

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DE UN EDIFICIO APORTICADO CON AMORTIGUADORES DE FLUIDO-VISCOZO EN DISPOSICIÓN DIAGONAL

Tesis para optar el Título de **INGENIERO CIVIL**, que presentan los bachilleres:

Diego Nicolás Guevara Huatuco

Percy Omar Torres Arias

ASESOR: Julio Alejandro Muñoz Peláez

Lima, Julio del 2012



A mi padre Percy, por regalarme las fuerzas de sus brazos y depositar sus sueños e ilusiones en mí. A mi madre Elizabeth, por enseñarme a perseverar, a poner los pies en la tierra y obsequiarme gustosamente su juventud y caricias. A mis hermanos Inés, Fiorella y Sebastián por su apoyo abnegado e incondicional.

Percy Omar





A mi abuelo Leandro (QEPD), por enseñarme a dar todo de mí y nunca rendirme. A mi madre Rosa, por regalarme su amor y dedicación día a día, muy feliz de ser la razón de su orgullo. A mi padre Nicolás, por ser un ejemplo de vida y de lucha constante, por ser mi mentor y guía. A mi hermana Diana, por acompañarme y alentarme siempre.

Diego Nicolás





Nuestro más sincero agradecimiento:

A nuestro Asesor, M. Sc. Alejandro Muñoz.

A nuestros Jurados,

M. Sc. Luis Zegarra y M. Sc. Antonio Montalbetti.

A nuestros colaboradores,

Ph. D. Amir Gilani, Ph. D. Tom Chan, Ing. Craig Winter, M. Sc. Iván Gonzales, M. Sc. María Inés Castillo, M. Sc. Maribel Burgos, Ing. Victor Cueva.

Diego Nicolás y Percy Omar



RESUMEN

La presente investigación muestra las características de los sistemas de protección sísmica por amortiguamiento, dando énfasis a los de fluido-viscoso. Luego expone una metodología de diseño para estructuras con sistemas de amortiguamiento enfocada en el desempeño y fundamentada en las disposiciones del ASCE (American Society of Civil Engineers), el FEMA (Federal Emergency Management Agency) y el ACI (American Concrete Institute).

Con el propósito de ilustrar la metodología, se seleccionó una estructura aporticada de 7 niveles con 730 m² de área techada por nivel, cuya deriva (10 ‰) superaba el límite permitido por la norma NTE E-030 (7 ‰). Para cumplir satisfactoriamente con este límite se incluyó un sistema de amortiguamiento de fluido-viscoso.

Como objetivo de diseño se fijó la reducción del daño a nivel moderado frente a un sismo raro (500 años de retorno). La estrategia se orienta a mantener la deriva por debajo de 5.8 ‰, valor propuesto por el HAZUS (Methodology for Estimating Potential Losses from Disasters). Con el sistema de amortiguamiento fluido-viscoso se logró incrementar el amortiguamiento al 23% y reducir la deriva a 5.8 ‰. Como parte del trabajo se diseñan las columnas adyacentes a los dispositivos y el brazo metálico.

Los resultados de la evaluación económica basada en ratios y precios propuestos por el fabricante indican que el costo del sistema de amortiguamiento de fluido-viscoso en esta estructura y para este nivel de desempeño, está alrededor de los 30 \$/m² y la incidencia en el costo total del proyecto bordea el 7%.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de Amortiguamiento de Fluido-Viscoso (SAFV) se usan desde 1968 en la industria militar y aeronáutica como sistemas de absorción de impactos. En la actualidad se utilizan también como una alternativa para el control de vibraciones en edificios sometidos a la acción de sismos y viento. Actualmente existen en el mundo más de 2000 edificios protegidos por este sistema.

Los SAFV se vienen aplicando exitosamente a nivel mundial en proyectos de reforzamiento estructural y en edificaciones nuevas. A la fecha (2012) en el Perú, la Torre del aeropuerto Jorge Chávez es la única que tiene amortiguadores de fluido-viscoso (TAYLOR), sin embargo ya se viene introduciendo esta nueva tecnología en proyectos de reforzamiento y de edificios nuevos.

La experiencia ha demostrado que el uso de los SAFV mejora el desempeño sísmico de los edificios, disminuyendo el riesgo de pérdida de vidas humanas y de materiales importantes o de valor histórico. Los SAFV permiten un ahorro importante en gastos de reparación y costos indirectos producidos por la interrupción del servicio de la edificación.

En el capítulo I, se exponen las características de los sistemas modernos de protección por amortiguación. Se presentan los principales tipos de dispositivos de amortiguación junto a una breve explicación de su funcionamiento. Se dedica una sección completa a los amortiguadores de fluido-viscoso revisando sus propiedades, principales disposiciones, criterios de ubicación y recomendaciones de su uso.

En el capítulo II, se presenta una metodología simplificada de diseño para estructuras regulares con amortiguadores de fluido-viscoso basada en el diseño por desempeño.

Para mostrar la metodología adoptada, en el capítulo III se presentan los detalles del diseño del sistema de protección para un edificio de oficinas de 7 niveles. Se comparan los resultados del uso de amortiguadores lineales y no lineales. Por último, se definen los amortiguadores y se diseñan los elementos adyacentes a los dispositivos.

En el capítulo 4 se presentan las conclusiones de la tesis, en los Anexos se presentan los planos estructurales e imágenes de edificios con SAFV.

CAPÍTULO I

SISTEMAS MODERNOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA POR AMORTIGUACIÓN

1.1. Edificaciones con Sistemas de Protección por Amortiguamiento

1.1.1. Enfoque sismoresistente tradicional

El desempeño de un edificio, según el enfoque tradicional del diseño sismorresistente, está basado en la capacidad que tiene la propia estructura de disipar la energía introducida por el sismo a través de una combinación de propiedades conocidas como ductilidad, resistencia y rigidez.

Es de esperarse que la estructura tenga un comportamiento elástico ante sismos leves y uno inelástico cuando esté sujeto a sismos moderados o raros. Este comportamiento inelástico está caracterizado por la disipación de energía a través de deformaciones no recuperables que se agravan conforme la deriva de entrepiso se incrementa; teniendo como consecuencia daño estructural y no estructural cuantioso.

Este enfoque convencional del diseño sismorresistente ha llevado a los ingenieros a detallar los edificios con suficiente ductilidad para prevenir fallas repentinas y catastróficas conforme la estructura va entrando en el rango inelástico. La Fig. 1 muestra la curva capacidad de una estructura y sus correspondientes niveles de desempeño conforme aumenta el desplazamiento del último nivel. Además muestra una foto de deformaciones inelásticas en porticos de concreto armado.

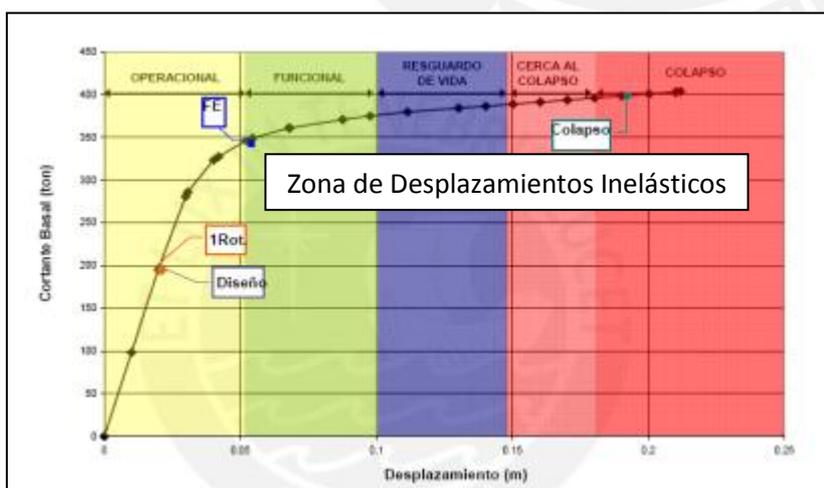


Fig. 1. Curva capacidad de una estructura y niveles de desempeño propuestos por SEAOC Vision 2000 Comité.

Existen edificios tales como hospitales, estaciones de policía, colegios y estaciones de bomberos, que deben continuar operativos después de un sismo severo. Este hecho exige que tales edificios se diseñen con suficiente resistencia para que las deformaciones inelásticas sean mínimas o reparables inmediatamente. Una alta resistencia, significa una alta inversión en términos económicos, y aun así, jamás podríamos mantener la estructura en el rango elástico.

El diseño sismorresistente tradicional, el mismo que se presenta en la norma peruana, tiene el objetivo principal de mantener las derivas de la estructura por debajo de un límite máximo incrementando la rigidez. Este incremento por lo general es causante de altas vibraciones que generan daño no estructural en una edificación. La Fig. 2 muestra el efecto de las vibraciones en los equipos de un hospital.



Fig. 2. Equipos dañados por las altas vibraciones generadas durante un evento sísmico.

1.1.2. Enfoque sismorresistente con sistemas de protección por amortiguamiento

Los sistemas de protección sísmica por amortiguamiento tienen como finalidad reducir los desplazamientos relativos de entrepiso, y por tanto aminorar el daño estructural. Esto se logra mediante un incremento de la participación del amortiguamiento viscoso en la disipación de energía sísmica.

Cuando un edificio no posee dispositivos de amortiguamiento, la energía total ingresada a través del movimiento sísmico es disipada en su gran mayoría mediante energía de deformación elástica e inelástica (también llamada histerética); mientras que la participación de la energía de amortiguamiento viscoso es casi nula.

Al usar un sistema de amortiguamiento, la energía de entrada es balanceada de tal forma que la energía de amortiguamiento viscoso incrementa su participación, comprometiendo menos la capacidad elástica e inelástica de la estructura. Esta redistribución de la energía se ilustra en la Fig. 3.

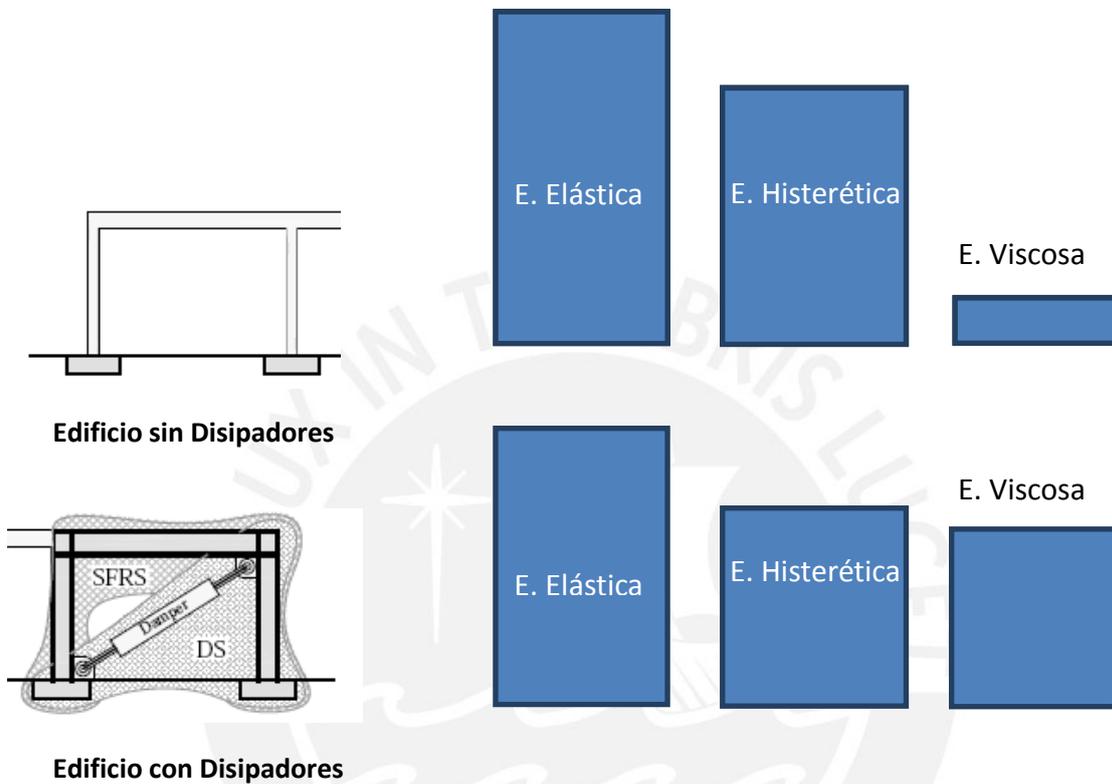


Fig. 3. Distribución de la energía sísmica en un edificio sin Disipadores y en otro con Disipadores.

$$E_i = E_e + E_h + E_v = \text{Constante}$$

(Ec 1.1)

Una consecuencia directa de la adición de amortiguadores es una reducción de la disipación inelástica o histerética (E_h), ya que como indica la Ec. 1.1, la energía de entrada (E_i) se mantiene constante durante el evento sísmico. El edificio ya no tiene que absorber la totalidad de energía sísmica por sí mismo, sino que una porción de esta energía es absorbida por el sistema de amortiguamiento (E_v).

El incremento del amortiguamiento genera una reducción del espectro de pseudoaceleraciones, y por tanto, una disminución de la resistencia demandada, como se ilustra en la Fig. 4.

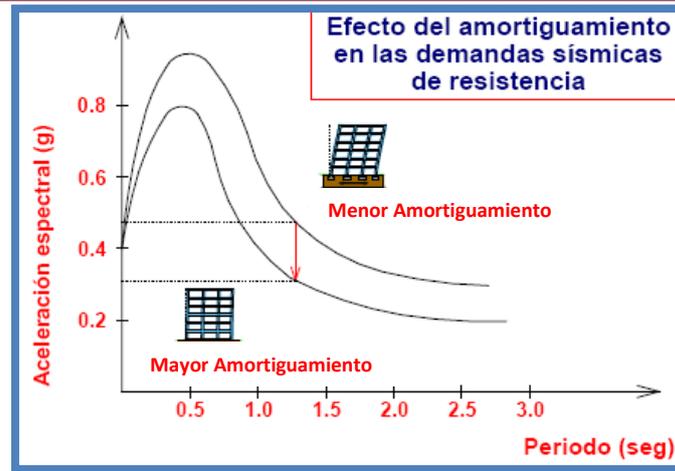


Fig. 4. Reducción en las demandas de resistencia debido al incremento de amortiguamiento.

1.2. Dispositivos de Amortiguación

1.2.1. Clasificación

Los dispositivos de amortiguación se clasifican en dos grandes categorías: Dependientes del Desplazamiento y Dependientes de la Velocidad. Asimismo se considera como una tercera categoría aquellos dispositivos que dependen del Desplazamiento y de la Velocidad.

- **Dependientes del Desplazamiento:** Disipadores de fluencia metálica y Disipadores por fricción.
- **Dependientes de la Velocidad:** Disipadores fluido-viscosos.
- **Dependientes del Desplazamiento y de la Velocidad:** Disipadores fluido visco-elásticos y Disipadores sólido visco-elásticos.

1.2.1.1. Disipadores Dependientes del Desplazamiento

Son aquellos dispositivos que inician la disipación de energía con el movimiento relativo de entrepiso. Esto se refleja como un incremento en la rigidez de la estructura modificando de esta manera el periodo de la misma.

Disipadores de fluencia metálica

Disipan energía plastificando el componente de acero que hay en su interior mediante esfuerzos de flexión o cortante. Entre los más usados tenemos el llamado dispositivo ADAS.

La principal desventaja que presenta este dispositivo es que no puede ser ensayado antes de ser colocado ya que al enfocar la disipación de energía en las deformaciones el dispositivo ingresa a un rango inelástico que va degenerándolo. Por este motivo es un dispositivo que requerirá mantenimiento o incluso reemplazo total tras un sismo.



Fig. 5. Dispositivo de amortiguación por fluencia Metálica ADAS.

Disipadores por fricción

Disipan energía utilizando la fricción entre dos superficies en contacto sometidas a presión. La principal desventaja que presenta este tipo de dispositivo es la incertidumbre del coeficiente de fricción. Este valor no se mantiene constante durante el movimiento, sino que depende de la velocidad, la presión normal y las condiciones de contacto.

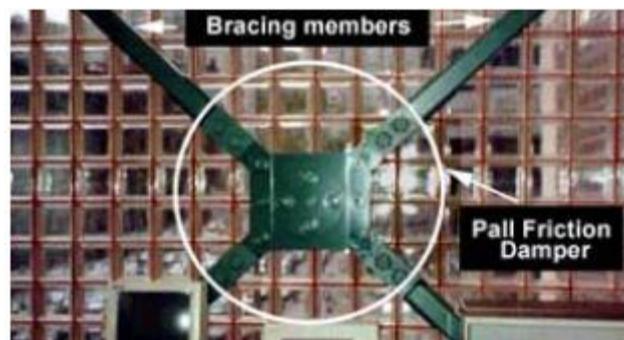


Fig. 6. Dispositivo de amortiguación por fricción.

1.2.1.2. Disipadores Dependientes de la Velocidad

Estos dispositivos inician la disipación de energía con la velocidad relativa de entrepiso. No generan ningún efecto en la rigidez de la estructura por lo cual el periodo de la misma se mantiene intacto.

Disipadores fluido-viscosos

También son conocidos como amortiguadores fluido viscosos. Inicialmente su aplicación se limitaba a la industria militar y aeronáutica. Sin embargo en años recientes su uso se ha extendido a la industria de la construcción, aplicándose exitosamente en edificaciones y puentes en Estados Unidos, Japón, Chile y otros países. Los detalles de su funcionamiento se detallan en la sección 1.4.



Fig. 7. Dispositivos de disipación Fluido Viscosos Taylor.

1.2.1.3. Disipadores Dependientes del Desplazamiento y de la Velocidad

Disipadores visco-elásticos

Estos dispositivos son capaces de iniciar su acción al menor desplazamiento y/o velocidad. Gracias a que el período de vibración del dispositivo es prácticamente invariable, nos permite linealizar su acción; de este modo puede obtenerse un modelo más sencillo.

Entre sus inconvenientes tenemos que los materiales visco-elásticos son muy sensibles a la variación de temperatura y frecuencia. Además es necesario un gran número de ellos para conseguir un amortiguamiento significativo.



Fig. 8. Dispositivo de disipación Visco-elástico.

1.3. Modelo del Sistema de Amortiguamiento

Al introducir disipadores de energía a un edificio, éste se divide en dos sistemas interdependientes: el Sistema Estructural, compuesto por los elementos de concreto armado ó acero que componen la estructura, y el Sistema de Amortiguamiento, compuesto por los amortiguadores, conexiones metálicas y elementos de concreto ó acero que estén conectados directamente a ellos.

En el presente acápite se exponen la representación física de un Sistema de Amortiguamiento de un grado de libertad y el modelamiento de un amortiguador fluido viscoso individual.

1.3.1. Representación Física del Sistema de Amortiguamiento

Para este modelo de un grado de libertad se consideran las disposiciones Chevron y Diagonal tal como se ilustra en la Figura 9 (extraída de “Smart Structures Innovative Systems for Seismic Response Control” – 2008).

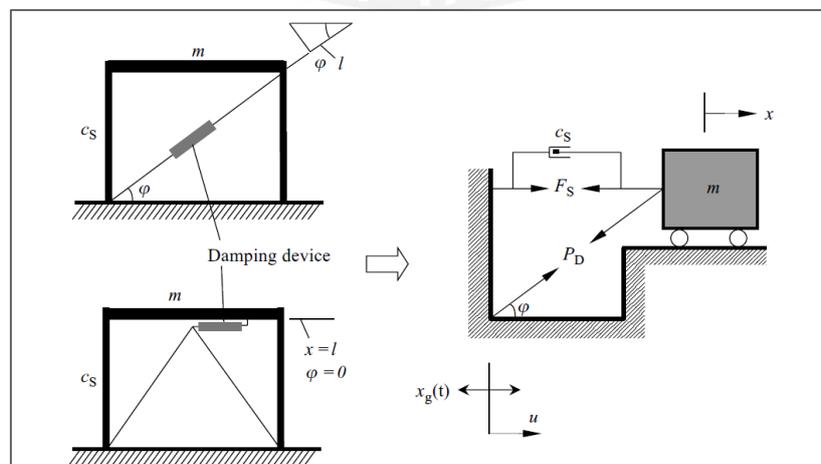


Fig. 9 – “Modelo dinámico del sistema de amortiguamiento de un sólo grado de libertad (Disposición Diagonal y Chevron)”

La rigidez axial del sistema viene gobernada por la rigidez del elemento que contiene el disipador, llamado brazo metálico. La rigidez de este brazo es mucho mayor que la del dispositivo de amortiguamiento. Por esa razón, los brazos pueden ser asumidos como elementos infinitamente rígidos.

Esta suposición y las condiciones de equilibrio nos permiten definir la ecuación dinámica de la estructura con un sistema de amortiguación de un solo grado de libertad.

$$m\ddot{x} + c_s\dot{x} + D + Q = -m\ddot{x}_g \quad \text{ó}$$

$$m\ddot{x} + c_s\dot{x} + P\cos\varphi + Q = -m\ddot{x}_g$$

(Ec. 2.1)

Donde:

m: Masa de la estructura, concentrada a nivel del techo.

Cs: Coeficiente de amortiguamiento.

Q: Expresión general que considera el comportamiento no lineal de la Fuerza estructural

P: fuerza definida a lo largo del movimiento del sistema de disipación.

D: Componente horizontal de la fuerza.

φ : Angulo que depende de la configuración del sistema de disipación y sus refuerzos.

$x(t)$: Desplazamiento de entrepiso

$\ddot{x} - \ddot{x}_g$: Aceleración estructural y aceleración del suelo

Esta ecuación representa de manera general el comportamiento de una estructura con dispositivos de amortiguamiento sometida a una fuerza sísmica.

Finalmente cabe destacar que la expresión que representa la fuerza en el dispositivo de amortiguamiento (P) es única para cada tipo de disipador; debido a que cada uno presenta propiedades y características distintas.

1.3.2. Modelo de un Amortiguador individual

La manera más sencilla de representar un amortiguador individual en la estructura es mediante el modelo Maxwell. Se considera un resorte lineal (Driver) en serie con un amortiguador puramente viscoso (Damper). La Fig. 10 presenta el modelo Maxwell.

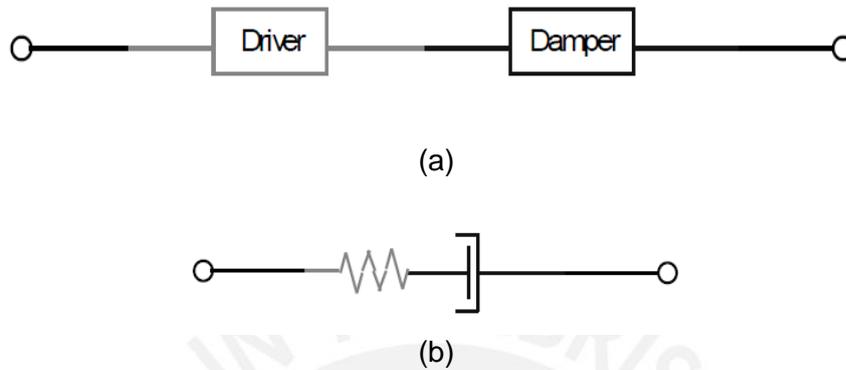


Fig. 10. Diagrama de bloques (a) y Representación Matemática (b) del modelo de Maxwell

La expresión que representa la relación fuerza-desplazamiento con la velocidad del modelo Maxwell es:

$$F = K_D u = C [\text{sgn}(v)] v^\alpha \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

F: Fuerza en el amortiguador.

K_D: Rigidez elástica del resorte.

C: Coeficiente de velocidad del amortiguador.

α: Exponente de velocidad.

u: Deformación axial.

[sgn(v)] : Función signo.

v: Velocidad axial.

Debe tenerse en cuenta que esta representación no considera ningún estado límite de fuerza o desplazamiento ante un sismo de alta magnitud. En el Instituto Tecnológico de Tokio (H. Kit Miyamoto) se realizaron investigaciones con el objetivo de encontrar un modelo que considere todo tipo de estado crítico del sistema para amortiguadores fluido viscosos. Con este modelo se estimaría un nivel de riesgo más real. La Fig 11 muestra el modelo matemático resultante de estas investigaciones.

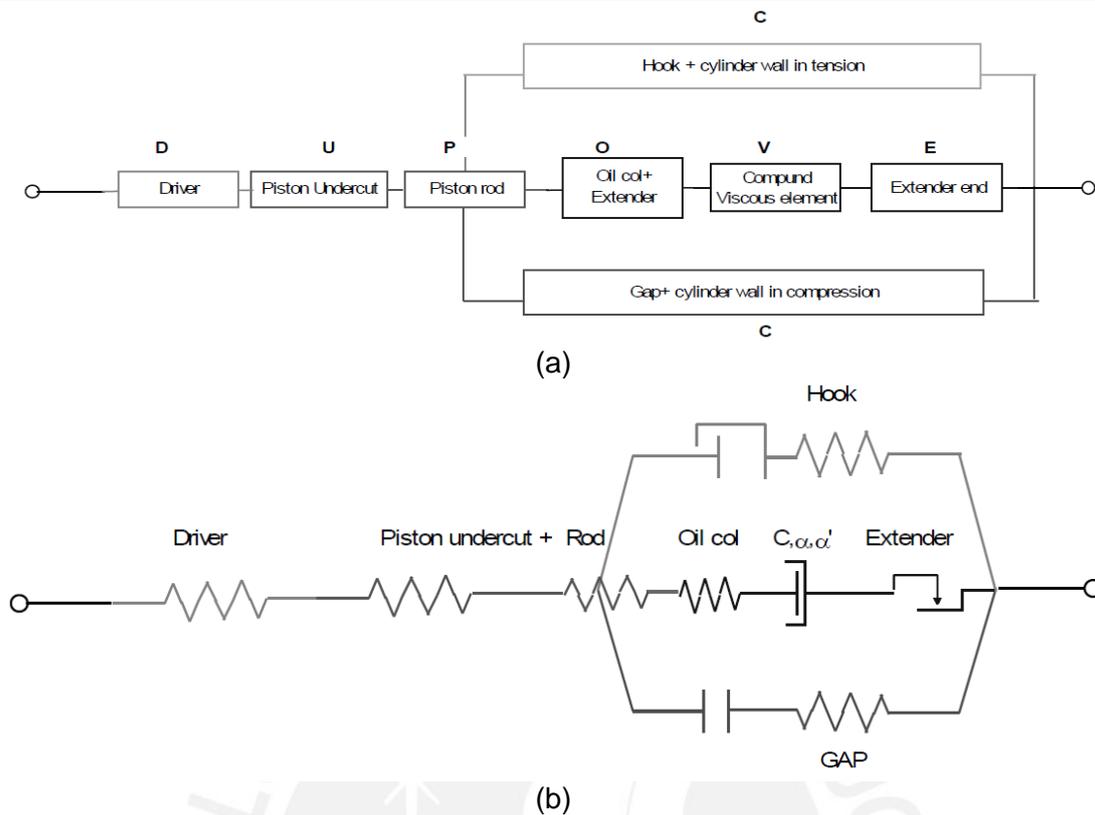


Fig. 11. Diagrama de bloques (a) y Representación Matemática (b) detallada del modelo del dispositivo de amortiguamiento viscoso.

En el software de cálculo estructural ETABS v9.5, el modelo del disipador es del tipo Maxwell. Así, el amortiguador puede modelarse como elemento tipo **“Link”**, para después asignarle propiedades **“Damper”** del tipo lineal o no lineal . Estas propiedades se presentan en detalle en la Sección 1.4.

1.4. Amortiguadores Fluido-Viscosos

Estos dispositivos son básicamente recipientes llenos de un fluido que deben mantenerse en condiciones de servicio durante el período de vida de la estructura a la que sirve. A diferencia de otros tipos de dispositivos, no aportan mayor rigidez ni resistencia al sistema. Además no añaden fuerzas al sistema debido a su comportamiento fuera de fase con la estructura.

El comportamiento fuera de fase con la estructura puede explicarse recurriendo al comportamiento de un fluido viscoso, cuya fuerza resistente aumenta al aumentar la velocidad con la que es comprimida. Esta propiedad origina que la velocidad de la

estructura sea cero cuando alcance su deformación máxima y por lo tanto la fuerza generada por el dispositivo, por deberse al fluido viscoso, es también cero.

Podemos concluir entonces que estos dispositivos tienen la propiedad de disminuir simultáneamente las deformaciones y los esfuerzos en la estructura. En la literatura especializada este comportamiento se denomina: “fuera de fase”.

1.4.1. Ecuación General

La ecuación simplificada de estos dispositivos es la siguiente:

$$F = C V^\alpha \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

F: Fuerza en el disipador.

C: Constante de Amortiguamiento.

V: Velocidad relativa en el amortiguador.

A: Coeficiente que varía entre 0.4 y 0.6 para edificaciones.

a) Coeficiente de amortiguamiento “C”

Es la constante de amortiguamiento del dispositivo, y está relacionado a las propiedades del fluido inmerso dentro del dispositivo. Debe ser definido por el proyectista de acuerdo al amortiguamiento objetivo.

Su cálculo parte de una estimación que depende directamente del tipo de disipador utilizado (lineal o no lineal) y del amortiguamiento objetivo. A continuación se exponen dichas expresiones:

Amortiguadores Lineales

Un valor inicial estimado del coeficiente de amortiguamiento “C” para dispositivos lineales puede obtenerse con la siguiente ecuación:

$$\beta_{visc.} = \frac{T \sum_j C_j \phi_{rj}^2 \cos^2 \theta_j}{4\pi \sum_i m_i \phi_i^2}$$

(Ec. 2.4)

Donde:

$\beta_{visc.}$: Amortiguamiento Viscoso Objetivo.

T : Período de la estructura.

ϕ_i : Modo de vibración del periodo fundamental.

ϕ_{rj} : Desplazamiento Relativo del modo de vibración fundamental.

θ_j : Ángulo de inclinación del disipador.

m_i : Masa de entrepiso.

Esta fórmula considera un coeficiente de amortiguamiento constante para todos los dispositivos. Sin embargo, se conoce experimentalmente que la eficiencia de los amortiguadores en los pisos superiores es menor que la que se presenta en los niveles inferiores debido a la importancia de los primeros modos.

Amortiguadores No Lineales

Un valor inicial estimado del coeficiente de amortiguamiento “C” para dispositivos no lineales puede obtenerse con la siguiente ecuación:

$$\beta_{visc.} = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

λ : Valores tabulados en el FEMA 273 a partir de la siguiente ecuación:

$$\lambda = 2^{2+\alpha} \frac{\Gamma^2(1+\frac{\alpha}{2})}{\Gamma(2+\alpha)}. \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Γ : Función gamma.

A : Amplitud del desplazamiento del modo fundamental de la estructura.

ω : Frecuencia angular fundamental de la estructura ($\omega = 2\pi f$).

α : Exponente de velocidad.

El rango del valor de C dependerá de las condiciones de la estructura tales como: **periodo, regularidad, número de niveles y otros.**

b) Exponente de Velocidad “ α ”

El exponente de velocidad “ α ” describe el comportamiento histerético de los disipadores; en otras palabras propone la disposición de los lazos histeréticos. Este exponente define la reacción del dispositivo ante los impactos de velocidad.

Para el caso de edificaciones se recomienda el uso de $\alpha < 1$, típico de un disipador no lineal. Cuando el amortiguador cumple esta condición, logra minimizar golpes de velocidades con una baja fuerza en el amortiguador.

Para amortiguadores lineales el valor de α es igual a 1. En estos dispositivos la fuerza es proporcional a la velocidad relativa, esto provoca un comportamiento fuera de fase:

“Fuerza máxima en la estructura” → “Fuerza mínima en el disipador”.

Los amortiguadores con α mayor 1 no son comúnmente utilizados en edificaciones porque se necesitan grandes velocidades para incrementar significativamente la fuerza en el amortiguador.

La Fig. 12 ilustra el comportamiento en el amortiguador al variar el valor de α . Demuestra la eficiencia de los amortiguadores no-lineales para aminorar altos shocks de velocidad en comparación con los amortiguadores lineales. Para bajas velocidades relativas, los amortiguadores no lineales reaccionan con una mayor fuerza de amortiguamiento.

Según los especialistas de MIYAMOTO INTERNATIONAL se recomienda utilizar valores de α entre **0.4 y 0.6** para estructuras comunes.

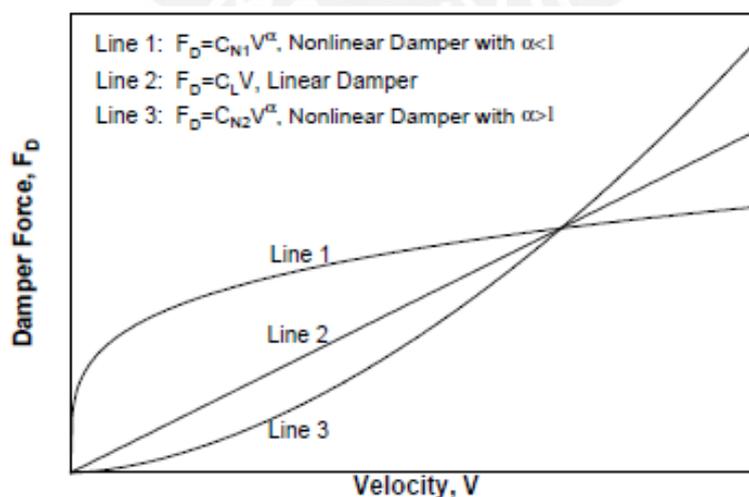


Fig. 12. Fuerza por amortiguamiento vs Velocidad (extraído de “Seismic Design of Structures with Viscous Dampers_Jenn-Shin Hwang”).

c) Rigidez del dispositivo “K” (Rigidez del brazo metálico)

De acuerdo a lo expuesto en la Sección 1.3.1, la rigidez del dispositivo es la rigidez del brazo metálico que lo conecta a la estructura principal. Esto debido a que la rigidez axial del dispositivo es mucho menor a la del brazo, cuyo valor se determina con la siguiente ecuación:

$$K = EA/L \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

E: Coeficiente de Elasticidad del Acero.

A: Área de la sección del brazo metálico.

L: Longitud del brazo metálico.

Es muy común utilizar **perfiles HSS o tipo PIPE** por razones de estética y por su facilidad de instalación.

En el proceso de diseño del brazo metálico se deben validar las siguientes expresiones:

$$\phi T_n = \phi F_y A_g < T_u (\text{Tensión}) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

T_n: Tensión nominal.

φ: Factor de reducción (0.9).

A_g: Área bruta de la sección del brazo metálico.

T_u: Tensión última obtenida a partir de las fuerzas en el disipador.

$$\phi P_n = \phi F_c r A_g < P_u (\text{Compresión}) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

P_n: Compresión nominal.

P_u: Compresión última obtenida a partir de las fuerzas en el disipador.

1.4.2. Esquema Del Dispositivo

Los amortiguadores fluido viscosos están clasificados como elementos pasivos de disipación de energía porque necesitan de una excitación externa, en este caso de

velocidad, para iniciar su desplazamiento interno. La disipación se produce por la conversión de energía cinética en calor.

En general, el dispositivo consiste en dos elementos: un cilindro y un pistón de acero inoxidable. El cilindro tiene en su interior silicona incompresible como fluido viscoso, el cual permite que el sistema de amortiguación se mantenga estable dentro de un rango considerable de variaciones de temperatura.

El dispositivo se activa mediante la transferencia del fluido de silicona a través de compartimientos en lados opuestos de la unidad mediante pequeños orificios. Las propiedades del dispositivo son especificadas por el proyectista, pero estas deberán ser desarrolladas por el fabricante mediante variaciones en la construcción mecánica y las propiedades de los orificios. Estos detalles determinarán además si es un amortiguador lineal o no lineal.

A continuación se muestra un esquema de un amortiguador y descripción de sus partes principales:

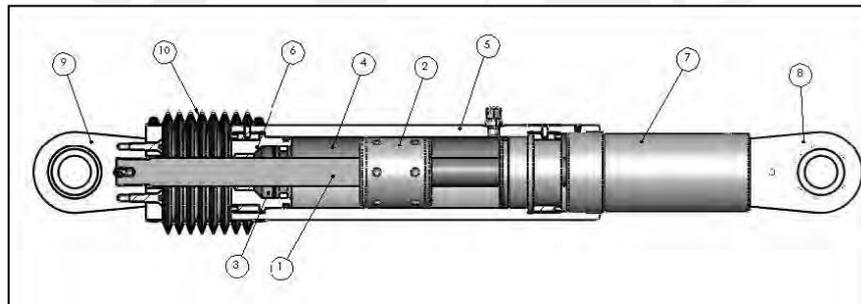


Fig. 13. “Esquema general de un Disipador de Energía TAYLOR DEVICES INC”

Donde:

- 1) Vástago de acero inoxidable.
- 2) Cabeza del pistón de acero sólido o de bronce.
- 3) Sellos / rodamientos de sello, juntas dinámicas.
- 4) Fluido viscoso, silicona incompresible.
- 5) Cilindro con tratamiento térmico de aleaciones de acero, protegido contra la corrosión a través de placas y/o pintura.
- 6) Tapa con tratamiento térmico de aleaciones de acero, protegido contra la corrosión a través de placas y/o pintura.
- 7) Extender, acero al carbono forjado en aluminio con protección contra la corrosión.
- 8) Horquilla final con tratamiento térmico de aleaciones de acero con protección contra la corrosión.

- 9) Cojinete esférico forjado con aleación de acero de calidad aeronáutica.
- 10) Fuelle, nylon reforzado de inicio de neopreno.

1.4.3. Comportamiento Fuerza Desplazamiento

A continuación se expone la relación fuerza-desplazamiento para el sistema de amortiguación fluido viscoso extraída del documento “Probabilistic Seismic Risk Identification of steel Buildings with Viscous Dampers”:

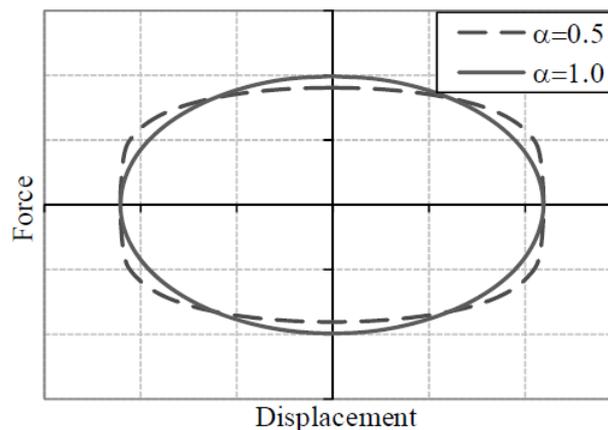


Fig. 14. Relación Fuerza – Desplazamiento para exponentes de velocidad de 1 y 0.5.

La curva que describe el comportamiento Histéretico de un disipador de energía fluido-viscoso es generalmente de geometría elíptica, alcanzando los valores máximos de fuerza para desplazamientos nulos.

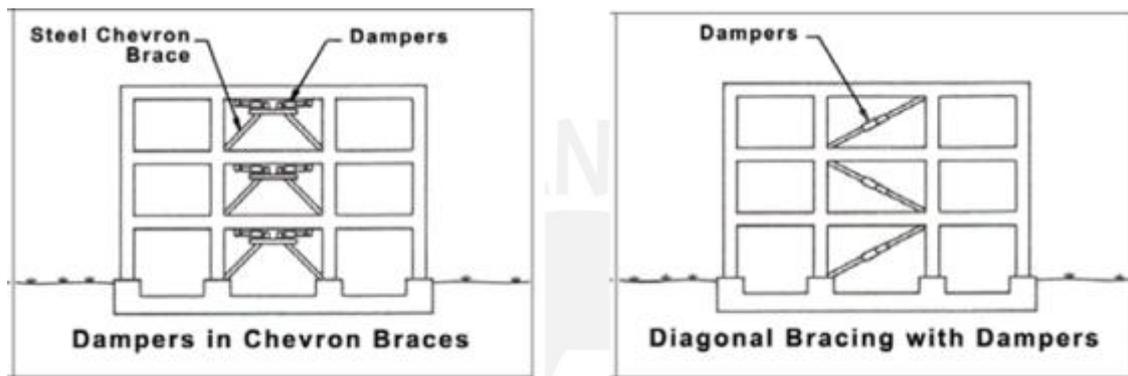
1.4.4. Criterios de Ubicación y Disposición

La ubicación, disposición y número de amortiguadores en el edificio influyen significativamente en la efectividad del sistema de amortiguamiento. Diversas investigaciones en torno a ello han dado como resultado recomendaciones generales de ubicación como la búsqueda de simetría.

En el caso de amortiguadores fluido viscosos, se sugiere ubicarlos inicialmente en las zonas de velocidades máximas y en los entresijos que experimentan mayor desplazamiento relativo. La ubicación óptima de los amortiguadores se logra mediante un proceso iterativo.

También es importante señalar que el uso del edificio y la arquitectura del mismo son factores que influyen significativamente en la ubicación de los amortiguadores. Por esa razón todos los profesionales envueltos en la construcción y diseño de la edificación deben llegar a un acuerdo en cuanto a la ubicación de los amortiguadores, de manera que cumpla con todos los requerimientos de diseño.

Entre los arreglos más comunes se presentan la disposición Chevron y la disposición Diagonal, ambos necesitan de un brazo metálico para conectarse con la estructura.



(a)



(b)

Fig. 15. Disposiciones comunes, (a) en chevron y (b) en diagonal

Disposición CHEVRON

Esta disposición se caracteriza por disponer al amortiguador en posición horizontal, paralelo al plano del techo. De este modo se logra absorber las fuerzas horizontales directamente.

Esta disposición genera un mejor desempeño de la estructura con respecto a la disposición diagonal porque resulta en una mayor reducción de derivas.

Entre las desventajas de esta disposición se encuentra el sobreesfuerzo generado en la parte intermedia de la viga cercana al amortiguador, un efecto de compresión y tracción que debe ser controlado por medio de planchas, anclajes y un refuerzo adicional en la viga.

Disposición DIAGONAL

Esta disposición se caracteriza por orientar el dispositivo en el ángulo diagonal del pórtico donde se ubicará. Por tanto, solamente la componente horizontal participa en la absorción de fuerzas horizontales.

La principal ventaja que presenta esta disposición es que no se requiere de ningún refuerzo adicional al pórtico que lo contiene, ya que los nudos pueden diseñarse para los esfuerzos añadidos de los amortiguadores.

Por otra lado, se suele necesitar un menor número de dispositivos que se utilizarían con otra disposición para el mismo nivel de desempeño objetivo .

La Tabla 1 muestra una breve comparación entre las disposiciones Chevron y Diagonal.

Tabla1: Comparativo Chevron vs Diagonal

COMPARATIVO	Mejor Control de Derivas	Menor solicitud de refuerzo adicional	Menor cantidad de dispositivos
	Chevron	Diagonal	Diagonal

1.4.5. Fabricantes

El principal fabricante de estos dispositivos es la marca **TAYLOR DEVICES INC**, de origen estadounidense y líder mundial desde 1954 en la producción de elementos de absorción de shocks por medio de la compresión y control de fluidos que permiten la disipación de energía. La empresa desarrolló y patentó conceptos tales como el control del fluido a través de orificios, la compresión dinámica de fluidos, los amortiguadores auto ajustables y el resorte líquido desarrollando productos para el sector comercial, militar e industrial.

La principal ventaja de los dispositivos Taylor es que no requieren de ningún mantenimiento antes, durante o después de haber sido sometidos a sollicitaciones de carga.

Los amortiguadores Taylor se encuentran presente en más de 400 proyectos a nivel mundial en estructuras nuevas y reforzadas. En estructuras importantes y de valor económico e histórico, ya sea por la estructura en sí o por su contenido, el uso de un sistema de amortiguamiento tiene por lo general una baja incidencia económica relativa.

En el Perú, la marca Taylor es representada por la empresa **CDV Representaciones**, empresa comercializadora de productos especializados para la construcción y la industria.

El precio unitario por dispositivo es de rango variable pero puede aproximarse inicialmente a US\$ 8000.00, dependiendo de la fuerza de diseño del dispositivo y las propiedades impuestas por el proyectista. Asimismo debe considerarse el costo de los elementos metálicos involucrados en la conexión.

1.5. Normativa y Requerimientos del Código ASCE

1.5.1. Procedimientos de Análisis

Existen cuatro procedimientos propuestos por el ASCE 7-10 para el análisis de estructuras con sistema de disipación de energía, estos son:

- Análisis de Respuesta Espectral.
- Análisis de Fuerza Lateral-Equivalente.
- Análisis No-lineal Estático o Análisis Pushover.
- Análisis de Respuesta No-lineal Tiempo-Historia.

La elección de un tipo determinado de análisis responde a las siguientes consideraciones:

- Categoría de diseño sísmico a partir de la ubicación de la estructura.
- Sistema Sismo-resistente seleccionado.
- Sistema de Disipación de Energía seleccionado.
- Configuración estructural.

Los procedimientos recomendados para estructuras con sistemas de Amortiguamiento son en general métodos No-lineales. Los procedimientos de Respuesta Espectral y Fuerza Lateral Equivalente pueden usarse siempre y cuando el edificio sea modelado linealmente y bajo ciertas restricciones del ASCE 7-10.

1.5.2. Reducción de la Respuesta, Coeficiente “B”

Según el ASCE 7-10, la respuesta de la estructura ante una solicitud sísmica puede ser reducida debido al incremento del amortiguamiento proporcionado por los disipadores. Esta reducción de la fuerza cortante basal se expresa mediante:

$$V_{min} = \frac{V}{B_{V+I}} \quad (\text{Ec. 2.10 - 1})$$

Donde V es la fuerza cortante basal obtenida sin la aplicación de disipadores y B es el factor de reducción de respuesta en función del amortiguamiento equivalente cuyo valor mínimo es:

$$V_{min} = 0.75V \quad (\text{Ec. 2.10 - 2})$$

Si se elige el análisis espectral, el factor B puede interpretarse como una reducción del espectro de pseudoaceleraciones, de desplazamientos y de fuerza cortante. La Figura 16, extraída del FEMA 368 y 369, ilustra este hecho.

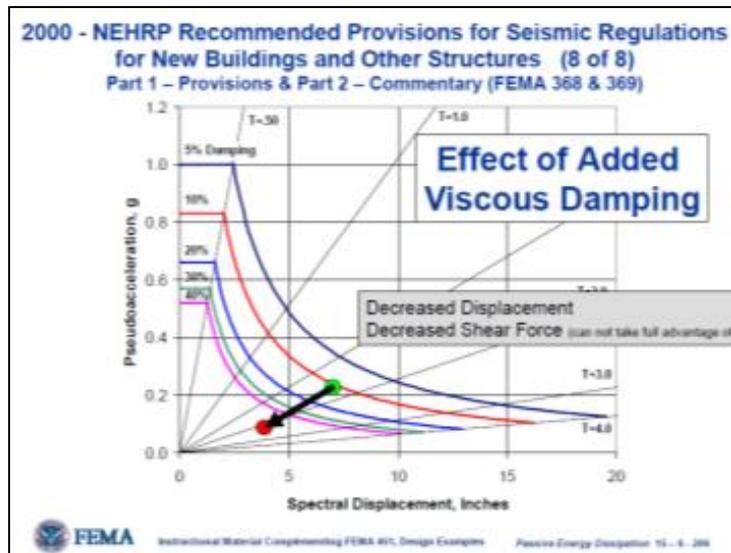


Fig. 16. Reducción del espectro por incremento del amortiguamiento viscoso.

1.5.3. Amortiguamiento Equivalente, Factor “β”

El amortiguamiento equivalente es una sumatoria del amortiguamiento inherente, amortiguamiento histerético y amortiguamiento viscoso, expresada en fórmulas expuestas en el ASCE 7-10 Capítulo 18. A cada valor de “β” corresponde un factor de reducción “B”, es decir, para cada porcentaje de amortiguamiento que presenta la estructura, habrá un factor por el que reducir su respuesta. La tabla 2, extraída del ASCE 7-10 Capítulo 18, indica estas relaciones.

Tabla 2: Coeficiente de amortiguamiento en función del amortiguamiento equivalente (tabla extraída del ASCE 7-10, capítulo 18)

Effective Damping, β (percentage of critical)	$B_{V+I}, B_{LD}, B_R, B_{IM}, B_{MD}, B_{NM}$ (where period of the structure $\geq T_0$)
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.8
40	2.1
50	2.4
60	2.7
70	3.0
80	3.3
90	3.6
≥ 100	4.0

1.6. Recomendaciones sobre el uso del Sistema de Amortiguamiento en Edificaciones.

El presente acápite busca recomendar el uso de este moderno sistema de protección sísmica por amortiguamiento fluido-visco en función de las variables más importantes dentro de un Proyecto de Edificaciones.

➤ En Función del Tipo de Sistema Estructural

La capacidad de disipar energía de estos dispositivos se incrementa conforme el desplazamiento relativo en su interior aumenta. Estos dispositivos permiten aquellos desplazamiento gracias al fluido que llevan en el interior el cual se activa una vez que inicia el movimiento que es el que somete la estructura a aceleraciones generando así altas velocidades en los amortiguadores.

Este comportamiento nos lleva a la conclusión de que la conveniencia en el uso de estos dispositivos depende exclusivamente de la flexibilidad o rigidez de la estructura. Así un sistema de muros tendría dispositivos destinados a controlar el daño con efectividad únicamente en las primeras etapas de agrietamiento, mientras que un sistema de pórticos o dual tendría la ventaja de controlar las derivas de entrepiso y el daño estructural generados durante todo el proceso.

➤ En Función del Nivel de Desempeño Deseado

Para este punto de vista se propone comparar el sistema de amortiguamiento con respecto a otro igualmente moderno pero con un enfoque diferente, se trata del sistema de aislamiento sísmico.

El capítulo 9 del FEMA 274 nos muestra algunas recomendaciones en el uso de ambos sistemas de acuerdo a los diversos niveles de desempeño deseados. Por ejemplo, para los niveles de desempeño: Operativo, Inmediatamente Ocupable y Resguardo de la vida, los amortiguadores son especialmente útiles. Para el nivel Cerca al colapso es mejor recurrir a otros sistemas de reforzamiento o a la combinación de ambos.

A continuación reproducimos una adaptación al castellano de la tabla de referencia publicada en el FEMA 274.

Tabla 3. Recomendaciones de la aplicación del Sistema de amortiguamiento y de aislamiento de la base según el Nivel de Desempeño Deseado.

Desempeño		Aislamiento de la base	Amortiguamiento
Nivel	Rango		
Operativo	Control de daño	Muy recomendable	Recomendable
Inmediatamente Ocupable	Control de daño	Recomendable	Recomendable
Resguardo de la vida	Seguridad al limite	Limitado	Recomendable
Cerca al Colapso	Seguridad al limite	No Recomendable	Limitado

➤ En Función de la Edad de la estructura

En muchos países se usan estos dispositivos con fines de reforzamiento de estructuras existentes. Ciertamente esta es una opción atractiva porque se mejora el desempeño de la estructura sin adicionar elementos rigidizantes tales como muros de concreto armado y arriostres metálicos.

Adicionalmente su instalación demanda menores implicancias porque generalmente son adosadas a los pórticos. Aquí reside una gran ventaja en comparación con los sistemas de aislamiento sísmico.

En edificios nuevos, los amortiguadores han sido usados para controlar la excesiva vibración que pudiera ocasionar daño en los elementos no estructurales como equipos y/o artefactos. Inclusive su aplicación nos permite reducir secciones del casco estructural logrando así una reducción en el costo total del proyecto.

➤ En Función de la Estética o Arquitectura del proyecto

Debido a que estos dispositivos son generalmente integrados dentro del marco de un pórtico, pueden esconderse fácilmente detrás de muros de drywall y así tener un mínimo efecto en la integridad arquitectónica del edificio.

A pesar de esto cabe mencionar que algunos expertos del tema consideran una mejora arquitectónica la exposición de los amortiguadores, inclusive un incremento considerable del valor del proyecto.

➤ En Función del Mantenimiento o Vida Util

Los dispositivos de fluido-viscoso TAYLOR DEVICES no requieren de ningún tipo de mantenimiento inclusive luego de algún evento sísmico. Esta afirmación cuenta con el respaldo de la industria militar que participó directamente en la investigación, inclusive

existen muchas edificaciones a nivel mundial que demuestran la veracidad de esta propiedad.

➤ En Función del Costo y las condiciones del proyecto

El costo del análisis, diseño, fabricación e instalación de los amortiguadores en una estructura esta en función de los siguientes factores:

- *Movimiento del suelo y condiciones de suelo.*
- *Tipo de estructura.*
- *Desempeño deseado.*
- *Número de amortiguadores.*
- *Capacidad de cada disipador en fuerza, desplazamiento y velocidad.*
- *Refuerzo requerido de elementos estructurales existentes, conexiones o cimentaciones.*
- *Detalles de construcción e instalación.*
- *Interrupción en la ocupación del edificio durante la construcción o reforzamiento.*

Se recomienda contar con especialistas en todos los campos de manera que pueda controlarse a la mayor medida todos estos factores.

Adicionalmente se debe tener en cuenta que el proyectista encargado debe contar con dos importantes requerimientos en función de minimizar los costos y seleccionar adecuadamente un amortiguador. El primero, un entendimiento claro de las propiedades de este sistema y segundo, un racional proceso de diseño teniendo muy en claro los objetivos de diseño establecidos.

➤ En Función de la Importancia de la Estructura

En estructuras importantes y esenciales, el costo relativo de implementar un sistema de amortiguamiento es relativamente bajo en comparación con los gastos que se tendrían que asumir en reparación estructural después del evento sísmico y los gastos originados por los daños del contenido del edificio.

La aplicación de sistemas modernos de amortiguamiento es un valor agregado también desde el punto de vista comercial para aquellos edificios destinados a oficinas o departamentos. El costo de venta de una oficina o departamento en un edificio con disipadores de energía siempre será superior al de un edificio convencional.

➤ En Función del tipo de Dispositivo seleccionado

Si se desea incrementar el amortiguamiento para movimientos sísmicos desde pequeños hasta severos, entonces los dispositivos visco elásticos y fluido viscosos son apropiados porque estos disipan energía en todos los niveles de movimiento. Dispositivos histeréticos y de fricción requieren de suficiente movimiento relativo para empezar su acción de disipación.

Si se desea aumentar la resistencia y rigidez lateral en un edificio, entonces el uso de dispositivos visco elásticos ó histereticos es recomendable.



CAPÍTULO II

METODOLOGÍA DE DISEÑO – AMORTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO

En este capítulo se presentará una metodología de diseño para edificaciones usando amortiguadores de fluido-viscoso en disposición diagonal. Los requisitos mínimos a considerar en base a las recomendaciones del ASCE Capítulo 18 sección 18.2.4.1 son los siguientes:

- Estructura regular.
- Dos dispositivos como mínimo en cada dirección de análisis.
- Dispositivos en todos los niveles.

Para la etapa de análisis se aplicará un análisis tiempo-historia con el objetivo de obtener derivas y valores de fuerza en el SAFV. En la etapa de diseño se trabajará con un espectro reducido, el cual representa los efectos del incremento de amortiguación.

2.1. Análisis Estructural del Edificio Sin Amortiguadores

La estructura en cuestión se modelará linealmente con secciones agrietadas según los criterios de fisuración del ACI:

- Vigas $\rightarrow 0.35 * (I_g)$
- Columnas $\rightarrow 0.70 * (I_g)$

Donde “ I_g ” es la sección bruta.

2.1.1. Registros Tiempo-Historia

La Norma Peruana Sismo-Resistente E 0.30 indica que siempre que se desarrolle un análisis estructural tiempo-historia, deberá contarse con 5 registros de aceleraciones horizontales como mínimo, sean reales o artificiales, normalizados a la aceleración máxima esperada en el sitio. Se señala también que si se trata de una edificación importante se requerirá que los elementos estructurales sean modelados con propiedades inelásticas.

El ASCE 07-10, en su capítulo 18: “Requerimientos de diseño sísmico para estructuras con Sistemas de Amortiguamiento”, señala que el análisis tiempo historia deberá ejecutarse con un mínimo de 3 pares de registros sísmicos.

Siguiendo la recomendación del ASCE 07-10, se usarán 3 pares de registros sísmicos debidamente normalizados. Luego de analizar la estructura con estos registros se procede a anotar las derivas máximas en las direcciones de análisis X e Y.

2.2. Objetivos de Desempeño

Se procede a la elección de los objetivos de desempeño sísmico. Estos objetivos corresponden a expresiones de acoplamiento entre los niveles de desempeño deseados y el nivel de movimiento sísmico esperado. Para seleccionar estos objetivos es necesario tomar en consideración algunos factores como la importancia de las funciones que ocurren dentro del edificio, consideraciones económicas como el costo de interrupción de las actividades así como costos de reparación.

2.2.1. Niveles de Desempeño

Los niveles de desempeño pueden ser cuantificados en términos de cantidad de daño directo a la estructura y al impacto indirecto posterior sobre las actividades en el edificio. A continuación se presenta una descripción detallada de los 4 niveles de desempeño establecidos por uno de los trabajos más completos realizados hasta el momento: el del comité VISION 2000 del SEAOC.

a) Totalmente Operacional

Es un nivel en el que prácticamente no ocurren daños. El edificio permanece estable y seguro para sus ocupantes. No se requieren reparaciones.

b) Operacional

Se presentan daños estructurales leves y daños moderados en el contenido de la edificación y algunos elementos no estructurales. En realidad el daño es limitado y el edificio puede ser ocupado inmediatamente después del evento sísmico. Los daños no estructurales pueden limitar parcialmente el funcionamiento normal de la edificación.

c) Seguridad

A este nivel, ocurren daños moderados en los elementos estructurales y en el contenido de la edificación. La rigidez lateral es reducida posiblemente en un gran porcentaje, sin embargo, aún existe un margen de seguridad frente al colapso. Los

daños pueden resultar en una interrupción de las actividades en el edificio. Se requiere rehabilitación siempre en cuando sea viable y justificable desde el punto de vista económico.

d) Próximo al Colapso

La estructura se acerca al colapso debido a la gran degradación de la rigidez lateral y disminución significativa de la estabilidad. Bajo estas condiciones la edificación es insegura y el costo de rehabilitación puede ser injustificable desde el punto de vista económico.

2.2.2. Sismos de Diseño

Los movimientos sísmicos de diseño son expresados por el comité VISION 2000 en términos de un intervalo de recurrencia medio o de una probabilidad de excedencia. La Tabla 4 muestra los intervalos de ocurrencia y la probabilidad de excedencia para cada uno de los movimientos sísmicos de diseño considerados por el comité VISION 2000.

Tabla 4: Movimientos Sísmicos de Diseño (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995).		
Movimiento Sísmico de Diseño	Periodo de Retorno (años)	Probabilidad de excedencia – aceleración máxima esperada
Frecuente	43	50% en 30 años
Ocasional	72	50% en 50 años
Raro	475	10% en 50 años
Muy raro	950	10% en 100 años

2.2.3. Elección de los Objetivos de Desempeño

El comité VISION 2000 agrupa las estructuras en tres grandes grupos de acuerdo a su grado de importancia durante y después del sismo:

- Estructuras Críticas** : Aquellas que contienen materiales peligrosos que podrían resultar en una amenaza inaceptable para un amplio sector de la comunidad.
- Estructuras Esenciales** : Aquellas encargadas de todas las operaciones post-terremoto como hospitales, estaciones de bomberas, estaciones de policía, etc.

- c) **Estructuras Básicas** : Aquellas estructuras no consideradas en los grupos anteriores.

La Tabla 5 muestra la matriz propuesta por el comité VISION 2000 para definir los objetivos de desempeño. Los números representan los tres tipos de estructuras considerados. La tabla 6 ilustra la definición de los objetivos de desempeño para estructuras básicas. Así, para un sismo raro, el nivel de desempeño mínimo es el de Seguridad.

Tabla 5: Objetivos de desempeño sísmico recomendado para estructuras (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995).

Movimiento Sísmico de Diseño	Nivel de Desempeño			
	Totalmente Operacional	Operacional	Seguridad	Próximo al colapso
Sismo Frecuente	1	0	0	0
Sismo Ocasional	2	1	0	0
Sismo Raro	3	2	1	0
Sismo Muy Raro	0	3	2	1

0 : Desempeño Inaceptable
1 : Estructuras Básicas
2 : Estructuras Esenciales / Riesgosas
3 : Estructuras Críticas

Tabla 6: Objetivos de desempeño para estructuras básicas.

Movimiento Sísmico de Diseño	Nivel de desempeño mínimo
Sismo Frecuente	Totalmente Operacional
Sismo Ocasional	Operacional
Sismo Raro	Seguridad
Sismo Muy raro	Próximo a colapso

2.3. Definición de los Objetivos de Diseño

2.3.1. Relación Desempeño-Deriva

Se ha demostrado que el daño en un edificio es función principal del desplazamiento en vez de función de la fuerza. Así se observa que cuando la estructura ingresa al rango inelástico, el aumento de daño se debe al aumento de desplazamientos aún cuando la fuerza que actúa en ella se mantenga constante.

El comité VISION 2000 hace una descripción detallada del daño correspondiente a cada uno de los 4 niveles de desempeño para los elementos estructurales resistentes de cargas verticales y de cargas laterales así como para elementos no estructurales. La Tabla 7 presenta un resumen de la relación entre nivel de desempeño y estado de daño.

Tabla 7: Descripción de daño para cada nivel de desempeño (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995).		
Estado de Daño	Nivel de Desempeño	Descripción de Daño
Despreciable	Totalmente Operacional	Daño estructural y no estructural despreciable o nulo. Los sistemas de evacuación y todas las instalaciones continúan prestando servicios.
Leve	Operacional	Agrietamientos en elementos estructurales. Daño entre leve y moderado en los elementos arquitectónicos. Los sistemas de seguridad y evacuación funcional con normalidad.
Moderado	Seguridad	Daños moderados en algunos elementos. Pérdida de resistencia y rigidez en los elementos parte del sistema resistente de cargas laterales. El sistema permanece funcional. Algunos elementos no estructurales y contenidos pueden dañarse. Puede ser necesario cerrar el edificio por algún tiempo.
Severo	Pre-colapso	Daños severos en elementos no estructurales. Fallo de elementos secundarios, no estructurales y contenidos. Puede ser necesario demoler el edificio.
Completo	Colapso	Pérdida parcial o total de soporte. Colapso total o parcial. No es posible la reparación.

2.3.2. Deriva Objetivo

La relación existente entre Daño y Deriva en edificios ha sido estudiada y cuantificada por el FEMA Mitigation Division del gobierno estadounidense en su documento *Multihazard Loss Estimation Methodology HAZUS*. Este documento presenta los estados de daño y sus correspondientes derivas características de diversos sistemas estructurales.

En el capítulo 5 del mismo, se hallan descripciones que ayudan a clasificar el tipo de edificio en análisis. Por ejemplo un S2L es un edificio de acero con arriostres como sistema de resistencia sísmica de baja altura.

En la parte final del capítulo 5 se encuentran tablas que relacionan el estado de daño y su deriva característica para cada tipo de edificio, la tabla 8 muestra estas relaciones. Cada estado de daño se relaciona con un nivel de desempeño según la tabla 7. Por lo tanto para un desempeño objetivo, definido según 2.2.3, puede encontrarse una deriva objetivo.

Tabla 8: Relación Daño-Deriva según el tipo de la estructura (extraído de “Multihazard Loss Estimation Methodology- HAZUS”).

Building Properties Type	Height (inches)		Interstory Drift at Threshold of Damage State			
	Roof	Modal	Slight	Moderate	Extensive	Complete
W1	168	126	0.0040	0.0099	0.0306	0.0750
W2	288	216	0.0040	0.0099	0.0306	0.0750
S1L	288	216	0.0060	0.0104	0.0235	0.0600
S1M	720	540	0.0040	0.0069	0.0157	0.0400
S1H	1872	1123	0.0030	0.0052	0.0118	0.0300
S2L	288	216	0.0050	0.0087	0.0233	0.0600
S2M	720	540	0.0033	0.0058	0.0156	0.0400
S2H	1872	1123	0.0025	0.0043	0.0117	0.0300
S3	180	135	0.0040	0.0070	0.0187	0.0525
S4L	288	216	0.0040	0.0069	0.0187	0.0525
S4M	720	540	0.0027	0.0046	0.0125	0.0350
S4H	1872	1123	0.0020	0.0035	0.0093	0.0262
S5L						
S5M						
S5H						
C1L	240	180	0.0050	0.0087	0.0233	0.0600
C1M	600	450	0.0033	0.0058	0.0156	0.0400
C1H	1440	864	0.0025	0.0043	0.0117	0.0300

2.3.3. Amortiguamiento Objetivo

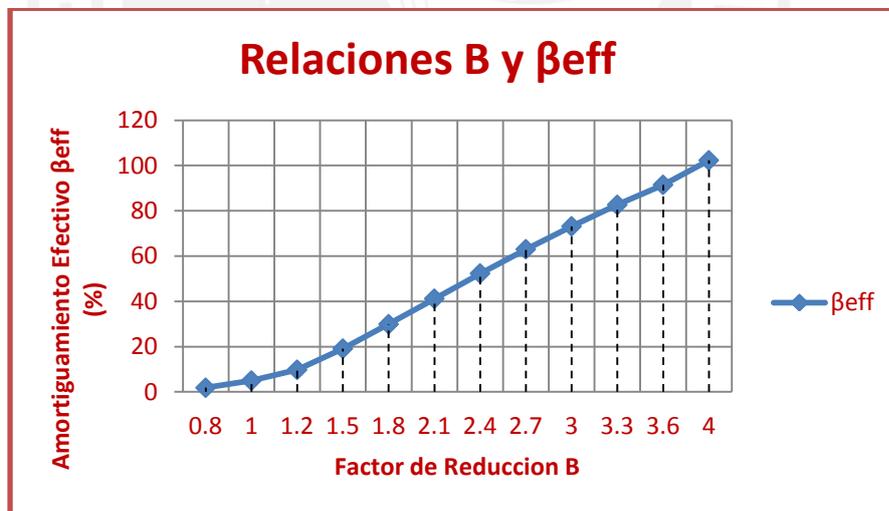
Si la deriva máxima obtenida del análisis del edificio sin disipadores es mayor que la deriva objetivo, entonces se determina el cociente:

$$B = \frac{\text{DerivaMáxima}}{\text{DerivaObjetivo}} \tag{Ec. 3.1}$$

Este es el factor de reducción de respuesta para llegar a la deriva objetivo. Con este factor **B** podemos determinar el amortiguamiento efectivo necesario β_{eff} que desarrollará la estructura para alcanzar la deriva objetivo mediante la fórmula de Newmark :

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})} \tag{Ec. 3.2}$$

En el siguiente gráfico se muestra las relaciones entre algunos valores del factor de reducción B y su correspondiente β_{eff} :



Graf. 1. Relación Factor B y Amortiguamiento efectivo β_{eff} . *Elaboración propia.*

β_{eff} es el amortiguamiento objetivo que debe desarrollar la estructura con la adición de los disipadores de energía. La participación que tendrán los disipadores en el amortiguamiento ($\beta_{visc.}$) puede obtenerse descontando el amortiguamiento inherente de la estructura, 5% para edificios de concreto armado, del valor β_{eff} :

$$\beta_{visc.} = \beta_{eff} - 5\% \tag{Ec. 3.3}$$

2.4. Ubicación y Disposición de los Amortiguadores

Se recomienda ubicar los dispositivos en los pórticos extremos y estos deberán ser constantes en toda la altura. La cantidad de dispositivos dispuestos en la dirección “X” e “Y” deberá ser semejante y su ubicación, se recomienda, deberá ser simétrica en planta. Además, se siguen los criterios descritos en el acápite 1.4.4.

2.5. Definición de las Propiedades del Amortiguador

2.5.1. Rigidez del Brazo Metálico “K”

Cuando los amortiguadores están adosados a la estructura usando brazos metálicos en posición diagonal, la rigidez axial de este brazo metálico gobierna la rigidez axial del sistema brazo-disipador y puede hallarse mediante la fórmula:

$$K = \frac{EA}{L}$$

(Ec. 3.4)

Donde:

E: Coeficiente de Elasticidad del material.

A: Área de la sección del brazo metálico.

L: Longitud del brazo metálico.

Los especialistas de MIYAMOTO INTERNATIONAL recomiendan iniciar con el proceso de iteración planteando un valor de 2000 kips/in, el cual será posteriormente afinado.

2.5.2. Coeficiente de Amortiguamiento “C”

Asumiendo que todos los disipadores en la estructura tienen las mismas propiedades, la obtención del coeficiente “C” se desarrolla mediante una estimación del factor en las ecuaciones 2.4 y 2.5 cuyos términos se expusieron en la Sección 1.4.1.

Para amortiguadores Lineales:

$$\beta_{visc.} = \frac{T \sum_j C_j \phi_{rj}^2 \cos^2 \theta_j}{4\pi \sum_i m_i \phi_i^2}$$

(Ec. 2.4)

Para amortiguadores No Lineales:

$$\beta_{visc.} = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} W^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2}$$

(Ec. 2.5)

2.5.3. Exponente de Velocidad “ α ”

El exponente de velocidad es inicialmente estimado por el proyectista de acuerdo a la reacción del dispositivo que desee obtener. Siempre será menor que 1 para amortiguadores no lineales y su influencia en el comportamiento del amortiguador se describe en la sección 1.4.3.

2.6. Modelamiento del Sistema de Amortiguamiento

El modelo del sistema estructural será del tipo lineal considerando secciones fisuradas en vigas y columnas; mientras que los dispositivos de amortiguación corresponderán a elementos no lineales.

En cuanto a los dispositivos de amortiguación, la Figura 17 muestra la manera de introducir las propiedades expuestas en el acápite 3.6 en el software de cálculo ETABS v9.5.

Una vez definido el elemento se procede con la ubicación y disposición de los dispositivos según el acápite 1.4.4.

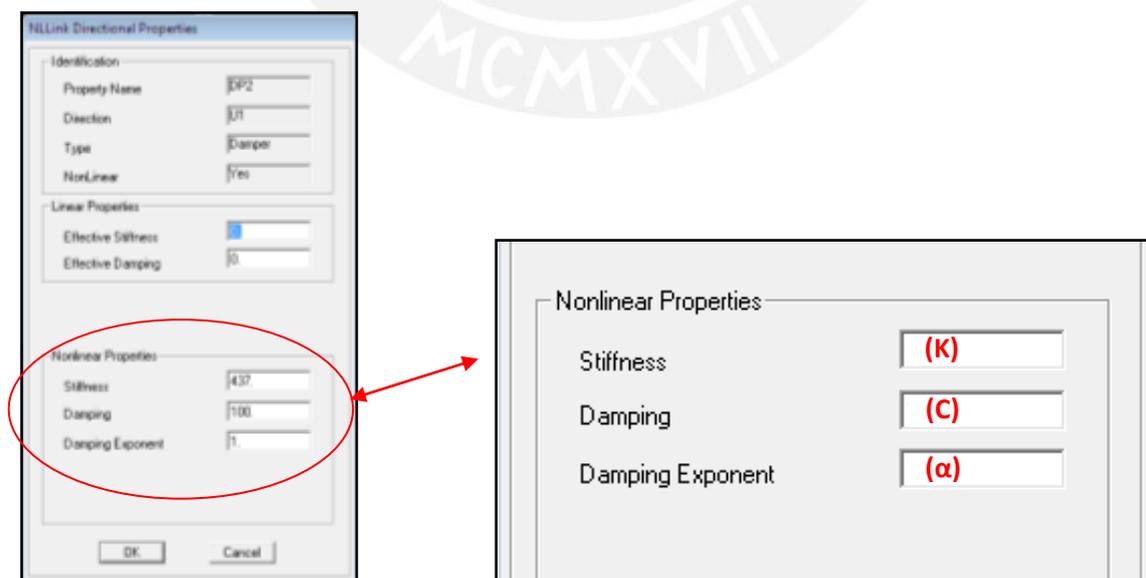


Fig. 17. Propiedades del dispositivo en el software ETABS.

2.7. Respuesta de la Estructura con Sistema de Amortiguamiento

2.7.1. Derivas

Se evalúan si las derivas máximas de entrepiso obtenidas usando el sistema de amortiguamiento caracterizados por el factor “C” y “α” estimados en la primera iteración han alcanzado la deriva objetivo. Si no fuera el caso, se procede a iterar el valor de las constantes “C” y “α”, la cantidad de dispositivos e inclusive la posición ó disposición de los mismos; en este orden de importancia cuantas veces sea necesario.

2.7.2. Balance Energético

Se evalúa el balance energético de la estructura con el sistema de amortiguamiento. Un balance energético gráfico permite apreciar la participación de los amortiguadores y de la estructura en la disipación de la energía total. Además puede evaluarse la efectividad de la ubicación y disposición de los amortiguadores.

2.7.3. Verificación del Amortiguamiento Objetivo

Con el propósito de verificar si el amortiguamiento añadido por los disipadores alcanza al amortiguamiento objetivo definido en la Sección 2.3.3, se somete al edificio a una prueba de vibración libre. Para ello se usará una función Pulso.

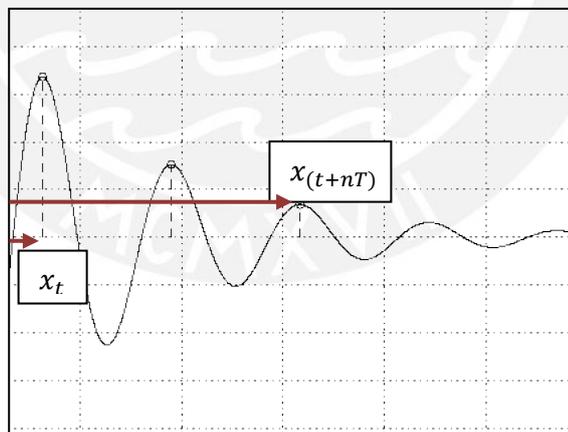


Fig. 18. Respuesta de una estructura amortiguada sometida a un Pulso.

El grado de amortiguamiento se evaluará mediante la fórmula del decremento logarítmico:

$$\ln\left(\frac{x_t}{x_{(t+nT)}}\right) \cong \frac{2n\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

(Ec. 3.5)

Donde:

ξ : Amortiguamiento alcanzado por la estructura bajo las propiedades del disipador: C, α y K definidas en la sección 2.5.

x_t : Desplazamiento en el tiempo “t” de vibración.

x_{t+nT} : Desplazamiento en el tiempo “t + nT” de vibración.

n: Número de ciclos.

2.8. Diseño Estructural

2.8.1. Diseño del Sistema de Amortiguamiento

2.8.1.1. Diseño de los elementos de Concreto Armado

Para el diseño de las columnas de concreto armado que son parte del sistema de amortiguamiento, se anotan las fuerzas axiales obtenidas del análisis del edificio sin amortiguadores y con el espectro reducido. A continuación, estas fuerzas se amplifican con un coeficiente “A” que expresa la razón de las fuerzas axiales en las columnas cuando se disponen de amortiguadores con respecto a las que no los presentan bajo el análisis tiempo historia.

$$A = \frac{N_{Con\ Disipadores}}{N_{Sin\ Disipadores}}$$

(Ec. 3.6)

Este coeficiente es propio de cada columna. Sin embargo, si los valores de “A” son semejantes, se puede asumir un promedio que afecte a todas las columnas que forman parte del sistema de amortiguamiento.

2.8.1.2. Diseño de los Dispositivos de Amortiguación y Conexiones Metálicas

Las conexiones metálicas y los dispositivos de amortiguación serán diseñadas con los esfuerzos críticos obtenidos del análisis tiempo historia no lineal.

Una vez obtenidas las fuerzas de diseño se procede a agrupar los dispositivos de acuerdo a la magnitud de su fuerza procurando definir como máximo 7 grupos.

Finalmente con los dispositivos agrupados procedemos a definir las propiedades de éstos a partir de los cuadros provistos por el fabricante. Estos se exponen a continuación:

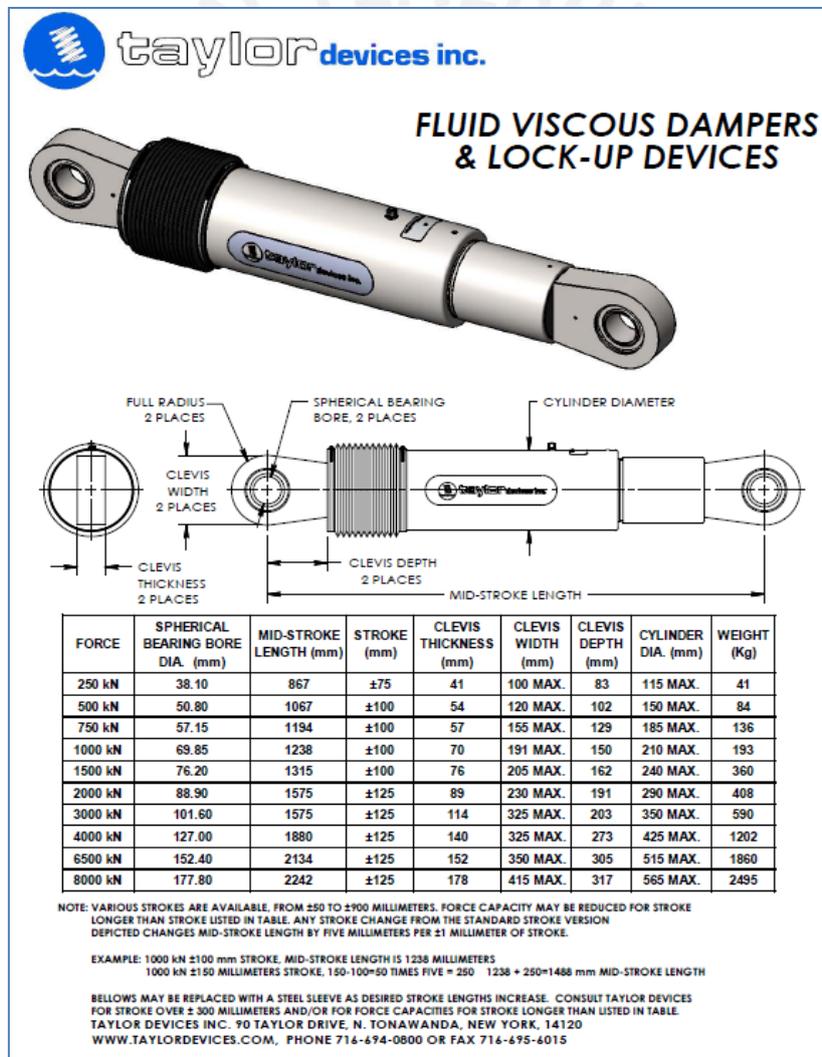
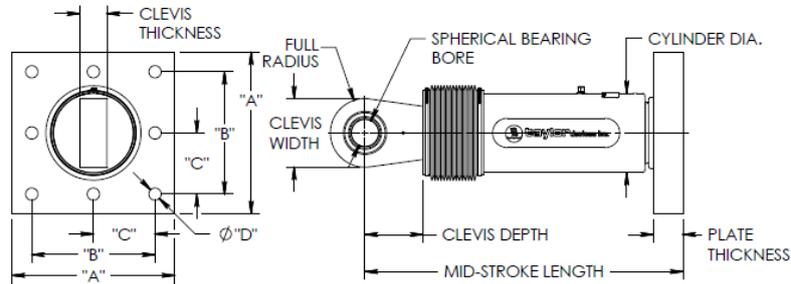


Fig. 19. Propiedades del Dispositivo TAYLOR DEVICES - Argollas



taylor devices inc.

**FLUID VISCOUS DAMPERS
& LOCK-UP DEVICES**



FORCE	SPHERICAL BEARING BORE DIA. (mm)	MID-STROKE LENGTH (mm)	STROKE (mm)	CLEVIS THICKNESS (mm)	CLEVIS WIDTH (mm)	CLEVIS DEPTH (mm)	CYLINDER DIA. (mm)	WEIGHT (Kg)
250 kN	38.10	787	±75	41	100 MAX.	83	114 MAX.	44
500 kN	50.80	997	±100	54	127 MAX.	102	150 MAX.	98
750 kN	57.15	1016	±100	57	155 MAX.	129	184 MAX.	181
1000 kN	69.85	1048	±100	70	191 MAX.	150	210 MAX.	254
1500 kN	76.20	1105	±100	76	205 MAX.	162	241 MAX.	306
2000 kN	88.90	1346	±125	89	230 MAX.	191	292 MAX.	450
3000 kN	101.60	1441	±125	114	290 MAX.	203	350 MAX.	800
4000 kN	127.00	1626	±125	140	325 MAX.	273	425 MAX.	1088
6500 kN	†	†	†	†	†	†	†	†
8000 kN	†	†	†	†	†	†	†	†

FORCE	"A" (mm)	"B" (mm)	"C" (mm)	"D" (mm)	PLATE THICKNESS (mm)
250 kN	178±3	127±.25	*	20.6±.25	38±.76
500 kN	282±3	203±.25	*	31.8±.25	38±.76
750 kN	343±3	254±.25	127±.25	28.7±.25	61±.76
1000 kN	419±3	318±.25	159±.25	31.8±.25	76±1.5
1500 kN	432±3	330±.25	165±.25	34.9±.25	76±1.5
2000 kN	457±3	343±.25	171.5±.25	38.1±.25	102±1.5
3000 kN	508±3	406±.25	203±.25	41.4±.25	102±1.5
4000 kN	†	†	†	†	†
6500 kN	†	†	†	†	†
8000 kN	†	†	†	†	†

NOTE:
VARIOUS STROKES ARE AVAILABLE. FROM ±50 TO ±900 mm. FORCE CAPACITY MAY BE REDUCED FOR STROKE LONGER THAN STROKE LISTED IN TABLE. ANY STROKE CHANGE FROM THE STANDARD STROKE VERSION DEPICTED CHANGES MID-STROKE LENGTH BY FIVE MILLIMETERS PER ±1 MILLIMETER OF STROKE.

EXAMPLE: 1000 kN ±100 mm STROKE. MID-STROKE LENGTH IS 1048 mm
1000 kN ±150 mm STROKE.
150-100 = 50 TIMES FIVE = 250
1048+250 = 1298 mm MID-STROKE LENGTH

BELLOWS MAY BE REPLACED WITH A STEEL SLEEVE AS DESIRED STROKE LENGTHS INCREASE. CONSULT TAYLOR DEVICES FOR STROKE OVER ± 300 mm AND/OR FOR FORCE CAPACITIES FOR STROKE LONGER THAN LISTED IN TABLE.
* DENOTES 4-BOLT MOUNTING PATTERN
† DENOTES CUSTOM PATTERN. CONSULT FACTORY.

TAYLOR DEVICES INC.
90 TAYLOR DRIVE
N. TONAWANDA, NEW YORK, 14120
WWW.TAYLORDEVICES.COM
PHONE 716-694-0800 OR FAX 716-695-6015

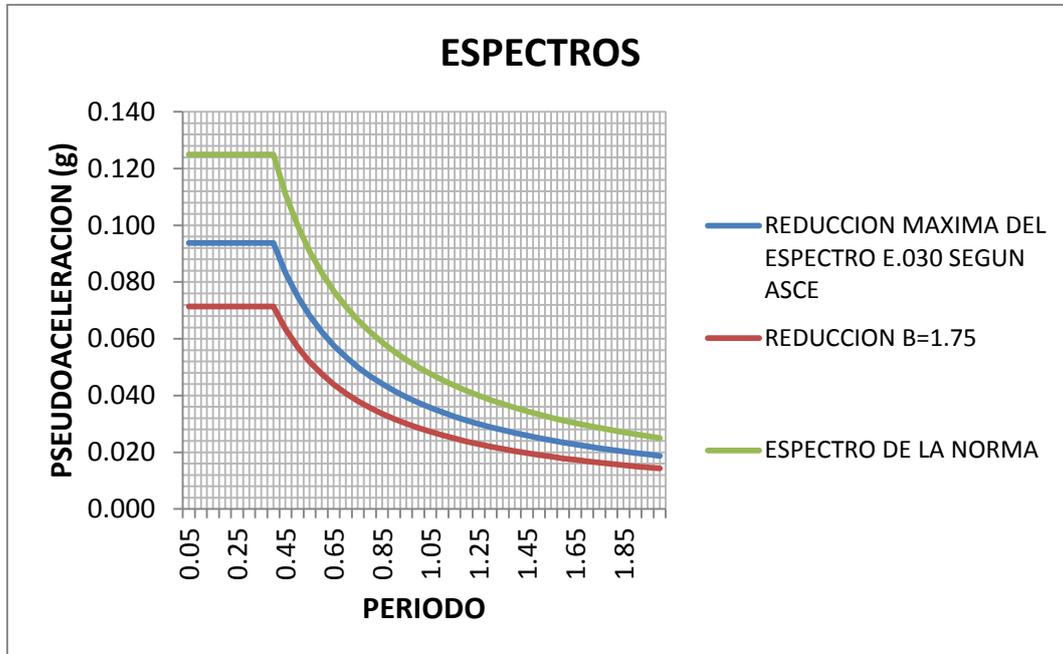
Fig. 20. Propiedades del Dispositivo TAYLOR DEVICES” – Plancha Base

2.8.2. Diseño del Sistema Estructural

2.8.2.1. Espectro Reducido

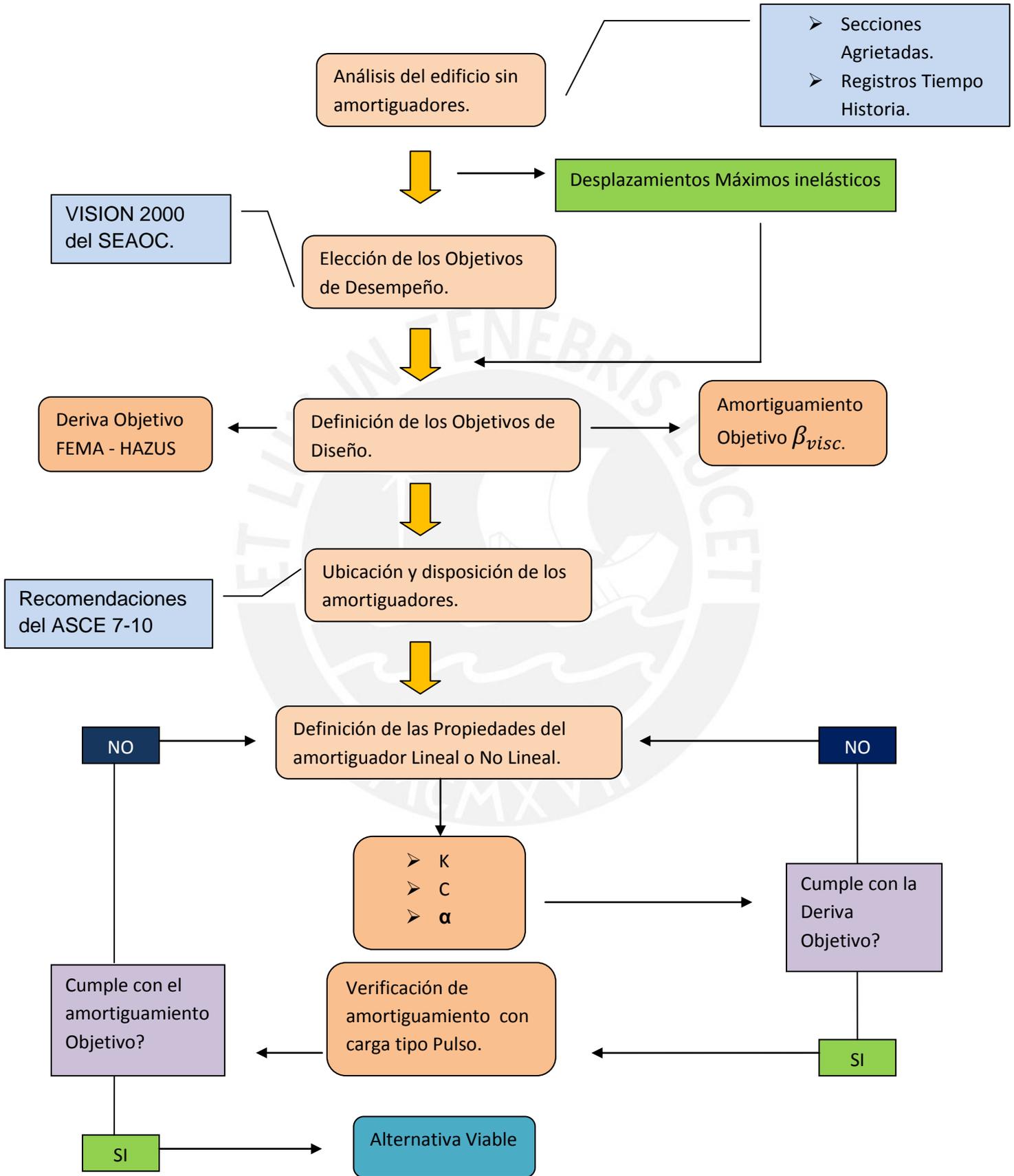
Como se expuso en la Sección 1.5.2, el incremento de amortiguamiento en la estructura permite una reducción en la amenaza sísmica, principalmente para los elementos que no forman parte del sistema de amortiguamiento. Es decir, para aquellas columnas, vigas o placas que no están conectadas directamente a uno o más disipadores, puede admitirse una reducción del espectro de la Norma E.030 de hasta el 25% con fines de diseño.

Esta reducción viene dada por el factor “**B**” expuesto en la Sección 2.3.3. Por ejemplo, como se ilustra en el Graf. 2, si el factor B es 1.75, se deberá usar la reducción máxima del espectro de la Norma E.030 propuesta por el ASCE 7-10.



Graf. 2. Reducción máxima del espectro de la norma NTP E.030 según el ASCE 7-10.

2.9. Síntesis de la Metodología



CAPÍTULO III

 DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN CON SISTEMA DE
AMORTIGUACIÓN DE FLUIDO VISCOSO

3.1. Sistema Estructural del Edificio

Se eligió un **edificio regular** de oficinas, aporticado de concreto armado y de 7 niveles. Las características físicas del edificio son señaladas en las tablas 9-1 y 9-2. Las cargas consideradas en la estructura son descritas en las Tablas 9-3 y 10.

Función	Edificio de Oficinas		
Ubicación	Distrito de San Isidro, Lima, Perú		
Área	730 m ² por nivel		
Niveles	7	Altura 1er Nivel	3.5 m
		Altura piso Típico	2.7 m

Sistema	Aporticado		
Columnas	45 x 45 cm	Vigas	25 x 50 cm
Sistema de Losas	Macizas (e = 15 cm)		
f'c (kg/cm²) – columnas y vigas	380		

Peso Propio (losa maciza)	360	kg/m ²
Piso Terminado	100	kg/m ²
Tabiquería	100	kg/m ²
Sobre Carga (Piso típico)	250	kg/m ²
Sobre Carga (azotea)	100	kg/m ²

Piso	Area (m ²)	Peso x m ² CM (TON)	Peso x m ² CV (TON)	Peso total 100%CM +25%CV (TON)
1	726.00	0.56	0.25	451.94
2	726.00	0.56	0.25	451.94
3	726.00	0.56	0.25	451.94
4	726.00	0.56	0.25	451.94
5	726.00	0.56	0.25	451.94
6	726.00	0.56	0.25	451.94
7	726.00	0.46	0.10	352.11
TOTAL	5082.00	Ptotal		3063.72

Planta típica y esquema tridimensional:

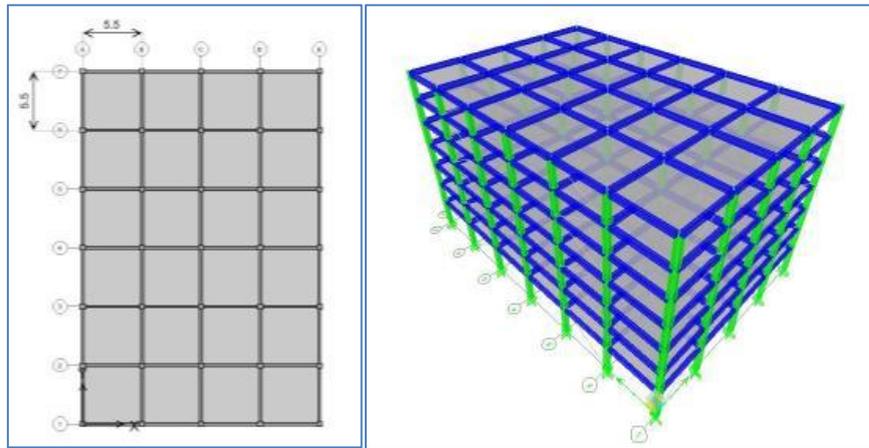


Fig. 21. Esquema de la estructura, modelo en el software de cálculo ETABS.

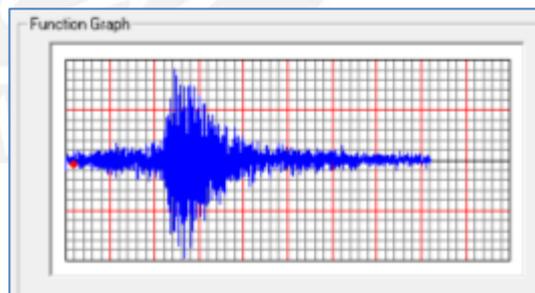
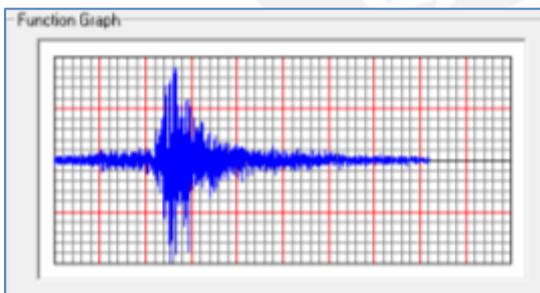
3.2. Análisis del edificio sin Amortiguadores

La amenaza sísmica será representada por registros tiempo historia de sismos ocurridos en la ciudad de Lima en los años 1966, 1970 y 1974. Todos estos registros serán normalizados con la asistencia del programa de cómputo *SismoSignal* a una aceleración máxima de 0.4g (aceleración del suelo en la zona de la estructura) propuesta por la Norma E 0.30.

La Figura 22 muestra los 3 pares de registros utilizados en el modelamiento:

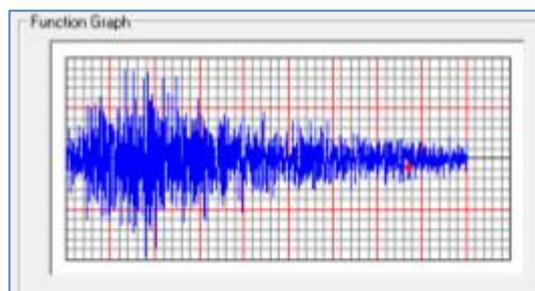
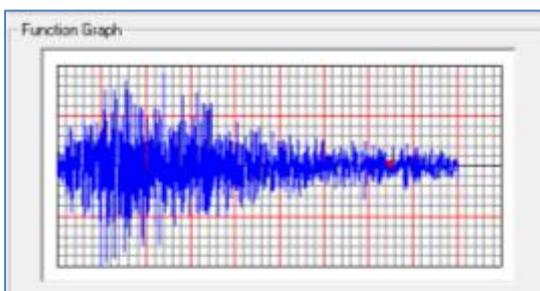
6610N08

6610N82



7005M08

7005N82



7410N08

7410N82

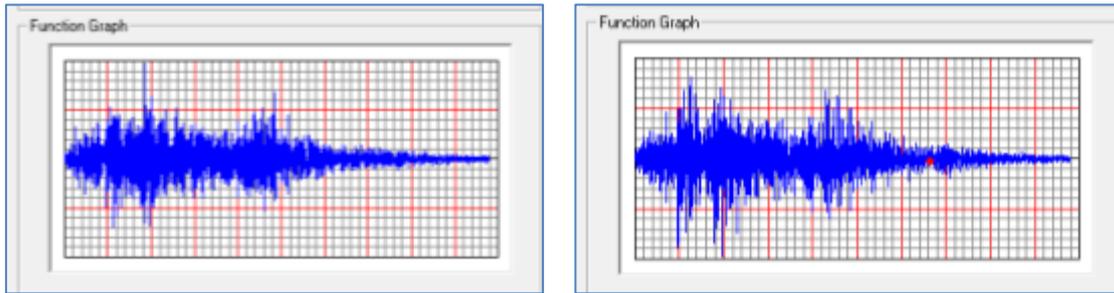


Fig. 22. Solicitaciones Sísmicas en la Ciudad de Lima (66, 70 y 74).

3.2.1 Respuesta del edificio sin amortiguadores

El análisis de la estructura se desarrolló considerando secciones fisuradas, en vigas y columnas. La estructura se sometió a los registros tiempo historia expuestos en la Sección 3.2, obteniendo finalmente los siguientes records de derivas de entrepiso en cada dirección X e Y:

Tabla 11-1. Derivas (‰) por nivel y por registro sísmico (Eje X).

Nivel	REGISTROS TIEMPO HISTORIA						MAX
	6610N08	6610N82	7005N08	7005N82	7410N08	7410N82	
Piso 7	3.94	4.24	3.42	3.35	4.41	5.03	5.03
Piso 6	5.28	5.74	4.96	4.45	5.60	6.75	6.75
Piso 5	5.39	5.17	5.37	5.67	5.46	8.21	8.21
Piso 4	5.44	4.71	4.35	5.99	4.93	8.34	8.34
Piso 3	5.48	5.07	4.49	5.85	4.77	8.56	8.56
Piso 2	5.66	5.06	5.33	6.20	5.19	9.05	9.05
Piso 1	4.66	3.49	4.24	4.45	4.59	6.44	6.44
MAX	5.66	5.74	5.37	6.20	5.60	9.05	9.05

Tabla 11-2. Derivas (‰) por nivel y por registro sísmico (Eje Y).

Nivel	REGISTROS TIEMPO HISTORIA						MAX
	6610N08	6610N82	7005N08	7005N82	7410N08	7410N82	
Piso 7	3.93	3.65	3.40	3.39	4.76	4.31	4.76
Piso 6	5.39	4.70	4.35	5.00	6.55	5.64	6.55
Piso 5	4.80	4.93	4.78	5.54	7.51	5.41	7.51
Piso 4	5.18	5.10	5.02	4.53	7.88	4.43	7.88
Piso 3	5.84	5.01	5.66	4.16	8.41	4.42	8.41
Piso 2	5.89	5.30	6.01	5.26	8.57	5.13	8.57
Piso 1	3.93	4.46	4.16	4.26	6.28	4.09	6.28
MAX	5.89	5.30	6.01	5.54	8.57	5.64	8.57

Los valores máximos de derivas inelásticas alcanzados en la dirección X e Y fueron de **9** y **8.6** por mil respectivamente. Estos valores son mayores al valor de 7 por mil, establecido como máximo por la norma peruana sismorresistente E.030, para edificios aporticados de concreto armado.

3.3. Elección del Objetivo de Desempeño

Según la clasificación del SEAOC, el edificio es una Estructura Básica. Elegimos como sismo de diseño un Sismo de 500 años de periodo de retorno.

La tabla 12 ilustra la definición de los niveles de desempeño para estructuras básicas (oficinas y viviendas). Puede observarse que el nivel de desempeño elegido es el de Seguridad o Resguardo de la vida.

Tabla 12. Objetivos de desempeño para estructuras básicas.	
Movimiento Sísmico de Diseño	Nivel de desempeño mínimo
Sismo Frecuente	Totalmente Operacional
Sismo Ocasional	Operacional
Sismo Raro	Seguridad
Sismo Muy raro	Próximo a colapso

3.4. Definición de los Objetivos de Diseño

DERIVA OBJETIVO

Según el capítulo 5 de *Multihazard Loss Estimation Methodology HAZUS*, el edificio es del tipo “Aporticado de Concreto Armado de mediana altura”, abreviado como CM1. La tabla 13 extraída y adaptada del Multihazard Loss Estimation Methodology del Hazus, expone los estados de daño y sus derivas características para un CM1 diseñado con un código sísmico moderado.

Tabla 13. Descripción de daño y deriva característica para edificios tipo CM1 (HAZUS).

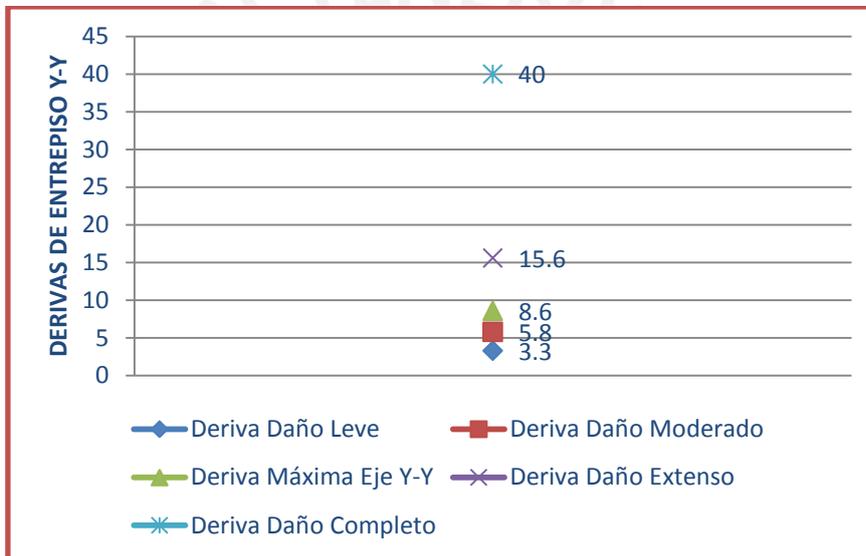
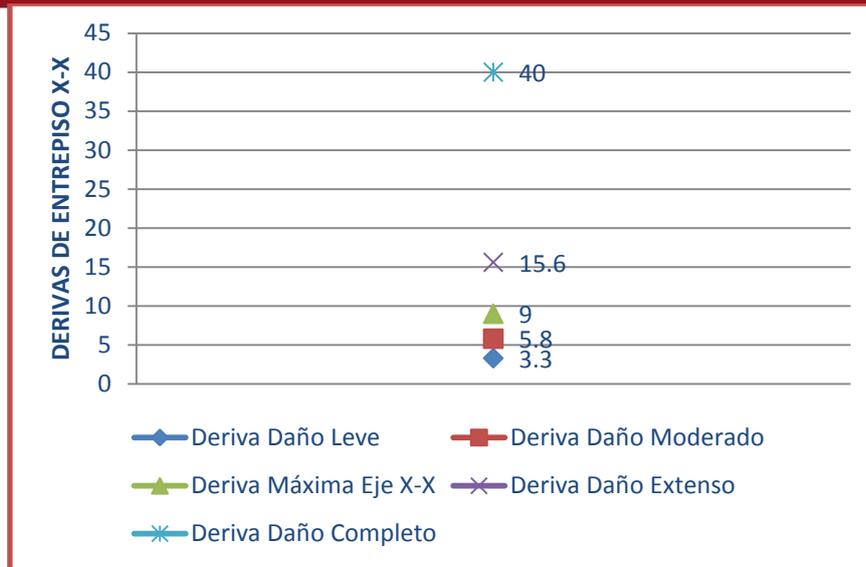
Daño Estructural	Descripción	Deriva
Leve	Pueden observarse grietas de corte y de flexión cerca a la unión de algunas vigas y columnas.	0.0033
Moderado	La mayoría de columnas y vigas presentan grietas. Algunos elementos como vigas han alcanzado la fluencia. Es evidente la presencia de largas grietas de flexión y en algunos lugares el concreto de recubrimiento se ha desprendido.	0.0058
Extenso	Algunos pórticos han alcanzado su capacidad última evidente por la presencia de largas grietas de flexión, concreto desprendido y refuerzo principal y transversal deformado. Resulta en un colapso parcial.	0.0156
Completo	La estructura ha colapsado o está a punto de hacerlo debido a falla frágil, agotamiento de ductilidad o pérdida de la estabilidad del sistema.	0.0400

Por lo tanto, se obtienen los niveles de desempeño y sus correspondientes derivas características haciendo uso además, de las equivalencias de la tabla 7. En la tabla 14 se expone las relaciones desempeño-deriva para edificios CM1. Se elige la **deriva objetivo del Nivel de Desempeño Seguridad : 0.0058.**

Tabla 14. Niveles de desempeño y derivas objetivo para edificios tipo CM1 (HAZUS Y SEAOC VISION 2000).

Nivel de Desempeño Objetivo	Deriva Objetivo
Totalmente Operacional	0.0033
Operacional	
Seguridad	0.0058
Pre-Colapso	0.0156
Colapso	0.0400

Las derivas máximas obtenidas del análisis de la estructura sin amortiguadores y expuestas en la Sección 3.2.1, están en el rango entre daño moderado y extenso, según lo ilustra el Graf. 3.



Graf. 3. Derivas máximas alcanzadas sin amortiguadores y el rango de daños.

AMORTIGUAMIENTO OBJETIVO

Determinamos el factor de reducción de respuesta mediante el cociente:

$$B = \frac{\text{Deriva Máxima}}{\text{Deriva Objetivo}}$$

Por lo tanto tenemos:

$$B_{xx} = 1.56$$

$$B_{yy} = 1.53$$

Usamos la ecuación de reducción de la demanda en función del amortiguamiento efectivo; considerando 5% de amortiguamiento inherente:

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{\text{eff}})}$$

Despejamos el amortiguamiento efectivo necesario para cada dirección de análisis:

$$\beta_{\text{eff}xx} = 21.20\%$$

$$\beta_{\text{eff}yy} = 20.16\%$$

Estos amortiguamientos son los que deben lograrse con la adición de los disipadores de energía. Descontando el amortiguamiento inherente se obtiene el amortiguamiento viscoso de demanda:

$$\beta_{\text{visc.}xx} = 16.20\%$$

$$\beta_{\text{visc.}yy} = 15.16\%$$

Debido a la semejanza de valores y manteniendo un margen de seguridad, establecemos un solo porcentaje de amortiguamiento objetivo:

$$\beta_{\text{visc.}} = 18\%$$

3.5. Ubicación de los Dispositivos de Amortiguación

El ASCE 7-10 exige como mínimo 2 dispositivos por dirección de análisis en cada piso y en arreglo tal que no genere torsión. Considerando un margen razonable de seguridad proponemos **8 dispositivos por piso**, 4 en cada dirección y ubicados en los porticos exteriores del edificio. Esta ubicación y disposición de los amortiguadores puede observarse en las figuras 23-1 y 23-2.

Cuando los amortiguadores están alejados del centro de masa, nos brindan la ventaja de trabajar en la zona de máximas velocidades (zona de mayor efectividad de los dispositivos de fluido viscoso). Otra ventaja de esta ubicación es la simetría y regularidad, factores que permiten un mejor control de los efectos de la torsión.

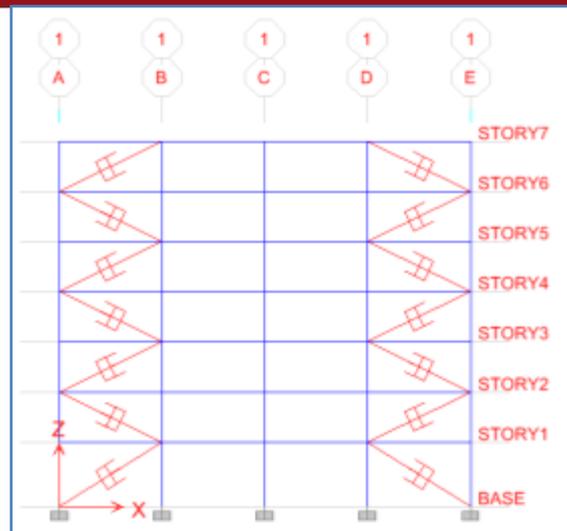


Fig. 23-1. Ubicación de los Dispositivos en los Pórticos 1 y 7, Eje X-X.

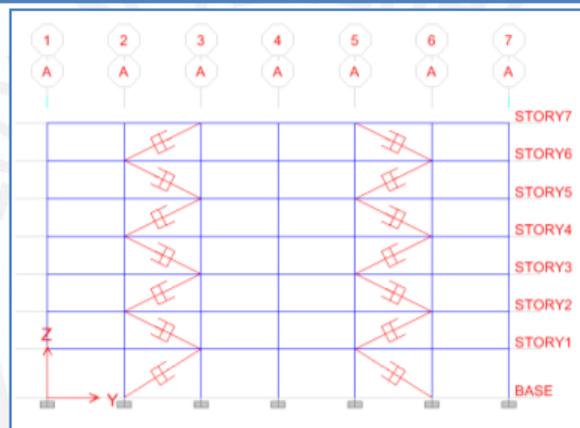


Fig. 23-2. Ubicación de los Dispositivos en los Pórticos A y E, Eje Y-Y.

3.6. Diseño Estructural del Sistema de Amortiguamiento

3.6.1. Cálculo Preliminar de Rigidez “K”

Se inicia la iteración considerando un perfil metálico estandar HSS o PIPE STD, por lo que en el caso del presente ejemplo, partimos con un perfil del tipo PIPE 10 STD.

Las propiedades de este perfil son las siguientes:

Dimensiones PIPE 10 STD				
D ext. (in)	D int. (in)	espesor (in)	Área (in ²)	Inercia (in ⁴)
10.8	10	0.349	13.6	262

Con los datos del perfil y la geometría de la estructura, se procede a definir la rigidez del sistema:

$$K = \frac{EA}{L}$$

Datos →

$$E_{\text{Acero}} = 29\,000 \text{ ksi} = 20.4 \times 10^6 \text{ tn/m}^2$$

$$A = 11.1 \text{ in}^2 = 71.61 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$L_{\text{terpiso}} = 256.7 \text{ in}; \quad L_{\text{tipico}} = 241.2 \text{ in}$$

$$K_{\text{terpiso}} = 1254 \text{ kip/in}; \quad K_{\text{tipico}} = 1334.6 \text{ kip/in}$$

3.6.2. Diseño Estructural Con Amortiguadores Lineales

3.6.2.1. Estimación Del Coeficiente “C” – Dispositivos Lineales

El primer paso corresponde a la definición del exponente de velocidad “ α ”. Para este caso, por tratarse de un dispositivo lineal se considerará como “ $\alpha = 1$ ”. Una vez culminado esta elección, se procede a utilizar la Ec. 2.4:

$$\beta_{\text{visc.}} = \frac{T \sum_j C_j \phi_{rj}^2 \text{Cos}^2 \theta_j}{4\pi \sum_i m_i \phi_i^2}$$

Asumiendo que todos los amortiguadores tendran un coeficiente “C” constante y un total de 4 dispositivos por piso en cada dirección, procedemos a despejar la variable “C” de la ecuación base para un amortiguamiento viscoso objetivo: $\beta_{\text{visc.}} = 18\%$.

Tabla 15-1. Cálculo del Coeficiente de Amortiguamiento – Lineal.

DIRECCION X-X						T=1.562seg	
	ϕ_i	ϕ_{rj}	m_i	Cos θ	$\sum \phi_{rj}^2 \text{Cos}^2 \theta$	$\sum \phi_i^2 m_i$	
PISO 1	0.1700	0.170	452094	0.844	0.02059	13065	
PISO 2	0.3650	0.195	452094	0.898	0.03066	60230	
PISO 3	0.5550	0.190	452094	0.898	0.02911	139256	
PISO 4	0.7213	0.166	452094	0.898	0.02229	235180	
PISO 5	0.8538	0.133	452094	0.898	0.01416	329526	
PISO 6	0.9450	0.091	452094	0.898	0.00671	403731	
PISO 7	1.0000	0.055	352277	0.898	0.00244	352277	
TOTAL					0.126	1533266	

Por lo tanto se obtiene:

$C_{XX} = 4,414.76 \text{ Tn-s/m}$
$C_{XX} = 441.48 \text{ Tn-s/m}$

Tabla 15-2. Cálculo del Coeficiente de Amortiguamiento – Lineal.						
DIRECCION Y-Y						T=1.521 seg
	ϕ_i	ϕ_{rj}	m_i	$\text{Cos}\theta$	$\sum \phi_{rj}^2 \text{Cos}^2 \theta$	$\sum \phi_i^2 m_i$
PISO 1	0.1731	0.170	452094	0.844	0.02059	13065
PISO 2	0.3701	0.195	452094	0.898	0.03066	60230
PISO 3	0.5596	0.190	452094	0.898	0.02911	139256
PISO 4	0.7252	0.166	452094	0.898	0.02229	235180
PISO 5	0.8570	0.133	452094	0.898	0.01416	329526
PISO 6	0.9473	0.091	452094	0.898	0.00671	403731
PISO 7	1.0000	0.055	352277	0.898	0.00244	352277
TOTAL					0.127	1544830

Por lo tanto se obtiene:

$C_{YY} = 4,546.76 \text{ Tn-s/m}$
$C_{YY} = 454.68 \text{ Tn-s/m}$

Los valores obtenidos son similares debido a las regularidades en planta, en elevación y en masa del edificio. Elegimos un sólo valor “C” para ambas direcciones.

$C \sim 445 \text{ Tn-s/m}$

3.6.2.2. Primera Alternativa de Diseño

A partir de las primeras iteraciones, procedemos a ajustar la rigidez del brazo; ésta variable puede considerarse como irrelevante, pero guarda un grado de relación con el coeficiente de velocidad del dispositivo, por lo que es recomendable proceder con el ajuste en función de las ecuaciones Ec. 2.8 y Ec. 2.9.

Los resultados del presente ajuste nos conducen a la selección del perfil PIPE 6 STD, obteniendo el siguiente coeficiente de rigidez como resultado:

$$K_{1\text{piso}} = 10,532.71 \text{ Tn/ m}$$

$$K_{2-7\text{piso}} = 11,206.58 \text{ Tn/ m}$$

Una vez afinado los modelos, se obtiene finalmente la primera alternativa viable considerando el siguiente coeficiente de amortiguamiento:

$$C = 420 \text{ Tn-s/m}$$

Las Tablas 16-1 y 16-2 muestran las derivas obtenidas con este valor C.

X-X	Tabla 16-1. Derivas en Función de los Registros Tiempo-Historia.						
Nivel	6610N08	6610N82	7005N08	7005N82	7410N08	7410N82	MAX
Piso 7	1.38	0.97	1.33	1.14	1.40	1.81	1.81
Piso 6	2.14	1.59	2.25	1.94	2.17	3.09	3.09
Piso 5	2.69	2.00	3.01	2.65	2.55	4.30	4.30
Piso 4	2.85	2.32	3.36	2.85	2.60	5.16	5.16
Piso 3	3.21	2.65	3.46	3.02	2.71	5.66	5.66
Piso 2	3.68	2.77	3.49	3.35	3.00	5.66	5.66
Piso 1	2.88	1.90	2.69	2.55	2.37	3.78	3.78
MAX	3.68	2.77	3.49	3.35	3.00	5.66	5.66

Y-Y	Tabla 16-2 "Derivas en Función de los Registros Tiempo-Historia"						
Nivel	6610N08	6610N82	7005N08	7005N82	7410N08	7410N82	MAX
Piso 7	0.92	1.31	1.13	1.27	1.72	1.35	1.72
Piso 6	1.54	2.05	1.96	2.17	3.01	2.16	3.01
Piso 5	1.96	2.61	2.70	2.91	4.20	2.56	4.20
Piso 4	2.30	2.79	2.96	3.28	5.10	2.63	5.10
Piso 3	2.54	3.10	2.98	3.41	5.65	2.77	5.65
Piso 2	2.68	3.56	3.23	3.45	5.72	3.03	5.72
Piso 1	1.88	2.83	2.51	2.68	3.92	2.42	3.92
MAX	2.68	3.56	3.23	3.45	5.72	3.03	5.72

Los valores máximos de deriva alcanzados en la dirección X e Y con la inclusión de amortiguadores fueron de **5.7 por mil**. Estos valores son menores al valor de 7 por mil, establecido como máximo por la norma peruana sismorresistente E.030, para edificios aporticados de concreto armado.

Finalmente, procedemos con la verificación del amortiguamiento objetivo a partir de la Ec. 3.5 expuesta anteriormente y la curva **Tiempo vs Desplazamiento** que brinda el software correspondiente a la sollicitación de carga tipo Pulso:

$$\ln\left(\frac{x_t}{x_{t+nT}}\right) = \frac{2n\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

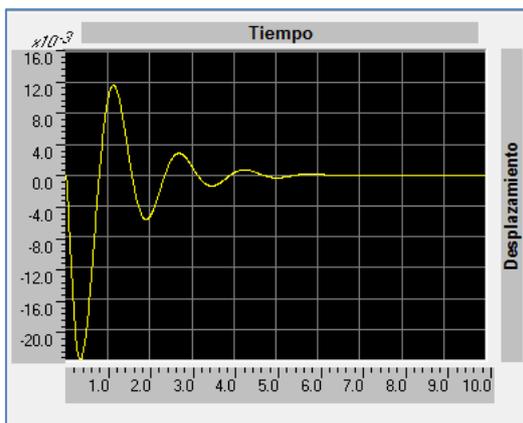


Fig. 24. “Curva Tiempo vs Desplazamiento” – Sollicitación de carga: Pulso – Dispositivos Lineales

Reemplazando valores en la ecuación anterior con los desplazamientos obtenidos en el análisis, tenemos:

$$n\left(\frac{2.4 \times 10^{-2}}{3.4 \times 10^{-4}}\right) = \frac{2(3)\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

De donde:

$$\xi = \beta_{eff} = 22.03\%$$

Considerando 5% de amortiguamiento inherente:

$$\beta_{visc.} = 17.03\%$$

Como este porcentaje es muy cercano al 18% objetivo, se da por verificado el diseño del coeficiente “C” para alcanzar el amortiguamiento objetivo.

3.6.2.3. Energía y Curva de Histéresis

BALANCE DE ENERGÍA

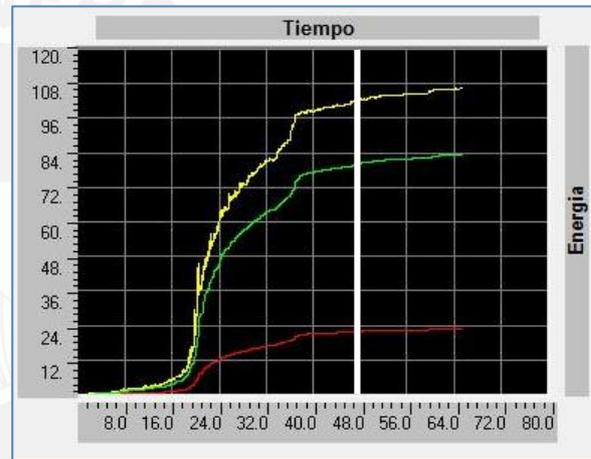
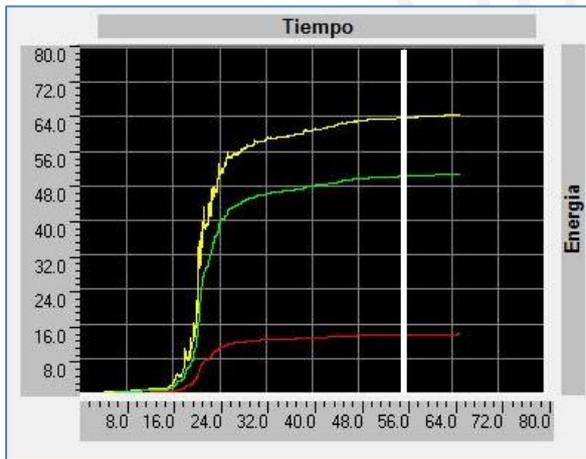
Se procede a evaluar la participación de los amortiguadores en la disipación de energía de entrada o Input Energy a través del gráfico de energía que proporciona el software ETABS v9.5 para cada registro sísmico.

Registro 6610N08

Porcentaje de Disipación: $\frac{50.96}{64.57} = 78.9 \%$

Registro 6610N82

Porcentaje de Disipación: $\frac{83.40}{106.3} = 78.6 \%$

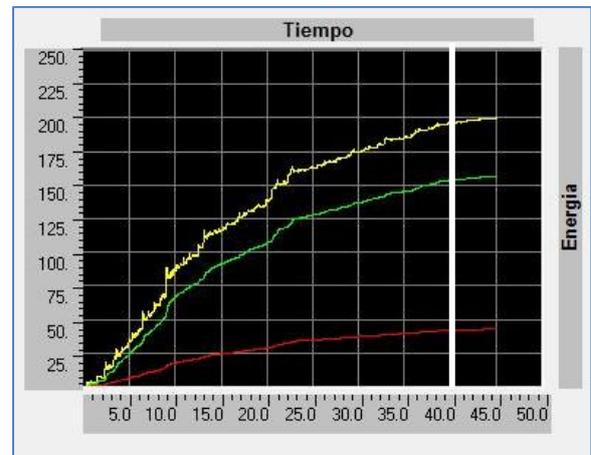
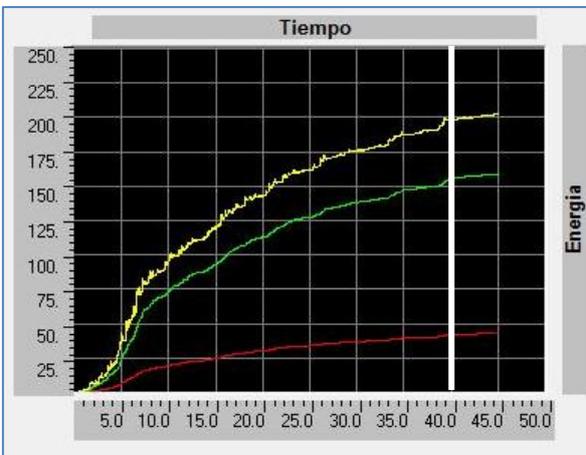


Registro 7005N08

Porcentaje de Disipación: $\frac{159.36}{202.26} = 78.8 \%$

Registro 7005N82

Porcentaje de Disipación: $\frac{157.29}{199.96} = 78.7 \%$

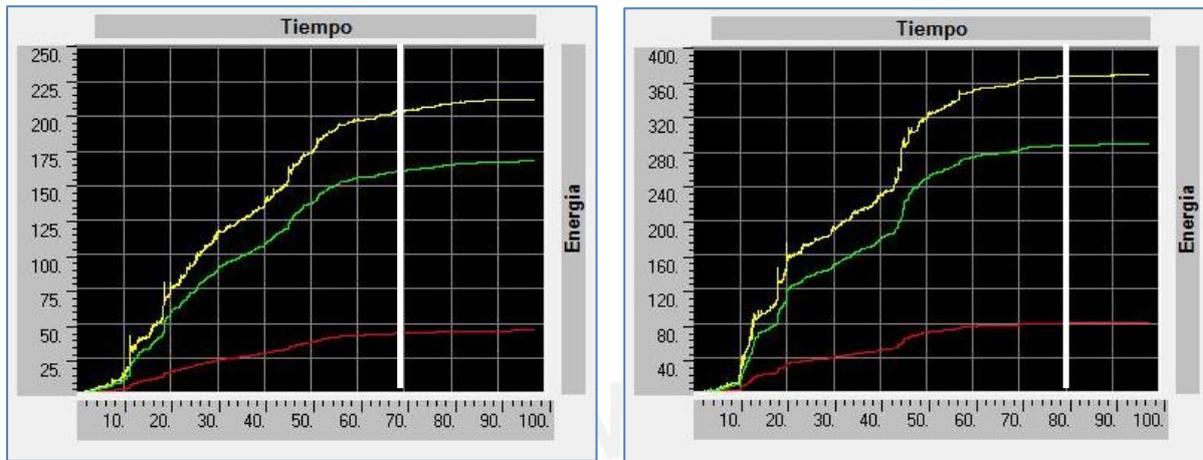


Registro 7410N08

Registro 7410N82

Porcentaje de Disipación: $\frac{168.04}{212.72} = 79.0\%$

Porcentaje de Disipación: $\frac{289.84}{370.47} = 78.2\%$



- **Energía del Sismo (Input Energy)**
- **Energía del Sistema de Amortiguamiento (NDamp Energy)**
- **Energía de la Estructura (MDamp Energy - Modal)**

Fig. 25. Curvas de Balance Energético para cada registro – Dispositivos Lineales.

Para estimar el porcentaje de disipación de energía del sistema de amortiguamiento, se procedió a extraer los valores de disipación en un tiempo t, caracterizado por la línea vertical en cada gráfico. El criterio utilizado para el trazo de la línea es el de buscar los valores más representativos siguiendo la tendencia de las curvas.

A partir de este análisis se observa que la participación energética del Sistema de Amortiguamiento Lineal se aproxima al 79%, participación que refleja la gran cantidad de dispositivos utilizados en la estructura y asimismo la gran esbeltez que la estructura presenta, participando muy poco en la disipación energética. Este indicador nos permite confiar en la reducción de daños que podrá presentar la estructura con la ayuda de los disipadores fluido – viscosos durante un evento sísmico.

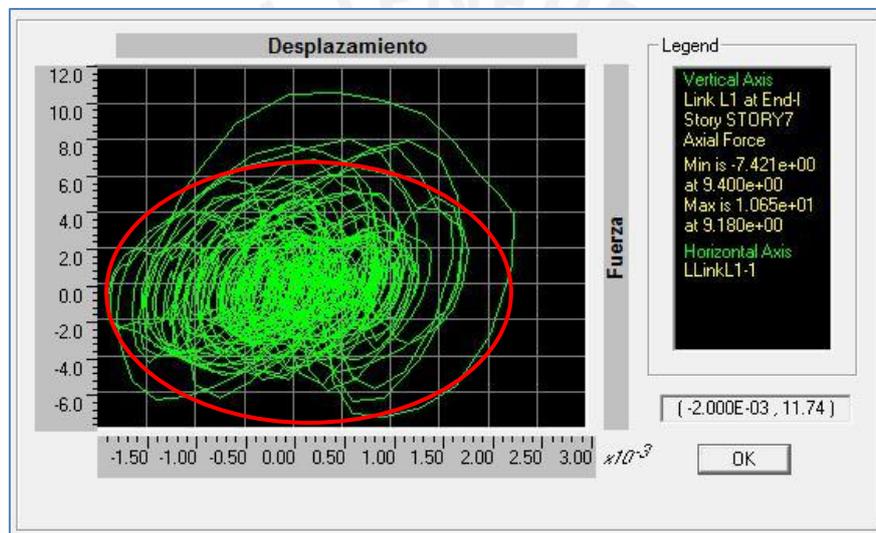
CURVA DE HISTERESIS

A partir de estos gráficos podemos identificar el comportamiento fuerza-desplazamiento del amortiguador. Se observa una tendencia elíptica (subrayada alrededor de las curvas). Esta tendencia se expuso previamente en el acápite 1.4.3.

El área de la curva representa la energía disipada y la tendencia demuestra el comportamiento fuera de fase con respecto a la estructura. Se alcanza observar los grandes lazos histeréticos que demuestran la significativa disipación energética.

Disipador Lineal

Dispositivo Line L1 – Sismo del 70



Dispositivo Line L2 – Sismo del 70

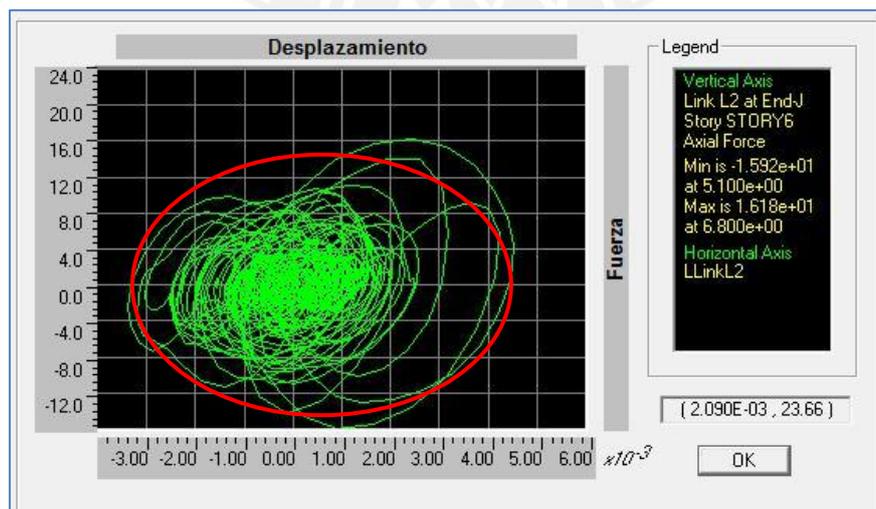


Fig. 26. Curvas Desplazamiento vs Fuerza – Histéresis de Dispositivo Lineal.

3.6.2.4. Agrupación de Dispositivos por Niveles de Fuerza

Se presentan a continuación los valores de las fuerzas máximas obtenidas en los dispositivos de amortiguación considerando esfuerzos de tracción y compresión debido a las sollicitaciones sísmicas. Estas fuerzas deberán ser agrupadas con objeto de estandarizar las fuerzas en los dispositivos y así poder ser enviados a fabricación.

Tabla 17 – 1. Niveles de Fuerza usando Dispositivos Lineales Eje X

Disipador	Fuerza (Tn)	Fuerza (kN)	Disipador (kN)
Piso 1 Disipador L1	37.9	372	500
Piso 1 Disipador L3	37.7	370	500
Piso 1 Disipador L5	37.7	370	500
Piso 1 Disipador L7	37.9	372	500
Piso 2 Disipador L2	39.9	391	500
Piso 2 Disipador L4	40.1	393	500
Piso 2 Disipador L6	40.1	393	500
Piso 2 Disipador L8	39.9	391	500
Piso 3 Disipador L1	36.4	357	500
Piso 3 Disipador L3	36.3	356	500
Piso 3 Disipador L5	36.3	356	500
Piso 3 Disipador L7	36.4	357	500
Piso 4 Disipador L2	34.0	333	500
Piso 4 Disipador L4	34.1	335	500
Piso 4 Disipador L6	34.1	335	500
Piso 4 Disipador L8	34.0	333	500
Piso 5 Disipador L1	31.6	310	500
Piso 5 Disipador L3	31.6	310	500
Piso 5 Disipador L5	31.6	310	500
Piso 5 Disipador L7	31.6	310	500
Piso 6 Disipador L2	24.6	242	250
Piso 6 Disipador L4	24.7	242	250
Piso 6 Disipador L6	24.7	242	250
Piso 6 Disipador L8	24.6	242	250
Piso 7 Disipador L1	15.2	149	250
Piso 7 Disipador L3	15.2	149	250
Piso 7 Disipador L5	15.2	149	250
Piso 7 Disipador L7	15.2	149	250

Tabla 17 – 2. Niveles de Fuerza usando Dispositivos No lineales Eje Y

Disipador	Fuerza (Tn)	Fuerza (kN)	Disipador (kN)
Piso 1 Disipador L9	37.9	372	500
Piso 1 Disipador L11	37.7	369	500
Piso 1 Disipador L13	37.7	369	500
Piso 1 Disipador L15	37.9	372	500
Piso 2 Disipador L10	39.6	389	500
Piso 2 Disipador L12	39.8	390	500
Piso 2 Disipador L14	39.8	390	500
Piso 2 Disipador L16	39.6	389	500
Piso 3 Disipador L9	36.2	355	500
Piso 3 Disipador L11	36.1	354	500
Piso 3 Disipador L13	36.1	354	500
Piso 3 Disipador L15	36.2	355	500
Piso 4 Disipador L10	34.2	335	500
Piso 4 Disipador L12	34.3	337	500
Piso 4 Disipador L14	34.3	337	500
Piso 4 Disipador L16	34.2	335	500
Piso 5 Disipador L9	31.6	310	500
Piso 5 Disipador L11	31.5	309	500
Piso 5 Disipador L13	31.5	309	500
Piso 5 Disipador L15	31.6	310	500
Piso 6 Disipador L10	24.5	240	250
Piso 6 Disipador L12	24.6	241	250
Piso 6 Disipador L14	24.6	241	250
Piso 6 Disipador L16	24.5	240	250
Piso 7 Disipador L9	15.0	147	250
Piso 7 Disipador L11	15.0	147	250
Piso 7 Disipador L13	15.0	147	250
Piso 7 Disipador L15	15.0	147	250

Tabla 17 – 3. Resumen Amortiguadores Lineales.

Disipadores (kN)	Cantidad
250	16
500	40
Total	56

3.6.3. Diseño Estructural con Amortiguadores No Lineales

3.6.3.1. Estimación del Coeficiente “C” – Dispositivos No Lineales

El primer paso corresponde a la definición del exponente de velocidad “ α ”. Para este caso, por tratarse de un dispositivo No lineal, se considerará un “ $\alpha = 0.5$ ”. Una vez culminado esto, se procede a utilizar la Ec. 2.5:

$$\beta_{visc.} = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} w^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2}$$

Asumiendo que todos los amortiguadores tendrán un coeficiente “C” constante y un total de 4 dispositivos por piso en cada dirección, procedemos a despejar la variable “C” de la ecuación base para un amortiguamiento viscoso objetivo: $\beta_{visc.} = 18\%$.

Tabla 18 – 1. Cálculo del Coeficiente de Amortiguamiento – No Lineal.

DIRECCION X-X						T=1.562seg	
	ϕ_i	ϕ_{rj}	m_i	$\cos \theta$	$\sum \phi_r^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta$	$\sum \phi_i^2 m_i$	
PISO 1	0.1700	0.170	452094	0.844	0.05435	13065.52	
PISO 2	0.3650	0.195	452094	0.898	0.04184	60230.22	
PISO 3	0.5550	0.190	452094	0.898	0.01626	139256.25	
PISO 4	0.7213	0.166	452094	0.898	0.00019	235180.01	
PISO 5	0.8538	0.133	452094	0.898	0.11899	329526.37	
PISO 6	0.9450	0.091	452094	0.898	0.08194	403731.24	
PISO 7	1.0000	0.055	352277	0.898	0.04939	352277.00	
SUMA TOTAL					0.363	1533266.62	
w (rad/seg) = 4.02		A (m)= 0.08		$\alpha = 0.5$			

Por lo tanto se obtiene:

$C_{XX} = 78.10 \text{ Tn} - (\text{s/m})^{(1/0.5)}$
$C_{XX} = 78.23 \text{ Tn} - (\text{s/m})^{(1/0.5)}$

Tabla 18 – 2. Cálculo del Coeficiente de Amortiguamiento – No Lineal.

DIRECCION Y-Y					T=1.521seg	
	ϕ_i	ϕ_{rj}	m_i	$\text{Cos}\theta$	$\sum \phi_r^{1+\alpha} \text{cos}^{1+\alpha} \theta$	$\sum \phi_i^2 m_i$
PISO 1	0.1731	0.173	452094	0.844	0.05587	13554.09
PISO 2	0.3701	0.197	452094	0.898	0.04263	61937.85
PISO 3	0.5596	0.189	452094	0.898	0.01615	141573.45
PISO 4	0.7252	0.166	452094	0.898	0.00019	237775.87
PISO 5	0.8570	0.132	452094	0.898	0.11831	332011.79
PISO 6	0.9473	0.090	452094	0.898	0.08112	405700.93
PISO 7	1.0000	0.053	352277	0.898	0.04732	352277.00
SUMA TOTAL					0.362	1544830.98
w (rad/seg) = 4.13		A (m) = 0.0797		$\alpha = 0.5$		

Se obtiene lo siguiente:

$$C_{YY} = 82.03 \text{ Tn} - (\text{s/m})^{(1/0.5)}$$

$$C_{YY} = 82.03 \text{ Tn} - (\text{s/m})^{(1/0.5)}$$

Los valores obtenidos son similares debido a las regularidades en planta, en elevación y en masa del edificio. Finalmente, elegimos un solo valor “C” para ambas direcciones que se aproxime a:

$$C \sim 80 \text{ Tn} - (\text{s/m})^{(1/0.5)}$$

3.6.3.2. Primera Alternativa de Diseño

Los resultados del ajuste del coeficiente de rigidez nos conducen a la selección del perfil PIPE 6 STD, obteniendo el siguiente coeficiente de rigidez como resultado:

$$K_{1\text{piso}} = 10,532.71 \text{ Tn/ m}$$

$$K_{2-7\text{piso}} = 11,206.58 \text{ Tn/ m}$$

Una vez afinado los modelos, se obtiene finalmente la primera alternativa viable considerando el siguiente coeficiente de amortiguamiento:

$$C = 90 \text{ Tn} - (\text{s/m})^{(1/0.5)}$$

Las Tablas 19-1 y 19-2 muestran las derivas obtenidas con este valor de C.

X-X	Tabla 19-1. Derivas en Función de los Registros Tiempo Historia.						
Nivel	6610N08	6610N82	7005N08	7005N82	7410N08	7410N82	MAX
Piso 7	1.25	0.89	1.19	1.19	1.36	1.56	1.56
Piso 6	2.13	1.60	2.16	2.17	2.22	2.86	2.86
Piso 5	2.81	2.05	2.98	2.98	2.78	4.11	4.11
Piso 4	2.83	2.33	3.27	3.23	2.84	5.03	5.03
Piso 3	3.02	2.52	3.70	2.96	2.80	5.63	5.63
Piso 2	3.51	2.39	3.81	2.98	3.08	5.69	5.69
Piso 1	2.81	1.67	2.65	2.14	2.52	3.83	3.83
MAX	3.51	2.52	3.81	3.23	3.08	5.69	5.69

Y-Y	Tabla 19-2. Derivas en Función de los Registros Tiempo Historia.						
Nivel	6610N08	6610N82	7005N08	7005N82	7410N08	7410N82	MAX
Piso 7	0.84	1.18	1.15	1.11	1.47	1.30	1.47
Piso 6	1.55	2.05	2.15	2.07	2.74	2.18	2.74
Piso 5	2.01	2.75	2.97	2.87	3.98	2.77	3.98
Piso 4	2.30	2.76	3.27	3.19	4.93	2.86	4.93
Piso 3	2.52	2.92	3.06	3.68	5.57	2.77	5.57
Piso 2	2.41	3.37	2.99	3.83	5.70	3.04	5.70
Piso 1	1.71	2.73	2.18	2.66	3.92	2.51	3.92
MAX	2.52	3.37	3.27	3.83	5.70	3.04	5.70

Los valores máximos de deriva alcanzados en la dirección X e Y con la inclusión de amortiguadores no lineales fueron de **5.7** y **5.7** por mil respectivamente. Estos valores son menores al valor de 7 por mil, establecido como máximo por la norma peruana sismorresistente E.030, para edificios aporricados de concreto armado.

Se observa que los amortiguadores no lineales y lineales logran prácticamente una misma reducción de deriva.

Para verificar si el amortiguamiento añadido es el objetivo, hacemos uso de la función pulso como en el caso de amortiguadores lineales. Se obtiene la siguiente historia de desplazamientos:

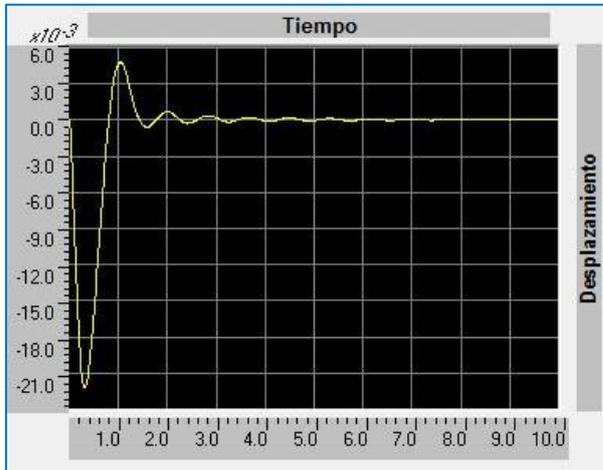


Fig. 27. Curva Tiempo vs Desplazamiento – Sollicitación de carga: Pulso – Dispositivos No Lineales.

Reemplazando valores en la ecuación anterior con los desplazamientos obtenidos en el análisis, tenemos:

$$n \left(\frac{2.22 \times 10^{-2}}{1.568 \times 10^{-4}} \right) = \frac{2(3)\pi\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}}$$

De donde:

$$\xi = \beta_{eff} = 25.41\%$$

Considerando 5% de amortiguamiento inherente:

$$\beta_{visc.} = 20.41\%$$

El amortiguamiento obtenido con la adición de disipadores no lineales superó los objetivos.

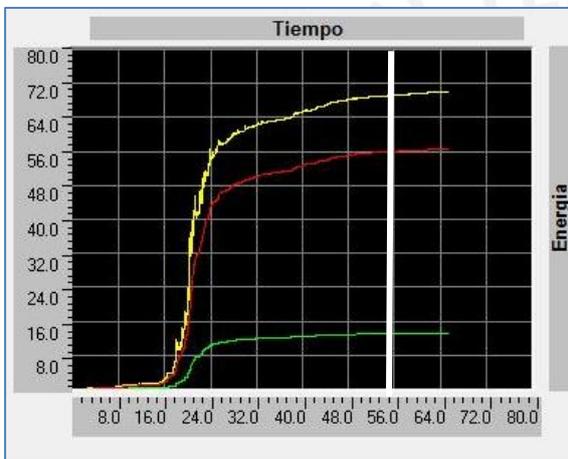
3.6.3.3. Energía y Curva de Histéresis

BALANCE DE ENERGÍA

Finalmente, podemos observar la participación de los Dispositivos en la disipación de energía de entrada o Input Energy a través del grafico de energía que nos proporciona el software ETABS v9.5 para cada registro sísmico.

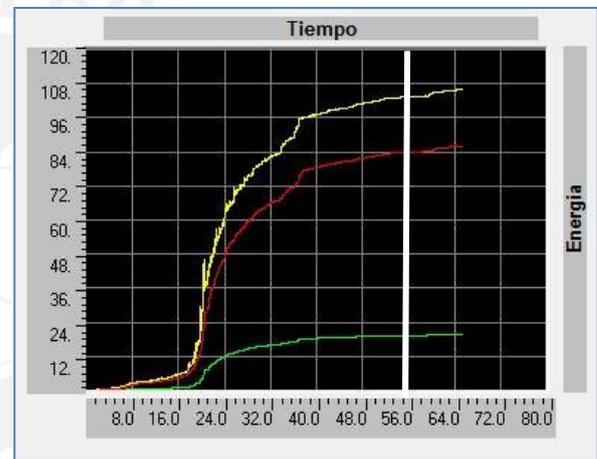
Registro 6610N08

Porcentaje de Disipación: $\frac{56.82}{70.02} = 81.15 \%$



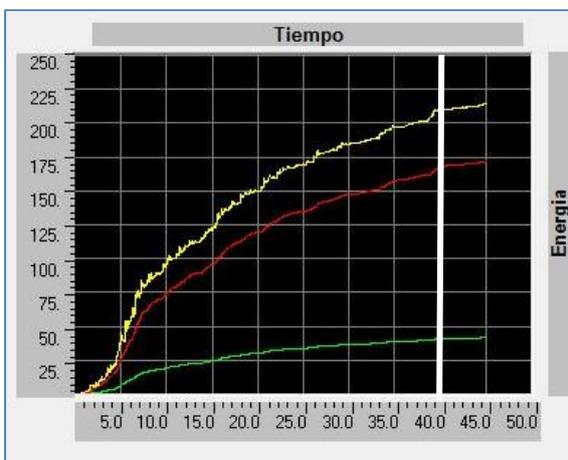
Registro 6610N82

Porcentaje de Disipación: $\frac{86.20}{105.92} = 81.38 \%$



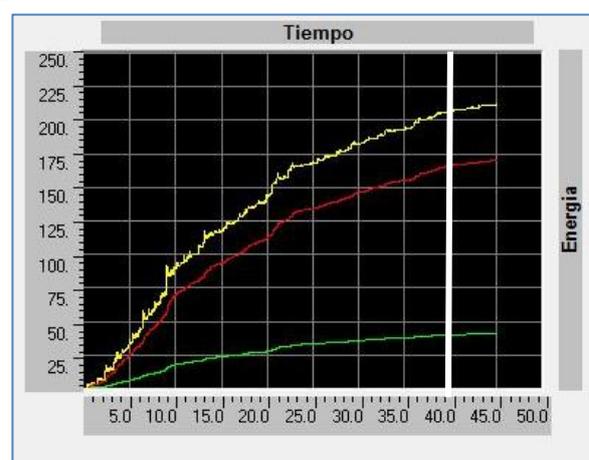
Registro 7005N08

Porcentaje de Disipación: $\frac{172.57}{214.19} = 80.57\%$



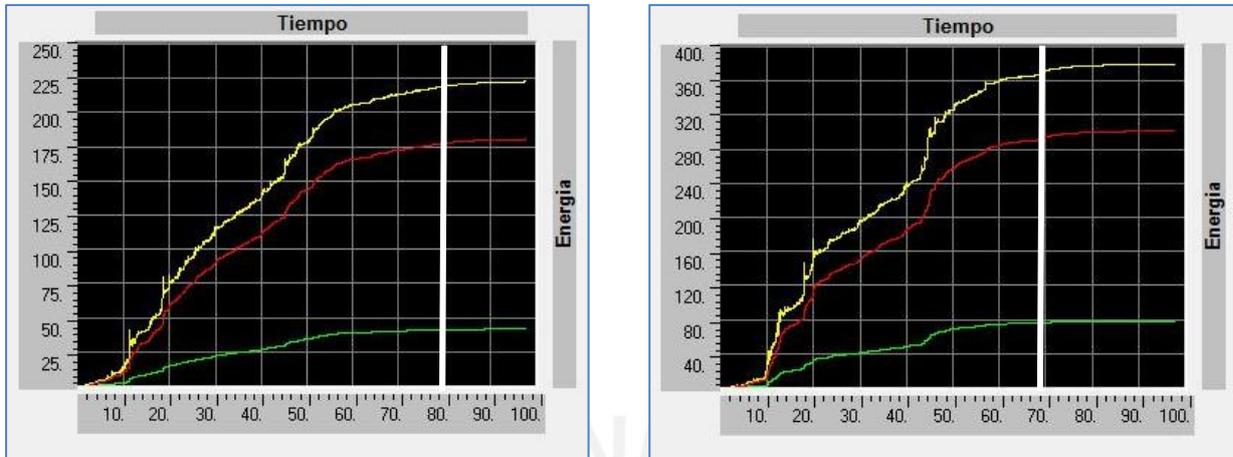
Registro 7005N82

Porcentaje de Disipación: $\frac{170.68}{211.68} = 80.63\%$



Registro 7410N08**Registro 7410N82**

Porcentaje de Disipación: $\frac{180.94}{222.58} = 81.29\%$ Porcentaje de Disipación: $\frac{302.03}{379.88} = 79.51\%$



- **Energía del Sismo (Input Energy)**
- **Energía de la Estructura – Modal (MDamp Energy)**
- **Energía del Sistema de Amortiguamiento (NDamp Energy)**

Fig. 28. Curvas de Balance Energético de cada registro – Dispositivos No Lineales.

Para estimar el porcentaje de disipación de energía del sistema de amortiguamiento, se sigue el procedimiento explicado en la sección 3.6.2.3.

A partir de este análisis se observa que la participación energética del Sistema de Amortiguamiento No-Lineal se aproxima al 80%, participación que refleja la gran cantidad de dispositivos utilizados en la estructura y asimismo la gran esbeltez que la estructura presenta, participando considerablemente en la disipación energética.

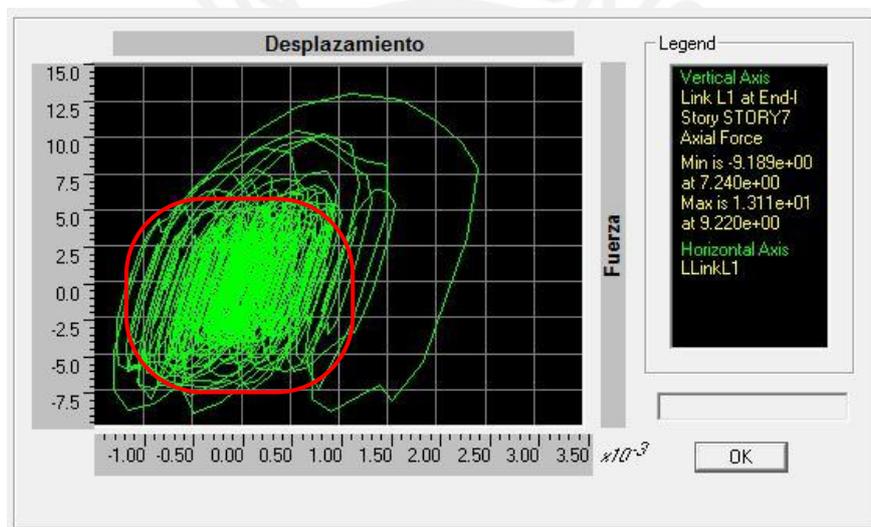
CURVA DE HISTERESIS

A partir de estos gráficos podemos identificar el comportamiento fuerza-desplazamiento del amortiguador. Se observa una tendencia semi-elíptica (subrayada alrededor de las curvas). Esta tendencia se expuso previamente en el acápite 1.4.3.

Se puede identificar que la curva se encuentra algo inclinada pero mantiene la forma predefinida de los dispositivos no lineales. A diferencia de los dispositivos lineales, no trabajan completamente a desfase con la estructura lo cual genera cierto esfuerzo remanente en los elementos estructurales.

Disipador No-Lineal

Dispositivo Line L1 – Sismo del 70



Dispositivo Line L2 – Sismo del 70

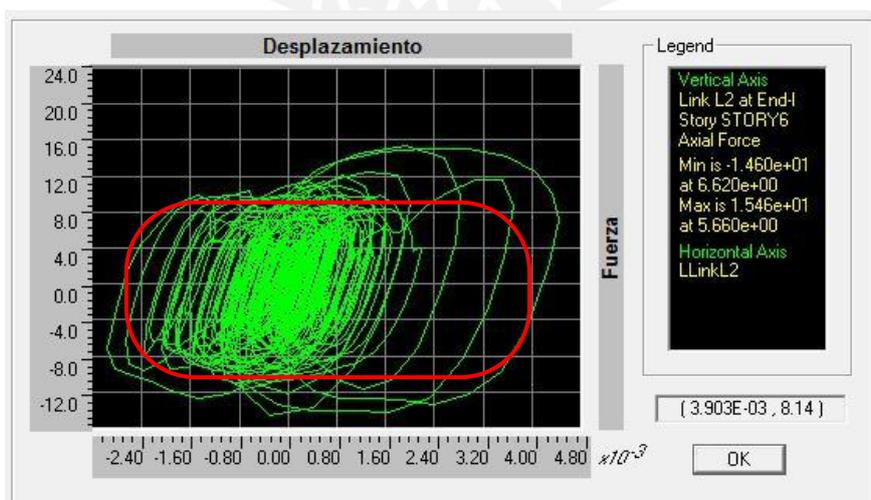


Fig. 29. Curva Desplazamiento vs Fuerza – Histeresis de Dispositivos No Lineales.

3.6.3.4. Agrupación de Dispositivos por Niveles de Fuerza

Tabla 20 – 1. Niveles de Fuerza usando Dispositivos Lineales Eje X

Disipador	Fuerza (Tn)	Fuerza (kN)	Disipador (kN)
Piso 1 Disipador L1	25.2	247	250
Piso 1 Disipador L3	25.1	246	250
Piso 1 Disipador L5	25.1	246	250
Piso 1 Disipador L7	25.2	247	250
Piso 2 Disipador L2	26.2	257	250
Piso 2 Disipador L4	26.3	258	250
Piso 2 Disipador L6	26.3	258	250
Piso 2 Disipador L8	26.2	257	250
Piso 3 Disipador L1	25.5	250	250
Piso 3 Disipador L3	25.5	250	250
Piso 3 Disipador L5	25.5	250	250
Piso 3 Disipador L7	25.5	250	250
Piso 4 Disipador L2	25.2	248	250
Piso 4 Disipador L4	25.3	248	250
Piso 4 Disipador L6	25.3	248	250
Piso 4 Disipador L8	25.2	248	250
Piso 5 Disipador L1	23.7	232	250
Piso 5 Disipador L3	23.7	232	250
Piso 5 Disipador L5	23.7	232	250
Piso 5 Disipador L7	23.7	232	250
Piso 6 Disipador L2	19.8	194	250
Piso 6 Disipador L4	19.8	194	250
Piso 6 Disipador L6	19.8	194	250
Piso 6 Disipador L8	19.8	194	250
Piso 7 Disipador L1	16.0	157	250
Piso 7 Disipador L3	16.0	157	250
Piso 7 Disipador L5	16.0	157	250
Piso 7 Disipador L7	16.0	157	250

Tabla 20 – 2. Niveles de Fuerza usando Dispositivos No lineales Eje Y

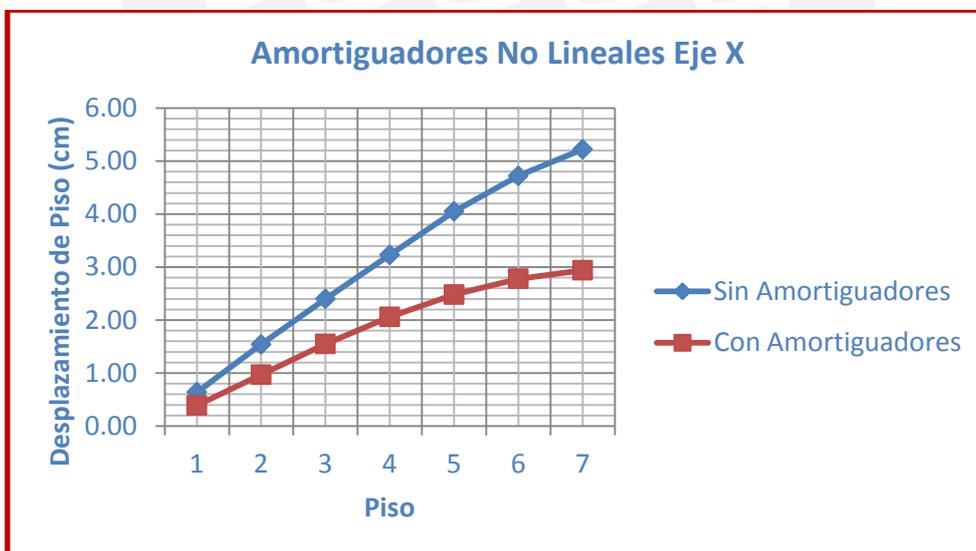
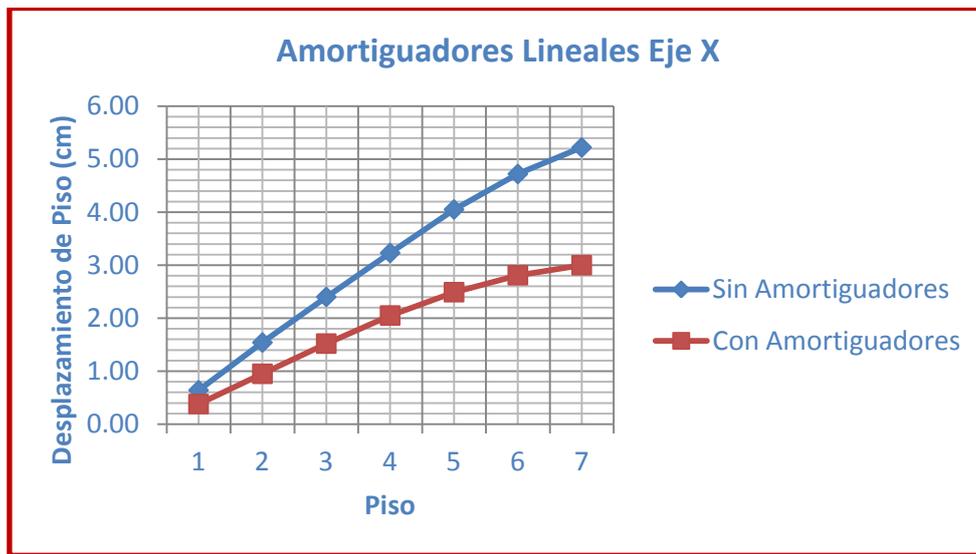
Disipador	Fuerza (Tn)	Fuerza (kN)	Disipador (kN)
Piso 1 Disipador L9	25.2	247	250
Piso 1 Disipador L11	25.1	246	250
Piso 1 Disipador L13	25.1	246	250
Piso 1 Disipador L15	25.2	247	250
Piso 2 Disipador L10	26.1	256	250
Piso 2 Disipador L12	26.2	257	250
Piso 2 Disipador L14	26.2	257	250
Piso 2 Disipador L16	26.1	256	250
Piso 3 Disipador L9	25.4	249	250
Piso 3 Disipador L11	25.4	249	250
Piso 3 Disipador L13	25.4	249	250
Piso 3 Disipador L15	25.4	249	250
Piso 4 Disipador L10	25.2	248	250
Piso 4 Disipador L12	25.3	248	250
Piso 4 Disipador L14	25.3	248	250
Piso 4 Disipador L16	25.2	248	250
Piso 5 Disipador L9	23.6	232	250
Piso 5 Disipador L11	23.6	232	250
Piso 5 Disipador L13	23.6	232	250
Piso 5 Disipador L15	23.6	232	250
Piso 6 Disipador L10	19.8	194	250
Piso 6 Disipador L12	19.8	194	250
Piso 6 Disipador L14	19.8	194	250
Piso 6 Disipador L16	19.8	194	250
Piso 7 Disipador L9	16.0	156	250
Piso 7 Disipador L11	15.9	156	250
Piso 7 Disipador L13	15.9	156	250
Piso 7 Disipador L15	16.0	156	250

Tabla 20 – 3. Resumen Amortiguadores no lineales.

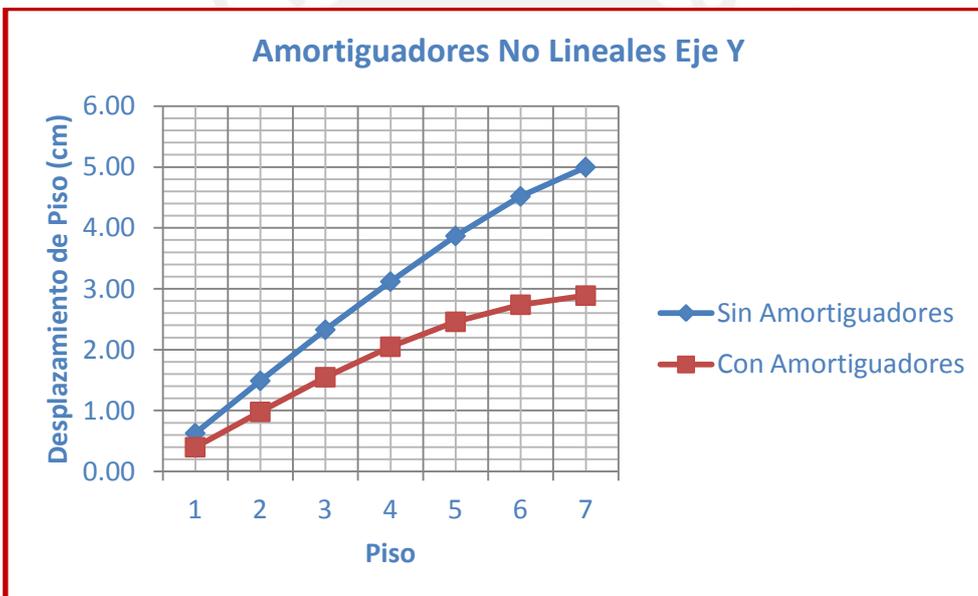
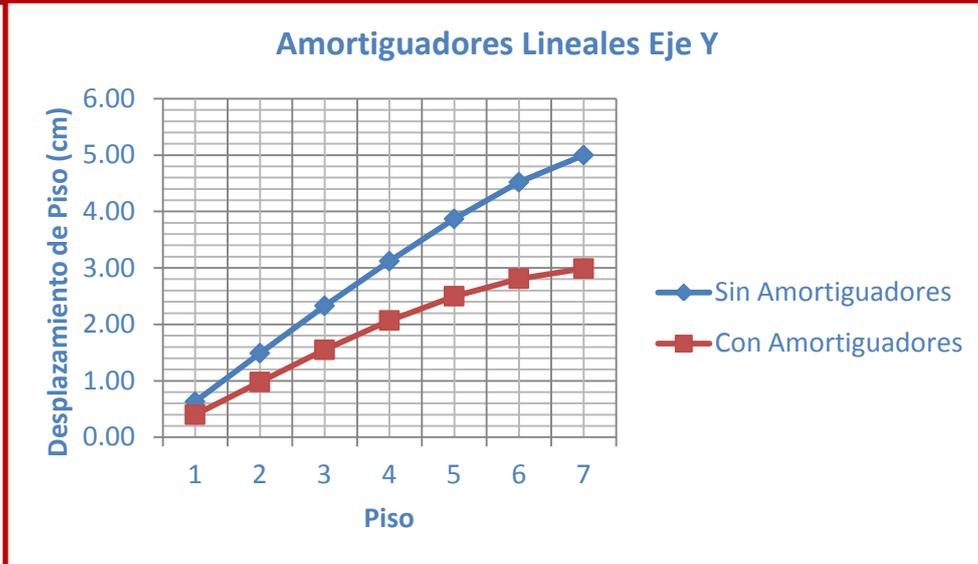
Amortiguadores (kN)	Cantidad
250	56
Total	56

3.7. Evaluación de los Resultados

- ❖ Según los resultados obtenidos en la Sección 3.5 el uso de amortiguadores fluido-viscosos Lineales ó No lineales reduce los desplazamientos de piso en un rango del 35 a 40%. Esta reducción es similar en ambos ejes X e Y.



Graf. 4. Comparación de desplazamiento de piso: Edificio sin Amortiguadores y Edificio con Amortiguadores en el eje X usando dispositivos lineales y no lineales.

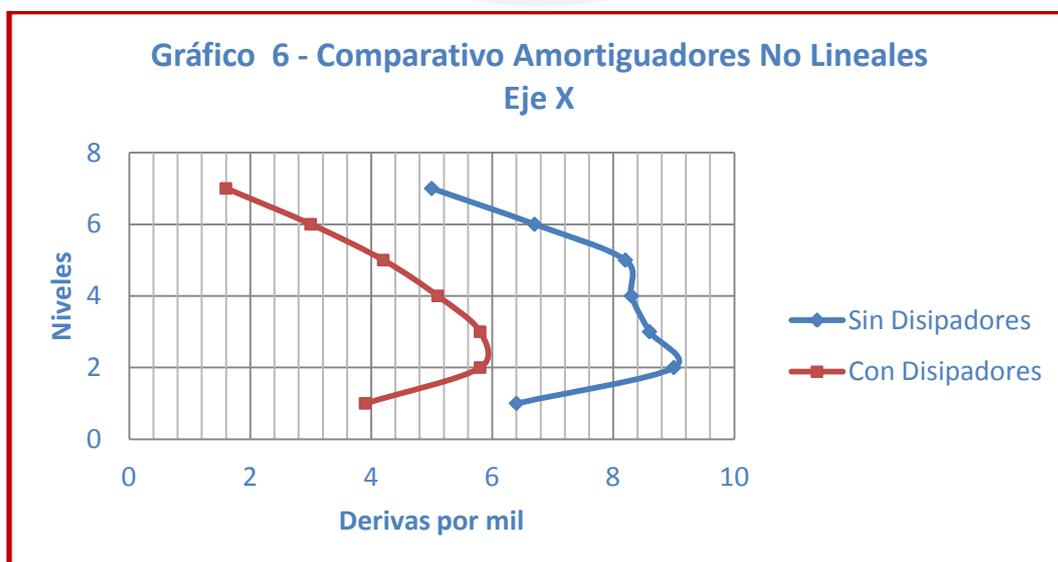


Graf. 5. Comparación de desplazamiento de piso: Edificio sin Amortiguadores y Edificio con Amortiguadores en el eje Y usando dispositivos lineales y no lineales.

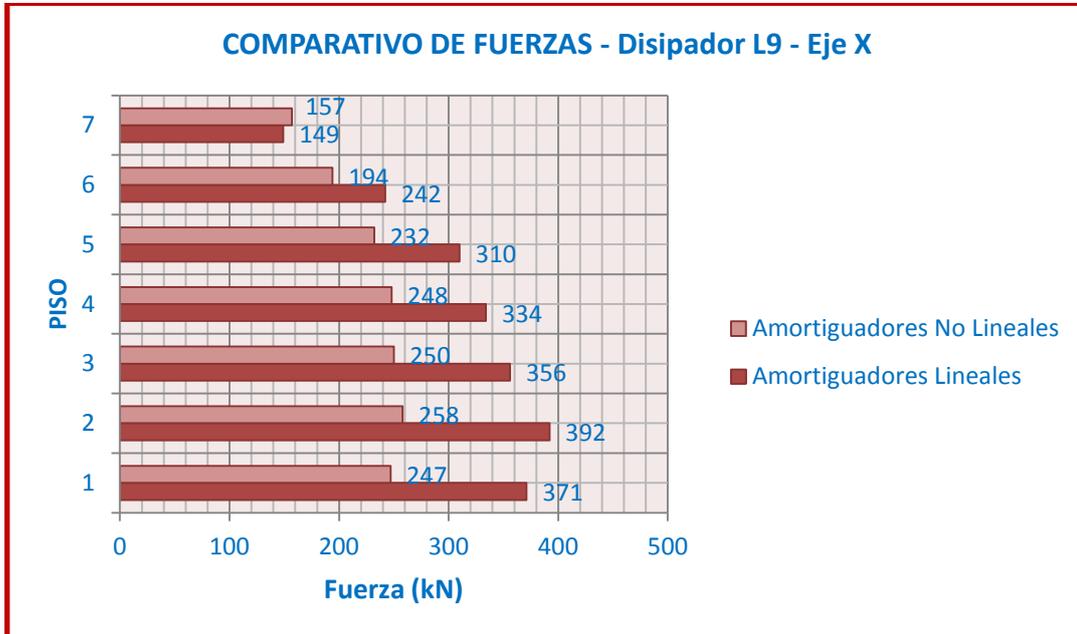
- ❖ El porcentaje de reducción de derivas de entrepiso es ligeramente mayor con el uso de amortiguadores no lineales, según los resultados expuestos en la Sección 3.5. Esta reducción logra su máximo valor en el piso 7 y tiene una tendencia a la baja conforme la altura del edificio desciende.

Tabla 21- Comparación de derivas de entrepiso (1/1000): Edificio sin Amortiguadores y Edificio con Amortiguadores en el eje X.

Sistema de Amortiguación Lineal			
Nivel	Sin Sistema de Amortiguación	Con Sistema de Amortiguación	Porcentaje de Reducción
7	5.00	1.90	62%
6	6.70	3.20	52%
5	8.20	4.40	46%
4	8.30	5.30	36%
3	8.60	5.70	34%
2	9.00	5.70	37%
1	6.40	3.80	41%
Sistema de Amortiguación No Lineal			
Nivel	Sin Sistema de Amortiguación	Con Sistema de Amortiguación	Porcentaje de Reducción
7	5.00	1.60	68%
6	6.70	3.00	55%
5	8.20	4.20	49%
4	8.30	5.10	39%
3	8.60	5.80	33%
2	9.00	5.80	36%
1	6.40	3.90	39%



- ❖ Las fuerzas que se presentan en los dispositivos no lineales son menores a las que se presentan en los dispositivos lineales, como puede apreciarse en la Sección 3.5. En el Graf. 7 se expone un comparativo de las fuerzas en el disipador “Line L9” considerando ambos sistemas lineal y no lineal.



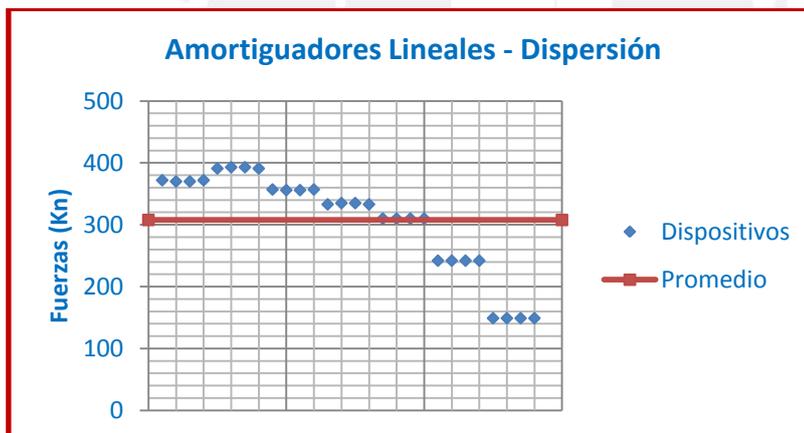
Graf 7. Fuerzas en el disipador L9 con dispositivos Lineales y No lineales.

- ❖ La participación en la disipación de energía de los amortiguadores lineales y no lineales es similar, según lo muestran las Figuras 25 y 28. Para el caso de dispositivos lineales esta disipación es en promedio 79% y en los no lineales de 80%. Como se mencionó previamente, esto se debe a la gran cantidad de dispositivos, 56 en total, y a la esbeltez de la estructura.
- ❖ Tomando los resultados del análisis Tiempo Historia en la columna C28, la columna central en los dos ejes y que no está conectada a amortiguador alguno, se observa que existe una reducción de la fuerza cortante y momento flector máximos al introducir el sistema de amortiguamiento no lineal a la estructura definido en la Sección 3.5.3.

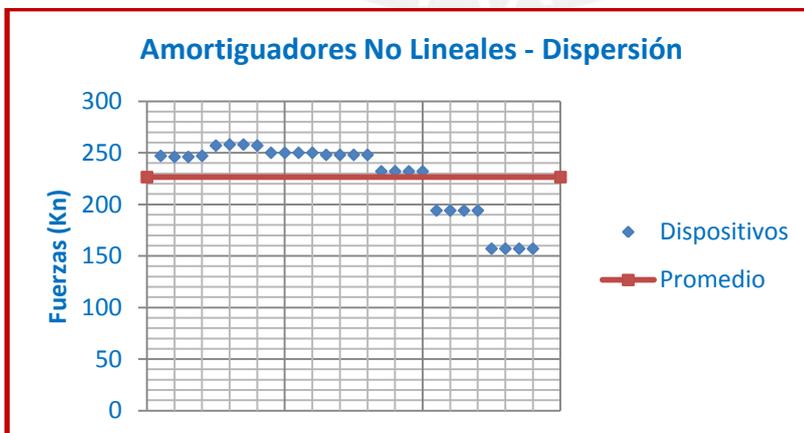
Tabla 22. Comparación de esfuerzos máximos de la columna central C28 en la estructura sin sistema de amortiguamiento y con sistema de amortiguamiento.

	Sin Sistema de Amortiguación t=48.88 seg	Con Sistema de Amortiguación t=44.86 seg	Reducción
Fuerza Cortante Máxima(Ton)	52.53	36.68	30.17%
	Sin Sistema de Amortiguación t=48.86 seg	Con Sistema de Amortiguación t=44.82 seg	Reducción
Momento Flector Máximo (Ton m)	73.44	45.27	38.36%

- ❖ Las fuerzas en los dispositivos lineales presentan una dispersión mucho mayor a las que presentan los dispositivos no lineales. Este hecho nos permite agrupar a los dispositivos en un rango más reducido de fuerzas. Esto se representa en los siguientes gráficos tomados en función de las Tablas 17 y 20 (Eje X):



Promedio: 307.8 kN
Desv. Estandar: 80.5 kN



Promedio: 226.4 kN
Desv. Estandar: 35.1 kN

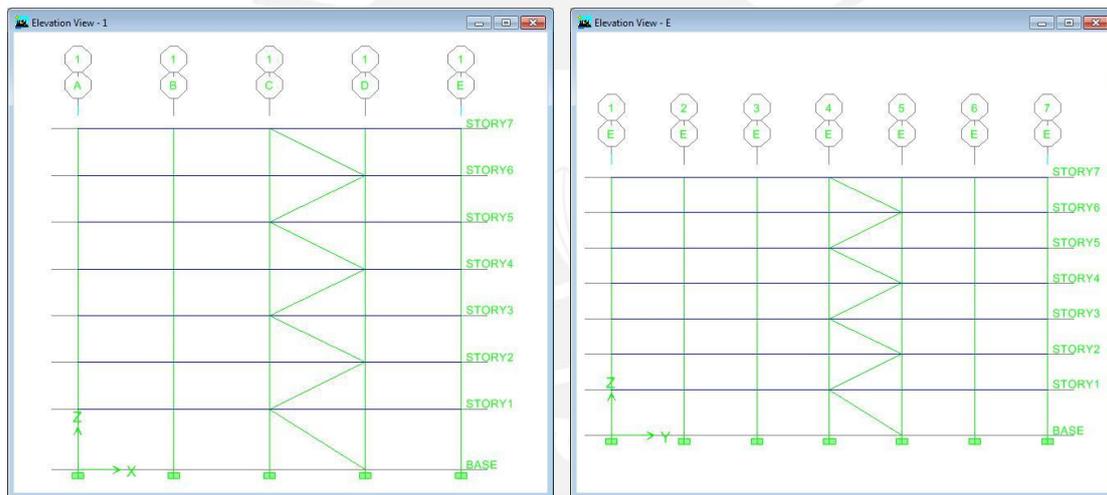
Graf. 8. Dispersión de Fuerzas en los Amortiguadores Lineales y No Lineales.

3.8. Propuesta de Diseño Final

Una vez analizados los resultados se observó que bajo las mismas condiciones, un sistema No-Lineal presenta una mejora en el desempeño sismo-resistente de mayor eficiencia. Este caso es muy común especialmente cuando se trata de estructuras convencionales. Inclusive se notó que las fuerzas en los dispositivos no trabajaban a su mayor capacidad, por lo que se buscó optimizar su aplicación.

En el diseño final se redujó la cantidad de dispositivos a 4 por nivel (mínimo propuesto por el ASCE) generando así una cantidad total de 28 dispositivos en lugar de 56. A continuación se presenta la propuesta:

Ubicación de los dispositivos



Eje 1 y 7 / X-X

Eje A y E / Y-Y

Derivas Máximas

Dirección X-X → 5.8 ‰

Dirección Y-Y → 5.8 ‰

Características de los Dispositivos

$\alpha = 0.5$

$C = 180 T_n \cdot (s/m)^{1/0.5}$

Brazo metálico → HSS 7.50x0.500 ($K_{1er} = 1200 T_n/m$; $K_{tip} = 1255 T_n/m$)

Agrupación de Dispositivos

X-X	Link	Fuerza (Tn)	Fuerza (Kn)	Disipador (Kn)
story 7	L17	31.1	305	500
	L23	31.1	305	500
story 6	L18	43.3	424	500
	L24	43.3	424	500
story 5	L17	53.0	520	500
	L23	53.2	521	500
story 4	L18	53.8	528	500
	L24	53.8	528	500
story 3	L17	55.2	542	750
	L23	55.3	542	750
story 2	L18	56.3	552	750
	L24	56.3	552	750
story 1	L17	58.6	575	750
	L23	58.2	571	750

Y-Y	Link	Fuerza (Tn)	Fuerza (Kn)	Disipador (Kn)
story 7	L19	30.8	302	500
	L21	30.8	302	500
story 6	L20	43.3	424	500
	L22	43.3	424	500
story 5	L19	53.0	520	500
	L21	53.0	520	500
story 4	L20	53.2	522	500
	L22	53.2	522	500
story 3	L19	55.2	542	750
	L21	55.2	542	750
story 2	L20	55.9	548	750
	L22	55.9	548	750
story 1	L19	58.6	575	750
	L21	58.6	575	750

Amortiguadores (Kn)	Cantidad
500	16
750	12
Total	28

3.9. Evaluación de Costos

Para evaluar la incidencia de los amortiguadores en el costo total del proyecto consideramos 3 niveles de sótanos de estacionamientos, proponiendo así un área techada de 7300 m². Los precios de los amortiguadores fueron proporcionados por el fabricante y se obtuvo lo siguiente:

Ítem	Cantidad	P.U. (US\$)	Parcial (US\$)
Disipador 500 kN	16	5500	88,000.00
Disipador 750 kN	12	7500	90,000.00
Conexiones	28	1500	42,000.00
Total (US\$)			220,000.00
Area techada-Incluye 3 sótanos (m ²)	7300	Costo x m²	30.10

Para estimar el costo total del proyecto hacemos uso de ratios manejados por el sector inmobiliario.

Especialidad	Ratio (US\$/m ²)	Área (m ²)	Parcial (US\$)
Estructuras	175	7300	1,277,500.00
Acabados	170	7300	1,241,000.00
IISS	20	7300	146,000.00
IIEE	32	7300	233,600.00
Sistema de Amortiguación	30.1	7300	220,000.00
Parcial (US\$)			3,118,100.00
GG (2%)			62,362.00
Total (US\$)			3,180,462.00
Incidencia			6.92%

Se obtuvo una incidencia del **6.92 %**, valor mucho menor a lo que se obtendría por costos de reparación (**15 – 20 %**). El precio por metro cuadrado (**30.1 \$/m²**) es cercano a lo que se presenta en edificaciones con amortiguadores de fluido-viscoso en otros países (**20 – 30 \$/m²**).

Se debe considerar que esta incidencia corresponde a una estructura ideal y un desempeño objetivo bastante ambicioso: el que se alcance daño moderado ante un sismo severo. La incidencia real tendría que considerar a su vez la reducción de las secciones de los elementos estructurales gracias a la reducción de la resistencia demanda obteniendo como resultado una reducción en el costo total.

3.10. Diseño de los Dispositivos de Amortiguamiento

El presente acápite toma en consideración los resultados del diseño final; ésta selección se debe a las ventajas que el sistema No Lineal exhibe con respecto al lineal expuestas con mayor detalle en las conclusiones.

Con la información obtenida de la Tabla 20-3 y con una predisposición de la instalación de los dispositivos (uso de placa base), podemos definir las propiedades de los dispositivos con la Figura 30, propuesta por el fabricante.

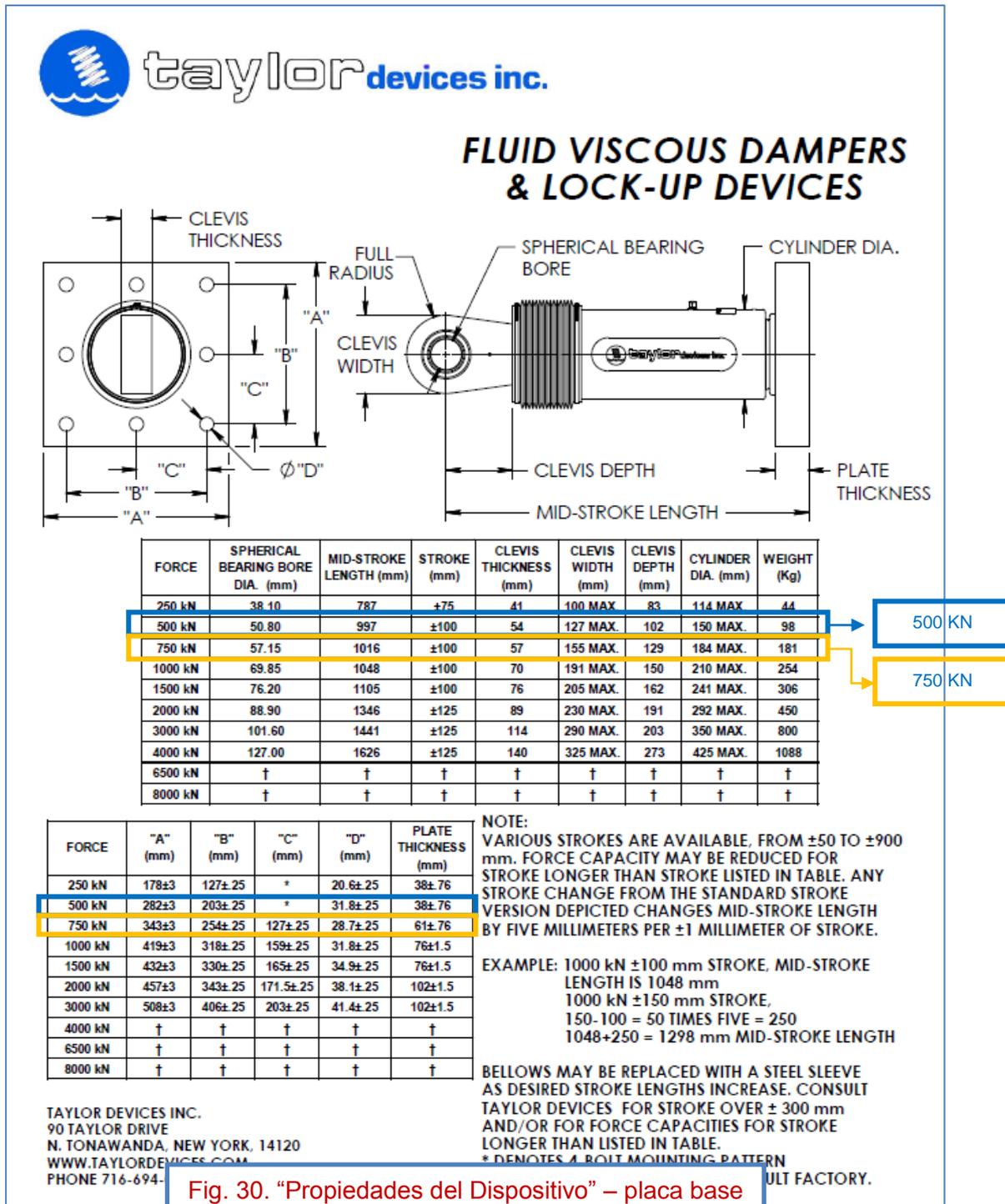


Fig. 30. "Propiedades del Dispositivo" – placa base

Como se presenta en la Fig. 30 el fabricante propone valores estandar para el mercado, el proyectista deberá brindarle unicamente los valores de fuerzas obtenidos. El fabricante cuenta con su propio Factor de Seguridad de manera que los valores no requerirán de ninguna amplificación.

Los dispositivos seleccionados son los de capacidad de 500 y 750 kN:

Tabla 23. Propiedades del Dispositivo de Amortiguación.				
FORCE	SPHERICAL BEARING BORE DIA. (mm)	MID-STROKE LENGTH (mm)	STROKE (mm)	CLEVIS THICKNESS (mm)
500 kN	50.80	997	±100	54
750 kN	57.15	1016	±100	57

Tabla 23. Propiedades del Dispositivo de Amortiguación – Continuación.				
FORCE	CLEVIS WIDTH (mm)	CLEVIS DEPTH (mm)	CYLINDER DIA. (mm)	WEIGHT (kg)
500 kN	127 MAX.	102	150 MAX.	98
750 kN	155 MAX.	129	184 MAX.	181

Tabla 24. Características geométricas de la Placa Base.					
FORCE	"A" (mm)	"B" (mm)	"C" (mm)	"D" (mm)	PLATE THICKNESS (mm)
500 kN	282±3	203±.25	*	31.8±.25	38±.76
750 kN	343±3	254±.25	127±.25	28.7±.25	61±.76

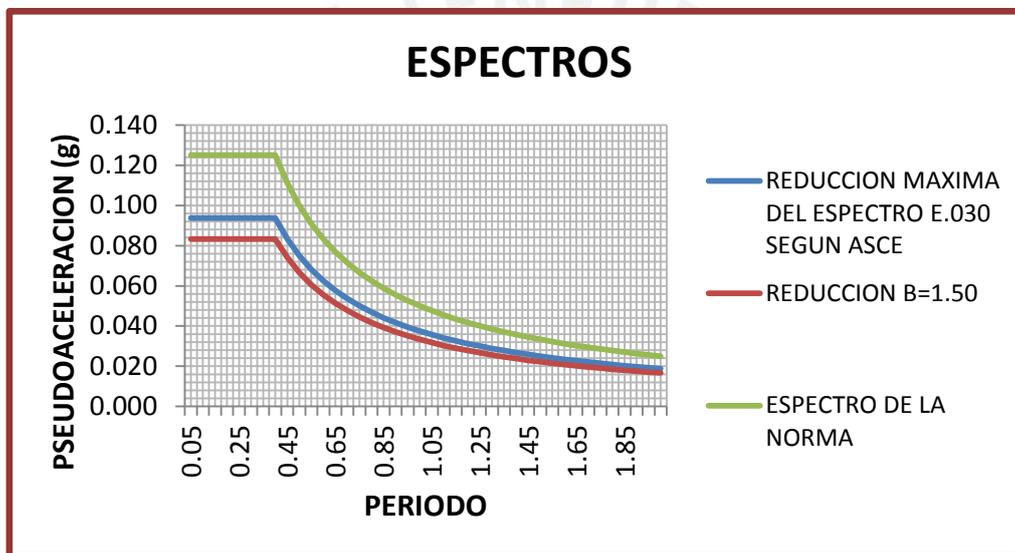
* Corresponde a una disposición de 4 pernos (no presenta esta magnitud).

3.11. Diseño en Concreto Armado

3.11.1. Reducción del Espectro

El amortiguamiento de 18% conlleva una reducción del espectro por el factor $B=1.5$ para fines de diseño de los elementos estructurales del edificio. Los elementos que forman parte del sistema de amortiguamiento, es decir, aquellos elementos que están conectados directamente a los amortiguadores requerirán de un factor de amplificación por carga axial.

En el Graf. 9 se aprecia que la reducción está por encima de la máxima. Por lo tanto, para fines de diseño se tomó la reducción máxima del espectro propuesta por la ASCE.



Graf. 9. Comparación entre espectro de la norma, espectro reducido y espectro mínimo propuesto por el ASCE.

3.11.2. Factor De Amplificación De Carga Axial

Siguiendo el procedimiento expuesto en la sección 2.8.1.1, obtenemos el factor de amplificación de fuerzas "A" para el diseño de los elementos de concreto armado parte del sistema de amortiguamiento. Se han considerado todas las columnas en el primer piso que se conectarán a los amortiguadores. La tabla 25 muestra los resultados de dicho análisis en los ejes X e Y respectivamente; donde además, NCD significa fuerza axial con disipadores y NSD fuerza axial sin disipadores.

Tabla 25-1. Comparación de fuerzas axiales en columnas conectadas a los amortiguadores en el eje X.						
EJE X-X	TRACCION		COMPRESION		NCD/ NSD TRACCION	NCD/ NSD COMPRESION
	N Con Disipadores (Ton)	N Sin Disipadores (Ton)	N Con Disipadores (Ton)	N Sin Disipadores (Ton)		
C 13	102.19	27.76	-105.44	-22.65	3.68	4.66
C 12	84.41	27.43	-83.65	-22.60	3.08	3.70
C 44	83.65	22.60	-84.41	-27.43	3.70	3.08
C 43	105.44	22.65	-102.19	-27.76	4.66	3.68
PROMEDIO					3.78	3.78

Tabla 25-2. Comparación de fuerzas axiales en columnas conectadas a los amortiguadores en el eje Y.						
EJE Y-Y	TRACCION		COMPRESION		NCD/ NSD TRACCION	NCD/ NSD COMPRESION
	N Con Disipadores (Ton)	N Sin Disipadores (Ton)	N Con Disipadores (Ton)	N Sin Disipadores (Ton)		
C 26	106.57	29.61	-102.56	-24.77	3.60	4.14
C 25	83.38	29.61	-87.13	-24.77	2.82	3.52
C 31	87.13	24.77	-83.38	-29.61	3.52	2.82
C 30	102.56	24.77	-106.57	-29.61	4.14	3.60
PROMEDIO					3.52	3.52

* Las columnas con los mayores incrementos en carga axial son las interiores, las más cercanas al centro de gravedad (color amarillo).

A partir de estos resultados se toma como coeficiente de amplificación (enfoque conservador) el siguiente valor:

Coeficiente de Amplificación Carga Axial Columnas	3.65
---	-------------

3.11.3. Diseño de Columna

Se diseñarán 2 columnas representativas por tener mayores esfuerzos axiales y estar conectadas a los dispositivos a través de sus nudos; estas son las columnas C25 y C26.

Se procede a analizar el edificio con el espectro reducido como fuerza sísmica, para después aplicar los factores de amplificación de fuerza axial "A" obtenidos en la Sección 3.11.2 en las columnas C25 y C26. Las combinaciones usadas para el análisis y diseño son:

COMBO 1 : 1.4CM+1.7CV	COMBO 2 : 1.25(CM+CV)+Sxx	COMBO 3 : 1.25(CM+CV)-Sxx
COMBO 4 : 1.25(CM+CV)+Syy	COMBO 5 : 1.25(CM+CV)-Syy	COMBO 6 : 0.9CM+Sxx
COMBO 7 : 0.9CM-Sxx	COMBO 8 : 0.9CM+Syy	COMBO 9 : 0.9CM-Syy

Las combinaciones que arrojan esfuerzos máximos son: **COMBO 1**, **COMBO 2** y **COMBO3**. La tabla 26 muestra los resultados del análisis y la tabla 27 muestra las sollicitaciones de cargas amplificadas para el diseño.

Columna C25	P (Ton)	Mxb (Tonxm)	Myb (Tonxm)	Mxt (Tonxm)	Myt (Tonxm)
COMBO1	63.75	0.88	-0.88	-1.43	1.43
COMBO2	46	1.62	6.72	-0.99	2.88
COMBO3	61.06	-0.16	-8.19	-1.41	-0.48
Columna C26	P (Ton)	Mxb (Tonxm)	Myb (Tonxm)	Mxt (Tonxm)	Myt (Tonxm)
COMBO1	123	0	1.717	0	-2.802
COMBO2	95	0.985	8.45	0.361	-0.773
COMBO3	111	-0.981	-5.573	-0.368	-3.921

Columna C25	P (Ton)	Mxb (Tonxm)	Myb (Tonxm)	Mxt (Tonxm)	Myt (Tonxm)
COMBO1	63.75	0.88	-0.88	-1.43	1.43
COMBO2	167.90	1.62	6.72	-0.99	2.88
COMBO3	222.87	-0.16	-8.19	-1.41	-0.48
Columna C26	P (Ton)	Mxb (Tonxm)	Myb (Tonxm)	Mxt (Tonxm)	Myt (Tonxm)
COMBO1	123	0	1.717	0	-2.802
COMBO2	346.75	0.985	8.45	0.361	-0.773
COMBO3	405.15	-0.981	-5.573	-0.368	-3.921

Para la columna C26, se propone una sección con 8 fierros de 1" y un $f'c = 380$ Kg/cm².

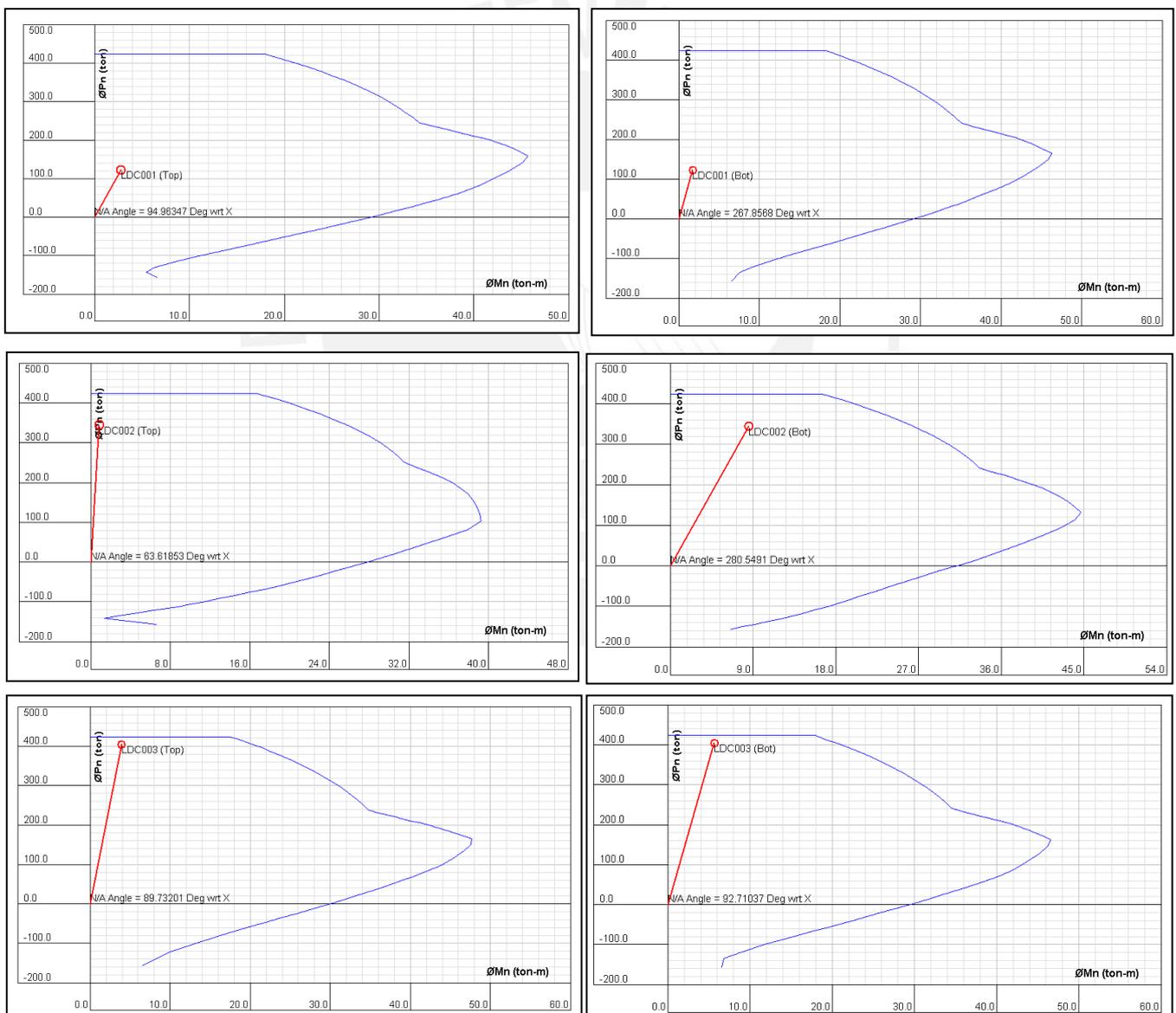
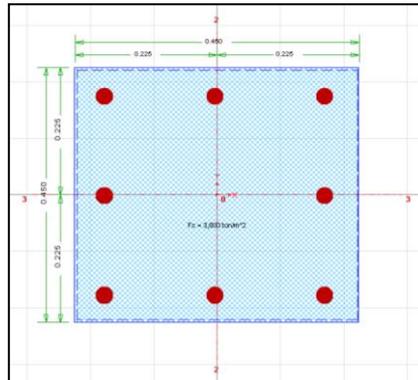


Fig. 31. Sección de la columna C26 y diagramas de interacción para las combinaciones COMBO 1 COMBO 2 y COMBO 3.

Para la columna C 25, se propone una sección con 4 fierros de $\frac{3}{4}$ " y 4 fierros de 1" - $f'c = 380 \text{ Kg/cm}^2$.

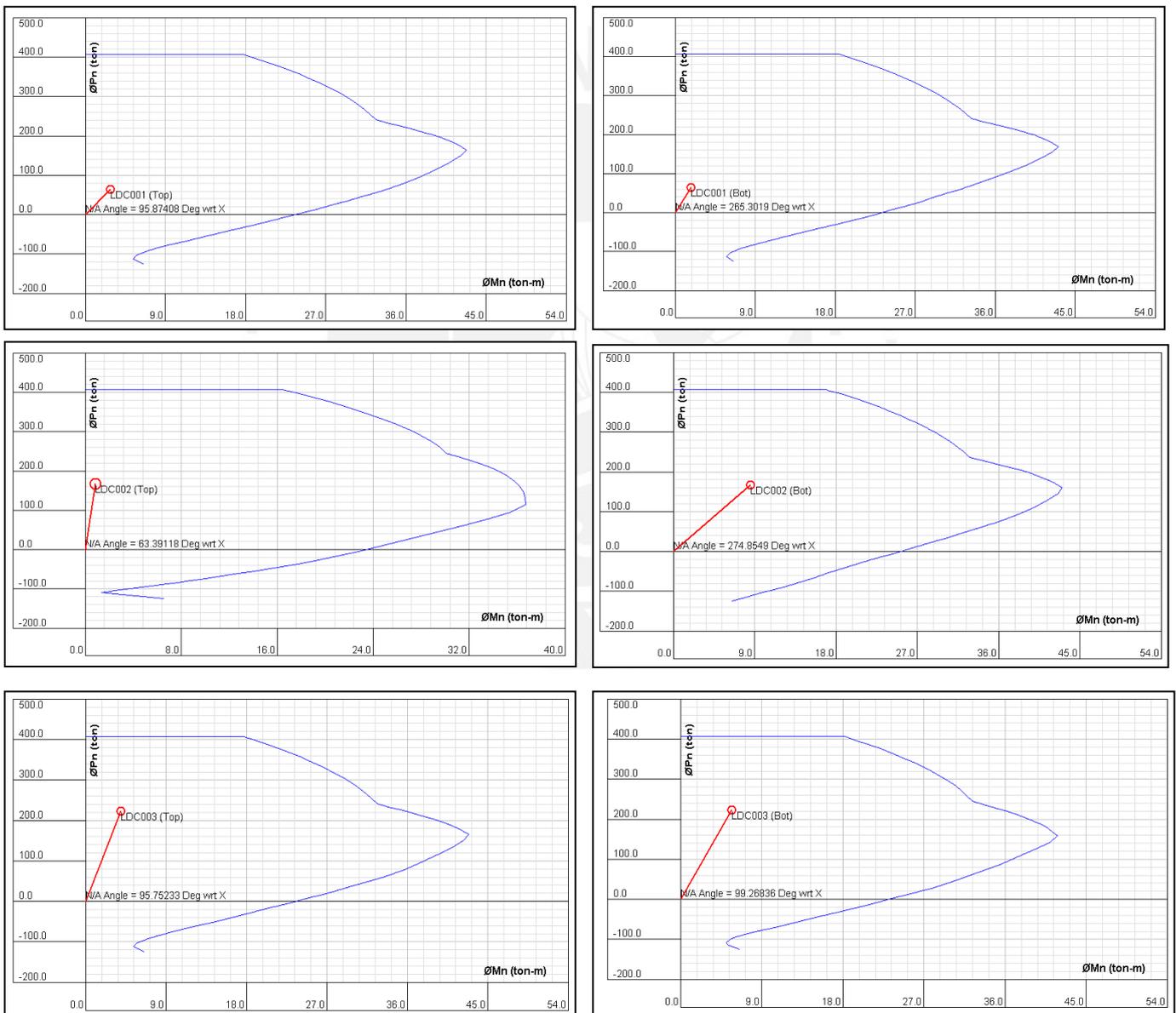
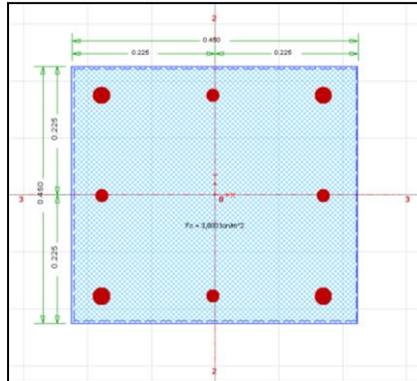


Fig. 32. Sección de la columna C25 y diagramas de interacción para las combinaciones COMBO 1 COMBO 2 y COMBO 3.

3.11.4. Diseño de Viga

Se diseñó una viga típica parte del sistema de amortiguamiento. Para ello se utilizó la envolvente de las combinaciones mostradas en la sección 3.11.3. con lo que se obtuvieron los siguientes esfuerzos y acero longitudinal:

Tabla 28 “Esfuerzos máximos en Viga y Acero de diseño”		
M (+) max.	8.41 Tonxm	3 Φ 5/8
M (-) max.	3.30 Tonxm	2 Φ 5/8
V max.	5.82 Ton	1@5cm, 5@10, Rto 20cm.

3.12. Diseño de Elementos Metálicos

El presente diseño concierne únicamente al brazo metálico dada su importancia al participar directamente del modelamiento del sistema de amortiguamiento mediante la variable “K”. Cabe recalcar que el presente dispositivo requerirá a su vez del diseño de cartelas y planchas destinadas al adosamiento del sistema y en caso se tratase de una estructura existente se requerirá a su vez del diseño de anclajes post-instalados.

3.12.1. Diseño del Brazo Metálico

Propiedades del perfil metálico seleccionado:

Tabla 29: Propiedades geométricas HSS9.625 – HSS6.875 (extraído de “AISC Steel construction manual 13th”).

Table 1–13 (continued) Round HSS Dimensions and Properties												
Shape	Design Wall Thickness, <i>t</i>	Nominal Wt.	Area, <i>A</i>	<i>D/t</i>	<i>I</i>	<i>S</i>	<i>r</i>	<i>Z</i>	Torsion			
	in.								lb/ft	in. ²	in. ⁴	in. ³
	in.								lb/ft	in. ²	in. ⁴	in. ³
HSS7.50×0.500	0.465	37.42	10.3	16.1	63.9	17.0	2.49	23.0	128	34.1		
×0.375	0.349	28.56	7.84	21.5	50.2	13.4	2.53	17.9	100	26.8		
×0.312	0.291	23.97	6.59	25.8	42.9	11.4	2.55	15.1	85.8	22.9		
×0.250	0.233	19.38	5.32	32.2	35.2	9.37	2.57	12.3	70.3	18.7		
×0.188	0.174	14.70	4.00	43.1	26.9	7.17	2.59	9.34	53.8	14.3		

Datos:

$$A = 10.3 \text{ in}^2 ; r = 2.49 \text{ in} ; F_y = 35 \text{ ksi} ; F_u = 50 \text{ ksi} ; E = 29,000 \text{ ksi} ; L = 241.2 \text{ in}$$

Cálculos:

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2 * 29000}{\left(\frac{241}{2.49}\right)^2} = 30.55 \text{ ksi}$$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] * F_y = \left[0.658^{\frac{35}{30.55}}\right] * 35 = 21.67 \text{ ksi}$$

$$\phi P_n = \phi * F_{cr} * A = 0.9 * 21.67 * 10.3 = 200.9 \text{ kips} = 91.14 \text{ Tn}$$

$$\phi T_n = \phi * F_y * A = 0.9 * 35 * 10.3 = 324.4 \text{ kips} = 146.8 \text{ Tn}$$

$$\phi P_n = 91.1 \text{ Tn} > P_u = 75 \text{ Tn}$$

$$\phi T_n = 146.8 \text{ Tn} > T_u = 75 \text{ Tn}$$

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sistemas de Protección Sísmica por amortiguamiento de fluido viscoso

- ✚ En la actualidad (año 2012), el Perú cuenta con una sólo estructura que tiene como reforzamiento un SAFV: Torre del Aeropuerto Jorge Chavez. Sin embargo a la fecha ya existen diversos proyectos en desarrollo que contarán con el SAFV en un futuro cercano.
- ✚ En el Perú (2012), las oficinas de diseño estructural vienen implementando paulatinamente metodologías de diseño para estructuras con SAFV. El conocimiento de esta tecnología se viene difundiendo en charlas, conferencias, seminarios y publicaciones.

Diseño Estructural del edificio

- ✚ Al estar basada en el diseño por desempeño moderno, la metodología de diseño simplificada permite controlar directamente el daño a partir de una deriva objetivo, el control se genera mediante un incremento del amortiguamiento.
- ✚ El número y propiedades de los amortiguadores que se usan en un edificio son función directa del nivel de desempeño que se pretende alcanzar.
- ✚ Los resultados del estudio indican que para un sismo raro la deriva máxima (9 ‰) se reduciría a 5.8 ‰. Valor con el cual el daño será de nivel moderado.
- ✚ De los niveles de deriva alcanzados se concluye que la aplicación de los SAFV disminuyen la incursión en el rango inelástico de la estructura, esto se traduce en menos daño.
- ✚ Se comprobó la efectividad del método de estimación del coeficiente de amortiguamiento “C” para amortiguadores lineales y no lineales, al haber alcanzado su valor óptimo en pocas iteraciones.

- ✚ Los resultados muestran que cuando se usa un sistema de amortiguamiento lineal, es necesario un coeficiente de amortiguamiento “C” completamente distinto que al usar un sistema no lineal. Mientras que en el primer sistema ($\alpha = 1$) necesitamos de un “C” igual a **420 Tn-s/m**, en el segundo ($\alpha = 0.5$) fué necesario un “C” de **90 Tn-s/m^(1/0.5)** para lograr la misma deriva objetivo.
- ✚ De los esfuerzos encontrados en la estructura, se observó que el introducir un SAFV origina que los esfuerzos cortantes y los momentos flectores en la estructura disminuyan a costa de un incremento en la carga axial de las columnas conectadas a los dispositivos de amortiguamiento.
- ✚ Al analizar las fuerzas en los amortiguadores, se observó que las fuerzas axiales en los amortiguadores lineales son mayores que las experimentadas en los amortiguadores no lineales. Asimismo se identificó una menor dispersión en los valores de estas fuerzas (sistema no lineal).
- ✚ La energía disipada por el sistema de amortiguamiento alcanza valores alrededor del 80% bajo todas las sollicitaciones tiempo historia. Esto responde a la gran cantidad de dispositivos, 56 en total, incluidos en el edificio durante las primeras opciones de diseño.
- ✚ Se identificó que el software Etabs v9.5 requiere utilizar el análisis por vectores de RITZ para proporcionar resultados satisfactorios. El análisis por Eigenectores no funciona para este tipo de modelamiento. Este hecho fué verificado durante el análisis del edificio y utilizando el Software SAP 2000.
- ✚ Finalmente se concluye que es posible optimizar el diseño del SAFV, para ello contamos con una serie de variables como la cantidad, fuerza, posición, características de los dispositivos, entre otros.

Recomendaciones

- ✚ Para hacer uso de la metodología simplificada es necesario cumplir con los requisitos mínimos propuestos por el ASCE, estos también ayudan a optimizar el proceso de estimación del valor de “C”. Mientras se cuente con una estructura regular y la cantidad de modos no sea cuantiosa, la estimación será más acertada ya que esta se basa únicamente en el primer modo.

- ✚ En la medida de lo posible, y conciliando con la arquitectura, se recomienda alejar los dispositivos de fluido-viscoso del centro de masa; de ese modo trabajarán en la zona de máximas velocidades logrando mayor efectividad.
- ✚ Siempre iniciar la metodología propuesta definiendo un objetivo de desempeño ajustado al presupuesto económico asignado.



BIBLIOGRAFÍA

- ✚ **ASCE 2010.** ASCE 7-10: Minimum design load for building and other structures. *American Society of Civil Engineers, Reston, VA.*
- ✚ **Kit Miyamoto, Hideki.** Probabilistic Seismic Risk Identification of Steel Building with Viscous Dampers. *Tokyo Institute of Technology, Mayo 2010.*
- ✚ **M.Determan, Lon; J. S. Gilani, Amir; Kit Miyamoto, H.** Seismic Retrofit of a Concrete Framed High-Rise Historic Building Using Supplementary Damping. *Miyamoto International, Inc. Structural and Earthquake Engineers – West Sacramento, CA.*
- ✚ **Jenn-Shi Hwang.** Seismic Design of Structures with Viscous Dampers. *International Training Program for Seismic Design of Buildings Structures.*
- ✚ **Wei Liu, Mai Tong, George C. Lee.** Simple procedure for preliminary design of structural dampers. 13th World Conference of Earthquake Engineering. *Vancouver, B.C., Canada. August 1-6, 2004. Paper No. 2021.*
- ✚ **Ajeet S. Kokil and Manish Shrikhande.** Optimal Placement of Supplemental Dampers In Seismic Design of Structures. *Department Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee.*
- ✚ **Franklin Y. Cheng, Hongping Jiang, Kangyu Lou.** Smart Structures. *CRC Press 2008.*
- ✚ **TAYLOR DEVICES INC.** Earthquake Protective Systems for Buildings, Bridges, and other structures. *North Tonawanda, NY. Junio 2007.*
- ✚ **FEMA Mitigation Division.** Multihazard Loss Estimation Methodology Hazus. *MH 2.0, Earthquake Model.*
- ✚ **Villareal Castro, Genner y Oviedo Sarmiento, Ricardo.** Edificaciones con Disipadores de Energía. *Libro Premio Nacional ANR 2008. Lima, Perú 2009.*

- ✚ **Burgos Namuche, Maribel.** Disipación de Energía Sísmica para el diseño y reforzamiento de las edificaciones” – *Charla CIP, Capítulo de Ingeniería Civil.*

- ✚ **Morales, Roberto y Oviedo, Ricardo.** Analisis Inelástico y control de la respuesta sísmica de Edificios utilizando disipadores de Energía.

- ✚ **Kit Miyamoto, H. y Gilani, Amir.** Design of a New Steel-Framed Building Using ASCE 7 Damper Provisions. *ASCE 2008 “Structures 2008: Crossing Borders”.*

- ✚ **TERATEC INC.** - Fluid Viscous Dampers / Lock Up Devices / Shock Absorbers. <http://www.teratec.ca/category.aspx?catid=11244>.

- ✚ **Ricardo Ramon Oviedo Sarmiento.** Dispositivos pasivos de disipacion de energía para diseño sismorresistente de estructuras. Tesis de Maestria. *Universidad Nacional de Ingenieria 2008.*

- ✚ **Trevor E. Kelly, S.E. In Structure Damping and Energy Dissipation.** Design Guidelines Holmes Consulting Group, New Zealand, 2001.

- ✚ **Muñoz A.** Ingeniería Antisímica. *Fondo editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 1999.*

- ✚ **Ottazi, G.** Apuntes del curso de Concreto Armado I. *Fondo editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 2010.*

- ✚ **Winter, Craig.** Fotos de proyectos a nivel Mundial. *TAYLOR DEVICES INC.*