convertido en modo fundamental de vibración y depende solamente del radio de curvatura de la superficie deslizante del aislador. El aislador proporciona una rigidez relativa al desplazamiento lateral directamente proporcional al radio de curvatura, uno de los elementos de interés de este dispositivo es su capacidad de proporcionar períodos y desplazamientos largos manteniendo su capacidad portante (Zayas 1998) de utilidad ante la presencia de terremotos cercanos a la falla caracterizados por la presencia de pulsos largos.

### GRÁFICO N°9: AISLADOR PENDULAR

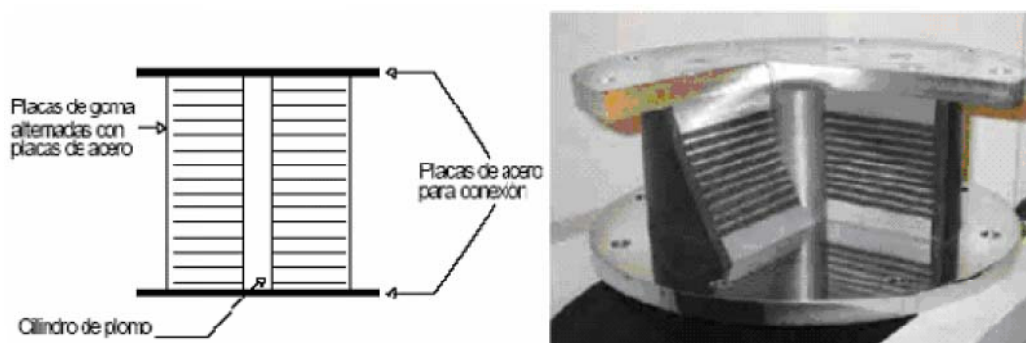


**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

Existen varias aplicaciones de sistemas de aislamiento de base en diferentes países, como por ejemplo el “Fire Command and Control Facility” en los Ángeles, este edificio es una central de emergencias que debe permanecer en funcionamiento incluso luego de un sismo severo, 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 éstos 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) [6].

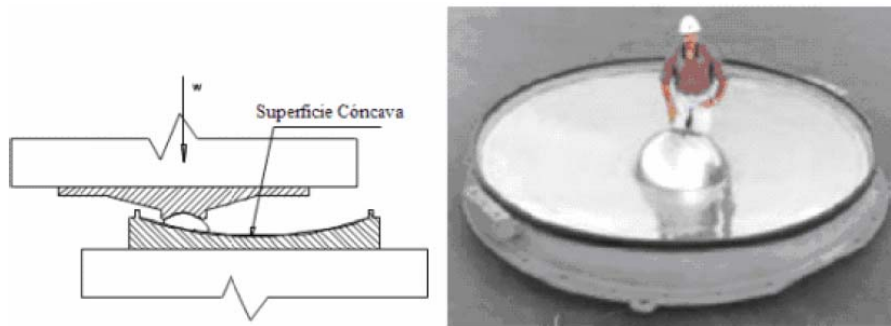
Otro ejemplo es el edificio correspondiente al hospital de docencia de la Universidad de Southern California, ubicado a 36km del epicentro del terremoto de Northridge del año de 1994, durante el terremoto el terreno bajo el edificio alcanzó una aceleración máxima de 0.49g mientras que en el interior del edificio las aceleraciones fueron entre 0.1g y 0.13g. Esto significa que la estructura fue aislada de forma efectiva de los movimientos del suelo, teniendo en cuenta que estos movimientos fueron suficientemente intensos como para provocar daños importantes en edificios adyacentes (Kelly, 1999) [6].

#### GRÁFICO N°10: AISLADOR BASAL CON NÚCLEO DE PLOMO



**FUENTE:** Juan Pablo Pardo. Control de la Respuesta dinámica de Estructuras [16]

## GRÁFICO N°11: AISLADOR BASAL DE PÉNDULO FRICCIONANTE



**FUENTE:** Juan Pablo Pardo. Control de la Respuesta dinámica de Estructuras [16]

### 2.2.2. DISIPADORES DE ENERGÍA

Se pueden dividir en dos grupos, los disipadores *histeréticos* y los disipadores *viscoelásticos*, los primeros dependen básicamente del *desplazamiento* y se basan en la plastificación de metales ya sea por flexión, cortante, torsión o extrusión, y en la fricción entre superficies. Mientras que el segundo grupo depende básicamente de la *velocidad* y pueden basarse en sólidos o fluidos viscoelásticos y fluidos conducidos a través de orificios.

#### 2.2.2.1. DISIPADORES HISTERÉTICOS

Los sistemas histeréticos, por definición, disipan energía a través de un mecanismo que es independiente del rango de aplicación de la carga. En este grupo están incluidos los disipadores metálicos que utilizan la plastificación de metales como el mecanismo disipativo y los disipadores friccionalantes que generan calor a través de la fricción de deslizamiento. Se debe notar que en todos los casos, la disipación de energía ocurre solamente después de que una determinada fuerza es excedida. Consecuentemente, los disipadores histeréticos son primariamente adecuados para aplicaciones sísmicas.

##### 2.2.2.1.1. DISIPADORES POR PLASTIFICACIÓN DE METALES

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 torsión, flexión, cortante o axial puede conducir a procesos de plastificación de metales. El acero ha sido el metal más empleado en los disipadores, entre sus virtudes están las posibilidades constructivas que ofrece, su bajo costo y elevada ductilidad.

Resultados experimentales indican que el acero ensayado bajo condiciones cuasiestáticas puede llegar a manifestar valores del límite de fluencia y tensión de máxima rotura inferiores en un 17% y 3% respectivamente a los obtenidos con velocidades de deformación del 10%/s (Wakabayashi 1986). Pese a estos resultados, la caracterización de los disipadores se ha venido realizando a partir de ensayos cuasiestáticos. Probablemente, dada la alta variabilidad de la acción sísmica y observando el buen comportamiento de los modelos adoptados basándose en la caracterización estática, la observación de una caracterización dinámica aumenta la complejidad del problema de forma desproporcionada.

En lo que al control de los dispositivos se refiere, los ensayos se enfocan en el comportamiento del metal y del dispositivo como tal, el acero (en caso de ser usado) debe ser ensayado a compresión y tracción, si el modo de falla y el comportamiento histerético está asociado a esfuerzos axiales. Si el modo de falla es por cortante, flexión o torsión, se deben hacer los respectivos ensayos para obtener su comportamiento histerético, también se deben ensayar prototipos del dispositivo ya construido y ensamblado para validar su comportamiento histerético.

El control estructural mediante disipadores metálicos tiene como requisito esencial la estabilidad de los ciclos de histéresis de los dispositivos ante cargas dinámicas, esta estabilidad es la que garantiza que las estructuras conserven su comportamiento de acuerdo con los parámetros e hipótesis de análisis y diseño. El acero ofrece una estabilidad de resistencia y ductilidad muy buena en comparación con otros metales.

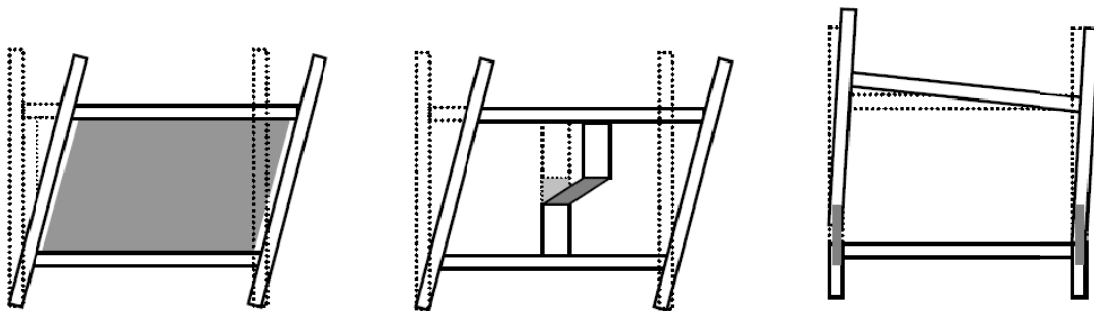
Investigaciones realizadas por Nakashima (1996) concluyen que, para reducir la respuesta estructural, es preferible disipar energía a partir de rangos bajos de fuerza y desplazamiento, en esta dirección se han ensayado disipadores con aceros de bajo límite elástico y con gran capacidad de alargamiento en relación a los aceros de construcción convencionales y de determinadas aleaciones de aluminio (Rai 1998). Estos disipadores se han basado en la plastificación por esfuerzo cortante, dando como resultado dispositivos de elevada rigidez, esfuerzos de plastificación de valores reducidos y gran uniformidad en la distribución de deformación plástica.

El empleo de disipadores histeréticos metálicos como disipadores de energía se utiliza en edificaciones de diferentes alturas y materiales, esta técnica, utiliza componentes adicionales más simples que, estratégicamente colocados en la estructura intervienen en la respuesta de la edificación controlando el daño de ésta y concentrándolo en ellos, entre sus ventajas prácticas podríamos citar (Oviedo y Del Pilar, 2009) [16]:

- Requerir procedimientos más sencillos para la verificación del estado de los dispositivos para su mantenimiento, y reemplazo durante la vida útil de la estructura.
- Utilizar menos componentes adicionales que intervienen en la respuesta de la edificación ante una excitación externa.
- La sencillez en los procedimientos de análisis y diseño estructural.
- Se pueden emplear como medida de rehabilitación o reforzamiento estructural sin comprometer de manera significativa la arquitectura de la edificación.

Los disipadores histeréticos metálicos son por lo general instalados en el plano de los pórticos del sistema estructural principal, dependiendo de la forma en que se conecten a los pórticos se pueden clasificar como de conexión directa, conexión indirecta y sistemas especiales.

### GRÁFICO N°12: AISLADOR BASAL DE PÉNDULO FRICCIONANTE

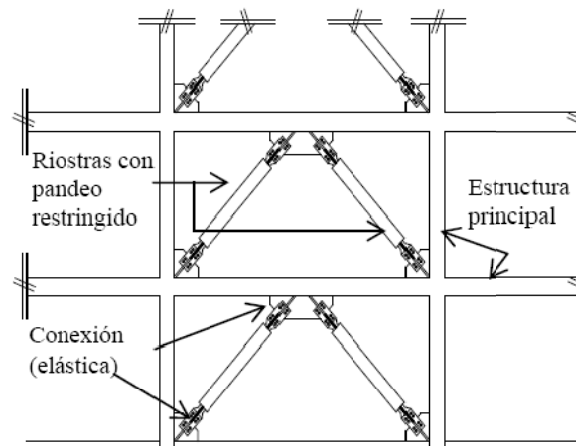


**FUENTE:** Disipadores Histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica, Juan Oviedo, María Del Pilar[12]

En el gráfico anterior, en la parte izquierda, los disipadores conectan directamente los elementos estructurales de los pisos en que el dispositivo está instalado, en el centro del gráfico, los disipadores conectan las vigas, controlando en cierta medida el desplazamiento relativo de entrepiso, a la derecha, los disipadores se instalan en las vigas o en las columnas, desconectando los elementos estructurales para que los dispositivos trabajen y disipen energía. Los disipadores de conexión directa han sido los más utilizados ya que otorgan mayor eficiencia y control de la respuesta estructural. En la figura se puede apreciar un esquema de disipadores metálicos tipo riostra con pandeo restringido que conectan la unión viga columna del piso inferior con la viga del piso superior. La conexión se hace por medio de placas soldadas o empernadas las cuales deben permanecer rígidas y elásticas.



### GRÁFICO N°13: AISLADOR BASAL DE PÉNDULO FRICCIONANTE



**FUENTE:** Disipadores Histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica, Juan Oviedo, María Del Pilar[12]

### GRÁFICO N°14: FOTOGRAFÍA KAISER PERMANENTE OAKLAND MEDICAL CENTER



**FUENTE:** Fuente propia

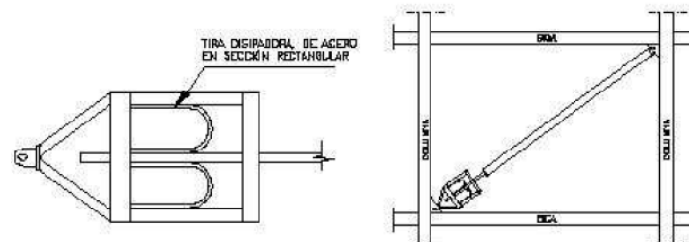
Las riostras como disipadores de energía cumplen un papel importante en las edificaciones por controlar las derivas, proporcionar rigidez adicional al sistema y mejorar el desempeño estructural, otorgando protección adicional a la estructura.

En el mundo hay varias empresas dedicadas a la producción y promoción de los dispositivos de respuesta sísmica, una de las principales es Taylor Devices de los Estados Unidos, entre otros ejemplos tenemos las compañías Japonesas Nippon Steel Corporation y Sumitomo Corporation.

## DISIPADORES POR FLEXIÓN

Se ha desarrollado numerosos dispositivos que plastifican debido a esfuerzos flectores. Skinner (1975) estudió el comportamiento de dos placas en forma de U que disipan energía por flexión pura al enrollarse por efecto del desplazamiento relativo entre sus extremos, su comportamiento histerético se mostró muy estable.

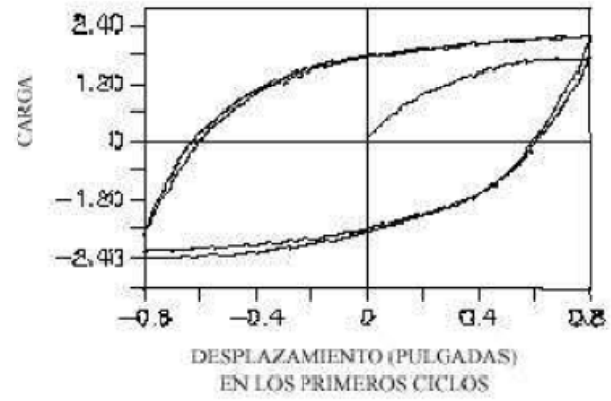
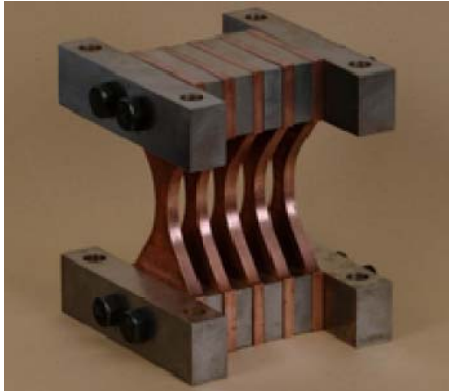
### GRÁFICO N°15: AISLADOR BASAL DE PÉNDULO FRICCIONANTE



**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

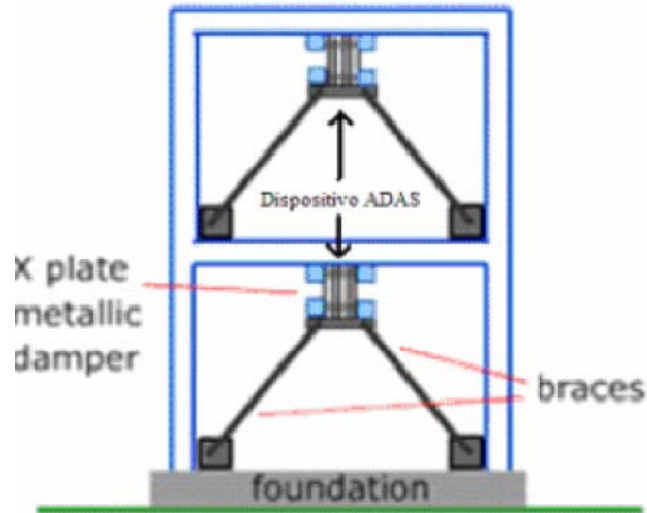
Uno de los disipadores más conocidos y estudiados es el “Added Damping and Stiffness” (ADAS), que consiste en un dispositivo formado por un conjunto de chapas en paralelo, de espesor constante y sección variable en “X”, tal que, frontalmente es similar a dos trapecios unidos por la base menor, el número de chapas en paralelo resulta variable, permitiendo ajustar el disipador a las necesidades de la estructura a la cual se incorpora. Cada placa del dispositivo se encuentra impedida de giro en ambos extremos, de forma que un desplazamiento relativo entre éstos en dirección perpendicular al plano de la placa produce una distribución de momentos flectores lineal, 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 de forma uniforme y estable, optimizando el proceso de disipación de energía.

### GRÁFICO N°16: SISTEMA ADAS Y SU RESPUESTA HISTERÉTICA EN LOS PRIMEROS CICLOS DE CARGA



**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

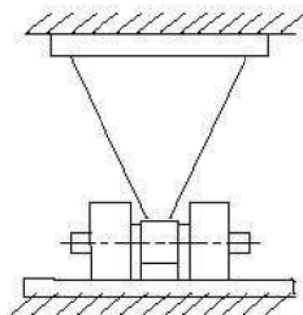
### GRÁFICO N°17: DISIPADOR DE ENERGÍA ADAS



**FUENTE:** Control de la respuesta dinámica de estructuras, Juan Pablo Pardo [16]

El dispositivo TADAS está formado por un conjunto de placas trapecoidales de acero paralelas y de espesor constante, el hecho de que las placas se encuentran con un extremo empotrado y el otro articulado, condiciona la forma trapecoidal, que posibilita también una distribución global de la plastificación. La base mayor de la placa se conecta al nivel de viga a una estructura aporticada, mientras que la otra se articula con una unión de bulón a dos contravientos dirigidos a la base de los pilares del pórtico, con un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión por curvatura simple. Al incorporar este sistema en un pórtico de acero a escala natural se ha observado que las reducciones en la respuesta son similares a las obtenidas con el sistema ADAS (Tsai 1993) [25].

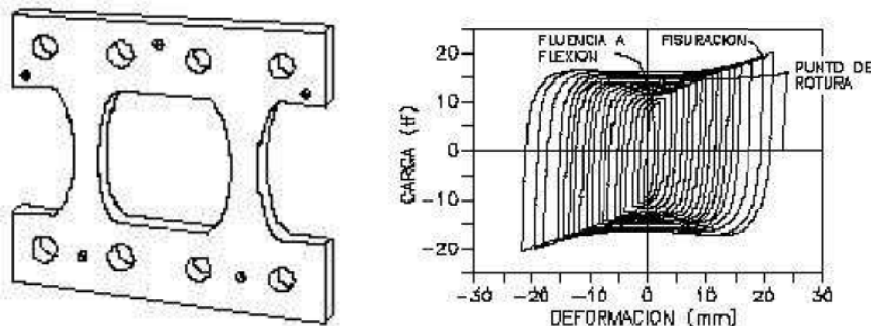
### GRÁFICO N°18: DISIPADOR DE ENERGÍA TADAS



**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

Kobori (1992) investigó el comportamiento de un disipador construido en una placa de acero mecanizada, debido a los espacios vacíos que deja entre disipadores se le conoce genéricamente como disipador tipo panel, su geometría tiene como objeto una plastificación lo más uniforme posible en la zona disipativa, su comportamiento histerético se ha revelado muy estable y de forma casi rectangular, con una respuesta más próxima a la rígido – plástica que en el caso del ADAS, la cual es más flexible.

### GRÁFICO N°19: DISIPADOR DE ENERGÍA HONEYCOMB Y SU RESPUESTA HISTERÉTICA



**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

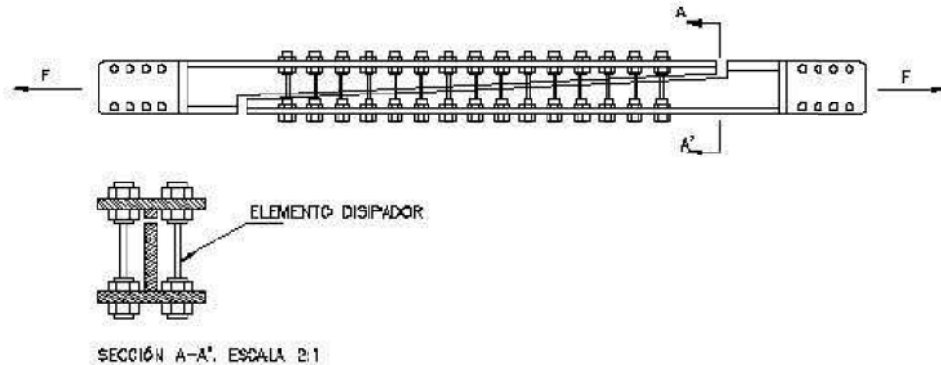


**FUENTE:** El portal de expertos en prevención de riesgos en Chile

Benavent (1998) [25] desarrolla dos disipadores, uno establecido a partir de la flexión de pernos y el otro basado en la plastificación por cortante, que permiten ser colocados como diagonales de arriostramiento, logrando así unos elementos prácticamente independientes de las acciones verticales y que resultan muy fáciles de instalar. Los disipadores están evaluados por una

amplia campaña de ensayos, a partir de la cual se establecen modelos de predicción del comportamiento y de su capacidad última disipativa bajo la acción sísmica.

**GRÁFICO N°20: DISIPADOR TIPO “DUR”**



**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

## DISPOSITIVOS A CORTANTE

El sistema estructural de los brazos excéntricos es el precursor de los dispositivos a cortante, la mayoría de los disipadores adoptan una geometría similar: sección en doble T con alma rigidizada. Popov observó que este sistema era de gran ductilidad y que permitía ciclos histeréticos estables y de gran capacidad disipativa siempre que la rigidización fuera correcta. Kasai y Popov establecieron criterios simples para determinar la aparición de la abolladura en el alma, los cuales han sido posteriormente validados para dispositivos disipadores.

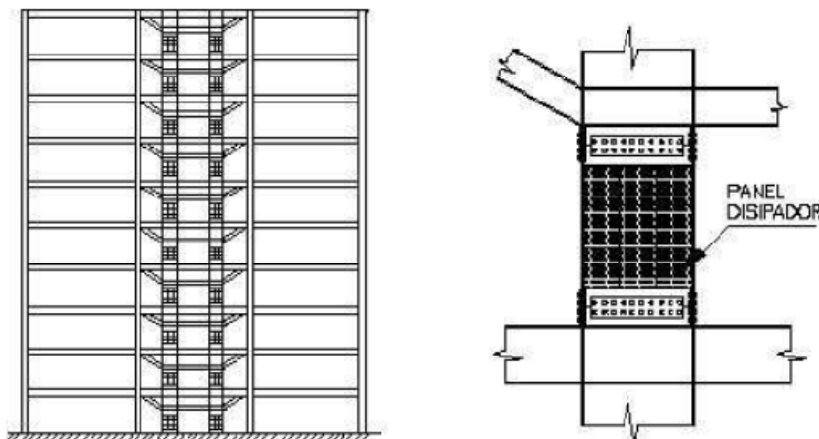
Los paneles de cortante son placas de acero rigidizada, su estructura con rigidizadores distanciados, obliga a espesores relativamente importantes para evitar el problema de la abolladura, los aceros de alta ductilidad y bajo límite elástico (80 MPa y 40-60% de alargamiento) se muestran de gran interés para permitir espesores mayores a igualdad de esfuerzo cortante, con una inferior necesidad de rigidización (Nakashima, 1995).

En el año 1997, Xavier Cahís, ensaya un diseño preliminar de un disipador por esfuerzo cortante, su cuerpo disipativo está construido a partir de un solo bloque de acero de construcción mecanizado por fresado, lo que permite incluir rigidizadores de pequeñas dimensiones y sin necesidad de soldadura en la zona de plastificación, los primeros resultados obtenidos señalaban una elevada rigidez bajo comportamiento elástico, un desplazamiento de inicio de

plastificación pequeño (0.5mm) y disipación de energía a partir de ciclos histeréticos estables.

En 1998 Tsai analiza el comportamiento de un dispositivo de cortante con sección en doble T y alma rigidizada, diseñado para actuar como nexo entre un pórtico y su arriostramiento en “A”, su unión con los brazos de arriostramiento, mediante bulones, admite sólo la acción horizontal, libre de momento y de acción vertical, con ello se consigue desacoplar el sistema rígido del sistema flexible y reducir solicitaciones de montaje. En este mismo año, Ray y Wallace desarrollan un dispositivo a partir de placas soldadas de aluminio mediante procedimiento TIG, el disipador permite cargas de plastificación reducidas con espesores superiores a los necesarios con acero dúctil, para evitar problemas de fragilidad, los rigidizadores del alma están únicamente soldados a las alas, practicándose además un normalizado final de tensiones, el resultado más significativo es la elevada ductilidad que se consigue con algunas aleaciones usadas, que llega incluso al 30% en ensayo a tracción, debido a una insuficiente rigidización, los dispositivos manifiestan abolladura del alma, la cual deriva en una disminución de su capacidad disipativa.

### GRÁFICO N°21: DISPOSICIÓN DE PANELES DE CORTANTE

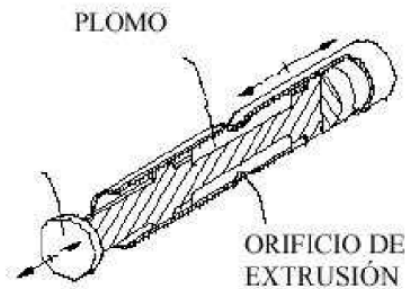


**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

### DISIPADORES BASADOS EN LA EXTRUSIÓN DE METALES

En el año de 1976 Robinson y Greebank diseñan “Penguin Vibration Damper” (PVD) el cual permite disipar energía a partir de la extrusión del plomo, en el cual el plomo pasa por un orificio y forzado a un cambio de sección, disipa energía. Su respuesta histerética resulta muy estable tras muchos ciclos de desplazamiento. Un modelo de 200 Kn apto para desplazamientos de hasta 10mm y que disipa desde 0.05mm mantiene su curva histerética sin modificaciones apreciables tras 144000 ciclos a una amplitud de 4mm.

## GRÁFICO N°22: DISIPADOR POR EXTRUSIÓN



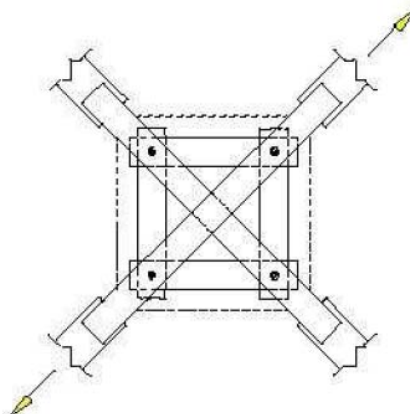
**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

### 2.2.2.1.2. DISIPADORES POR FRICCIÓN

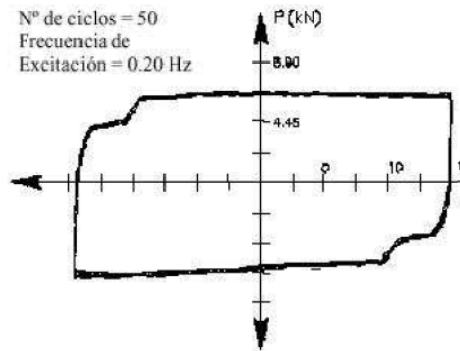
Los sistemas de fricción disipan energía basándose en el rozamiento existente entre dos superficies en contacto bajo presión y en el deslizamiento entre ellas, la fuerza de fricción en cada conexión es igual al producto de la fuerza normal por el coeficiente de rozamiento. Existen diversos dispositivos basados en la disipación por fricción, Pall y Marsh (1982) propusieron un sistema que permite ser emplazado en la intersección de un arriostramiento en "X". Sus curvas histeréticas son prácticamente rectangulares con lo cual la energía disipada por ciclo es máxima para un determinado valor de la fuerza de deslizamiento.

El mecanismo desliza ante una carga predeterminada, regulable a partir de la presión ejercida por pernos a través de una llave dinamométrica. Filiatrault y Cherry desarrollaron un método simplificado de diseño sísmico para estructuras que incorporan este sistema disipativo, a partir de un estudio paramétrico determinan la distribución en altura de la fuerza umbral óptima de deslizamiento y establecen un espectro de diseño para su determinación práctica.

## GRÁFICO N°23: DISIPADOR POR FRICCIÓN Y SU RESPUESTA HISTERÉTICA



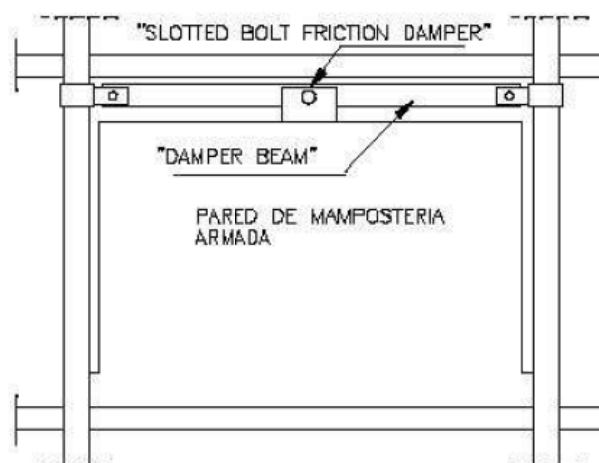




**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

Rao en 1996 plantea un dispositivo de fricción para ser empleado como conector entre una estructura aporricada y un muro de mampostería armada y establecen también un método de determinación de la fuerza umbral que proporciona la respuesta estructural óptima. El mayor inconveniente que presentan estos disipadores 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 ésta entra en el rango no lineal.

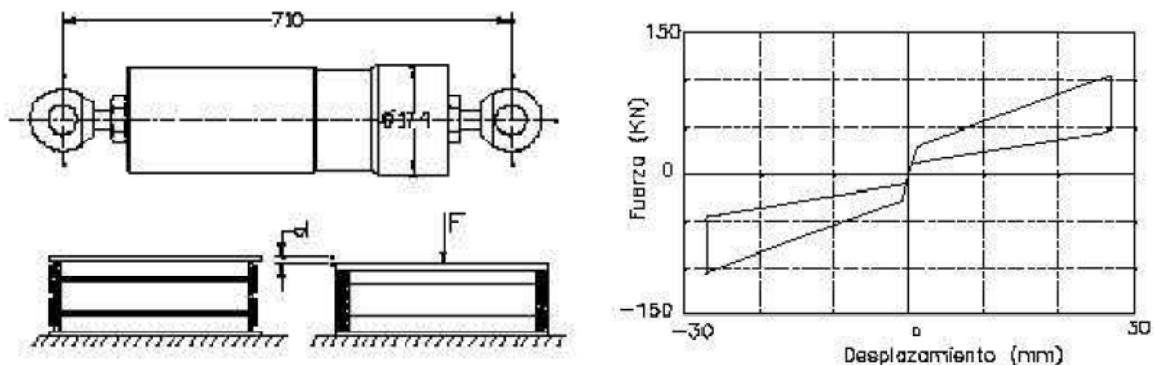
#### GRÁFICO N°24: DISIPADOR POR FRICCIÓN TIPO SLOTTED BOLT FRICTION DAMPER



**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

En el año de 1998 Kar diseña un disipador de fricción de concepción distinta a los dos anteriormente descritos, mientras que los primeros generan las fuerzas de fricción a través de uniones atornilladas, este disipador las obtiene a partir del deslizamiento entre una serie de anillos interiores y exteriores. El deslizamiento va acompañado de un aumento progresivo de la presión entre las superficies en contacto de los anillos, debido a la interferencia que se produce entre éstos durante el desplazamiento. Resultados de los ensayos efectuados mostraron que el comportamiento histerético resulta estable, repetible y predecible. Su acción sobre la estructura es autocentradora y su respuesta fuerza – desplazamiento resulta prácticamente independiente del contenido frecuencial de la excitación sísmica. Sus características mecánicas y geométricas permiten la incorporación del disipador en una diagonal rigidizadora o en un arriostramiento en “X”.

**GRÁFICO N°25: DISIPADOR “SHAPIA”**



**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

## 2.2.2.2. DISIPADORES CON COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO

### 2.2.2.2.1. DISIPADORES VISCOELÁSTICOS

Los disipadores viscoelásticos han sido empleados con éxito, durante los últimos treinta años, para reducir la respuesta de edificios altos ante la acción sísmica del viento, de forma más reciente se ha estudiado su utilización con fines de diseño sismoresistente.

Los disipadores viscoelásticos sólidos están formados con chapas metálicas unidas con capas finas de material viscoelástico y presentan unos ciclos histeréticos característicos elípticos.

Su acción disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural, presentan algunas ventajas con relación a los dispositivos histeréticos, tales como:

1. No precisan de una fuerza umbral para disipar la energía
2. No cambian significativamente los períodos de vibración, con lo cual resulta posible linealizar el comportamiento estructural y realizar una modelación más sencilla

Como inconvenientes de su uso y aplicación tenemos:

1. La poca variación del período fundamental no evita el comportamiento resonante.
2. Los materiales viscoelásticos, en general, son sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación, resultando necesario minimizar la influencia de estas variables en sus rangos de servicio en estructuras sismoresistentes para que su comportamiento resulte previsible.
3. 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.

En un estudio experimental llevado a cabo en el año de 1990, se analizaron disipadores viscoelásticos en una estructura de 9 plantas, en escala  $\frac{1}{4}$ , solicitada en una mesa vibratoria por señales procedentes de diversos sismos, entre sus conclusiones se destacan:

1. Que las características dinámicas del edificio no varían de forma significativa: la frecuencia fundamental pasaba de 2.04Hz a 2.76Hz, para un aumento de la fracción de amortiguamiento del 0.74% al 8.07% con disipadores.
2. El incremento en temperatura del dispositivo debido a la acción sísmica apenas afectaba a las propiedades dinámicas del sistema.
3. Que la teoría viscoelástica lineal se puede aplicar para describir el comportamiento de los disipadores.

## GRÁFICO N°26: AMORTIGUADOR VISCOELÁSTICO



Retrofit con SBC al Edificio I. Magnin (1930), Oakland, USA.

**FUENTE:** El portal de expertos en prevención de riesgos en Chile [25]

### 2.2.2.2. DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO

Los disipadores de fluido viscoso tienen la propiedad de reducir simultáneamente los esfuerzos y las deflexiones de la estructura. Esto es debido a que los disipadores de fluido varían su fuerza solamente con la velocidad, la cual provee una respuesta que es inherentemente fuera de fase con los esfuerzos debido a la flexibilidad de la estructura.

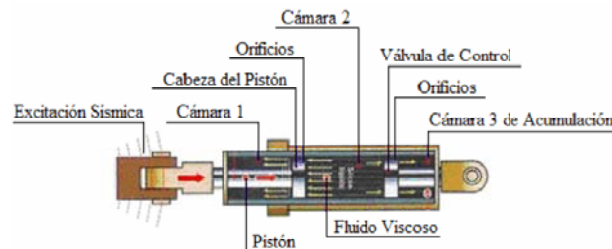
Otros disipadores pueden normalmente ser clasificados como histeréticos, donde una fuerza de amortiguamiento es generada bajo una deflexión o los viscoelásticos que son disipadores con un complejo resorte combinado con un amortiguamiento.

Inclusive en estos disipadores no fluidos tienen elementos de fluencia, fricción, rótulas plásticas. Ninguno de estos dispositivos tiene una respuesta fuera de fase debido a esfuerzos estructurales de flexión. Esto es porque estos dispositivos son dependientes de otros parámetros aparte de la velocidad.

Los disipadores de fluido viscoso son esencialmente mecanismos llenos de fluido, el cual debe ser capaz de mantenerse en servicio durante grandes períodos de tiempo sin mantenimiento. Los requerimientos de los materiales son que deben ser resistentes a la corrosión, resistencia al despostillamiento, de esfuerzos de ruptura y alta resistencia al impacto. Esto es especialmente cierto para el cilindro del disipador, el cual debe resistir esfuerzos triaxiales. Un amortiguador viscoso es comparable a los amortiguadores utilizados en los vehículos, a diferencia que los utilizados en edificios operan en un rango de fuerzas mucho mayor y son construidos en acero inoxidable y otros materiales duraderos. El fluido debe poseer alta viscosidad, resistencia al fuego (es decir no inflamable y no combustible), estable a los cambios de temperatura y a los

largos períodos de tiempo, en la actualidad, los únicos fluidos que poseen esas características pertenecen a la familia de las siliconas.

### GRÁFICO N°27: AMORTIGUADOR VISCOELÁSTICO

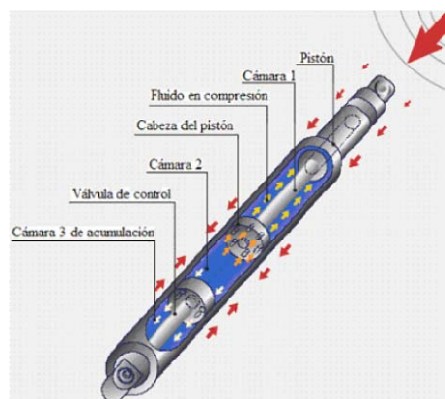


**FUENTE:** Juan Pablo Pardo. Control de la Respuesta dinámica de Estructuras [16]

El cilindro en su interior posee un pistón que se compone de una vara que en su borde interior tiene una cabeza 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.

La actividad sísmica presiona el pistón hacia el cilindro comprimiendo el fluido del interior hacia la cámara dos, luego éste pasa de regreso de la cámara uno a la cámara dos, 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 tres de acumulación.

### GRÁFICO N°28: FUNCIONAMIENTO DE UN DISIPADOR DE FLUIDO VISCOZO



**FUENTE:** Juan Pablo Pardo. Control de la Respuesta dinámica de Estructuras [16]

Los disipadores *no fluidos* disminuyen las deflexiones en la estructura, pero al mismo tiempo incrementan los esfuerzos en las columnas. Los esfuerzos en las columnas tienen su valor máximo, cuando el edificio llega a su deformación máxima. Si se adiciona un disipador de fluido viscoso, la fuerza de amortiguamiento se reduce a cero en este punto de máxima deformación. Esto es debido a que la velocidad del disipador es cero en este punto.

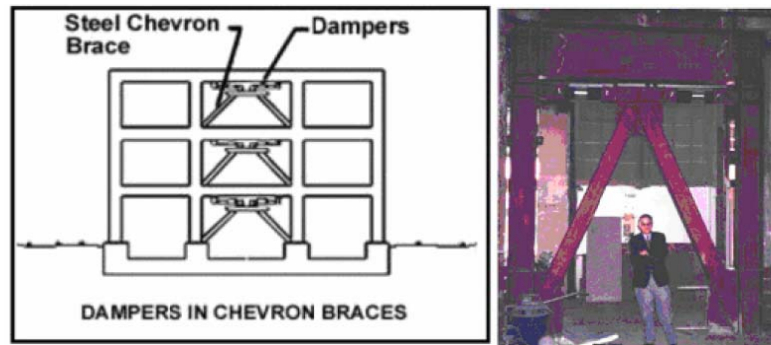
Mientras que la máxima fuerza de amortiguamiento ocurre cuando la velocidad es máxima, es decir, cuando el desplazamiento de las columnas es igual a cero (cuando el edificio se encuentra en el punto de equilibrio), éste también es el instante donde los esfuerzos en las columnas es el mínimo, esta respuesta 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 edificios.

Un disipador de fluido viscoso es un dispositivo que disipa energía aplicando una fuerza resistiva a un desplazamiento finito, la fuerza de salida del disipador es resistiva y actúa en la dirección opuesta al movimiento de entrada, debido a que el disipador se comporta de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos, el valor de la fuerza resistiva varía con respecto a la velocidad traslacional del disipador en cualquier punto en el tiempo.

En la industria de la construcción, los amortiguadores de fluido viscoso se utilizan para reducir las cargas debido a la excitación sísmica, estos dispositivos se ubican en el edificio de forma estratégica, tal que se activen durante el desplazamiento relativo entre dos pisos contiguos del edificio excitado, la instalación puede hacerse de varias formas (Juan Pablo Pardo, 2007):

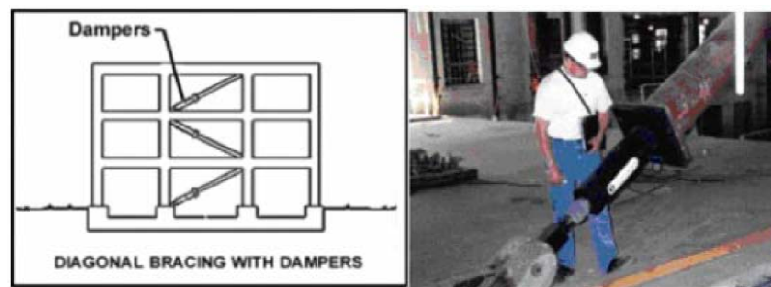
- Colocando los amortiguadores horizontalmente, para ligar de manera flexible el vértice de unión de las diagonales en forma de “V” invertida fijada en un piso inferior, con el nivel inmediato superior.
- Colocando los amortiguadores como una diagonal inclinada, conectando las dos uniones viga columna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

### **GRÁFICO N°29: DISIPADORES VISCOSOS, UNIENDO LAS DIAGONALES CON LAS COLUMNAS EN FORMA DE “V” INVERTIDA**



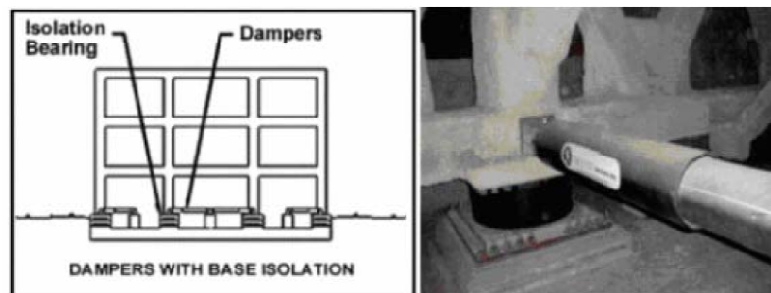
**FUENTE:** Juan Pablo Pardo. Control de la Respuesta dinámica de Estructuras [16]

### GRÁFICO N°30: DISIPADORES VISCOSOS, UBICADOS EN LA DIAGONAL



**FUENTE:** Juan Pablo Pardo. Control de la Respuesta dinámica de Estructuras [16]

### GRÁFICO N°31: DISIPADORES VISCOSOS, UBICADOS EN LA BASE DEL EDIFICIO



**FUENTE:** Juan Pablo Pardo. Control de la Respuesta dinámica de Estructuras [16]

#### 2.2.3. SISTEMAS INERCIALES ACOPLADOS

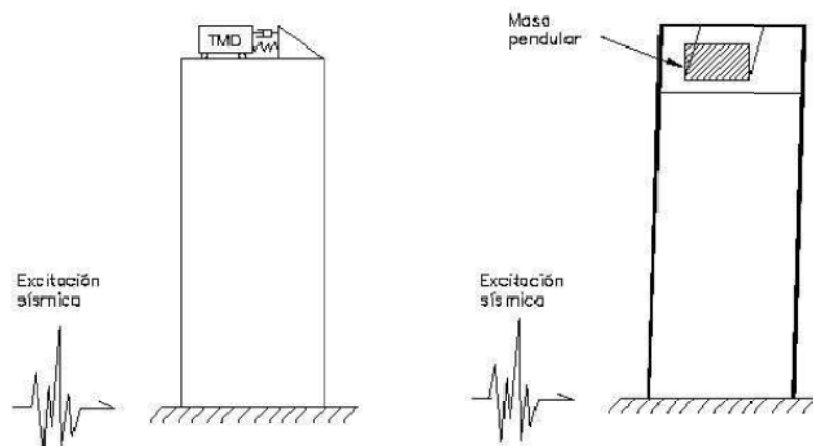
Generalmente se instalan en la parte alta de los edificios y constan de los siguientes elementos:

- Un oscilador de un grado de libertad
- Un mecanismo de muelle
- Un mecanismo de amortiguamiento

La masa y la rigidez del muelle se determinan de forma que la frecuencia de oscilación sea la misma que la frecuencia fundamental de la estructura. Una de sus principales desventajas es que requiere de una gran masa e importante disponibilidad de espacio para su instalación, por lo que para compensar este problema se ha propuesto recientemente el uso de cubiertas con aislamiento respecto a la estructura inferior o tanques de agua para ser usados como masas pendulares, otro inconveniente, es que su efectividad se reduce a una banda estrecha de frecuencias cercanas al período fundamental del edificio y pueden presentarse situaciones en las que el edificio se sitúe fuera de su período fundamental, como:

- En un edificio esbelto se pueden manifestar con distinta intensidad modos de vibración diferentes al fundamental, en función a las características de la excitación.
- Durante sismos severos la estructura puede llegar a comportarse plásticamente, alargando el período de la estructura y aportando una pérdida de sintonía con el sistema inercial.

### GRÁFICO N°31: SISTEMAS INERCIALES ACOPLADOS



**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

### 2.3. SISTEMAS DE CONTROL HÍBRIDO

Los sistemas híbridos son la combinación de sistemas activos y los sistemas pasivos, debido a que el control se consigue a partir de la actuación de un dispositivo pasivo, los sistemas híbridos suponen mejoras con relación a los activos como:

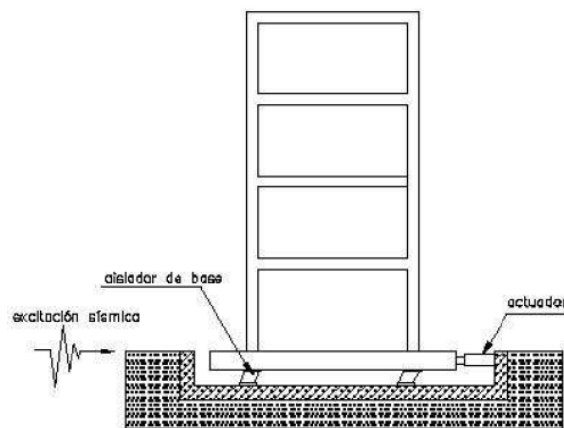
- En caso de falla del componente activo, aunque de forma menos efectiva, el sistema pasivo sigue ejerciendo funciones de control.
- Los requerimientos energéticos son menores



Entre los principales sistemas híbridos tenemos el Hibrid Mass Damper (HMD) y el aislamiento de base con control activo del desplazamiento de base.

El HMD dispone de una masa oscilante pasiva que por sí misma reduce la respuesta del edificio y de un actuador activo, el cual mejora la eficiencia del sistema y además le da una mayor robustez frente a cambios dinámicos que afectan a la estructura. El comportamiento pasivo desacopla parcialmente la estructura del terreno, producto de un desplazamiento significativo entre subestructura y superestructura. El objetivo del componente activo es 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 los límites aceptables. Sin embargo, la evaluación de dicha fuerza de control tiene 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.

### GRÁFICO N°32: ESQUEMA SISTEMA HÍBRIDO



**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo[6]

#### 2.4. SISTEMAS DE CONTROL SEMIACTIVO

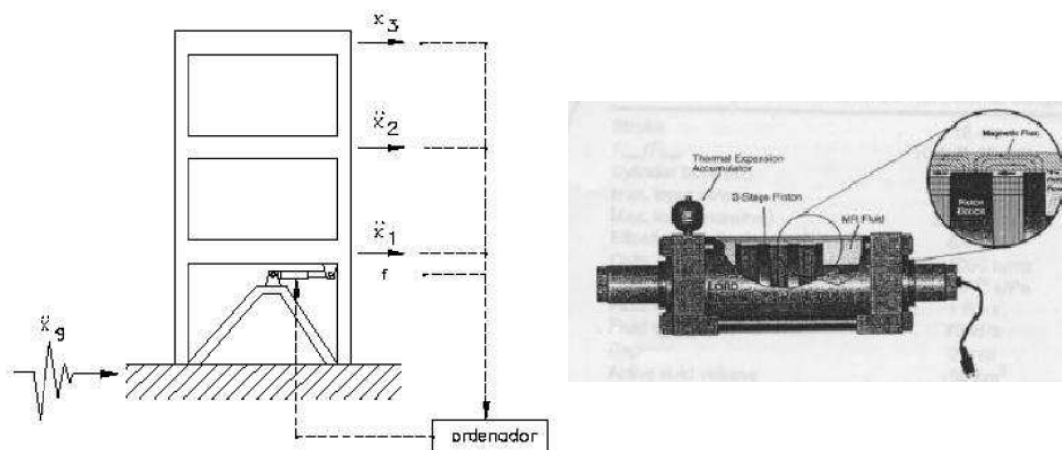
Los sistemas semiactivos tienen un esquema de funcionamiento muy similar a los sistemas activos, diferenciándose de estos en que el control estructural se obtiene a partir de dispositivos de carácter reactivo, cuyas características mecánicas son controlables, lo cual permite modificar las propiedades dinámicas de la estructura con costos energéticos reducidos. Algunas de las técnicas de control empleadas por los sistemas semiactivos son:

- La fricción variable

- El movimiento de masa de líquido en el interior de tanques (Tuned Sloshing Dampers) o columnas dentro del edificio (Tuned Liquid Column Dampers)
- La incorporación de dispositivos hidráulicos de rigidez o amortiguamiento variable
- Amortiguadores con fluidos de viscosidad controlable a partir de campos eléctricos o magnéticos.

Los líquidos controlables tienen la propiedad de variar sus características reológicas ante campos eléctricos o ante campos magnéticos, 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 o magnético.

### GRÁFICO N°33: ESQUEMAS SISTEMAS SEMI ACTIVOS



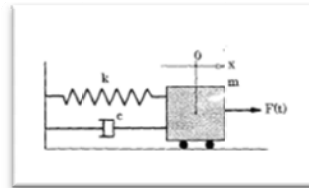
**FUENTE:** Edificaciones con disipadores de energía, Genner Villarreal, Ricardo Oviedo [6]

## CAPÍTULO III: ECUACIONES DEL MOVIMIENTO

### 3.1. GENERALIDADES

Toda estructura continua tiene infinito número de grados de libertad, sin embargo, el proceso de selección o idealización de un modelo matemático apropiado permite reducir los grados de libertad a un número discreto y en algunos casos a uno solo.

#### GRÁFICO N°34: SISTEMA UN GRADO DE LIBERTAD



**FUENTE:** Dinámica estructural aplicada al diseño sismoresistente, Luis García [17]

El modelo matemático representado en la figura anterior tiene los siguientes elementos:

1. Un elemento de masa “ $m$ ” que representa la masa o propiedad de inercia de la estructura.
2. Un elemento resorte “ $k$ ” que representa las fuerzas internas del sistema y la capacidad de la estructura de almacenar energía potencial.
3. Un elemento de amortiguación “ $c$ ” que representa las características friccionales y las pérdidas de energía de la estructura.
4. La fuerza de excitación  $F(t)$  que a su vez representa las fuerzas exteriores que actúan sobre el elemento estructural .

Al adoptar el modelo matemático anterior se asume que cada elemento del sistema representa una sola propiedad, es decir, la masa “ $m$ ” representa sólo la propiedad de inercia y no la de la elasticidad o de disipación de energía, mientras que el resorte “ $k$ ” representa sólo a la elasticidad y no a la inercia o a la disipación de la energía, y el elemento de amortiguación “ $c$ ” solamente disipa energía, por lo que los modelos matemáticos son solamente idealizaciones conceptuales de estructuras reales.

Los modelos matemáticos pueden proporcionar un conocimiento exacto y completo del comportamiento del modelo mismo, pero sólo puede dar una información limitada o aproximada del comportamiento del sistema físico real, sin embargo, desde el punto de vista práctico la información que se adquiere en el análisis del modelo matemático puede ser suficiente para comprender el comportamiento dinámico del sistema físico.



Las estructuras reales disipan energía cuando experimentan movimientos vibratorios, el método más común para considerar esta disipación de energía es suponer que se debe a fuerzas viscosas de amortiguación, estas fuerzas se suponen proporcionales a la magnitud de la velocidad pero actuando en dirección opuesta al movimiento, el factor de proporcionalidad es el coeficiente de amortiguamiento viscoso, es conveniente expresar este coeficiente como una fracción de la amortiguación crítica del sistema ( $\xi = c/c_c$ ).

La amortiguación crítica puede definirse como el valor mínimo del coeficiente de amortiguamiento para que el sistema no oscile cuando es excitado inicialmente, sino que retorne a su posición de equilibrio.

De acuerdo al Principio de D' Alembert un sistema puede ser puesto en estado equilibrio dinámico agregando a las fuerzas externas una fuerza ficticia denominada *fuerza de inercia*.

Con todo lo dicho anteriormente, se plantea la ecuación diferencial de un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso:

La expresión analítica de la solución de esta ecuación depende de la magnitud de la razón de amortiguamiento, tres casos son posibles:

1. Un sistema subamortiguado, con  $\xi < 1$
2. Un sistema con amortiguación crítica,  $\xi = 1$
3. Un sistema sobreamortiguado, con  $\xi > 1$

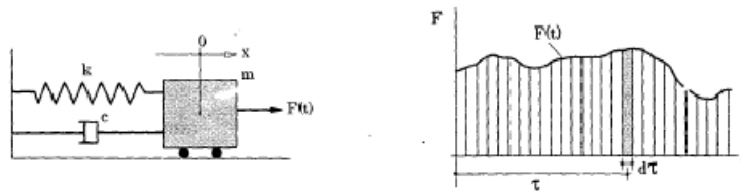
Un método común para determinar la amortiguación presente en un sistema es calcular el **decremento logarítmico**, el cual se define como el logaritmo natural de la razón de dos amplitudes consecutivas máximas en vibración libre, esto es:

—

Se acepta comúnmente que los sistemas estructurales tienen un amortiguamiento aproximado del 5% del crítico, en tales sistemas, la frecuencia en vibración libre con amortiguación es aproximadamente igual a la frecuencia sin amortiguación.

### 3.2. EXCITACIÓN ARBITRARIA

Cuando un sistema se somete a una excitación arbitraria expresada en términos de fuerza, como el indicado, es posible dividirla en una serie de impulsos que se aplican en el tiempo  $\tau$  y que tienen una duración  $d\tau$ .



**FUENTE:** Dinámica estructural aplicada al diseño sismoresistente, Luis García [17]

Al integrar el efecto de cada uno de estos impulsos diferenciales variando  $\tau$ , se obtiene para el caso sin amortiguamiento:

\_\_\_\_\_

Y para el caso con amortiguamiento:

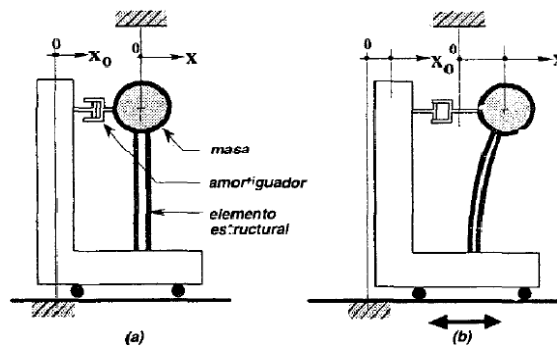
=====

\_\_\_\_\_

Estas integrales se conocen como integrales convolución o de Duhamel y corresponden a la solución particular del sistema, si hay condiciones iniciales hay necesidad de adicionarles a la solución homogénea respectivamente.

### 3.3. EXCITACIÓN EN LA BASE

La ordenada  $X_0$  describe el movimiento de la base de la estructura mientras que la ordenada  $X$  corresponde a la posición de la masa, tal como se aprecia en la figura:



**FUENTE:** Dinámica estructural aplicada al diseño sismoresistente, Luis García [17]



La fuerza inercial está dado por:

La fuerza en el resorte o elemento estructural, está descrita por el módulo de deformación multiplicada por el desplazamiento relativo entre los extremos:

Igualmente la fuerza ejercida por el amortiguador se determina por medio de la constante del amortiguador multiplicada por la velocidad relativa entre sus extremos:

Al aplicar el principio de D' Alembert se obtiene:

Lo cual conduce a la ecuación diferencial de equilibrio:

Si se define la variable " $u$ " para describir el desplazamiento relativo entre la masa y la base de apoyo del sistema entonces:

Al derivar contra el tiempo obtenemos:

Y al derivar nuevamente tenemos:

Y al despejar tenemos:

Al reemplazar en la ecuación inicial tenemos:

### **3.4. OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA EN SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD**

En la medida que la excitación se hace más compleja su tratamiento por medio de la integral de convolución se hace más compleja, razón por la cual es necesario recurrir a los métodos numéricos, los cuales utilizan diferentes

técnicas y son adecuados para distintos problemas fácilmente solucionables con la ayuda del computador.

### 3.4.1. MÉTODO DE LA ACELERACIÓN LINEAL

Cuando se desea determinar la respuesta de un sistema lineal de un grado de libertad utilizando procedimientos iterativos, en general se conoce el desplazamiento de la masa, su velocidad y aceleración en un instante "t" obteniendo su desplazamiento, velocidad y aceleración al final de un intervalo de tiempo  $\Delta t$ .

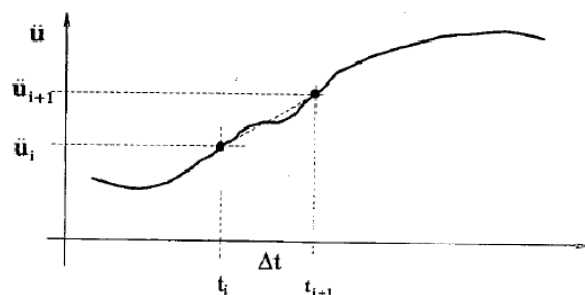
Si inicialmente se supone que el movimiento es rectilíneo y éste tiene una aceleración constante  $a$ , entonces la velocidad  $v$ , después de un intervalo  $\Delta t$  está dado por la siguiente expresión:

Donde  $v_0$  es la velocidad al comienzo del intervalo, el espacio que se recorre durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  corresponde a la siguiente expresión:

Donde  $s_0$  es el espacio recorrido hasta el comienzo del intervalo  $\Delta t$ .

Si se toma un sistema lineal el cual es afectado por una fuerza arbitraria que varía en el tiempo  $P(t)$  el comportamiento de este sistema está descrito por la siguiente ecuación diferencial de equilibrio:

La respuesta del sistema en términos de la aceleración de la masa tiene la forma mostrada en la figura donde puede observarse que la aceleración de la masa no permanece constante durante el intervalo  $\Delta t$ . Además el hecho de que la fuerza no permanece constante durante el intervalo, induce a errores en la solución cuando se utiliza aceleración promedio.





Si se supone que la aceleración varía linealmente durante el intervalo de tiempo entonces:

\_\_\_\_\_

Integrando esta expresión se obtiene la siguiente ecuación para la velocidad:

\_\_\_\_\_

Cuando esta última ecuación se evalúa en el tiempo  $t_{i+1}$  se obtiene la siguiente expresión para la velocidad al final del intervalo  $\Delta t$ :

—

Integrando la ecuación de la velocidad se obtiene la siguiente ecuación para el desplazamiento:

\_\_\_\_\_

De la ecuación anterior se obtiene el desplazamiento al final del intervalo  $\Delta t$ :

\_\_\_\_\_

Finalmente obtenemos:

\_\_\_\_\_

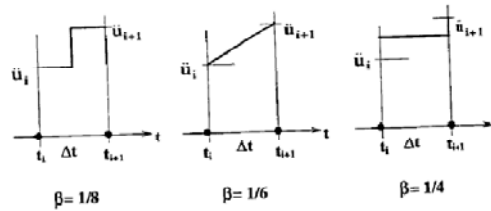
El intervalo de evaluación de la respuesta debe ser pequeño para garantizar que la respuesta evaluada sea la correcta, como mínimo debe corresponder a los puntos en los cuales cambia la fuerza de excitación.

### 3.4.2. MÉTODO DE NEWMARK

Utiliza un estimativo de la aceleración al final del intervalo que se va corrigiendo por medio de un proceso iterativo. Newmark propuso utilizar la aceleración “**a**” expresada de la siguiente manera:



Donde  $\beta$  es una constante que varía entre 0 y 1/2. En la figura siguiente se muestra la interpretación que se puede dar a diferentes valores de  $\beta$ .



Ahora, utilizando la aceleración promedio y el valor de la aceleración dado por la ecuación anterior, se obtienen las siguientes expresiones para la velocidad y el desplazamiento al final del intervalo de tiempo  $\Delta t$  en función de los valores al comienzo del intervalo:

\_\_\_\_\_

—

Utilizando los valores de desplazamiento y velocidad al final del intervalo obtenidos de las dos ecuaciones anteriores se obtiene un mejor valor de la aceleración al final del intervalo  $\Delta t$ .

\_\_\_\_\_

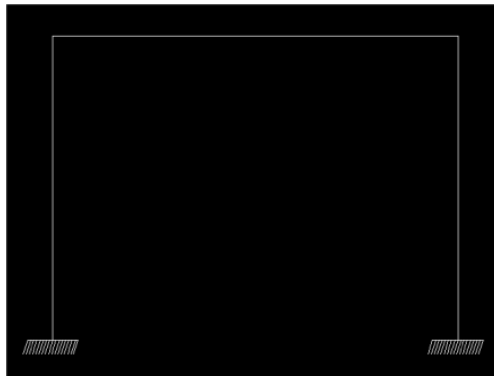
Este valor de \_\_\_\_\_ se utiliza en la primera ecuación de la aceleración y de nuevo se calculan los valores de \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_ mediante las ecuaciones correspondientes. Este proceso iterativo se repite hasta que se obtenga un valor de la aceleración al final del intervalo que sea igual, con un error aceptable, a la estimada al inicio del proceso. En ese momento se incrementa el tiempo en un intervalo  $\Delta t$  y se repite el proceso para este nuevo intervalo de tiempo. De esta manera se determinan el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la masa durante todo el tiempo de interés. A medida que el intervalo de tiempo  $\Delta t$  que se utilice en el proceso numérico sea menor, mayor será la precisión de la respuesta. Se recomienda utilizar valores menores a 1/10 del período de vibración del sistema. Respecto a “ $\beta$ ” no existe una regla definida, pero en general con  $\beta=1/6$  la respuesta es exacta si la aceleración varía linealmente durante el intervalo. Con  $\beta=1/4$  la respuesta es exacta si la aceleración varía linealmente durante el intervalo. Newmark sugirió que si se utilizan valores entre 1/6 y 1/4 la respuesta es satisfactoria desde todo punto de vista y que un valor de  $\beta=1/6$  es estable en todos los casos.

### 3.5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se considera un sistema de un grado de libertad como el mostrado en la figura, cuya masa ( $m$ ) se asume concentrada en la parte superior de este, con una

razón de amortiguamiento ( $\xi$ ) del 5% del amortiguamiento crítico, al cual se le ha sometido a una aceleración en su base correspondiente a la componente NS del registro sísmico de El Centro 1940. Se plantea resolver el problema mediante el método de Newmark y comparar sus resultados con los obtenidos mediante el programa computacional SAP 2000v10. Se proponen dos casos, el primero, como el mostrado en la figura, sin sistemas suplementarios de disipación de energía, simplemente considerando el amortiguamiento natural adoptado del 5% del crítico, y el segundo caso, considerando un dispositivo de fluido viscoso que provea al sistema un amortiguamiento del orden del 25% del amortiguamiento crítico.

### GRÁFICO N°35: SISTEMA UN GRADO DE LIBERTAD



Los datos del problema son los siguientes:

$$m = 22 \text{ kg.s}^2/\text{cm}$$

Dimensiones de las columnas: 30x30cm

$$E = 220000 \text{ kg/cm}^2$$

$$L = 300\text{cm}$$

$$\xi = 5\%$$

La rigidez se obtiene con la expresión:

\_\_\_\_\_

Donde:

E: módulo de elasticidad

I: Momento de inercia de la sección

L: Altura de las columnas

Al reemplazar se obtiene:

$$I = 67500\text{cm}^4$$

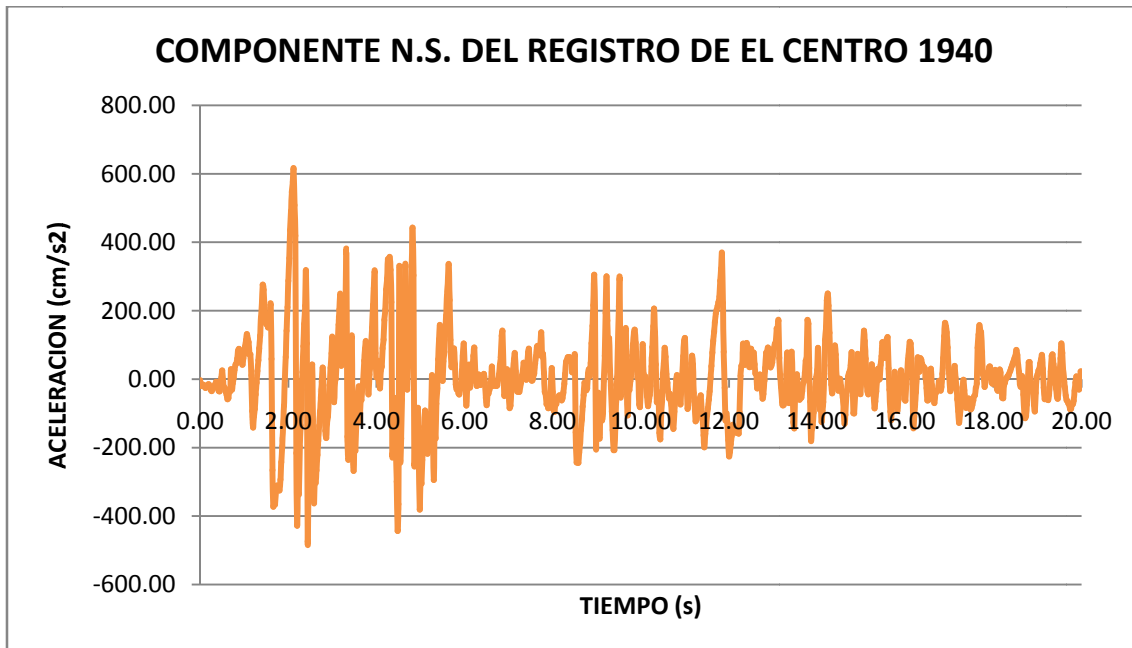
$$K = 6600 + 6600 = 13200 \text{ kg/cm}$$

El período de vibración es igual a:

—  
—

El acelerograma empleado es el siguiente:

### GRÁFICO N°36: ACELEROGRAMA EMPLEADO



#### RESPUESTA OBTENIDA MEDIANTE EL MÉTODO DE NEWMARK

1. El valor asumido del intervalo  $\Delta t = 0.02s$ , cumpliendo la recomendación de que  $\Delta t < T/10$
2. Se incrementa el tiempo (en el primer punto  $n=1$ ,  $t_n=0$ ) para localizarse en el punto  $n+1$  de manera tal que:  $t_{n+1} = t_n + \Delta t$
3. Se estima la aceleración al final del intervalo:

$$\ddot{v}_c = \frac{P(t) - (C\dot{v} + R)}{m} = \frac{P - F}{m}$$

4. Se estima la velocidad y el desplazamiento del sistema:

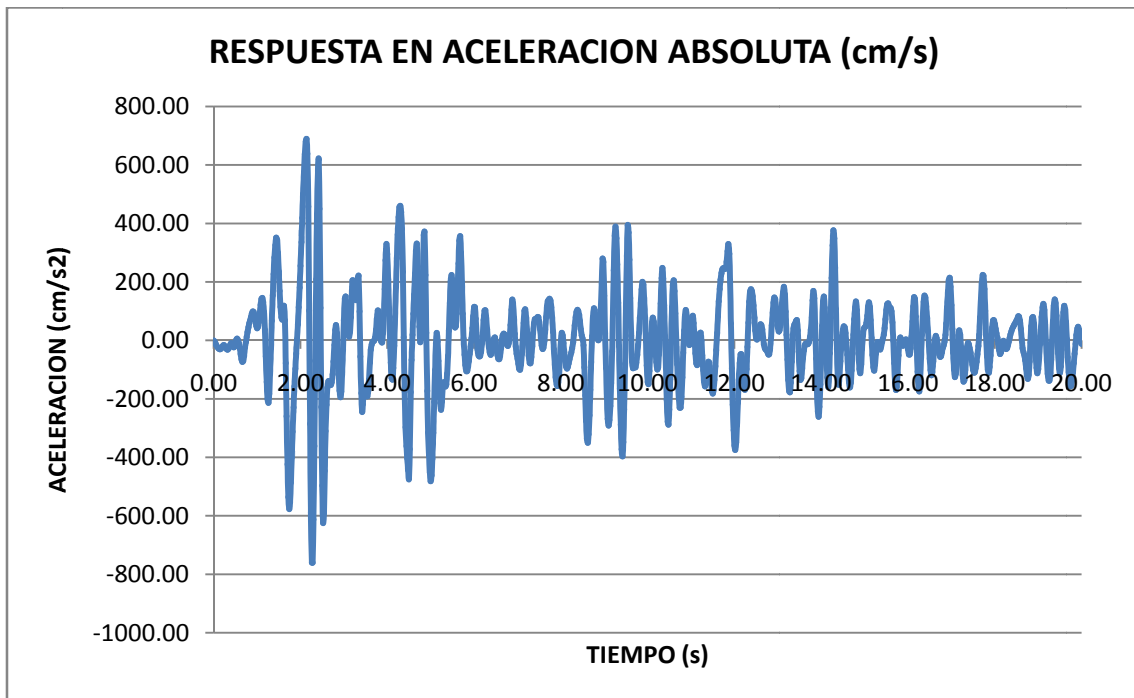
$$\dot{v}_{n+1} = \dot{v}_n + \frac{h}{2} (\ddot{v}_n + \ddot{v}_{n+1})$$

$$v_{n+1} = v_n + h \dot{v}_n + \frac{h^2}{6} (2\ddot{v}_n + \ddot{v}_{n+1})$$

5. Se calcula la aceleración y se verifica que

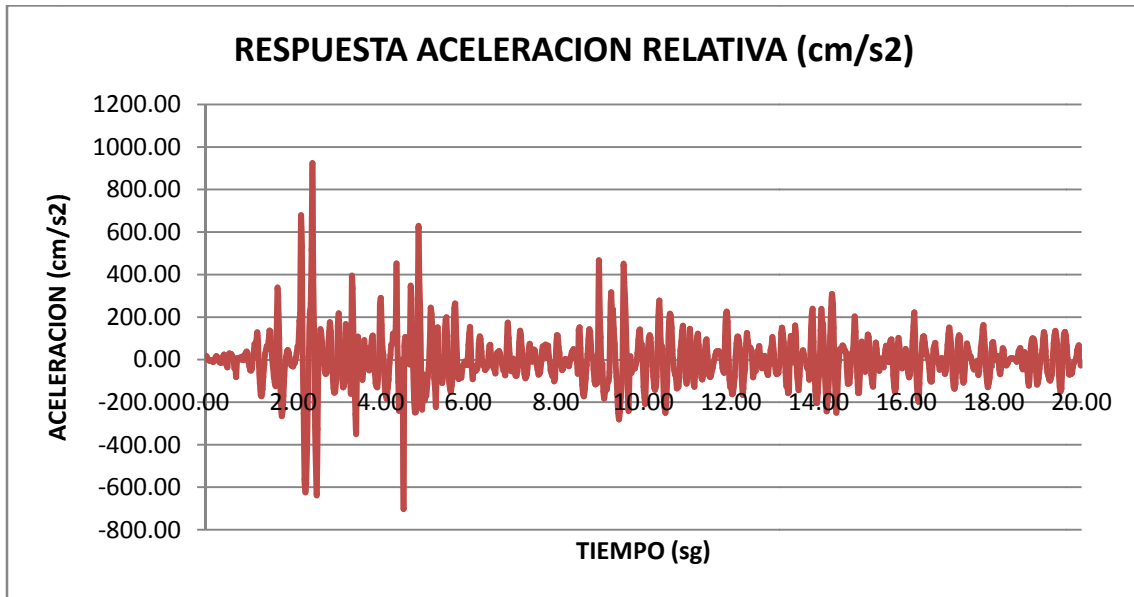
Siguiendo el resumen anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

### GRÁFICO N°37: RESPUESTA OBTENIDA EN ACELERACIÓN ABSOLUTA



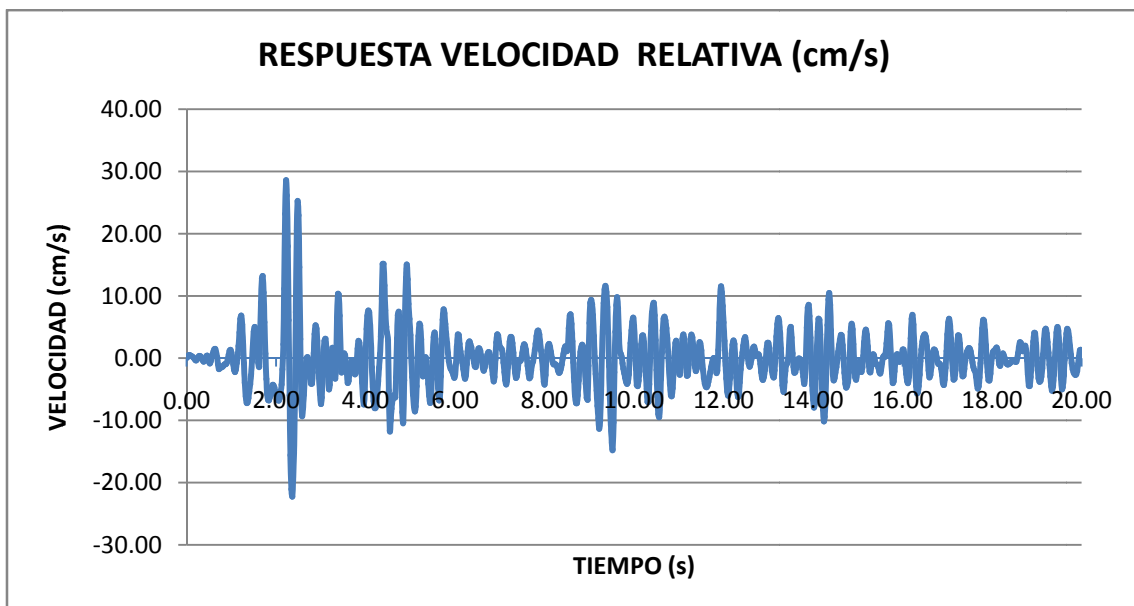
VALORES EXTREMOS	
ACELERACIÓN MÁXIMA	1284.53 cm/s <sup>2</sup>
ACELERACIÓN MÍNIMA	-1461.09 cm/s <sup>2</sup>

### GRÁFICO N°38: RESPUESTA OBTENIDA EN ACELERACIÓN RELATIVA



VALORES EXTREMOS	
ACELERACIÓN MÁXIMA	1778.47 cm/s <sup>2</sup>
ACELERACIÓN MÍNIMA	-1725.32 cm/s <sup>2</sup>

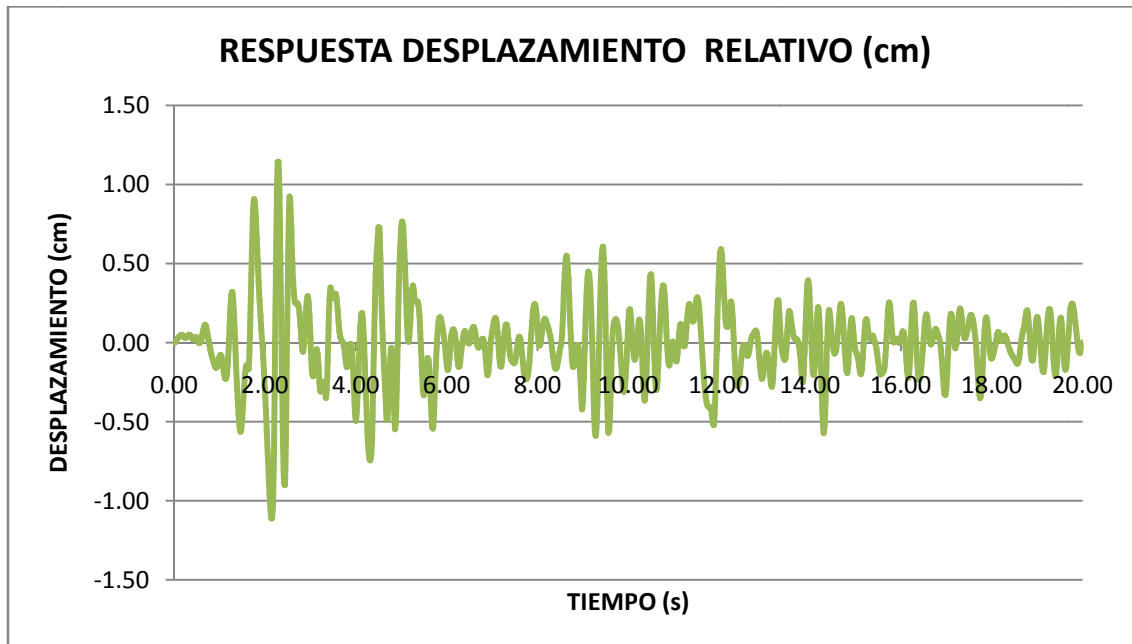
### GRÁFICO N°39: RESPUESTA OBTENIDA EN VELOCIDAD RELATIVA



VALORES EXTREMOS	
------------------	--

VELOCIDAD MÁXIMA	65.76 cm/s
VELOCIDAD MÍNIMA	-53.57 cm/s

### GRÁFICO N°40: RESPUESTA OBTENIDA EN DESPLAZAMIENTO RELATIVO

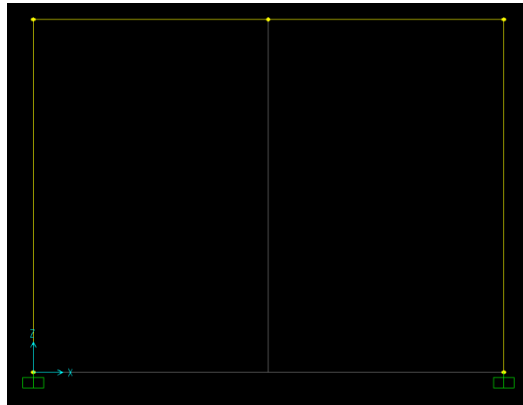


VALORES EXTREMOS	
VELOCIDAD MÁXIMA	2.75 cm
VELOCIDAD MÍNIMA	-2.40 cm

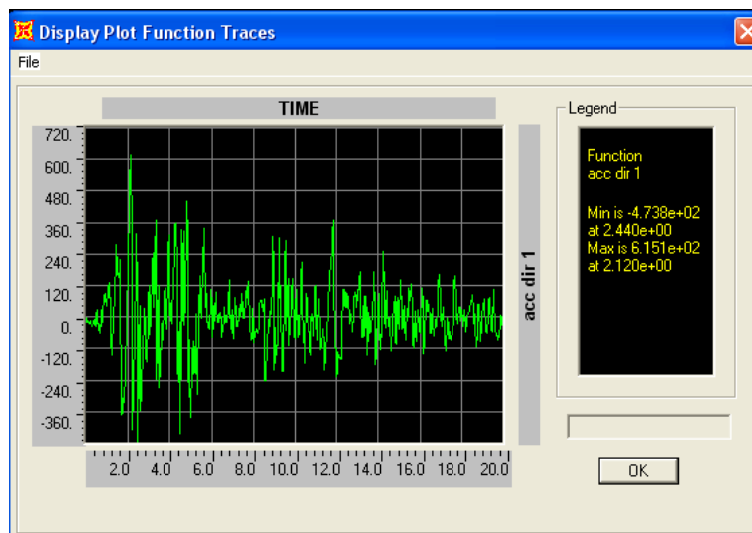
*RESPUESTA DEL SISTEMA OBTENIDA MEDIANTE EL PROGRAMA SAP2000v10.*

El modelo ingresado corresponde a un marco plano compuesto de dos columnas de hormigón armado cuyo  $E=220.000\text{kg/cm}^2$  y una viga considerada rígida axialmente en cuyo centro se asume concentrada la masa del sistema. Se realizó un análisis lineal mediante el uso de la opción tiempo historia, en la cual se ingresó el acelerograma del registro antes indicado, los valores ingresados al programa fueron, la masa traslacional, en el sentido "X" de 22  $\text{kg.s}^2/\text{cm}$ , la razón de amortiguamiento de 5%, el ancho del intervalo de 0.02s, se ingresaron un número total de 1000pasos y se consideró un solo modo de vibrar.

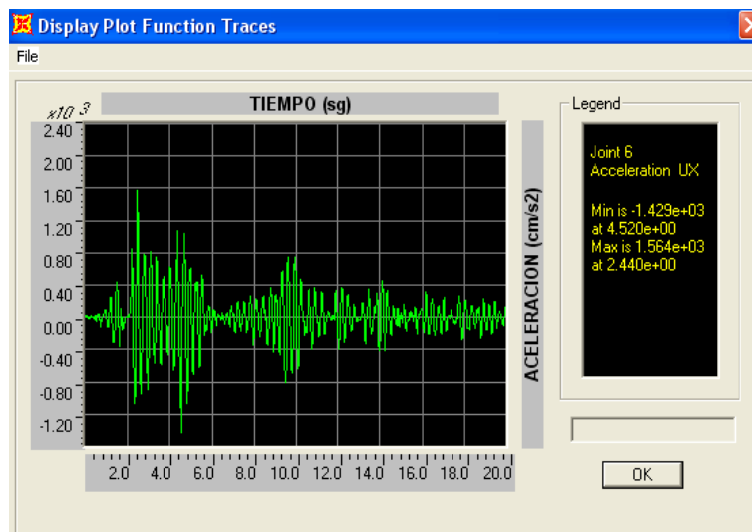
### GRÁFICO N°41: MODELO EMPLEADO EN EL PROGRAMA



### GRÁFICO N°42: REGISTRO ACELEROGRÁFICO INGRESADO



### GRÁFICO N°43: RESPUESTA EN ACELERACIÓN RELATIVA



### GRÁFICO N°44: RESPUESTA EN VELOCIDAD RELATIVA

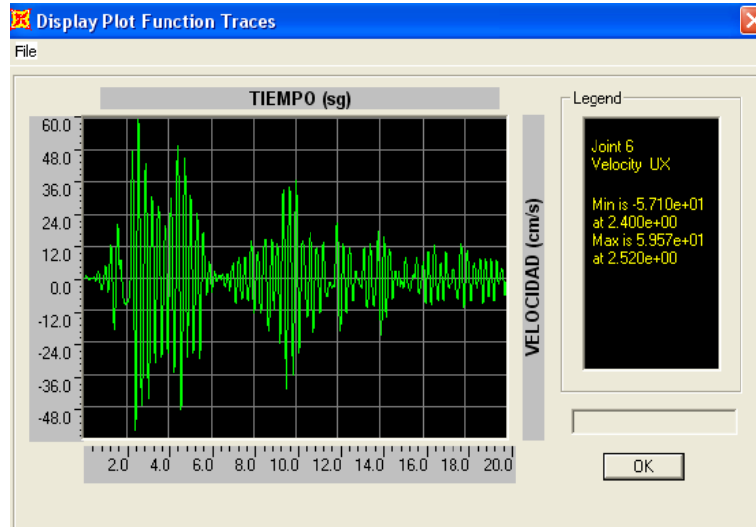


GRÁFICO N°45: RESPUESTA EN DESPLAZAMIENTO RELATIVO

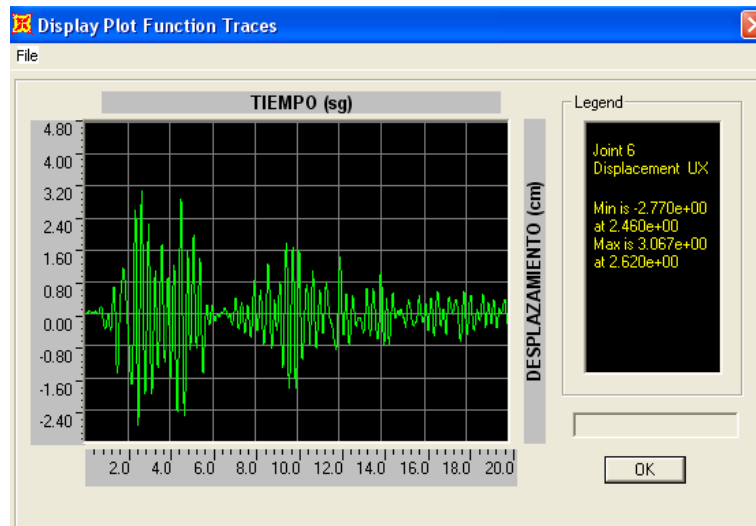
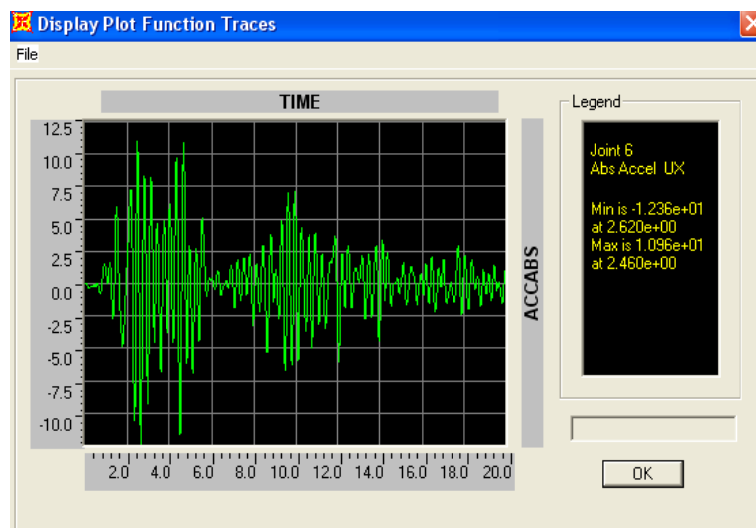


GRÁFICO N°46: RESPUESTA EN ACELERACIÓN ABSOLUTA





## COMPARACIÓN DE LOS VALORES ENTREGADOS POR EL PROGRAMA Y LOS VALORES OBTENIDOS MEDIANTE EL MÉTODO DE NEWMARK

<b>ACELERACIÓN RELATIVA (cm/s<sup>2</sup>):</b>			
	<b>SAP 2000</b>	<b>MTDO NEWMARK</b>	<b>DIFERENCIA</b>
<b>MAXIMO:</b>	1564	1778.47	12.06%
<b>MINIMO:</b>	-1429	-1725.32	17.17%

<b>VELOCIDAD (cm/s):</b>			
	<b>SAP 2000</b>	<b>MTDO NEWMARK</b>	<b>DIFERENCIA</b>
<b>MAXIMO:</b>	59.57	65.76	9.41%
<b>MINIMO:</b>	-57.1	-53.57	6.58%

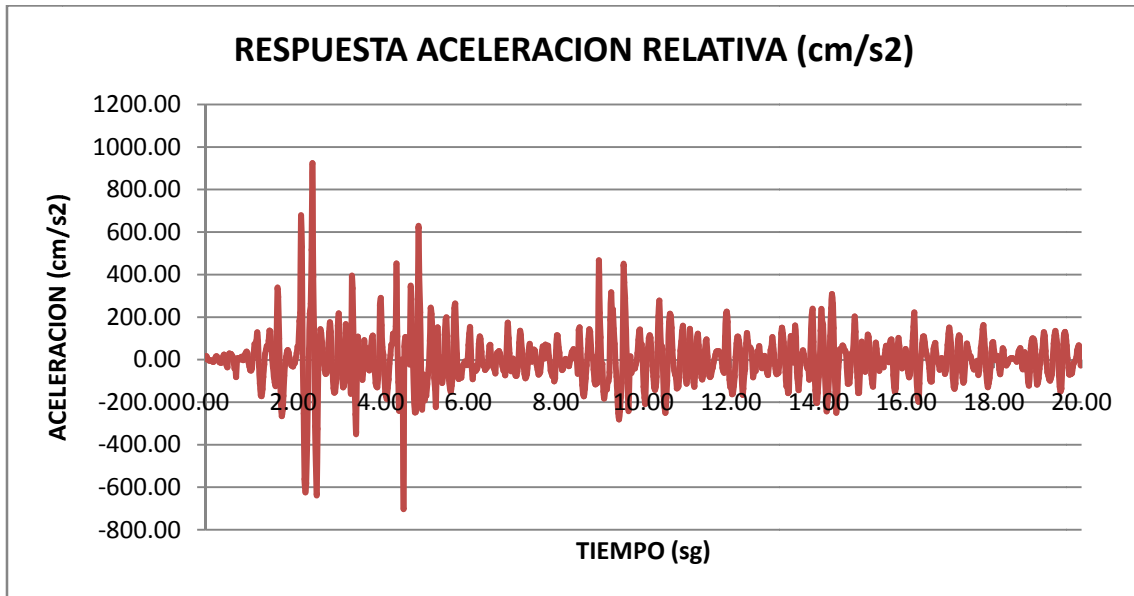
<b>DESPLAZAMIENTOS (cm):</b>			
	<b>SAP 2000</b>	<b>MTDO NEWMARK</b>	<b>DIFERENCIA</b>
<b>MAXIMO:</b>	3.06	2.75	11.25%
<b>MINIMO:</b>	-2.77	-2.40	15.22%

<b>ACELERACIÓN ABSOLUTA (cm/s<sup>2</sup>):</b>			
	<b>SAP 2000</b>	<b>MTDO NEWMARK</b>	<b>DIFERENCIA</b>
<b>MAXIMO:</b>	1096	1284.53	14.68%
<b>MINIMO:</b>	-1236	-1461.09	15.41%

### CASO 2: CONSIDERANDO UN DISPOSITIVO TIPO FLUIDO VISCOSO

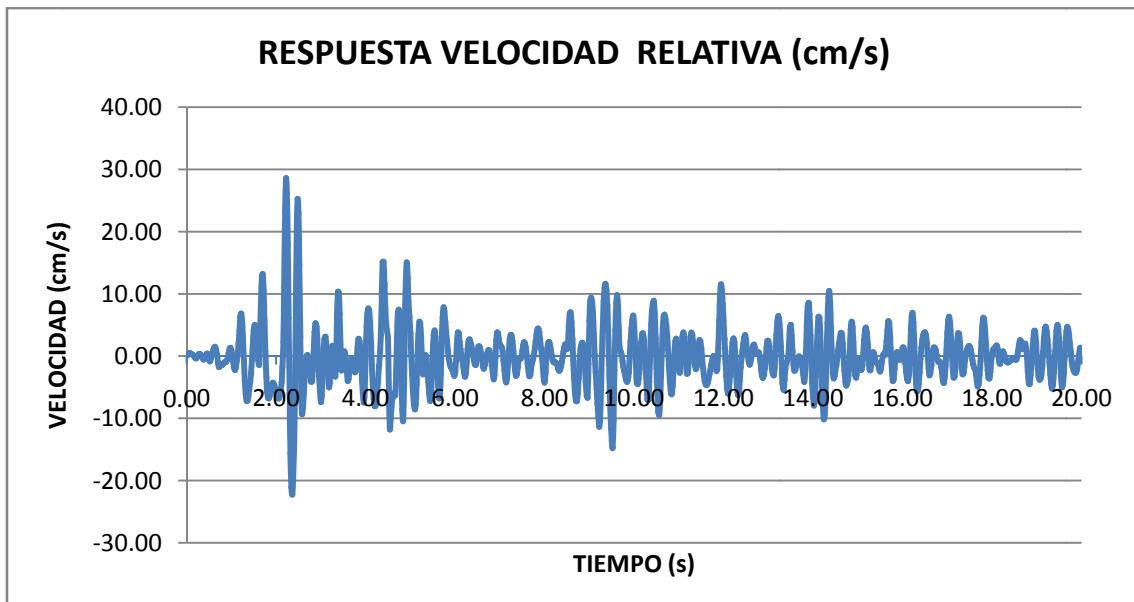
Ahora se considera el mismo ejemplo anterior sujeto al registro correspondiente a la componente N.S. de El Centro 1940 con la diferencia que posee un disipador de energía tipo fluido viscoso, con lo que se puede apreciar su ventaja al obtener la respuesta del sistema. Se resuelve de igual forma tanto por el método de Newmark así como con el programa computacional SAP 2000v10.

**GRÁFICO N°47: RESPUESTA EN ACELERACIÓN RELATIVA**



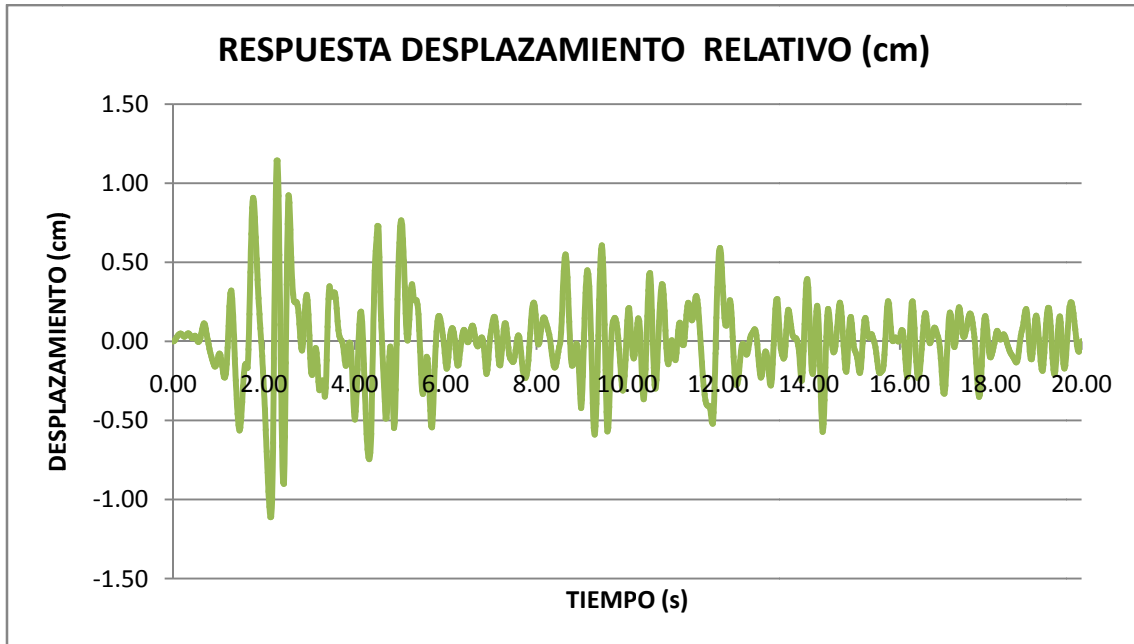
<b>VALORES EXTREMOS</b>	
ACELERACIÓN MÁXIMA	923.51 cm/s <sup>2</sup>
ACELERACIÓN MÍNIMA	-702.29 cm/s <sup>2</sup>

**GRÁFICO N°48: RESPUESTA EN VELOCIDAD RELATIVA**



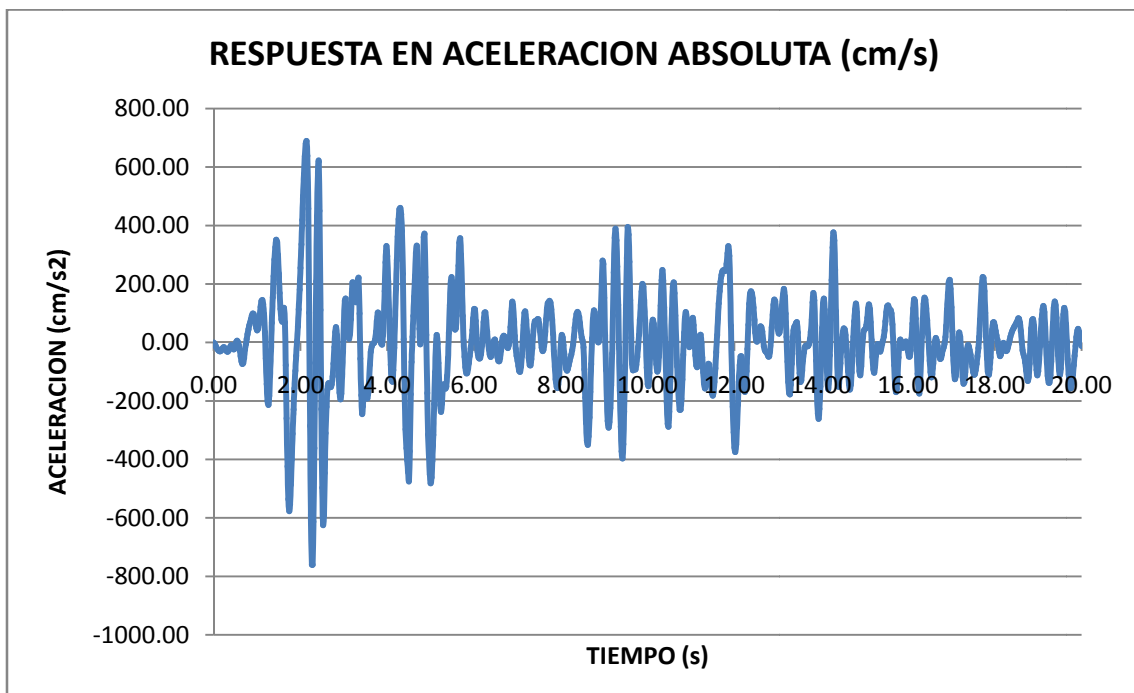
<b>VALORES EXTREMOS</b>	
VELOCIDAD MÁXIMA	28.56 cm/s
VELOCIDAD MÍNIMA	-22.24 cm/s

### GRÁFICO N°49: RESPUESTA EN DESPLAZAMIENTO RELATIVO



VALORES EXTREMOS	
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO	1.17 cm
DESPLAZAMIENTO MÍNIMO	-1.36 cm

### GRÁFICO N°50: RESPUESTA EN ACELERACIÓN ABSOLUTA



VALORES EXTREMOS	
ACELERACIÓN MÁXIMA	688.62 cm/s <sup>2</sup>
ACELERACIÓN MÍNIMA	-759.91 cm/s <sup>2</sup>

### RESPUESTA OBTENIDA MEDIANTE EL PROGRAMA SAP2000

Para modelar el comportamiento del disipador mencionado se emplea el elemento *Damper*, mismo que se basa en el modelo viscoelástico de Maxwell, formado por un resorte en serie con un amortiguador, como es un dispositivo dependiente netamente de la velocidad, la rigidez del resorte debe ser igual a cero.

El período de vibración y la frecuencia circular obtenidas mediante el programa son de 0.31sg y de 20.13 rad/sg respectivamente.

El coeficiente de amortiguamiento del dispositivo se estima mediante la expresión conocida:

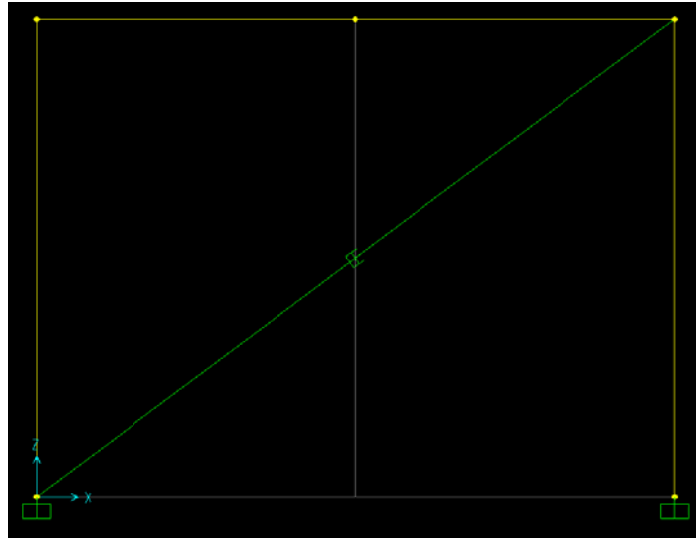
Siendo

Donde  $\zeta$  y  $\zeta_s$  representan el amortiguamiento natural y suplementario respectivamente.

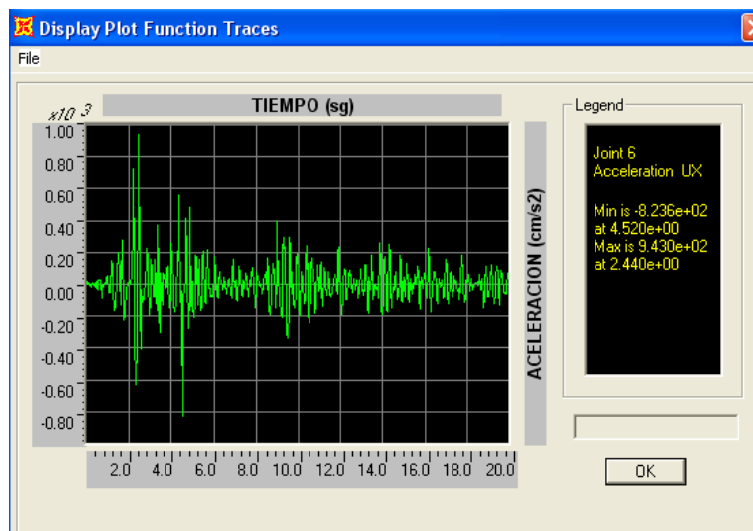
Se ha adoptado un amortiguamiento global del 25% por lo que al ser el amortiguamiento natural del 5%, el suplementario es del 20% del crítico.

Por tanto, se estima el valor del coeficiente de amortiguamiento de  $C = 177$  kg.sg/cm

## GRÁFICO N°51: MODELO EMPLEADO CON DISIPADOR FLUIDO VISCOSO



## GRÁFICO N°52: RESPUESTA EN ACELERACIÓN RELATIVA



## GRÁFICO N°53: RESPUESTA EN VELOCIDAD RELATIVA

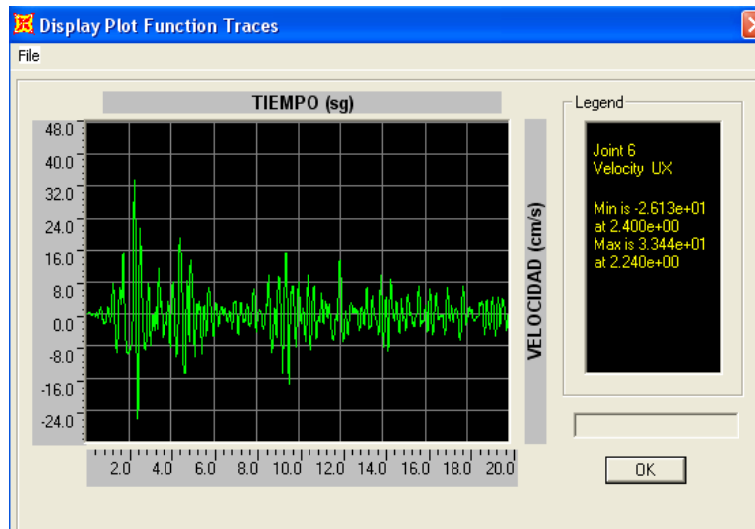


GRÁFICO N°54: RESPUESTA EN DESPLAZAMIENTO RELATIVO

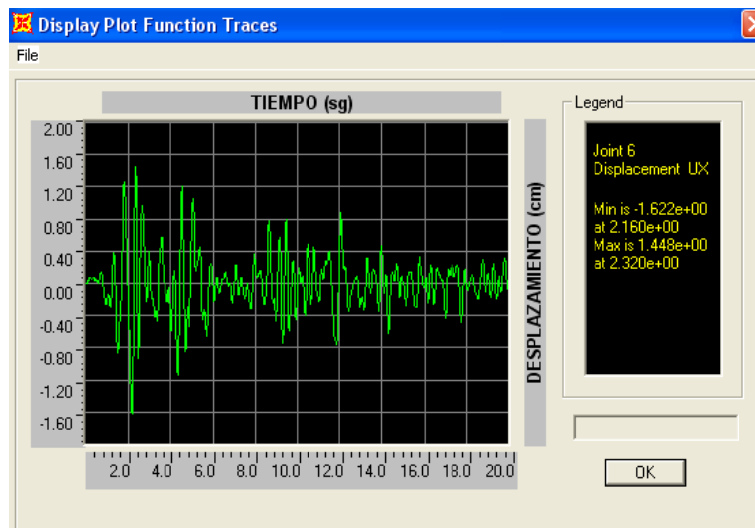
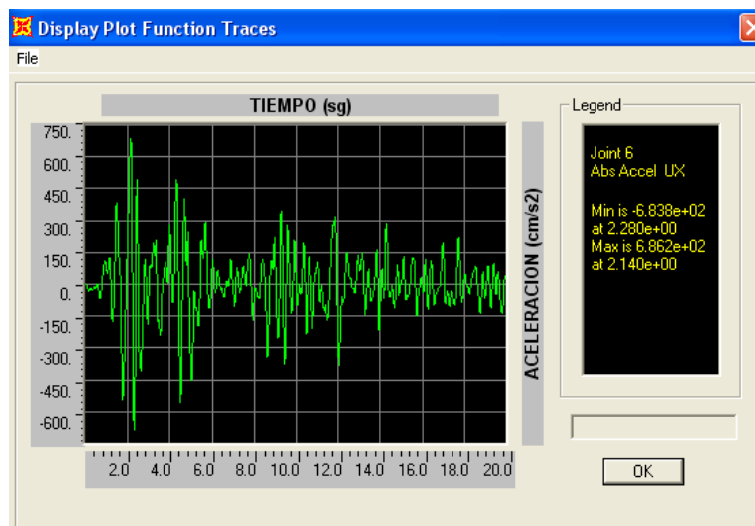


GRÁFICO N°55: RESPUESTA EN ACELERACIÓN ABSOLUTA



## COMPARACIÓN DE LOS VALORES ENTREGADOS POR EL PROGRAMA Y LOS VALORES OBTENIDOS MEDIANTE EL MÉTODO DE NEWMARK

<b>ACELERACION (cm/s<sup>2</sup>):</b>			
	<b>SAP 2000</b>	<b>MTDO NEWMARK</b>	<b>DIFERENCIA</b>
<b>MAXIMO:</b>	943	923.51	2.11%
<b>MINIMO:</b>	-823.6	-702.29	17.27%

<b>VELOCIDAD (cm/s):</b>			
	<b>SAP 2000</b>	<b>MTDO NEWMARK</b>	<b>DIFERENCIA</b>
<b>MAXIMO:</b>	33.44	28.56	17.09%
<b>MINIMO:</b>	-26.13	-22.24	17.49%

<b>DESPLAZAMIENTOS (cm):</b>			
	<b>SAP 2000</b>	<b>MTDO NEWMARK</b>	<b>DIFERENCIA</b>
<b>MAXIMO:</b>	1.4	1.17	19.62%
<b>MINIMO:</b>	-1.6	-1.36	17.65%

<b>ACELERACION ABSOLUTA (cm/s<sup>2</sup>):</b>			
	<b>SAP 2000</b>	<b>MTDO NEWMARK</b>	<b>DIFERENCIA</b>
<b>MAXIMO:</b>	686.2	688.62	0.35%
<b>MINIMO:</b>	-683.8	-759.91	10.02%

De los resultados obtenidos se puede apreciar que tanto para el caso uno como para el caso dos, los valores de las respuestas tanto en aceleración, velocidad y desplazamientos son similares, de lo que se puede concluir que los valores entregados por el programa son adecuados y confiables, así mismo se puede concluir que se está manejando el programa de forma correcta.

Por otra parte se puede apreciar con claridad el efecto del disipador de fluido viscoso en la respuesta estructural del sistema, se observa una clara disminución tanto en las aceleraciones, velocidad y desplazamientos, lo que se presenta como resumen en la tabla siguiente:

<b>PARAMETRO</b>	<b>SIN DISIPADOR</b>	<b>CON DISIPADOR</b>	<b>DIFERENCIA (%)</b>
ACELERACION ABSOLUTA (cm/s <sup>2</sup> )	1096	686.2	37.39
VELOCIDAD RELATIVA (cm/s)	59.57	34.44	42.19



DESPLAZAMIENTO RELATIVO (cm)	30.67	14.48	52.79
CARGA AXIAL (Kg)	-8076	-4730	41.43
MOMENTO FLECTOR (Kg.m)	-23501	-13764	41.43
CORTANTE (Kg)	-14631	-7740	47.10

Se ha comparado en la tabla anterior únicamente los resultados entregados por el programa. Los valores de carga axial, momento flector y cortante se refieren a los máximos valores correspondientes a las columnas del sistema.



## CAPÍTULO IV: MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS SISTEMAS PASIVOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA

En este capítulo se presenta un resumen metodológico de la modelación matemática de los dispositivos empleados como disipadores de energía en edificaciones, los disipadores que se han considerado son los disipadores viscoelásticos, los disipadores de fluido viscoso, los disipadores histeréticos y por fricción, y los aisladores sísmicos, la formulación matemática se ha tomado con permiso escrito de los autores de la publicación “Edificaciones con disipadores de Energía, 2008” de los Dr. Genner Villarreal Castro y M.Sc. Ricardo Oviedo Sarmiento [6].

Luego de presentada la formulación matemática, se plantea el desarrollo de un ejemplo práctico en el cual se puede verificar la ventaja del uso de los disipadores pasivos de energía en edificaciones, se ha propuesto el análisis de un edificio real, basándose en los ejes del proyecto arquitectónico. Se desarrolló el modelo matemático de análisis con la ayuda del programa de cálculo estructural SAP2000 v.10 realizando un análisis tiempo historia.

### 4.1. DISIPADORES VISCOELÁSTICOS

La respuesta de los materiales viscoelásticos bajo carga dinámica depende de la frecuencia de vibración, del nivel de deformación y la temperatura del ambiente, bajo excitación armónica infinitesimal con la frecuencia  $\omega$ , la relación entre el esfuerzo de corte  $\tau(t)$  y la deformación por corte  $\gamma(t)$  puede expresarse como:

$$\tau(t) = G'(\omega) \gamma(t) + G''(\omega) \dot{\gamma}(t) \quad \text{Ec (4.1)}$$

Donde  $G'(\omega)$  y  $G''(\omega)$  son respectivamente el módulo de almacenamiento y pérdida por corte, el factor de pérdida es definido como:

$$\tan \delta = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} \quad \text{Ec (4.2)}$$

Para una excitación más general, el principio de superposición de Boltzmann puede ser transformado para proveer la siguiente relación constitutiva para materiales polímeros:

$$\tau(t) = \int_0^t G(t-\tau) \dot{\gamma}(\tau) d\tau \quad \text{Ec (4.3)}$$

En la ecuación anterior  $G(t)$  representa el módulo de relajación del esfuerzo, el cual es definido como el ratio del esfuerzo a la deformación para el caso de



deformación constante. El valor de  $G(t)$  puede ser determinado experimentalmente para un material dado.

El valor de  $G(t)$  puede ser determinado experimentalmente para un material dado. También existen diferentes expresiones que pueden ser asumidas para el módulo de relajación del esfuerzo, como el desarrollado por Williams (1964), el cual predice un módulo límite para todos los tiempos no negativos y ha sido encontrado razonablemente preciso para la mayoría de los materiales viscoelásticos. Inicialmente el módulo de relajación del esfuerzo coincide con el módulo vidrioso, pero suavemente se aproxima al módulo tipo caucho con el incremento del tiempo. (Shen y Soong, 1995).

$$\text{—————} \quad \text{Ec (4.4)}$$

Al realizar una transformación laplaciana de la ecuación anterior, los parámetros del modelo pueden ser relacionados al módulo de almacenamiento y al de pérdida, las expresiones resultantes se muestran a continuación:

$$\text{—————} \quad \text{Ec (4.5)}$$

$$\text{—————} \quad \text{Ec (4.6)}$$

Donde  $\Gamma$  representa a la función gamma.

Los materiales empleados en estos disipadores dependen de la temperatura, para una amplia clase de polímeros la forma de la superficie de la curva del módulo dinámico versus la frecuencia es similar cuando es evaluada a varias temperaturas, lo que conllevó al desarrollo del método de las variables reducidas (Ferry, 1980) el cual muestra una conveniente simplificación en la separación de las dos variables principales, *la frecuencia y la temperatura*. Utilizando este método, la dependencia de la temperatura del módulo viscoelástico puede ser obtenido de la siguiente manera:

$$\text{—————} \quad \text{Ec (4.7)}$$

$$\text{—————} \quad \text{Ec (4.8)}$$

$$\text{—————} \quad \text{Ec (4.9)}$$

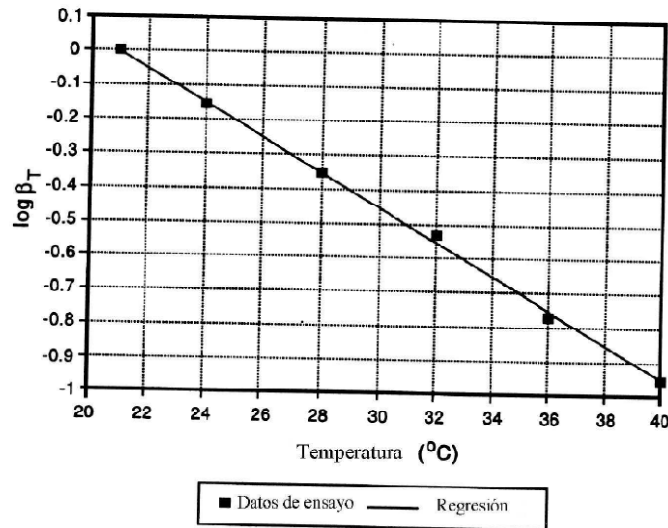
Donde:

$T$ , es la temperatura de ambiente de interés.

$T_0$ , es la temperatura de referencia arbitrariamente seleccionada, donde las mediciones son hechas.

$\rho$ , densidad del material viscoso.

Todas las temperaturas deben ser medidas a una escala absoluta. El factor  $\beta_T$  es un factor de cambio del tiempo o frecuencia, el cual es determinado experimentalmente, frecuentemente una impresión del  $\log \beta_T$  versus la temperatura produce casi una línea recta, como el ejemplo de datos experimentales mostrados en la figura.



Una vez que el modelo constitutivo ha sido establecido para la respuesta del material del disipador en corte, todo el modelo fuerza – deformación para el disipador puede ser construido. Debido a la simplicidad geométrica del área de corte típico del disipador  $A$  y el espesor  $\delta$  la siguiente relación fuerza – deformación es obtenida para la respuesta bajo la excitación armónica en el tiempo:

$$\text{Ec (4.10)}$$

Donde:

\_\_\_\_\_

$$\text{Ec (4.11)}$$

\_\_\_\_\_

$$\text{Ec (4.12)}$$

En la mayoría de aplicaciones estructurales, las aproximaciones involucradas en la adopción del modelo anterior son razonablemente provistas para que uno seleccione un valor propio de  $\omega$ . Por ejemplo, en sistemas estructurales de múltiples grados de libertad, Soon y Lai (1991) han propuesto el uso del método de energía de deformación modal para establecer los radios de amortiguamiento modal y las frecuencias modales modificadas debido a la adición de los disipadores viscoelásticos [6].

## 4.2. DISIPADORES VISCOELÁSTICOS DE FLUIDO

La disipación de energía ocurre vía conversión de la energía mecánica al calor relacionada a la deformación del pistón y a la sustancia altamente viscosa similar a un gel de silicona, para maximizar la densidad de la disipación de energía uno debe emplear materiales con altas viscosidades, lo que generalmente conlleva a la selección de materiales que exhiben comportamientos dependientes de la temperatura y la frecuencia.

A través de los años, numerosos modelos constitutivos han sido propuestos para los disipadores viscoelásticos fluidos, una particular clase efectiva está basada en la generalización de los modelos clásicos para incorporar operadores fraccionales derivados, esto fue primeramente sugerido por Gemant (1936), más recientemente Makris y Constantinou (1991) aplicaron los modelos fraccionales derivados de Maxwell para representar el comportamiento de los disipadores viscoelásticos fluidos y después extenderlo a modelos incorporando derivadas de orden complejo. (Makris y Constantino, 1993)[6].

El modelo constitutivo de Maxwell de derivada compleja que ha sido usada para caracterizar un particular fluido polibutano sobre un amplio rango de frecuencia y temperatura (Makris et al., 1995); a alguna temperatura referencial  $T_0$  bajo la suposición de una deformación infinitesimal incompresible, el modelo propuesto puede ser escrito en términos de esfuerzo de corte  $\tau$  y deformación de corte  $\gamma$ .

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{Ec (4.13)}$$

Donde  $\lambda = \lambda_1 + i.\lambda_2$ ,  $\lambda = \lambda_1 + i.\lambda_2$ ,  $\lambda = \lambda_1 + i.\lambda_2$ , son parámetros de material de valores complejos. Ambos parámetros  $\lambda$  y  $\mu$  son funciones de la temperatura.

El símbolo  $dv/dtv$  denota una derivada generalizada de orden "v" con respecto al tiempo (Oldham y Spanier, 1974). Para  $v=1$  la ecuación anterior se reduce al clásico modelo de Maxwell. El módulo de ganancia  $G'$  y el módulo de pérdida  $G''$  corresponden al modelo mostrado, que puede ser obtenido realizando una transformada de Fourier. Utilizando la relación para la transformada de Fourier de una derivada generalizada (Erdelyi et al., 1954; Makris, 1992):

$$\text{---} \quad \text{Ec (4.14)}$$

Uno obtiene:

$$\text{Ec (4.15)}$$

$$\text{Ec (4.16)}$$

Con cálculo dinámico:

$$E_c (4.17)$$

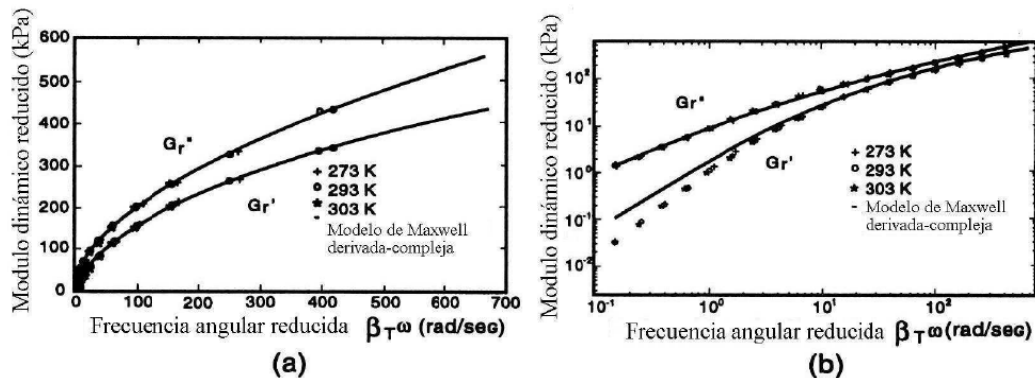
En las ecuaciones 4.15 y 4.16 “K” y “E” extraen respectivamente la parte real e imaginaria de su argumento.

Los parámetros del material son entonces obtenidos de información experimental utilizando una regresión algorítmica no lineal en el espacio complejo, con una restricción adicional casual para asegurar un retraso en la fase no negativa (Makris et al., 1995).

Habiendo establecido los parámetros del material en el modelo de Maxwell de derivada compleja, la dependencia de la frecuencia es completamente caracterizada a la temperatura de referencia  $T_0$ . Sólo queda determinar la dependencia de la temperatura de la respuesta. Otra vez el método de variables reducidas puede ser frecuentemente aplicado. En este caso la función de frecuencia  $\beta_T$  caracteriza la dependencia de la temperatura.

Una impresión del módulo dinámico reducido versus la frecuencia angular reducida,  $\beta_T \omega$  es mostrado en la figura a continuación, para un fluido polibutano.

### GRÁFICO N°56: MÓDULO DINÁMICO PARA FLUIDO POLIBUTANO



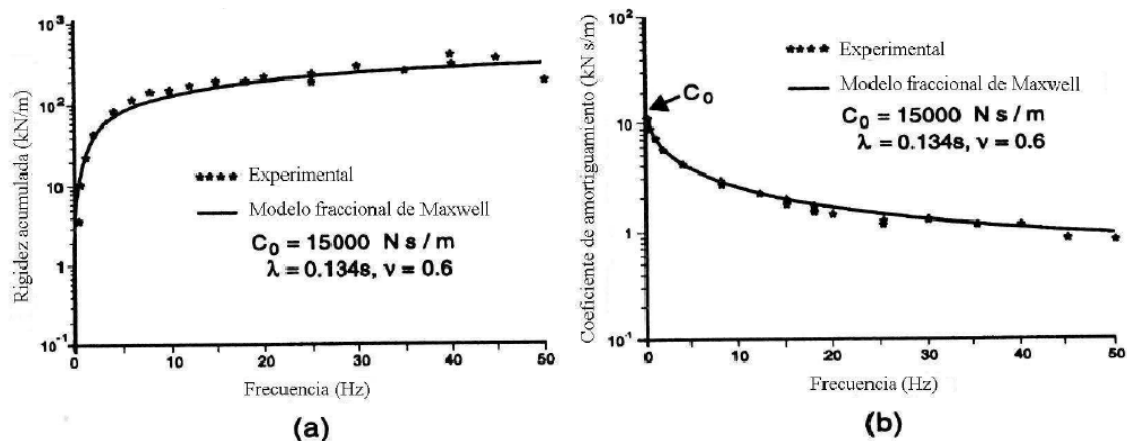
Esta información experimental obtenida a tres diferentes temperaturas, claramente delinea un par de curvas maestras para el módulo de ganancia y pérdida y valida el uso del método de variables reducidas para este material. También se grafica en esa figura el módulo dinámico de corte obtenido del modelo de Maxwell de derivada compleja. La correlación es buena en un amplio rango de frecuencias, la única desviación notable ocurre en el módulo de ganancia a baja frecuencia, por otra parte, en ese rango, el módulo de pérdida es un orden de magnitud más grande, a pesar de que se reduce significativamente la desviación.

En muchos casos se podría esperar que toda la respuesta fuerza – deformación de los disipadores fluidos cercanamente siga el comportamiento constitutivo. En Makris y Constantinou (1991) y Makris et al., (1993) el siguiente modelo fuerza desplazamiento de Maxwell de derivada fraccional fue utilizado para modelar toda la respuesta del disipador:

$$\text{Ec (4.18)}$$

Con “F” como la fuerza aplicada al pistón y “x” como la resultante del desplazamiento del pistón. Los parámetros del disipador  $C_0$ ,  $\lambda$ , y  $\nu$ , representan respectivamente, el coeficiente de amortiguamiento de frecuencia cero, el tiempo de relajación y el orden de la derivada fraccional. En Makris y Constantinou (1991), los parámetros del disipador son determinados directamente de información experimental, mientras que en Makris et. Al (1993) los parámetros son estimados de la información del material y un modelo analítico simplificado. Un resultado típico es el mostrado en la figura siguiente, se puede notar que para frecuencias suficientemente bajas, los efectos de la inercia sin importantes, y se corrobora que los parámetros macroscópicos  $\lambda$  y  $\nu$  coinciden con aquellos obtenidos de la modelación constitutiva, a pesar, de que solamente  $C_0$  es una función de la geometría del disipador. [6]

**GRÁFICO N°57: MODELO MICROSCÓPICO PARA LA RESPUESTA DE DISIPADOR CILÍNDRICO**

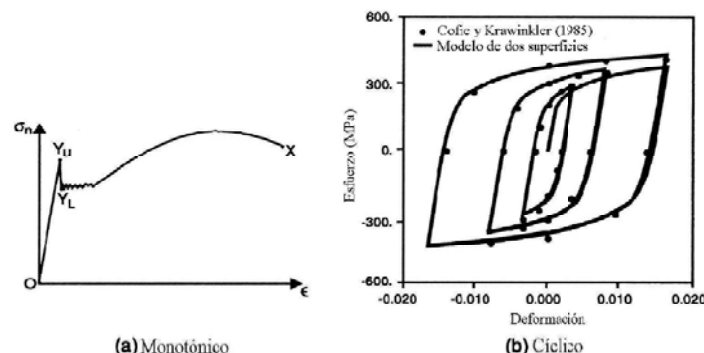


#### 4.3. DISIPADORES POR PLASTIFICACIÓN DE METALES

Uno de los mecanismos más efectivos disponibles para la disipación de la energía, dentro de una estructura durante un sismo, es a través de la deformación inelástica de sustancias metálicas. La idea de utilizar disipadores histeréticos metálicos en la superestructura para absorber una gran porción de la energía sísmica comenzó con el trabajo conceptual y experimental de Kelly et al., (1992) y Skinner et al., (1975).

A pesar de que existen diferencias en la configuración geométrica de varios dispositivos metálicos, el mecanismo de disipación en todos los casos resulta de la deformación inelástica de un metal, usualmente acero, a pesar que algunas veces es empleado el plomo. En cualquier caso, para emplear efectivamente un disipador metálico para diseño estructural sísmoresistente, uno debe construir un modelo matemático razonable de sus características relevantes fuerza – deformación. Debido a que toda la respuesta está íntimamente relacionada con el comportamiento cíclico esfuerzo – deformación del metal, es beneficioso revisar detalladamente la respuesta estructural típica de esfuerzo – deformación del acero estructural. La respuesta de un espécimen de acero, sometido a una carga uniaxial monotónica, se muestra en la figura siguiente, incluye la apariencia en esfuerzo de fluencia superior e inferior, una platea de esfuerzo – deformación y también una zona de endurecimiento por deformación. Bajo ciclos controlados de deformación de amplitud constante, resulta la respuesta mostrada en el gráfico N° 37(b)

### GRÁFICO N°58: MODELO MICROSCÓPICO PARA LA RESPUESTA DE DISIPADOR CILÍNDRICO



A cualquier amplitud dada, una curva estabilizada es eventualmente obtenida, la cual es independiente de la carga histórica (Cofie y Krawinkler, 1985). Nótese en el gráfico N° 37(b) que el pico de la rótula es suavizada y que la platea ha desaparecido, lógicamente uno debería esperar que toda la respuesta fuerza – deformación de los disipadores metálicos tengan una apariencia similar. Este es generalmente el caso para el disipador de plato de superficie - X (Wittaker et al., 1991). [6].

Existen al menos dos diferentes aproximaciones que pueden ser tomadas para construir un modelo de disipador fuerza – desplazamiento. La primera aproximación involucra el uso directo de la información experimental obtenida de las pruebas de los componentes de los disipadores metálicos. La forma básica del modelo fuerza – desplazamiento es seleccionado, usualmente basado en analogía con la teoría plástica y después los parámetros del modelo son determinados vía un procedimiento de ajuste de curva.

En la segunda aproximación, el modelo fuerza desplazamiento de una relación constitutiva apropiada para el metal, se obtiene aplicando los principios de la mecánica. Esta aproximación posterior puede frecuentemente proveer adicional perspicacia en el comportamiento del dispositivo, mientras se reducen los requerimientos para las pruebas de los componentes.

Uno de los primeros avances para desarrollar una relación racional fuerza – desplazamiento para un disipador metálico fue investigado por Ozdemir (1976), el enfoque en ese estudio fueron los disipadores de vigas de torsión, cuyas formulaciones desarrolladas tienen aplicaciones más generales.

La respuesta de cualquier disipador metálico es una función de su geometría y las características mecánicas del metal del cual es fabricado, consecuentemente es bastante lógico utilizar modelos fuerza – desplazamiento que tienen una forma similar a aquellos empleados para el modelamiento constitutivo de ese metal, esto es exactamente la característica tomada por Ozdemir, la estructura de sus modelos de disipadores está basado en aquellos frecuentemente usados en estados variables de viscoplasticidad.

El modelo de Ozdemir para el disipador puede ser escrito de la siguiente manera:

$$\text{—} \quad \text{Ec (4.19)}$$

$$\text{—} \quad \text{Ec (4.20)}$$

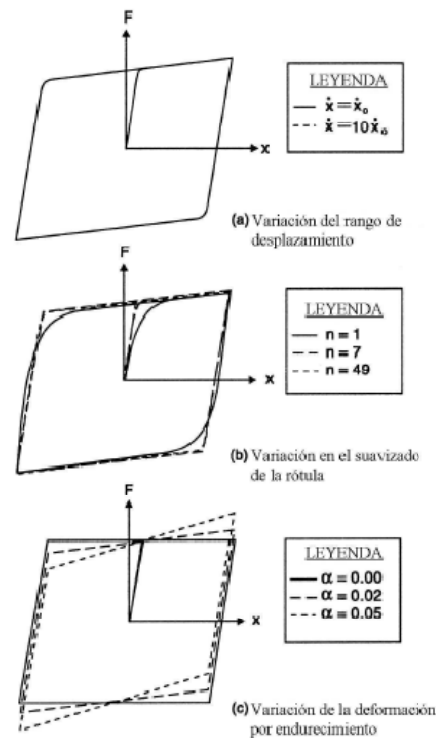
Siendo **F** la fuerza del disipador, “**x**” el desplazamiento y **B** la variable interna, que representa la fuerza de retorno. Los puntos sobrepuestos representan la diferenciación con respecto al tiempo. Los cuatro parámetros  $k_0$ ,  $F_0$ ,  $n$  y  $\alpha$  son requeridos para definir la respuesta del disipador. En las dos ecuaciones anteriores el exponente “**n**” es restringido a integradores impares, a pesar de que la forma de las ecuaciones pueden ser fácilmente generalizadas para permitir a “**n**” como cualquier número real (Graesser y Cozzarelli, 1991).

Observe que la integración de las ecuaciones 4.19 y 4.20 en el tiempo es requerida para la determinación de la respuesta del disipador. Esto es fácil de realizarlo utilizando por ejemplo una fórmula de Runge-Kuta de orden superior con tamaño de paso adaptivo (Press et al., 1992). Como una ilustración del comportamiento potencial en la ecuación 4.19, considere la respuesta mostrado en la figura siguiente debido a la variación sinusoidal del desplazamiento, nótese que en el gráfico N° 38 a) que la respuesta es independiente del rango de desplazamiento. El parámetro  $k_0$  representa la rigidez elástica inicial del dispositivo, además es evidente del gráfico N° 38 b)



que el parámetro “n” controla la superficie de la rótula, mientras que “ $\alpha$ ” determina la curvatura en el rango inelástico como se muestra en el gráfico N° 38 c) Para n tendiendo a infinito la idealización de la respuesta es un endurecimiento por deformación elástico – lineal.

### GRÁFICO N°59: MODELO RADIO – INDEPENDIENTE DE OZDEMIR



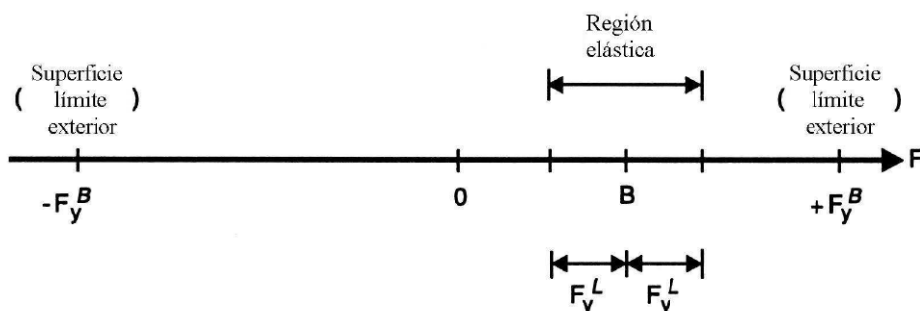
Adicionalmente cuando  $\alpha=0$ , el modelo clásico plástico perfectamente elástico es recobrado. Se puede notar que la cantidad de energía disipada por el dispositivo pasivo modelado por las ecuaciones 4.19 y 4.20 pueden ser determinados fácilmente en cualquier instante vía integración numérica. En el trabajo original de Ozdemir (1976) los parámetros del disipador  $k_0$ ,  $F_0$ ,  $n$  y  $\alpha$  fueron seleccionados para proveer un mejor ajuste con los resultados experimentales para una carga sinusoidal de desplazamiento controlado. El modelo fue subsecuentemente verificado vía comparaciones que involucraban excitaciones de desplazamiento controlado y se encontró una buena relación con los modelos para magnitudes moderadas de desplazamiento.

Las extensiones de las ecuaciones 4.19 y 4.20 son también posibles para modelar respuestas cíclicas más complicadas, en particular, Ozdemir examinó modelos que incluían la deteorización del esfuerzo de fluencia, el módulo elástico y las características de endurecimiento al introducir variables internas adicionales. Estas versiones extendidas con pequeñas variaciones, tienen aplicación directa a muchos de los disipadores mecánicos actualmente en existencia. Además, algún cuidado es necesitado, desde que la estructura del modelo radio independiente de Ozdemir está cercanamente relacionado a versiones tempranas de la teoría de la plasticidad endocrónica (Valanis, 1971).

Como un resultado, este modelo surge de algún defecto teórico presente en las formulaciones iniciales de Valanis (Rivlin, 1981). A pesar de que resultados estables son obtenidos, un control cuidadoso es necesario para aproximar soluciones que son obtenidas de aplicaciones de radio independiente.

Alternativamente, uno puede desarrollar un modelo basado en la analogía con los modelos populares de plasticidad de dos superficies (Dafalias y Popov, 1975; Krieg, 1975). Considere por ejemplo la versión uniaxial escrita en el espacio fuerza – deformación, donde dos distintas superficies de fluencia son definidas en el espacio fuerza, tal como se muestra en la figura siguiente. La carga, la cual separa los regímenes de respuesta elástico e inelástico, está caracterizada por su centro y radio representado por la fuerza anterior  $B$  y la fuerza de fluencia  $F_Y^L$  respectivamente. Así mismo, la superficie de borde, la cual completamente contiene la superficie interior más pequeña, está siempre centrada en el origen de la fuerza espacio con radio igual a una variable exterior de fluencia  $F_Y^B$ . La traslación de la superficie interna corresponde al endurecimiento cinemático, mientras que la expansión de la superficie exterior produce endurecimiento isotrópico del dispositivo.

### GRÁFICO N° 60: MODELO FUERZA DESPLAZAMIENTO DE DOS SUPERFICIES



El criterio de fluencia, reglas de flujo y regla de endurecimiento están establecidas para asegurar que las fuerzas actuales  $F$  siempre descansen en ambas superficies, que todas las transiciones durante la carga sean suaves y que los ciclos de deformación infinitesimal no causen comportamientos anómalos. El modelo, el cual requiere la determinación de seis parámetros del dispositivo ( $k$ ,  $F_Y^L$ ,  $F_{Y0}^B$ ,  $h_0^B$ ,  $h_1^B$  y  $n$ ) está definido a continuación. Note que  $F_{Y0}^B$  corresponde al valor inicial de  $F_Y^B$ . Los valores de dichos parámetros pueden ser obtenidos de informaciones de respuesta cíclicas de disipadores fuerza-desplazamiento utilizando el algoritmo de Marquardt (1963) para ajustes no lineales [6].

#### Modelo de dispositivo uniaxial de doble superficie: [6]

Si

Carga elástica o descarga



Además si  $\mu < \mu_c$ , entonces

Carga inelástica dentro de la superficie exterior

Donde

Además

Carga inelástica en la superficie exterior

Donde

#### **4.4. DISIPADORES POR FRICCIÓN**

En los disipadores por fricción, el trabajo irrecuperable está hecho por la fuerza tangencial requerida para deslizar un cuerpo sólido a lo largo de la superficie de otro. Es naturalmente importante que una consistente y predecible



respuesta friccional sea mantenida a lo largo de la vida del disipador. Esta respuesta depende de considerables condiciones de su superficie, la cual puede verse afectada por factores ambientales. Existen numerosas formas de fricción que pueden ser efectivamente utilizadas para mitigar el daño a las estructuras durante eventos sísmicos, pero todos los dispositivos de esta categoría emplean la fricción del desplazamiento del sólido como su mecanismo disipativo básico.

Los efectos del amortiguamiento friccional en la respuesta de estructuras de edificios fue investigada por Mayes y Mowbray (1975), a pesar de que Keightley (1977) fue el primero en considerar dispositivos friccionales para aplicaciones de edificios. Basado primariamente en una analogía de los frenos de los automóviles, Pall et al., (1980) continuó con el desarrollo de disipadores friccionales pasivos para mejorar la respuesta sísmica de las estructuras. El objetivo es disminuir el movimiento de los edificios “frenando en vez de quebrando” (Pall y Marsh, 1982). [6]

La teoría básica está basada en la hipótesis, la cual fue inicialmente usada para experimentos físicos involucrando deslizamiento plano de bloques rectilíneos:

1. La fuerza friccional total que puede ser desarrollada es independiente del área de superficie aparente de contacto.
2. La fuerza friccional total que puede ser desarrollada es proporcional a la fuerza normal actuando a lo largo de la interfase.
3. Para el caso de deslizamiento con bajas velocidades relativas, la fuerza friccional total es independiente de esa velocidad.

Como resultado de estas suposiciones, en el instante del deslizamiento independiente o durante el deslizamiento propiamente, se obtendrá:

$$E_c (4.21)$$

Donde:

$F_t$ : Fuerza de fricción  
 $\mu$ : coeficiente de fricción  
 $F_N$ : Fuerza normal

Son introducidos los coeficientes estático ( $\mu_s$ ) y cinético ( $\mu_k$ ). La fuerza friccional  $F_t$  actúa tangencialmente en el plano interfacial a la dirección opuesta al movimiento o impidiendo el movimiento. Para extender la teoría a condiciones más generales, involucrando distribuciones no uniformes o superficies no planas, estas suposiciones básicas son frecuentemente

abstraídas al límite infinitesimal. Las fuerzas totales son reemplazadas por tracciones de superficie y generalizando la ecuación 4.21 se obtiene en términos de las tracciones tangencial  $\tau_t$  y normal  $\tau_n$ .

$$E_c \quad (4.22)$$

Esta forma también es útil para determinar los esfuerzos de contacto que son frecuentemente requeridos para el propio diseño. Note que una integración de la ecuación 4.22 sobre un área de contacto plano se transforma en la ecuación 4.21. El concepto de la fricción de Coulomb, provee las bases teóricas para la mayoría de investigaciones que han aparecido con respecto a los disipadores por fricción. Por otra parte, se debe de entender que los procesos friccionales son simples. En la práctica, la teoría de Coulomb es solamente cierta en forma aproximada. El coeficiente de fricción  $\mu$ , no debe ser visto como una constante. Es un parámetro variable que depende no solamente de la selección de los materiales deslizantes, sino también de la condición presente en la superficie de interfase. Esta dependencia posteriormente incrementa notoriamente la complejidad de la modelación del problema, a partir de que las superficies son frecuentemente el sitio de numerosos procesos físicos y químicos. Estos procesos pueden cambiar las características físicas y químicas de las superficies y consecuentemente producir un impacto significativo en la respuesta friccional a través del cambio en el área verdadera de contacto. En particular, el uso de planchas galvánicas (acero y cobre) debe ser evitado y medidas adicionales de protección deben ser empleadas en condiciones ambientales para prevenir la corrosión.

Considerables esfuerzos han sido directamente orientados hacia el desarrollo de un moderno mecanismo para la fricción sólida, el cual tiende a un mejoramiento cualitativo del entendimiento del proceso, debido a que un cálculo cuantitativo de la respuesta friccional desde el principio no es todavía posible. A partir de que no hay todavía una teoría para la fricción por deslizamiento comparable con la bien establecida teoría de plasticidad de metales, existe una necesidad por mayor cantidad de ensayos físicos. De acuerdo a esto, Pall et al. (1980) comenzó con su desarrollo de disipadores por fricción conduciendo ensayos estáticos y dinámicos en una variedad de elementos simples de deslizamiento teniendo diferentes tratamientos en su superficie. Su objetivo no era necesariamente obtener la máxima disipación de energía, sino identificar un sistema que posea una consistente y predecible respuesta. Para estos ensayos, el contacto fue mantenido entre las dos caras de la superficie pretensionándolas con pernos de alta resistencia.

En las superficies consideradas por Pall et al. (1980), las superficies conteniendo planchas pesadas de frenos insertadas entre las laminas de acero proporcionaron una consistente y predecible respuesta. Basado en el comportamiento obtenido por Pall et al. (1980) la caracterización de su sistema



friccional simple de línea de freno en términos de un modelo plástico perfectamente elástico es apropiado. Incluso una forma limitada del modelo de Ozdemir puede ser utilizada como explicación del modelo simple de plasticidad de superficie única definida a continuación, donde  $k_0$  y  $F_s$  representan la rigidez elástica y la carga de deslizamiento. [6].

### **Modelo del dispositivo perfectamente elástico**

Si  
Elástico

Deslizamiento

En algunos disipadores por fricción, un estado de comportamiento rígido ocurre para desplazamientos cercanos a una superficie de deslizamiento dada. Un modelo histerético para ese caso se define a continuación, donde los parámetros adicionales  $x_b$  y  $k_2$  representan el desplazamiento total al primer contacto con la superficie y la rigidez. El modelo, el cual asume rigidez cero durante el deslizamiento ( $k_1 = 0$ ), es especificado en una razón de forma para describir apropiadamente las arbitrarias historias de carga y descarga.

### **Modelo de dispositivo histerético con límites simétricos: [6]**

Si  
Elástico

Además, si  
Deslizamiento

Comportamiento

## **4.5. AISLADORES SÍSMICOS**

Los aisladores sísmicos son elementos que separan a la estructura del suelo para reducir el efecto de los sismos, estos dispositivos absorben mediante



deformaciones elevadas la energía que un terremoto transmite a una estructura, al utilizar estos elementos, la estructura sufre un cambio en la forma como se mueve durante un sismo y se produce una reducción importante de las fuerzas que actúan sobre ella.

Cuando el sistema de aislamiento se comporta dentro del rango elástico, el sistema de ecuaciones diferenciales puede descomponerse en dos problemas: (Dr. Roberto Aguiar, Msc. Marcelo Romo, Verónica Bravo) [21].

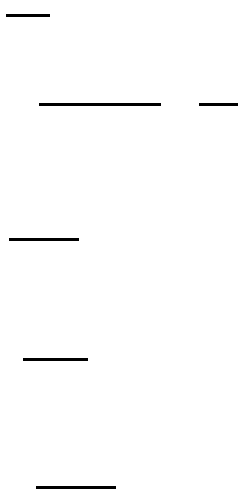
$$Ec (4.23)$$

$$Ec (4.24)$$

La solución total se obtiene superponiendo las soluciones parciales de los dos problemas planteados. Por lo general las características geométricas y mecánicas básicas de un aislador son las siguientes:

- Diámetro
- Altura de cada capa de caucho
- Altura total del caucho
- Presión de apoyo
- Amortiguamiento
- Módulo elástico bruto
- Módulo de corte básico

Las rigideces de los aisladores pueden encontrarse así:



Donde:



- S: Factor de forma  
E<sub>c</sub>: Módulo de elasticidad de compresión  
A: Sección transversal  
K<sub>v</sub>: Rigidez vertical  
K<sub>ef</sub>: Rigidez horizontal

#### 4.6. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LOS DISIPADORES PASIVOS

Se ha modelado un edificio a ser diseñado en hormigón armado, se analizará su respuesta ante un sismo en términos de aceleración, velocidad, desplazamiento. El registro acelerográfico empleado para el análisis corresponde al registro de componente N.S. de El Centro 1940 de Chile. El edificio consta de ocho plantas espaciadas cada 3m de altura, formada por pórticos de hormigón armado y con losas aligeradas de 25cm de espesor en los entrepisos. Las especificaciones utilizadas en el hormigón armado y el acero de refuerzo son las siguientes:

- Resistencia cilíndrica a la compresión del hormigón:  $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de elasticidad del hormigón:  $E_c = 220000 \text{ kg/cm}^2$
- Coeficiente de Poisson del hormigón:  $\nu = 0.20$
- Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo:  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de elasticidad del acero de refuerzo:  $E_s = 2000000 \text{ kg/cm}^2$

La estructura consistirá en pórticos de hormigón armado de acuerdo a los ejes del proyecto arquitectónico, constituido por columnas y vigas descolgadas, sin muros de corte, el sistema de piso será losas de hormigón armadas en dos direcciones, alivianadas y apoyadas sobre las vigas, su uso será habitacional.

Las cargas empleadas para el análisis son las siguientes:

##### *CARGA MUERTA:*

- Peso losa alivianada =  $300 \text{ kg/m}^2$
- Peso de los casetones =  $100 \text{ kg/m}^2$
- Carga muerta adicional =  $200 \text{ kg/m}^2$

##### *CARGA VIVA:*

- Carga Viva =  $250 \text{ kg/m}^2$

Para el análisis estructural se ha empleado el programa computacional SAP2000 v10 mismo que ha sido ampliamente utilizado en el campo del diseño





estructural, y ha sido desarrollado en la Universidad de California en Berkeley. El modelo matemático incluye la distribución espacial de las masas y las rigideces de la edificación.

El programa tiene la capacidad para analizar sistemas estructurales tridimensionales de gran tamaño, está compilado en Lenguaje Fortran Standard, la capacidad del programa no está limitada por el número de grados de libertad. No existe restricción en el número de elementos usados, en la cantidad de tipos de carga analizados ni en los anchos de banda de la matriz de rigidez. Cada nudo en el sistema puede tener de cero a seis grados de libertad.

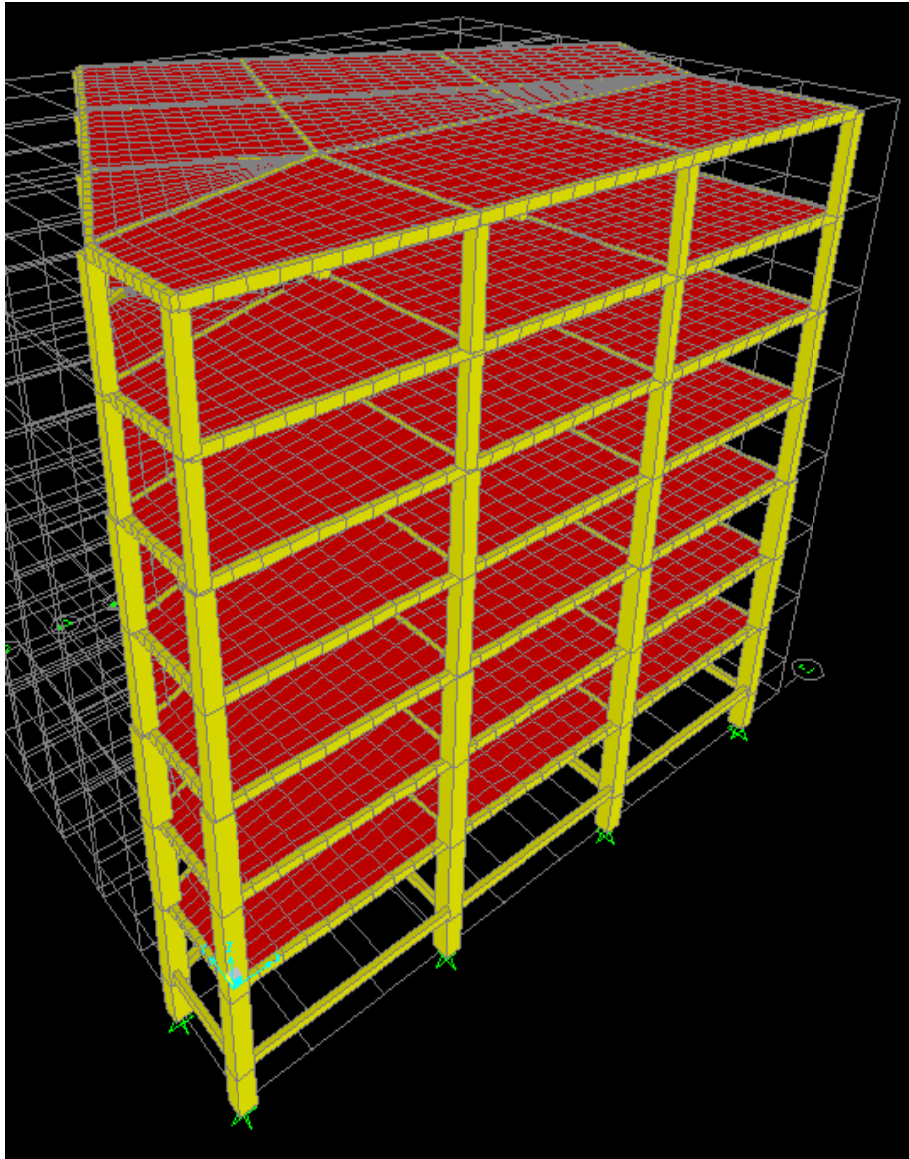
La solución del problema de análisis estructural se logra a través del método de las rigideces, que se describe muy brevemente:

1. Determinación de la matriz de rigidez para cada elemento individualmente considerado en su sistema de coordenadas local.
2. Transformación de la matriz de rigidez para cada elemento al sistema global de coordenadas y ensamble de estas en la matriz de rigidez de la estructura,  $[K]$ .
3. Solución de las ecuaciones de equilibrio  $\{B\} = [K] \{A\}$ , donde  $\{B\}$  representa las cargas aplicables en los nudos y  $\{A\}$  los desplazamientos desconocidos de los nudos.
4. Determinación de las fuerzas internas de los elementos y sus desplazamientos a través de expresiones que relacionan estas incógnitas con los desplazamientos de los nudos  $\{A\}$ .

En el modelo se utilizó brazos rígidos para modelar la unión de las columnas con las vigas, haciendo uso de la opción DIAPHRAGM CONSTRAINT se consideró en el modelo del edificio los diafragmas rígidos en el plano horizontal, con lo que se estaría analizando el movimiento de los nudos de una manera dependiente por piso del centro de masas de dicho nivel.

Para el desarrollo de los ejemplos de aplicación de los disipadores de energía, el parámetro de control de respuesta es el límite de las derivas de piso. De acuerdo al Código Ecuatoriano de la Construcción 2001 en su Art. 6.8.2.2 este límite es del 2% de la altura de piso.

## GRÁFICO N° 61: MODELO DE CÁLCULO EMPLEADO



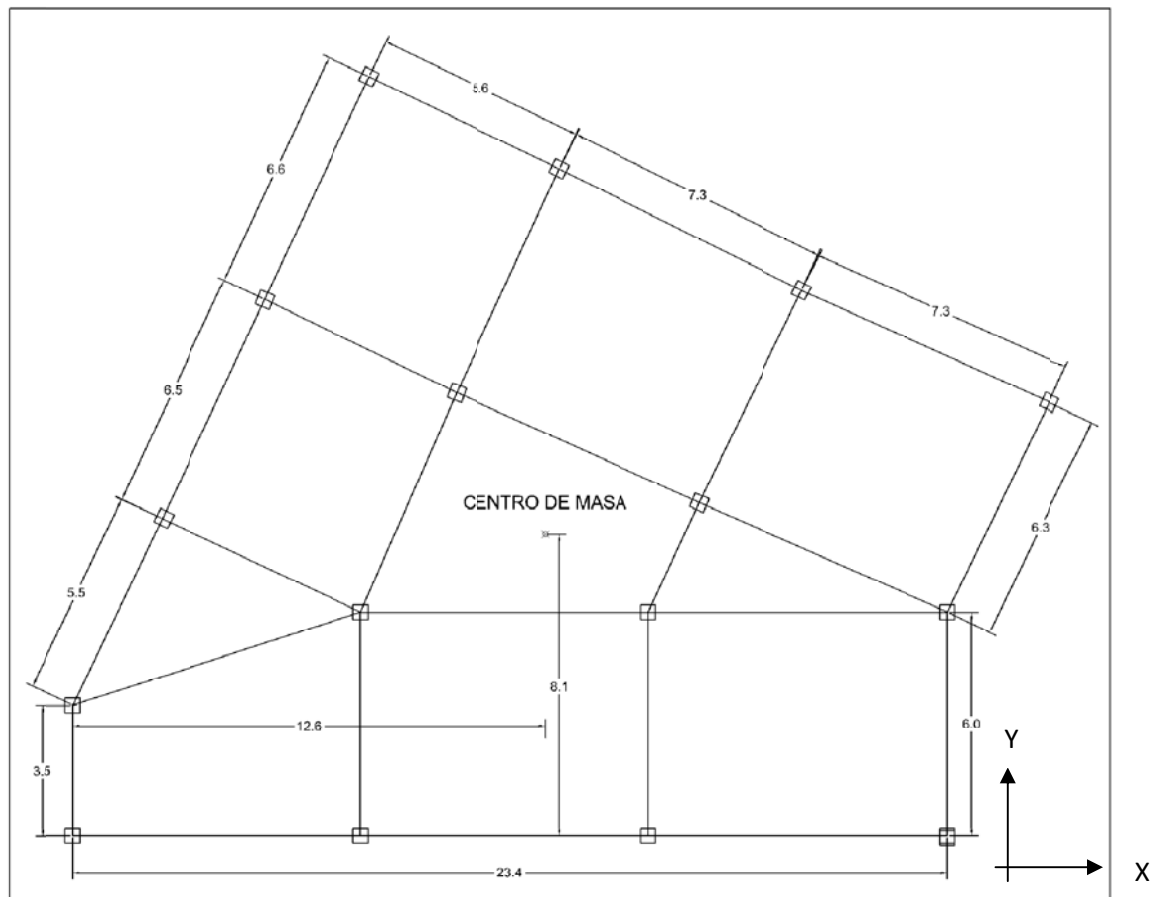
En la tabla siguiente se muestran las características del edificio:

**TABLA 4.1: CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO**

	<b>COLUMNAS (cm)</b>	<b>VIGAS (cm)</b>	<b>MASA TRASLACIONAL (Tn.s2/m)</b>	<b>MASA ROTACIONAL (Tn.s2.m)</b>
PISO 1	70x70	40x60	29.350	1851.250
PISO 2	70x70	40x60	29.350	1851.250
PISO 3	60x60	40x60	29.350	1851.250
PISO 4	60x60	40x50	29.350	1851.250
PISO 5	50x50	40x50	29.350	1851.250

PISO 6	50x50	40x50	29.350	1851.250
PISO 7	40x40	35x45	29.350	1851.250
PISO 8	40x40	35x45	29.350	1851.250

**GRÁFICO N° 62: VISTA EN PLANTA DEL EDIFICIO**



En la tabla siguiente se muestran las propiedades dinámicas del edificio obtenidas mediante el programa computacional SAP2000v10:

**TABLA 4.2: PERÍODOS Y FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN**

<b>MODO VIBRAR</b>	<b>Periodo (Sec)</b>	<b>Frecuencia (Cyc/sg)</b>	<b>Circ Frec (rad/sg)</b>
1	1.37673	0.72635	4.5638
2	1.111767	0.89946	5.6515
3	0.902522	1.1080	6.9618
4	0.601736	1.6619	10.442
5	0.560605	1.7838	11.208
6	0.454854	2.1985	13.814
7	0.283454	3.5279	22.166
8	0.266959	3.7459	23.536
9	0.217299	4.602	28.915
10	0.185574	5.3887	33.858
11	0.177374	5.6378	35.423
12	0.144674	6.9121	43.43
13	0.123796	8.0778	50.754
14	0.120798	8.2783	52.014
15	0.09851	10.151	63.782
16	0.086744	11.528	72.433

**TABLA 4.3: DESPLAZAMIENTOS MODALES**

<b>MODO</b>	<b>Período (Seg)</b>	<b>UX</b>	<b>UY</b>	<b>UZ</b>
1	1.37673	0.75	0.09918	1.117E-08
2	1.111767	0.08739	0.7	7.873E-10
3	0.902522	0.013	0.04806	2.258E-08
4	0.601736	0.04942	0.007473	8.551E-08
5	0.560605	0.006991	0.05055	8.205E-09
6	0.454854	0.0006298	0.002997	1.376E-07
7	0.283454	0.02788	0.003811	3.601E-08
8	0.266959	0.003516	0.02654	4.739E-09
9	0.217299	0.0002475	0.001456	7.87E-08
10	0.185574	0.01521	0.002328	6.55E-08
11	0.177374	0.002149	0.01414	6.966E-09
12	0.144674	0.00004594	0.0005281	6.583E-08
13	0.123796	0.009173	0.001685	4.219E-07
14	0.120798	0.001679	0.00875	1.159E-07

15	0.09851	5.088E-07	0.000208	3.939E-07
16	0.086744	0.007345	0.001413	4.497E-08

**TABLA 4.4: DESPLAZAMIENTOS MODALES**

MODO	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
1	0.75	0.09918	1.117E-08	0.08208	0.51	0.39	0.08208	0.51	0.39
2	0.84	0.8	1.196E-08	0.58	0.05929	0.35	0.66	0.56	0.74
3	0.85	0.85	3.454E-08	0.04033	0.008537	0.11	0.7	0.57	0.85
4	0.9	0.85	0.00000012	0.009024	0.05279	0.02691	0.71	0.63	0.88
5	0.91	0.9	1.282E-07	0.05762	0.006728	0.02339	0.77	0.63	0.9
6	0.91	0.91	2.659E-07	0.003179	0.000704	0.007632	0.77	0.63	0.91
7	0.93	0.91	3.019E-07	0.001697	0.01045	0.01499	0.78	0.64	0.92
8	0.94	0.94	3.066E-07	0.01254	0.00136	0.01234	0.79	0.65	0.93
9	0.94	0.94	3.853E-07	0.0006808	0.000115	0.004268	0.79	0.65	0.94
10	0.95	0.94	4.508E-07	0.0006987	0.003861	0.008652	0.79	0.65	0.95
11	0.96	0.96	4.578E-07	0.004584	0.00057	0.006157	0.79	0.65	0.95
12	0.96	0.96	5.236E-07	0.0001628	1.81E-05	0.002373	0.79	0.65	0.96
13	0.97	0.96	9.455E-07	0.000102	0.000415	0.005905	0.79	0.65	0.96
14	0.97	0.97	0.000001061	0.0004592	7.37E-05	0.003211	0.8	0.65	0.97
15	0.97	0.97	0.000001455	5.852E-06	2.95E-07	0.001569	0.8	0.65	0.97
16	0.97	0.97	0.0000015	0.0002387	0.001042	0.004887	0.8	0.65	0.97

**TABLA 4.5: DESPLAZAMIENTOS MODALES**

MODO	Periodo Seg	UX Kgf-s2	UY Kgf-s2	UZ Kgf-s2
1	1.37673	483.929861	-176.04817	-0.029457
2	1.111767	165.253376	467.465247	0.007821
3	0.902522	-63.744042	122.544283	0.041886
4	0.601736	124.272106	-48.323497	0.081508
5	0.560605	46.741138	125.682558	0.025249
6	0.454854	-14.028419	-30.602704	-0.103407
7	0.283454	-93.345265	34.511235	-0.052898
8	0.266959	33.147305	91.068752	0.019188
9	0.217299	-8.794826	-21.332134	-0.078199
10	0.185574	-68.941342	26.974106	-0.071338
11	0.177374	25.913824	66.471648	0.023265
12	0.144674	-3.788798	-12.845957	-0.07152

13	0.123796	53.53918	-22.94996	-0.181045
14	0.120798	22.90414	52.291929	-0.094907
15	0.09851	-0.39874	-8.061327	0.17495
16	0.086744	47.90846	-21.016213	0.059108

**TABLA 4.6: PARTICIPACIÓN MODAL**

MODO	RX Kgf-cm-s2	RY Kgf-cm-s2	RZ Kgf-cm-s2	Masa Modal Kgf-cm-s2	Rigidez Modal Kgf-cm
1	178177.73	488849.646	-596523.32	100	1250.6
2	474420.25	-167439.052	-570290.94	100	1519.69
3	124889.91	-63534.301	315722.0358	100	2326.96
4	-59080.72	-157996.007	-157256.674	100	10903.04
5	149288.73	-56401.693	146606.555	100	12561.65
6	-35066.31	18243.95121	83752.86	100	19081.61
7	25622.049	70311.2843	117381.4755	100	49135.36
8	69634.501	-25358.0389	106510.0278	100	55394.92
9	-16227.16	7366.179098	62628.8299	100	83607.65
10	16438.851	42728.2974	89169.967	100	114637.09
11	42106.35	-16410.1485	75222.4755	100	125482.1
12	-7934.102	2925.709003	46696.9008	100	188616.22
13	-6280.944	-14012.8282	-73670.8	100	257598.86
14	13326.62	-5905.1068	54323.6268	100	270545.77
15	-1504.507	-373.762383	37970.943	100	406820.63
16	-9608	-22196.1226	-67015.833	100	524660.96

La respuesta del edificio ante el acelerograma se presenta a continuación:

**SENTIDO "X":**

**TABLA 4.7: RESPUESTA DEL SISTEMA SIN DISIPADORES DE ENERGÍA**

CENTRO MASA	VALOR	ACELERACIÓN (cm/s <sup>2</sup> )	VELOCIDAD (cm/s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
PISO 1	MAX	495	15.56	4.07
	MIN	-354.4	-17.36	-4.31
PISO 2	MAX	500.6	42.58	11.31



	MIN	-452.2	-45.42	-11.9
PISO 3	MAX	487.6	62.72	16.97
	MIN	-502.1	-62.14	-17.7
PISO 4	MAX	422.3	76.16	20.85
	MIN	-376	-76.83	-21.53
PISO 5	MAX	414.5	86.11	23.47
	MIN	-400.5	-89.87	-23.99
PISO 6	MAX	497.6	94.61	26.01
	MIN	-435.8	-108.2	-26.28
PISO 7	MAX	492.6	106	29.08
	MIN	-546.3	-126.2	-29.03
PISO 8	MAX	826.3	123.1	31.33
	MIN	-724.4	-129.6	-31.1

En base a los desplazamientos antes presentados se calculan las derivas de piso respectivas:

**TABLA 4.8: DERIVAS DE PISO SISMO "X"**

PISO	ALTURA ENTREPISOS	DESPLAZAMIENTO	$\Delta x$ max	$\Delta x$ max/H	DERIVAS
	(mm)		(mm)		(mm)
8	3000	313.3	22.5	0.0075000	0.75
7	3000	290.8	30.7	0.0102333	1.02
6	3000	260.1	25.4	0.0084667	0.85
5	3000	234.7	26.2	0.0087333	0.87
4	3000	208.5	38.8	0.0129333	1.29
3	3000	169.7	56.6	0.0188667	1.89
2	3000	113.1	72.4	0.0241333	2.41
1	3000	40.7	40.7	0.0135667	1.36

#### SENTIDO "Y"

**TABLA 4.9: RESPUESTA DEL SISTEMA SIN DISIPADORES DE ENERGÍA**

CENTRO MASA	VALOR	ACELERACIÓN (cm/s <sup>2</sup> )	VELOCIDAD (cm/s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
PISO 1	MAX	531.1	15.1	3.45
	MIN	-329.4	-16.8	-3.96
PISO 2	MAX	535	41.28	9.48
	MIN	-454.2	-45.19	-10.89
PISO 3	MAX	517.9	61	14.09

	MIN	-496.1	-66.24	-16.21
PISO 4	MAX	426.3	74.5	17.12
	MIN	-434.2	-80.5	-19.81
PISO 5	MAX	507	85.09	19.03
	MIN	-442.8	-92.57	-22.27
PISO 6	MAX	467.7	95.07	21.02
	MIN	-423.6	-111	-24.67
PISO 7	MAX	448.8	107.1	25.17
	MIN	-571.1	-127.9	-27.4
PISO 8	MAX	937.6	129.9	28.14
	MIN	-804.8	-138.2	-29.3

En base a los desplazamientos antes presentados se calculan las derivas de piso respectivas:

TABLA 4.10: DERIVAS DE PISO SISMO "Y"					
PISO	ALTURA ENTREPISOS	DESPLAZAMIENTO	$\Delta x$ max	$\Delta x$ max/H	DERIVAS
	(mm)		(mm)		(mm)
8	3000	281.4	29.7	0.0099000	0.99
7	3000	251.7	41.5	0.0138333	1.38
6	3000	210.2	19.9	0.0066333	0.66
5	3000	190.3	19.1	0.0063667	0.64
4	3000	171.2	30.3	0.0101000	1.01
3	3000	140.9	46.1	0.0153667	1.54
2	3000	94.8	60.3	0.0201000	2.01
1	3000	34.5	34.5	0.0115000	1.15

### RESPUESTA DEL SISTEMA CONSIDERANDO DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO:

Para modelar los disipadores de fluido viscoso se ha utilizado el elemento Link tipo *dumper* del programa SAP2000 v10, se ha seleccionado un nivel de amortiguamiento suplementario del 15% sumado al amortiguamiento natural del 5% del amortiguamiento crítico. El Coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente se determina de la siguiente manera:

$$C_d = \frac{\beta_{vi} (D_{roof})^{1/2} [\sum (\omega_i \phi_{r1}^2)] 322,46}{(\lambda / 2\pi) (T_1 / 2\pi)^{3/2} (10g) (\cos^{3/2} \theta) (\sum \{\phi_{r1}\}^{3/2})}$$

Donde:



$C_d$ : coeficiente amortiguamiento viscoso equivalente

$D_{roof}$ : amplitud de desplazamiento (31.3mm)

$\beta_{vj}$ : radio de amortiguamiento (0.15)

$\omega_j$ : peso tributario por piso

$\phi_{r1}$ : desplazamiento del primer modo de vibrar

$\lambda$ : parámetro dependiente del exponente (3.5)

$\theta$ : ángulo de inclinación de los disipadores ( $21^\circ$ )

$$C_d = 10.9 \text{ tn.s/m}$$

La respuesta del sistema ante la excitación impuesta es la siguiente:

### SENTIDO "X"

**TABLA 4.11: RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO**

CENTRO MASA	VALOR	ACELERACIÓN (cm/s <sup>2</sup> )	VELOCIDAD (cm/s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
PISO 1	MAX	511.9	12.17	3.18
	MIN	-306.6	-12.45	-2.98
PISO 2	MAX	350.4	33.97	8.48
	MIN	-214.1	-34.86	-8.23
PISO 3	MAX	304.8	51.63	13.32
	MIN	-229	-53.17	-12.37
PISO 4	MAX	220.4	64.43	16.44
	MIN	-233.7	-66.58	-15.17
PISO 5	MAX	237.2	73.09	18.65
	MIN	-270.2	-76.83	-17.1
PISO 6	MAX	261.6	81.34	20.85
	MIN	-299.2	-87.69	-19.04
PISO 7	MAX	288.4	90.87	23.49
	MIN	-343.8	-99.83	-21.33
PISO 8	MAX	308.6	98.4	25.24
	MIN	-372.6	-110.75	-22.85

En base a los desplazamientos antes presentados se calculan las derivas de piso respectivas:

TABLA 4.12: DERIVAS DE PISO SISMO "X"					
PISO	ALTURA	DESPLAZAMIENTO	$\Delta x$	$\Delta x \text{ max/H}$	DERIVAS



	ENTREPISOS		max		%
	(mm)	(mm)	(mm)		
8	3000	252.4	17.5	0.0058333	0.58
7	3000	234.9	26.4	0.0088000	0.88
6	3000	208.5	22	0.0073333	0.73
5	3000	186.5	22.1	0.0073667	0.74
4	3000	164.4	31.2	0.0104000	1.04
3	3000	133.2	48.4	0.0161333	1.61
2	3000	84.8	53	0.0176667	1.77
1	3000	31.8	31.8	0.0106000	1.06

### SENTIDO "Y"

**TABLA 4.13: RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO**

CENTRO MASA	VALOR	ACELERACIÓN (cm/s <sup>2</sup> )	VELOCIDAD (cm/s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
PISO 1	MAX	524.2	13.51	2.85
	MIN	-290.1	-13.76	-3.33
PISO 2	MAX	408.6	37.26	7.99
	MIN	-303.8	-38.29	-9.19
PISO 3	MAX	385.3	56.1	12.07
	MIN	-306.2	-58.25	-13.75
PISO 4	MAX	275.5	69.4	15
	MIN	-292.1	-73.1	-16.89
PISO 5	MAX	330.4	79.24	17.23
	MIN	-304.2	-85.37	-19.13
PISO 6	MAX	360.6	88.26	19.69
	MIN	-320.1	-99.1	-21.44
PISO 7	MAX	381.7	101	22.77
	MIN	-415.5	-113.2	-24.16
PISO 8	MAX	521.3	114.9	24.92
	MIN	-576.6	-118.8	-25.9

En base a los desplazamientos antes presentados se calculan las derivas de piso respectivas:

TABLA 4.14: DERIVAS DE PISO SISMO "Y"					
PISO	ALTURA ENTREPISOS	DESPLAZAMIENTO	$\Delta x$ max	$\Delta x$ max/H	DERIVAS
	(mm)		(mm)		%



8	3000	249.2	21.5	0.0071667	0.72
7	3000	227.7	30.8	0.0102667	1.03
6	3000	196.9	24.6	0.0082000	0.82
5	3000	172.3	22.3	0.0074333	0.74
4	3000	150	29.3	0.0097667	0.98
3	3000	120.7	40.8	0.0136000	1.36
2	3000	79.9	51.4	0.0171333	1.71
1	3000	28.5	28.5	0.0095000	0.95

### RESPUESTA DEL SISTEMA CONSIDERANDO DISIPADORES POR PLASTIFICACIÓN DE METALES:

Para modelar los disipadores de fluido viscoso se ha utilizado el elemento Link tipo *plastic wen* del programa SAP2000 v10, las propiedades del disipador se determinaron de la siguiente manera:

1. Se calcula la rigidez del disipador por plastificación mediante la siguiente expresión:

$$K_{di} = \frac{NEbt^3}{6h^3 \cos \theta}$$

Donde:

$K_{di}$ : Rigidez del disipador por plastificación

N: número de disipadores asumidos por planta (cuatro en este ejemplo).

E: módulo de elasticidad del disipador (3000000 kg/cm<sup>2</sup>)

b: base del disipador por fluencia (30cm)

t: espesor asumido (30mm)

h: altura asumida (50cm)

$\theta$ : 21°

$$K_{di} = 1388 \text{ Tn/m}$$

2. Determinados la fuerza de fluencia de los disipadores:

$$V_{di} = \frac{N \cdot f_y \cdot 10b \cdot t^2}{4h \cos \theta}$$

$$V_{di} = 2.83 \text{ Tn}$$

Donde:

$V_{di}$ : fuerza de fluencia de los disipadores



$F_y$ : esfuerzo de fluencia de los disipadores (50kg/cm<sup>2</sup>)

3. Desplazamiento de fluencia:

$$\Delta_{yi} = \frac{1,5f_y \cdot 10h^2}{Et \cos \theta}$$

$$\Delta_{yi} = 2.23\text{mm}$$

4. Rigidez elástica inicial:

$$K_e = \frac{V_{di}}{\Delta_{yi}}$$

$$K_e = 1270 \text{ Tn/m}$$

5. Coeficiente de amortiguamiento:

$$C_d = \frac{4(K_e - K_h) \cdot \Delta_{yi} \cdot (d_0 - \Delta_{yi}) \cdot T_1}{2\pi^2 d_0^2}$$

$$C_d = 84.2 \text{ Tn.s/m}$$

Donde:

$C_d$ : coeficiente de amortiguamiento

$K_h$ : rigidez de deformación

$d_0$ : máximo desplazamiento de diseño del disipador

$T_1$ : período fundamental de vibración

La respuesta del sistema ante la excitación impuesta es la siguiente:

**SENTIDO "X"**

**TABLA 4.15: RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADORES DE PLASTIFICACIÓN DE METALES**

CENTRO MASA	VALOR	ACELERACIÓN (cm/s <sup>2</sup> )	VELOCIDAD (cm/s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
PISO 1	MAX	438.05	13.77	3.60
	MIN	-313.63	-15.36	-3.81
PISO 2	MAX	443.01	37.68	9.40
	MIN	-400.18	-40.19	-10.53
PISO 3	MAX	431.50	55.50	15.02

	MIN	-444.34	-54.99	-15.66
PISO 4	MAX	373.72	67.40	18.45
	MIN	-332.74	-67.99	-19.05
PISO 5	MAX	366.81	76.20	20.77
	MIN	-354.42	-79.53	-21.23
PISO 6	MAX	440.35	83.73	23.02
	MIN	-385.66	-95.75	-23.26
PISO 7	MAX	435.93	93.81	25.73
	MIN	-483.45	-111.68	-25.69
PISO 8	MAX	731.24	108.94	27.73
	MIN	-641.06	-114.69	-27.52

En base a los desplazamientos antes presentados se calculan las derivas de piso respectivas:

PISO	ALTURA ENTREPISOS	DESPLAZAMIENTO	$\Delta x$ max	$\Delta x$ max/H	DERIVAS
	(mm)		(mm)		(mm)
8	3000	277.3	19.9	0.0066372	0.66
7	3000	257.3	27.2	0.0090560	0.91
6	3000	230.2	22.5	0.0074926	0.75
5	3000	207.7	23.2	0.0077286	0.77
4	3000	184.5	34.3	0.0114454	1.14
3	3000	150.2	56.2	0.0187257	1.87
2	3000	94.0	58.0	0.0193274	1.93
1	3000	36.0	36.0	0.0120059	1.20

**SENTIDO "Y"**

**TABLA 4.17: RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADORES DE PLASTIFICACIÓN DE METALES**

CENTRO MASA	VALOR	ACELERACIÓN (cm/s <sup>2</sup> )	VELOCIDAD (cm/s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
PISO 1	MAX	470.00	13.36	3.05
	MIN	-291.50	-14.87	-3.50
PISO 2	MAX	473.45	36.53	8.39
	MIN	-401.95	-39.99	-9.64
PISO 3	MAX	458.32	53.98	12.47
	MIN	-439.03	-58.62	-14.35

PISO 4	MAX	377.26	65.93	15.15
	MIN	-384.25	-71.24	-17.53
PISO 5	MAX	448.67	75.30	16.84
	MIN	-391.86	-81.92	-19.71
PISO 6	MAX	413.89	84.13	18.60
	MIN	-374.87	-98.23	-21.83
PISO 7	MAX	397.17	94.78	22.27
	MIN	-505.40	-113.19	-24.25
PISO 8	MAX	829.73	114.96	24.90
	MIN	-712.21	-122.30	-25.93

En base a los desplazamientos antes presentados se calculan las derivas de piso respectivas:

PISO	ALTURA ENTREPISOS	DESPLAZAMIENTO	$\Delta x$ max	$\Delta x$ max/H	DERIVAS
	(mm)	(mm)	(mm)		%
8	3000	249.03	26.2831858	0.0087611	0.88
7	3000	222.74	36.7256637	0.0122419	1.22
6	3000	186.02	17.6106195	0.0058702	0.59
5	3000	168.41	16.9026549	0.0056342	0.56
4	3000	151.50	26.8141593	0.0089381	0.89
3	3000	124.69	40.7964602	0.0135988	1.36
2	3000	83.89	53.3628319	0.0177876	1.78
1	3000	30.53	30.5309735	0.0101770	1.02

### **RESPUESTA DEL SISTEMA CONSIDERANDO DISIPADORES VISCOELÁSTICOS:**

Para modelar los disipadores de fluido viscoso se ha utilizado el elemento Link tipo *damper* del programa SAP2000 v10, se ha seleccionado un nivel de amortiguamiento suplementario del 15% sumado al amortiguamiento natural del 5% del amortiguamiento crítico. Los parámetros del disipador se determinan de la siguiente manera:

1. Rigidez del disipador:

$$K_d = \frac{2\beta K_e}{(\eta - 2\beta)\alpha_d}$$



Donde:

$K_d$ : rigidez del disipador

$K_e$ : rigidez de la estructura sin disipadores

$\beta$ : radio de amortiguamiento asociado (0.15)

$\eta$ : factor de pérdida (1.39)

$\alpha_d$ : coeficiente de acoplamiento (0.566)

$K_d = 880 \text{ tn/m}$

2. Área del disipador:

$$A = \frac{K_d h}{G'(\omega)}$$

A: área del disipador

h: espesor del disipador (15mm)

$G'(w)$ : módulo de almacenamiento de corte del material (126.5)

$A = 0.11 \text{ m}^2$

3. Coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente:

$$C_d = \frac{AG''(\omega)}{(2\pi/T_1)h}$$

Donde:

$C_d$ : coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente

A: área del disipador

$G''(w)$ : módulo de pérdida de corte del material

$T_1$ : período fundamental de vibración

$C_d = 170 \text{ tn.s/m}$

La respuesta del sistema ante la excitación impuesta es la siguiente:

**SENTIDO "X"**

**TABLA 4.19: RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADORES VISCOELÁSTICOS**

<b>CENTRO MASA</b>	<b>VALOR</b>	<b>ACELERACIÓN (cm/s<sup>2</sup>)</b>	<b>VELOCIDAD (cm/s)</b>	<b>DESPLAZAMIENTO (cm)</b>
--------------------	--------------	---------------------------------------	-------------------------	----------------------------



PISO 1	MAX	415.97	13.08	3.42
	MIN	-297.82	-14.59	-3.62
PISO 2	MAX	420.67	35.78	9.10
	MIN	-380.00	-38.17	-10.00
PISO 3	MAX	409.75	52.71	14.26
	MIN	-421.93	-52.22	-14.87
PISO 4	MAX	354.87	64.00	17.52
	MIN	-315.97	-64.56	-18.09
PISO 5	MAX	348.32	72.36	19.72
	MIN	-336.55	-75.52	-20.16
PISO 6	MAX	418.15	79.50	21.86
	MIN	-366.22	-90.92	-22.08
PISO 7	MAX	413.95	89.08	24.44
	MIN	-459.08	-106.05	-24.39
PISO 8	MAX	694.37	103.45	26.33
	MIN	-608.74	-108.91	-26.13

En base a los desplazamientos antes presentados se calculan las derivas de piso respectivas:

<b>TABLA 4.20: DERIVAS DE PISO SISMO "X"</b>					
PISO	ALTURA ENTREPISOS	DESPLAZAMIENTO	$\Delta x$ max	$\Delta x$ max/H	DERIVAS
	(mm)	(mm)	(mm)		%
8	3000	263.3	18.9	0.0063025	0.63
7	3000	244.4	25.8	0.0085994	0.86
6	3000	218.6	21.3	0.0071148	0.71
5	3000	197.2	22.0	0.0073389	0.73
4	3000	175.2	32.6	0.0108683	1.09
3	3000	142.6	51.6	0.0172017	1.72
2	3000	91.0	56.8	0.0189328	1.89
1	3000	34.2	34.2	0.0114006	1.14

**SENTIDO "Y"**

**TABLA 4.21: RESPUESTA DEL SISTEMA CON DISIPADORES  
VISCOELÁSTICOS**

CENTRO MASA	VALOR	ACELERACIÓN (cm/s <sup>2</sup> )	VELOCIDAD (cm/s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
----------------	-------	-------------------------------------	---------------------	------------------------





PISO 1	MAX	446.30	12.69	2.90
	MIN	-276.81	-14.12	-3.33
PISO 2	MAX	449.58	34.69	7.97
	MIN	-381.68	-37.97	-9.15
PISO 3	MAX	435.21	51.26	11.84
	MIN	-416.89	-55.66	-13.62
PISO 4	MAX	358.24	62.61	14.39
	MIN	-364.87	-67.65	-16.65
PISO 5	MAX	426.05	71.50	15.99
	MIN	-372.10	-77.79	-18.71
PISO 6	MAX	393.03	79.89	17.66
	MIN	-355.97	-93.28	-20.73
PISO 7	MAX	377.14	90.00	21.15
	MIN	-479.92	-107.48	-23.03
PISO 8	MAX	787.90	109.16	23.65
	MIN	-676.30	-116.13	-24.62

En base a los desplazamientos antes presentados se calculan las derivas de piso respectivas:

PISO	ALTURA ENTREPISOS	DESPLAZAMIENTO	$\Delta x$ max	$\Delta x$ max/H	DERIVAS
	(mm)	(mm)	(mm)		%
8	3000	236.47	24.9579832	0.0083193	0.83
7	3000	211.51	34.8739496	0.0116246	1.16
6	3000	176.64	16.7226891	0.0055742	0.56
5	3000	159.92	16.0504202	0.0053501	0.54
4	3000	143.87	25.4621849	0.0084874	0.85
3	3000	118.40	38.7394958	0.0129132	1.29
2	3000	79.66	50.6722689	0.0168908	1.69
1	3000	28.99	28.9915966	0.0096639	0.97



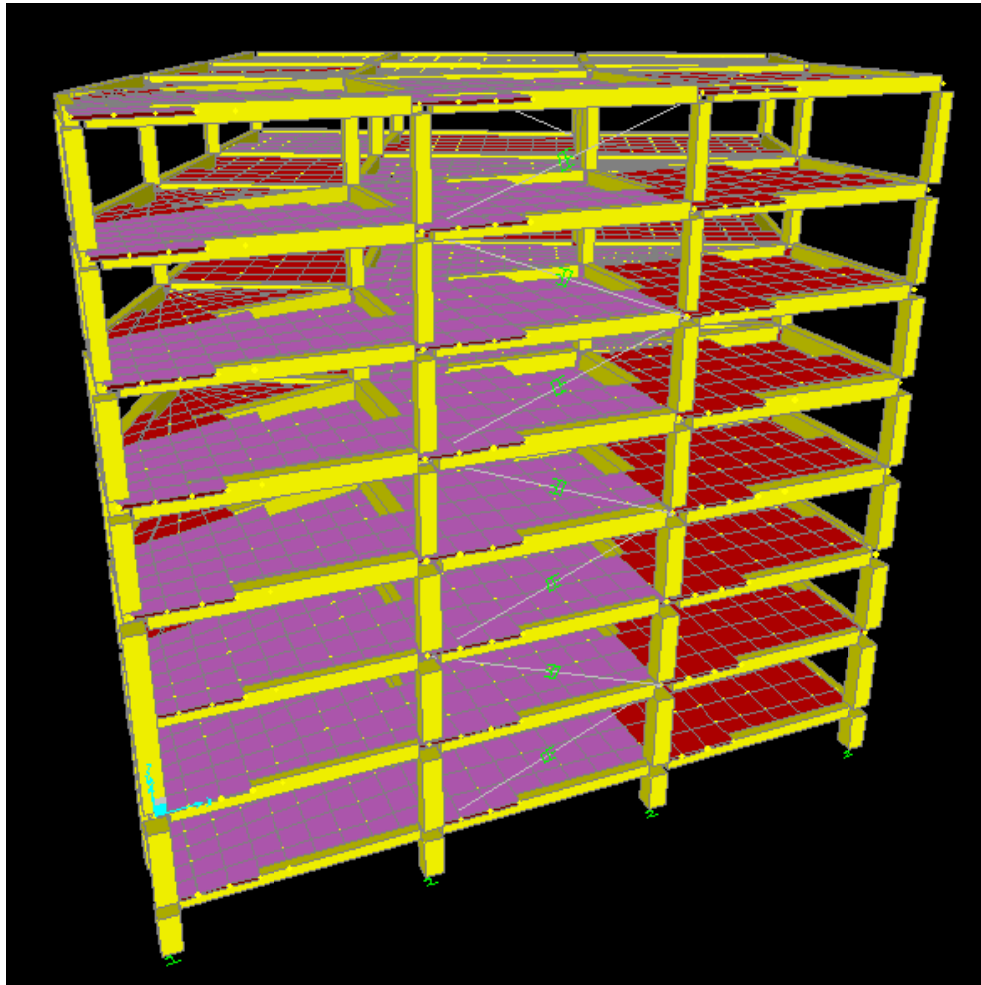
## RESPUESTA DEL SISTEMA CONSIDERANDO AISLADORES DE GOMA Y DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO:

Para modelar los disipadores de fluido viscoso se ha utilizado el elemento Link tipo *damper* del programa SAP2000 v10, se ha seleccionado un nivel de amortiguamiento suplementario del 15% sumado al amortiguamiento natural del 5% del amortiguamiento crítico. Mientras que para modelar el aislador de goma se ha utilizado la función *Rubber Isolator*. Se consideró un amortiguador circular cuyas características se presentan a continuación.

Diámetro:	700mm
Altura del caucho:	300mm
Presión de apoyo:	70kg/cm <sup>2</sup>
Módulo elástico bruto:	20000kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de corte:	5kg/cm <sup>2</sup>
Amortiguamiento efectivo:	0.16
Rigidez horizontal:	74000 tn/m
Rigidez vertical:	64 tn/m

Debido al efecto del aislador de la base, se incrementa la flexibilidad del edificio con el consecuente incremento del período fundamental de vibración, como se puede apreciar en la tabla 4.14, así mismo se produce una variación considerable de la curva de ingreso energético versus el tiempo, como se aprecia más adelante.

**GRÁFICO N° 63: MODELO DEL EDIFICIO CONSIDERANDO AISLADORES DE BASE Y DISIPADORES FLUIDO VISCOSO**



**TABLA 4.23. PERÍODOS Y FRECUENCIAS CONSIDERANDO AISLADORES**

<b>MODO</b>	<b>Periodo Sec</b>	<b>Frecuencia Cyc/sec</b>	<b>CircFreq rad/sec</b>
1	2.259736	0.44252	2.7805
2	1.86768	0.53542	3.3641
3	1.165231	0.85819	5.3922
4	0.776907	1.2872	8.0874
5	0.729464	1.3709	8.6134
6	0.588401	1.6995	10.678
7	0.425886	2.348	14.753
8	0.394563	2.5344	15.924
9	0.322148	3.1042	19.504
10	0.234598	4.2626	26.783

11	0.220964	4.5256	28.435
12	0.179641	5.5667	34.976

**SENTIDO "X"**
**TABLA 4.24: RESPUESTA DEL SISTEMA CON AISLADORES DE GOMA Y DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO**

CENTRO MASA	VALOR	ACELERACIÓN (cm/s <sup>2</sup> )	VELOCIDAD (cm/s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
PISO 1	MAX	138.1	57.82	27.18
	MIN	-89.7	-80.25	-30.12
PISO 2	MAX	107.8	63.55	29.65
	MIN	-86.76	-86.38	-32.94
PISO 3	MAX	101.2	67.83	31.41
	MIN	-86.92	-91.26	-34.97
PISO 4	MAX	107.7	70.8	32.54
	MIN	-88.46	-94.34	-36.3
PISO 5	MAX	110.9	73.09	33.28
	MIN	-88.95	-96.21	-37.19
PISO 6	MAX	112.3	75.46	33.98
	MIN	-91.9	-97.86	-38.04
PISO 7	MAX	123.6	78.58	34.78
	MIN	-100.4	-99.77	-39.04
PISO 8	MAX	137.6	80.8	35.31
	MIN	-108.1	-101.1	-39.71

En base a los desplazamientos antes presentados se calculan las derivas de piso respectivas:

TABLA 4.25: DERIVAS DE PISO SISMO "X"					
PISO	ALTURA ENTREPISOS	DESPLAZAMIENTO	$\Delta x$ max	$\Delta x$ max/H	DERIVAS
	(mm)		(mm)		
8	3000	353.1	5.3	0.0017667	0.18
7	3000	347.8	8.0	0.0026667	0.27
6	3000	339.8	7.0	0.0023333	0.23
5	3000	332.8	7.4	0.0024667	0.25
4	3000	325.4	11.3	0.0037667	0.38
3	3000	314.1	17.6	0.0058667	0.59
2	3000	296.5	24.7	0.0082333	0.82
1	3000	271.8	15.2	0.0050667	0.51



SENTIDO "Y":

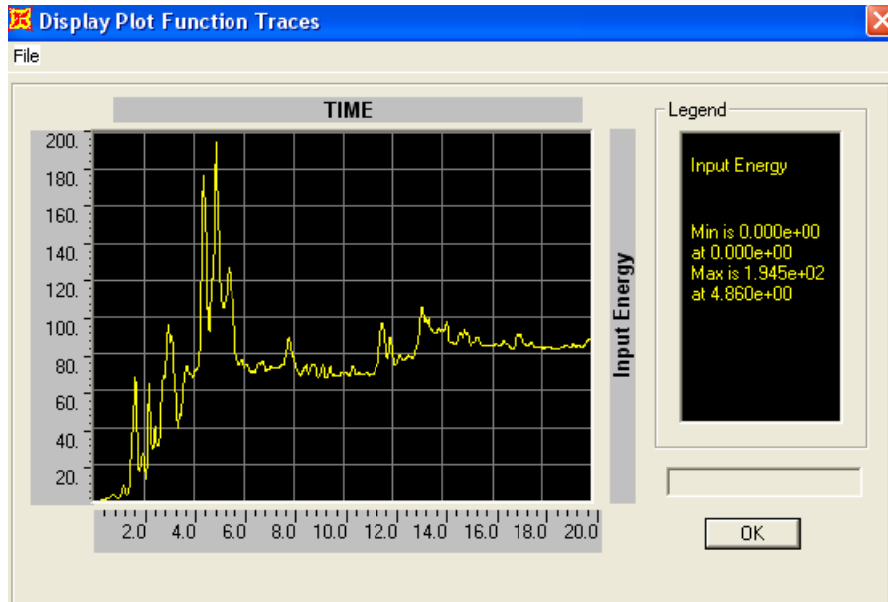
**TABLA 4.26: RESPUESTA DEL SISTEMA CON AISLADORES DE GOMA Y DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO**

CENTRO MASA	VALOR	ACELERACIÓN (cm/s <sup>2</sup> )	VELOCIDAD (cm/s)	DESPLAZAMIENTO (cm)
PISO 1	MAX	127.4	59.6	28.05
	MIN	-94.1	-84.26	-33.05
PISO 2	MAX	110.4	64.68	30.94
	MIN	-85.68	-90.16	-34.92
PISO 3	MAX	114.4	68.46	31.85
	MIN	-86.81	-94.45	-36.78
PISO 4	MAX	120.8	71.21	32.89
	MIN	-90.72	-97.1	-38.01
PISO 5	MAX	121.5	73.53	33.6
	MIN	-93.04	-98.7	-38.86
PISO 6	MAX	119.3	76.48	34.32
	MIN	-95.59	-100.2	-39.72
PISO 7	MAX	135.8	80.16	35.16
	MIN	-106.6	-101.9	-40.77
PISO 8	MAX	161.4	83.6	35.74
	MIN	-117.1	-103.1	-41.5

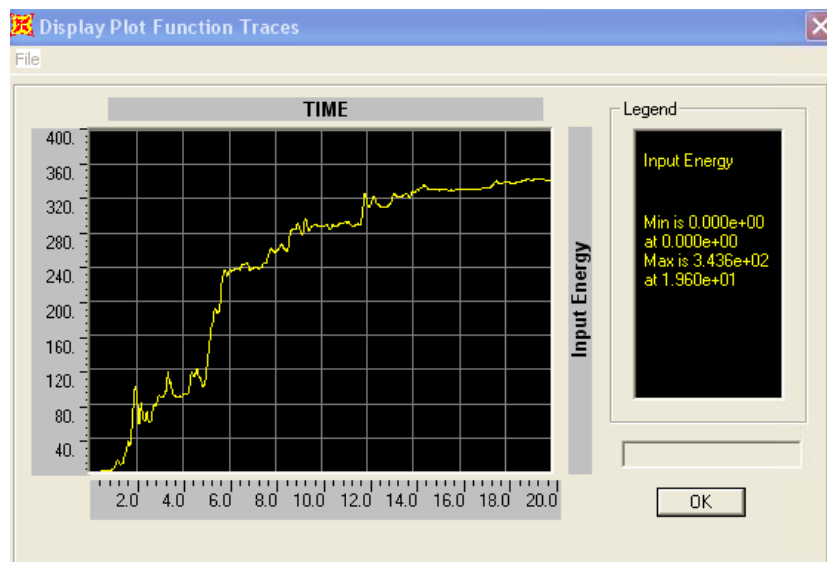
En base a los desplazamientos antes presentados se calculan las derivas de piso respectivas:

TABLA 4.27: DERIVAS DE PISO SISMO "Y"					
PISO	ALTURA ENTREPISOS	DESPLAZAMIENTO	$\Delta x$ max	$\Delta x$ max/H	DERIVAS
	(mm)		(mm)		
8	3000	357.40	5.8	0.0019333	0.19
7	3000	351.60	8.4	0.0028000	0.28
6	3000	343.20	7.2	0.0024000	0.24
5	3000	336.00	7.1	0.0023667	0.24
4	3000	328.90	10.4	0.0034667	0.35
3	3000	318.50	9.1	0.0030333	0.30
2	3000	309.40	28.9	0.0096333	0.96
1	3000	280.50	17	0.0056667	0.57

### GRÁFICO N° 64: CURVA INGRESO ENERGÉTICO VS. TIEMPO CONSIDERANDO AISLADORES DE GOMA EN LA BASE Y DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO



### GRÁFICO N° 65: CURVA INGRESO ENERGÉTICO VS. TIEMPO SIN DISIPADORES PASIVOS



En los gráficos anteriores se puede apreciar la variación de la función de ingreso energético con el tiempo para el caso de edificios sin disipadores pasivos y considerando aisladores de base y disipadores de fluido viscoso, se puede apreciar que el pico máximo en el primer caso llega a 343.6Tn.m mientras que en el segundo a 194.5Tn.m.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo se centró en los sistemas de control pasivo debido a que son sistemas relativamente sencillos, que muy bien podrían ser usados con la tecnología existente en el país, no precisan de aporte energético para funcionar lo que es una ventaja frente a los sistemas activos y son sistemas probados por su eficiencia.

En el capítulo tres, se obtuvo la respuesta de un sistema de un grado de libertad sometido a la excitación basal correspondiente a la componente NS del registro sísmico de la ciudad chilena de El Centro producido en 1940, mediante el método iterativo de Newmark y se comparó los resultados con los valores entregados por el programa computacional SAP2000 v10. Los resultados de las respuestas máximas fueron bastante similares, las diferencias se encuentran en rangos desde el 6% hasta el 17%, tanto para la velocidad, aceleración y desplazamientos, por lo que se corroboró la eficacia y el correcto manejo del programa. Como segundo ejemplo se planteó el mismo sistema de un grado de libertad, sometido a la misma aceleración basal pero con la inclusión de un disipador tipo fluido viscoso, el objetivo fue proporcionarle un amortiguamiento adicional del 20% del amortiguamiento crítico, consiguiendo un amortiguamiento global del 25%. De la misma manera se procedió a resolver mediante el método de Newmark y comparar con los resultados entregados por el programa, siendo nuevamente éstos valores bastante similares, en rangos desde el 0.35% hasta el 19%. Con los ejemplos anteriores se puede concluir que los resultados entregados por el programa para el análisis dinámico de edificios son confiables, y que los parámetros que se han ingresado al mismo son los adecuados, así mismo en este ejemplo sencillo se puede observar los resultados de un amortiguamiento adicional en la respuesta estructura. Las aceleraciones disminuyeron en un 37.39%, las velocidades en un 42.2%, los desplazamientos en un 52.79%, los valores de la carga axial de las columnas y los momentos flectores máximos de las vigas en un 41.43% y la fuerza cortante en un 47.10%.

En cuanto al edificio analizado en el capítulo cuatro, tanto con disipadores como sin disipadores y sometida a la misma excitación basal antes indicada, se puede concluir que los disipadores reducen de manera significativa la respuesta estructural y permiten alcanzar el nivel deseado por el proyectista de acuerdo a la especificación que se requiera cumplir. En este ejemplo se planteó reducir las derivas de piso a los límites permitidos por el Código Ecuatoriano de Construcción Art. 6.8.2.2. Se observa que tanto en la dirección "X" como en la dirección "Y" el piso "dos" no cumple la restricción al 2% de la altura de entrepisos, sus valores son 2.41% y 2.01% respectivamente. Con el uso de cualquiera de los disipadores analizados se cumple esta restricción. Para el caso de los disipadores de fluido viscoso las derivas de piso oscilan entre el



0.58% y el 1.77% para la dirección "X" y entre el 0.72% y el 1.71% para la dirección "Y". Para el caso del disipador por plastificación de metales las derivas se encuentran entre el 0.66% y el 1.93% en la dirección "X" y entre el 0.56% y el 1.78% en la dirección "Y". En el caso de los disipadores de sólidos viscoelásticos las derivas oscilan entre el 0.63% y el 1.89% en la dirección "X" y entre el 0.54% y el 1.69% en la dirección "Y". Finalmente la mejor respuesta se obtuvo con el uso de aisladores de goma y disipadores de fluido viscoso, oscilando las derivas de los entresijos entre 0.18% y 0.82% en la dirección "X" y entre el 0.19% y el 0.96% en la dirección "Y".

Así mismo, de los resultados se puede apreciar claramente que se reduce tanto los valores de aceleración y velocidad además de los de desplazamientos de los centros de masa de cada uno de los niveles del edificio, el período fundamental de vibración permanece inalterado utilizando los disipadores de fluido viscoso y de sólidos viscoelásticos con respecto al caso de análisis sin disipadores. Cuando se utilizan los de plastificación de metales por la rigidez que se le confiere a la edificación, el período fundamental disminuye de 1.37sg a 1.22sg. En el caso de análisis con aisladores de goma y disipadores de fluido viscoso el período fundamental se alarga de 1.37sg a 2.25sg.

Los aisladores de base tal como se predice en la parte teórica, disminuyen el ingreso energético hacia la edificación y por tanto la energía a ser disipada, como consecuencia de lo anterior, se reduce la demanda de respuesta estructural. En los gráficos N° 64 y N°65 se presentaron las curvas de energía vs tiempo, en el caso del edificio sin aisladores de base el pico máximo de energía es de 343.6Tn.m a los 20 sg, mientras que con aisladores de base el pico de energía es de 194.5Tn.m a los 5sg aproximadamente.

Al lograr disminuir los desplazamientos de los centros de masa de cada piso se puede evitar que la estructura incurra en el rango inelástico, reduciendo la incertidumbre del comportamiento no lineal, impidiendo además la formación de rótulas plásticas, limitando posibles mecanismos de falla y daños en los elementos no estructurales.

Los disipadores de energía pueden ser utilizados en el caso de reforzamiento y rehabilitación estructural de edificaciones que no cumplan las exigencias de las normativas vigentes, manteniendo su apariencia en caso de que esto sea un requerimiento arquitectónico insalvable. Los disipadores no incorporan un peso importante a la edificación como lo significarían técnicas como el encamisado de columnas o la construcción de muros para darle rigidez lateral a la estructura.

Indistintamente del tipo de técnica de control a utilizarse es importante realizar investigaciones sobre el diseño de los mismos, los costos de implementación y





la verificación del desempeño estructural de los dispositivos teniendo en cuenta las condiciones locales del país. Si bien se puede pensar que se le dará un costo adicional a las edificaciones, éste es compensado con la reducción del daño y las posteriores reparaciones que ocurrirían en un sismo severo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Carlos Gerbaudo, José Inaudi. Disipador metálico para una conexión seca articulada de una viga – columna. 2007.
2. Danny Arroyo Espinoza y Amador Terán Gilmore. Factores de reducción de fuerzas sísmicas para el diseño de estructuras con sistemas pasivos de disipación de energía. 2002.
3. Eduardo Botero J, Bogart Méndez U. y Miguel P. Romo. Consideraciones sísmicas sobre los disipadores de energía friccionantes. 2005.
4. Eduardo Miranda. Conceptos básicos sobre disipación de energía.
5. Francisco López Almansa. Tesis: Contribución al desarrollo de sistemas de control de estructuras de edificación mediante cables activos. Dirigida por: José Rodellar. 1988.
6. Genner Villareal Castro y Ricardo Oviedo. Edificaciones con disipadores de energía. 2009.
7. Gustavo Palazo, Pablo Martín, y Marcelo Guzmán. Consideraciones sobre el análisis de pórticos sismoresistentes con barras de pandeo restringido. 2009.
8. Javier Zevallos, Marcial Blondet, Alejandro Muñoz. Estado del arte en la protección sísmica.
9. José E. Stuardi, Julio C. Massa y Alejandro T. Brewer. Eficiencia de sistemas de aislamiento sísmico basados en resortes helicoidales y amortiguadores viscosos comparada con aisladores tradicionales goma-metal. 2005.
10. Juan Andrés Oviedo y María del Pilar Duque. Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas. 2009.
11. Juan Andrés Oviedo, María Del Pilar Duque. Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. 2006.
12. Juan Andrés Oviedo, María Del Pilar Duque. Situación de las técnicas de control de respuesta sísmica en Colombia. 2009.
13. Juan Carlos Reyes y Néstor R. Rubiano. Modelación inelástica de edificios de concreto con disipadores de energía histeréticos.
14. Juan Pablo Ascheri – Marcelo Rubinstein – Oscar Möller. Diseño matemático de disipadores de energía sísmica utilizando estrategia de control activo predictivo. 2006.
15. Juan Pablo Ascheri, Oscar Möller, Marcelo Rubinstein. Implementación de un elemento no lineal para la modelización del comportamiento de un disipador de energía por fluencia de acero. 2000.
16. Juan Pablo Pardo. Tesis de investigación: Control de la Respuesta dinámica de Estructuras mediante el uso de Disipadores de Energía de Fluido Viscoso del Tipo Lineal. Director: M.Sc. Ing. Adolfo Castro. 2007
17. Luis Enrique García. Dinámica estructural aplicada al diseño sismoresistente. Segunda edición. 1998



18. Mario paz. Dinámica estructural, teoría y cálculo. Tercera edición. 1992
19. Ricardo Oviedo Sarmiento. Control de la respuesta sísmica de edificios utilizando disipadores de energía.
20. Ricardo Oviedo sarmiento. Reforzamiento sísmico de colegios de concreto armado utilizando disipadores de energía.
21. Roberto Aguiar, Marcelo Romo, Verónica Bravo. Alternativas de modelamiento de estructuras con aisladores sísmicos mediante Sap2000.
22. Roberto Aguiar. Estudio experimental de tres disipadores de energía viscoelásticos.
23. Roberto Morales y Ricardo Oviedo. Análisis inelástico y control de la respuesta sísmica de edificios utilizando disipadores de energía.
24. SigWeb. Portal de expertos en prevención de riesgos en Chile. Disipación de Energía. [www.sigweb.cl](http://www.sigweb.cl)
25. Xavier Cahís. Tesis doctoral: Desarrollo de un nuevo disipador de energía para Diseño Sismoresistente. Análisis numérico y validación experimental de su comportamiento, dirigida por: Luis Bozo y Pere Alavedra. 2002.
26. Wikipedia, Enciclopedia de contenido libre. <http://es.wikipedia.org/>