

# **EDIFICACIONES CON DISIPADORES VISCOSOS**

---

**Ph.D. Genner Villarreal Castro**  
**Ing. Marco Díaz La Rosa Sánchez**

Lima – Perú

2016

# **EDIFICACIONES CON DISIPADORES VISCOSOS**

**Primera Edición Setiembre 2016**

Tiraje: 1000 ejemplares

Diagramación: Víctor Dionicio Torres

Carátula: Disipadores de Energía Sísmica Edificio GERPAL

Centro Empresarial Reducto - LIMA - PERU

Estilo: Brenda de Jesús Crisanto Panta

Autores:

© Ph.D. Genner Villarreal Castro

© Ing. Marco Díaz La Rosa Sánchez

Editor:

© Ph.D. Genner Villarreal Castro

Calle Pablo Picasso 567 Urb. El Bosque

Trujillo – Perú

Teléfono 202946 / 950907260

[www.gennervillarrealcastro.blogspot.pe](http://www.gennervillarrealcastro.blogspot.pe)

Impresión:

Editora & Imprenta Gráfica Norte S.R.L.

Calle Oswaldo Herculles 401 Urb. Los Granados

Trujillo – Perú

Teléfono 402705 / 969960030

[graficanorte@hotmail.com](mailto:graficanorte@hotmail.com)

Setiembre, 2016

©Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2016-12733

ISBN: 978-612-00-2419-5

Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización de los Autores.

Recientes sismos han mostrado que los edificios diseñados y construidos de acuerdo a los códigos más recientes proveen una buena respuesta, pero el costo de reparación de daños y el tiempo necesario para implementar estas reparaciones son más grandes que las anticipadas. Diversos esfuerzos en Estados Unidos, Japón y Rusia, se han centrado en desarrollar criterios de diseño sísmico y procedimientos para asegurar objetivos específicos de desempeño. El incremento en las fuerzas de diseño no mejora todos los aspectos del desempeño. Tres técnicas innovadoras han sido propuestas para usarse individualmente o en combinación, con la finalidad de mejorar el desempeño sísmico de los edificios: aislamiento sísmico, dispositivos suplementarios de disipación de energía y control estructural activo o híbrido. Esta investigación está orientada a la metodología de cálculo de edificaciones con dispositivos pasivos de fluido viscoso.

En la actualidad, dicho sistema constructivo se usa con mucha frecuencia en la práctica y se considera un campo abierto en la investigación sísmica; representando el presente trabajo un aporte importante en la actualización de los métodos de cálculo de edificaciones con disipadores de energía viscosos.

Después de realizar el análisis dinámico del edificio, el diseño de los disipadores fue hecho para obtener un amortiguamiento efectivo acorde con las distorsiones de los requerimientos de la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente. Como resultado, se obtuvo, que con los disipadores se puede reducir las fuerzas internas de diseño; también los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de los entrepisos, y, finalmente, se obtuvo la influencia de los disipadores de energía.

La presente investigación consta de 4 capítulos, conclusiones y bibliografía.

En el primer capítulo, se analiza el estado del arte en sistemas de protección sísmica, con énfasis en los disipadores de fluido viscoso, revisando la Norma ASCE 7-10 y detallando el proceso de cálculo de la rigidez del dispositivo, el coeficiente de amortiguamiento y exponente de velocidad.

En el segundo capítulo, se presenta la metodología de cálculo de edificaciones sin disipadores de energía, dando un enfoque completo del mismo, así como el proceso de escalamiento de acelerogramas al espectro de diseño y la determinación del sismo de diseño.

En el tercer capítulo, se detalla la metodología de cálculo de edificaciones con disipadores de energía, determinando los objetivos de diseño, propiedades del disipador y obteniendo la respuesta de la estructura con disipadores de energía de fluido viscoso.

En el cuarto capítulo se evalúan los resultados de desplazamientos, distorsiones de entrepiso, esfuerzos en los elementos de corte, aceleraciones, velocidades, modos y períodos

de vibración. Luego, se agrupan los dispositivos por niveles de fuerza y eligen los tipos de disipadores viscosos.

En las conclusiones se discuten los resultados, en las recomendaciones se dan los aspectos necesarios para una correcta modelación y en las líneas futuras de investigación se mencionan algunas posibles orientaciones de temas de investigación.

La presente investigación está dirigida a ingenieros civiles, postgraduandos e investigadores en el área de Mecánica Estructural.

Ph.D. Genner Villarreal Castro  
genner\_vc@hotmail.com

Ing. Marco Díaz La Rosa Sánchez  
mdiazlarosas@upao.edu.pe

Lima, Setiembre del 2016

# CAPÍTULO 1

## ESTADO DEL ARTE

### 1.1 SISTEMAS DE DISEÑO SISMORRESISTENTE

Para asegurar un adecuado comportamiento de las estructuras frente a los sismos, el diseño de estas, puede plantearse de dos maneras. La primera vendría a ser a base de un diseño convencional, el cual consiste en crear estructuras lo suficientemente rígidas pero a su vez dúctiles, es decir, que tengan la capacidad de incursionar en el rango inelástico.

Esto se puede conseguir empleando sistemas estructurales apertados, duales, así como elementos de reforzamiento como arriostres metálicos, entre otros, de tal forma que la estructura diseñada sea capaz de resistir las diferentes sollicitaciones sísmicas producidas por una excitación telúrica.

Cabe mencionar que dentro de este primer enfoque, deben también tomarse en cuenta algunos criterios importantes, tales como el suelo de fundación, el cual influye en el comportamiento dinámico de la estructura; así como el material a emplearse, siendo, por ejemplo, el acero más dúctil que el concreto. También se debe de tomar en cuenta la adecuada estructuración del proyecto, tratando en este punto de evitar las irregularidades tanto en planta, como en elevación.

En este primer enfoque es de esperarse que las estructuras, al ser sometidas a sismos de altas magnitudes, como los moderados y raros, se presente un comportamiento inelástico. Al realizar este trabajo inelástico, la estructura sufre daños estructurales, en la mayoría de los casos irreparables. Es importante indicar, que en estructuras esenciales como hospitales, compañía de bomberos y otros, estos daños no se permiten.

La segunda forma de diseñar edificaciones sismo-resistentes es incorporando dispositivos de disipación de energía, cuya función principal es incrementar el amortiguamiento, reduciendo los desplazamientos laterales, velocidades y aceleraciones.

### 1.2 BALANCE ENERGÉTICO

La ecuación 1.1 muestra la relación de la conservación de la energía en un sistema estructural expuesto a una excitación sísmica.

$$E_L = E_K + E_S + E_A + E_D \quad (1.1)$$

Dónde:

$E_L$  - Energía absoluta de entrada del movimiento sísmico.

$E_K$  - Energía cinética.

$E_S$  - Energía de deformación elástica recuperable.

$E_A$  - Energía de amortiguamiento.

$E_D$  - Energía irrecuperable disipada por el sistema estructural a través de la inelasticidad.

Para que el sistema estructural sea capaz de soportar las solicitaciones sísmicas, la capacidad de respuesta de esta debe ser mayor que la demanda sísmica. En pocas palabras la energía de entrada ( $E_L$ ) debe ser absorbida o disipada por la suma de la energía cinética ( $E_K$ ), elástica ( $E_S$ ), de amortiguamiento ( $E_A$ ) e inelástica ( $E_D$ ).

Asumiendo que la energía de entrada es constante, será evidente que el desempeño estructural puede ser optimizado de dos formas:

- A través del método convencional, es decir, aumentando la rigidez y la ductilidad en el sistema, incrementando así la energía por deformación inelástica ( $E_D$ ).
- Incrementando el amortiguamiento interno ( $E_A$ ) mediante la incorporación de dispositivos suplementarios colocados en lugares estratégicos.

La primera alternativa representa al diseño clásico, en donde se trabaja en función de la resistencia y la ductilidad de la estructura para que esta soporte las diferentes solicitaciones sísmicas producidas por un movimiento telúrico. El ingeniero a cargo del diseño se apoya en el amortiguamiento inherente de la estructura, la misma que oscila entre 1% y 5% (edificaciones de concreto armado). Este diseño permite cierto grado de daño en la estructura pero sin que esta llegue al colapso.

La segunda alternativa consiste en anexar a la estructura dispositivos suplementarios, estos tienen el propósito de maximizar el amortiguamiento del sistema, reduciendo la demanda de disipación de energía a través de la inelasticidad ( $E_D$ ) en los diferentes elementos estructurales, tales como columnas y placas, evitando así posibles fallas o daños en los mismos.

En la figura 1.1 se muestra el balance energético de una estructura sin disipadores de energía sísmica y se puede apreciar que la energía de entrada es completamente absorbida por la estructura. En la figura 1.2 se observa la distribución de energía para la misma edificación, pero esta vez considerando dispositivos de disipación de energía dentro del diseño, en este caso, vemos que la energía de amortiguamiento aumenta, reduciendo a su vez la demanda de disipación de energía por ductilidad. Donde, la energía de ingreso del sismo se representa con el color verde, la energía que absorbe el material de construcción con el color mostaza, la energía que absorbe el disipador de energía con el color rojo, la energía cinética con el color amarillo y la energía potencial con el color azul.

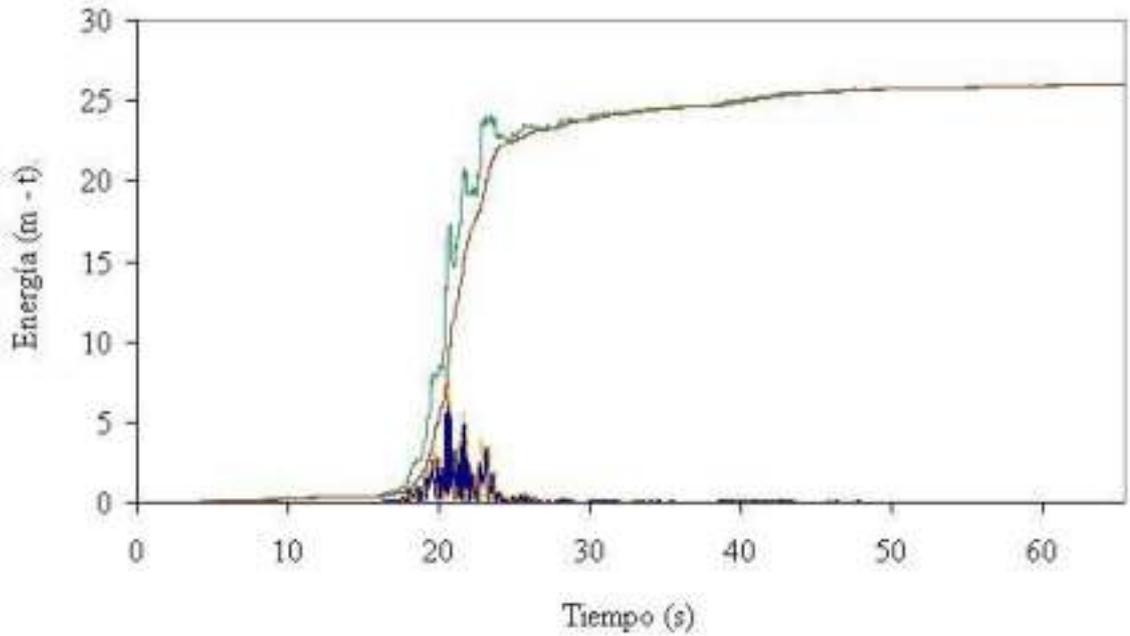


Fig. 1.1 Distribución de energía en un edificio sin disipadores  
 Fuente: Edificaciones con disipadores de energía - Villarreal & Oviedo

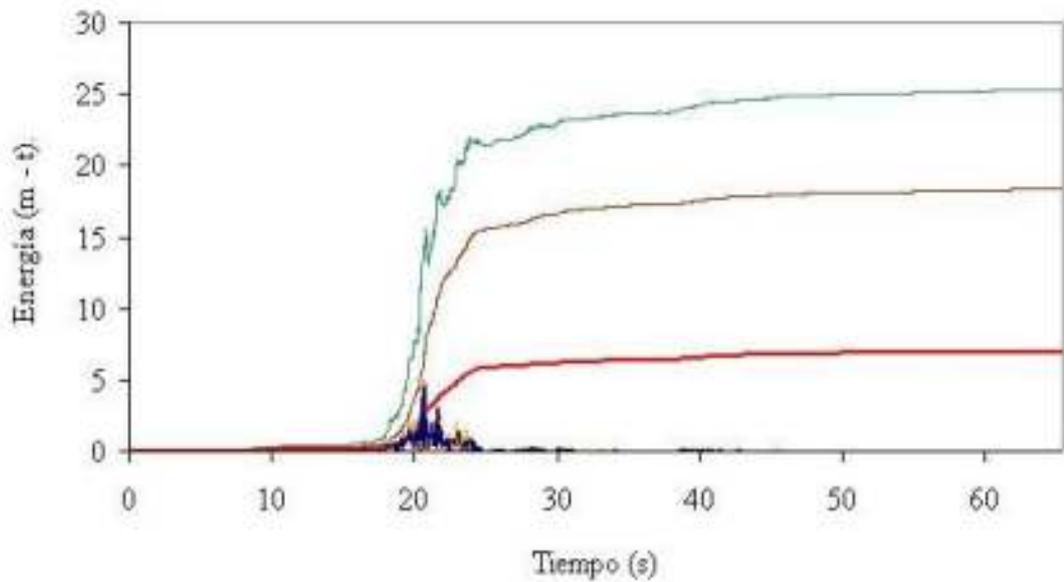


Fig. 1.2 Distribución de energía en un edificio con disipadores  
 Fuente: Edificaciones con disipadores de energía - Villarreal & Oviedo

### 1.3 SISTEMAS MODERNOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

Los diferentes sistemas de protección sísmica empleados en la actualidad tienen por objetivo el control de los desplazamientos de la estructura siguiendo una o varias de las siguientes alternativas:

- Por medio de dispositivos que anexados a la estructura absorban o disipen la energía de entrada del sismo.
- Por medio de mecanismos que al iniciar la excitación sísmica, ejerzan fuerzas buscando neutralizar la acción de esta.
- Por medio de dispositivos que modifiquen las propiedades y la respuesta dinámica de la estructura, buscando reducir la energía de entrada y evitando la resonancia.

De acuerdo a las alternativas expuestas, los sistemas de control estructural pueden clasificarse en 4 grandes grupos: los sistemas pasivos, semiactivos, híbridos y activos, cada uno de los cuales posee diferentes tipos de dispositivos que producen el correspondiente control requerido.

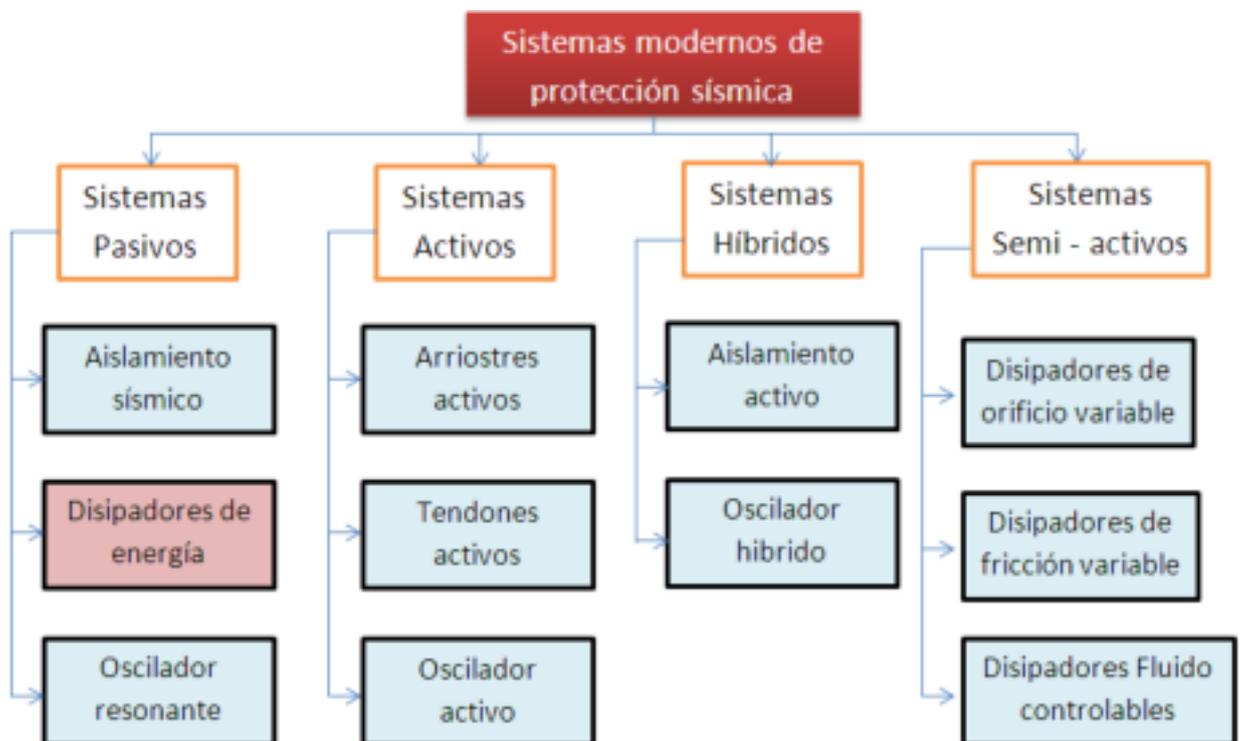


Fig. 1.3 Clasificación de los sistemas modernos de protección sísmica

Los disipadores de energía son dispositivos, como su nombre lo indica, que disipan grandes cantidades de energía, asegurándose, de esta manera, que otros elementos estructurales no sean sobre exigidos, lo que podría ocasionar importantes daños en la estructura. Estos dispositivos captan la fuerza sísmica a través del comportamiento plástico de metales dúctiles, la fricción entre superficies en contacto bajo presión, las deformaciones de corte de polímeros, la pérdida de energía en fluidos viscosos circulando a través de orificios y así evitan que el edificio reciba todo el impacto, generando una reducción en las deformaciones de la estructura.

El ASCE 7-10 en su capítulo 18 señala que estos dispositivos se clasifican según su comportamiento en 3 categorías diferentes: dependientes del desplazamiento, dependientes de la velocidad y dependientes del desplazamiento y de la velocidad.

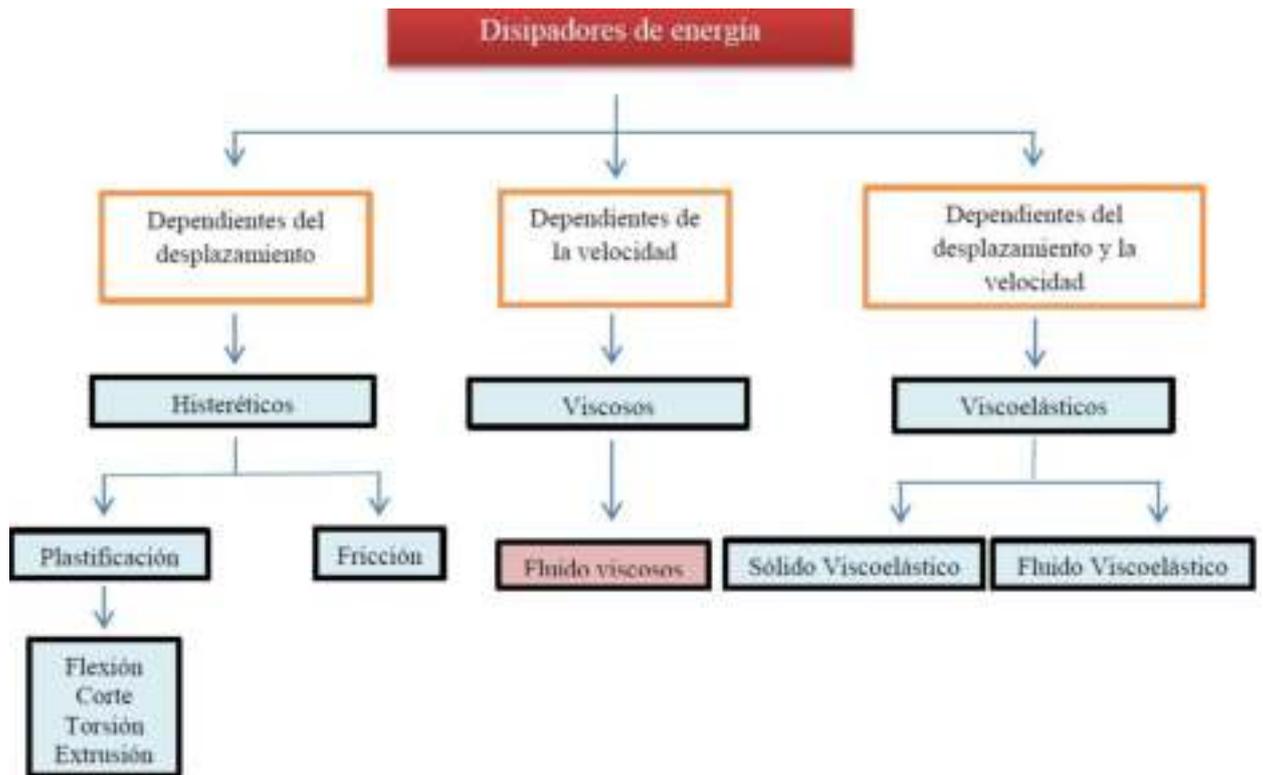


Fig. 1.4 Clasificación de los disipadores de energía

#### 1.4 DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO

Los disipadores viscosos son dispositivos que dependen de la velocidad y no del desplazamiento, razón por la cual no varía la rigidez de la estructura, ni tampoco incrementan los esfuerzos en los elementos estructurales.

Actualmente existen dos grandes fabricantes: Kajima Corporation de Japón y Taylor Devices Incorporation de Estados Unidos. Los disipadores manufacturados por ambas empresas se basan en el mismo concepto: disipar energía mediante el flujo forzado de un fluido (aceite o silicona).

En esta investigación, se emplearon disipadores viscosos Taylor, por ser el principal fabricante a nivel mundial y el que puede encontrarse en el mercado nacional.

Los disipadores viscosos Taylor se vienen manufacturando desde hace aproximadamente 50 años, donde su uso era limitado solo para aplicaciones militares.

Con el fin de la guerra fría en 1990 se permitió la comercialización para el público en general. Dado que esta tecnología era confiable y había demostrado un buen comportamiento a través de las décadas, la implementación a estructuras comerciales se llevó a cabo rápidamente.

Fueron pocas las empresas capaces de hacer la transición de su tecnología para el mercado comercial. Taylor Devices Inc., con sede en Nueva York, es un fabricante de productos de disipación de energía para uso militar y de defensa, iniciando en 1987 sus salidas comerciales para sus productos de defensa.

Hasta la fecha, más de 240 estructuras están empleando estos disipadores viscosos para obtener un mejor comportamiento estructural ante excitaciones sísmicas o de viento.

En la figura 1.5 se muestran los componentes de los disipadores viscosos.

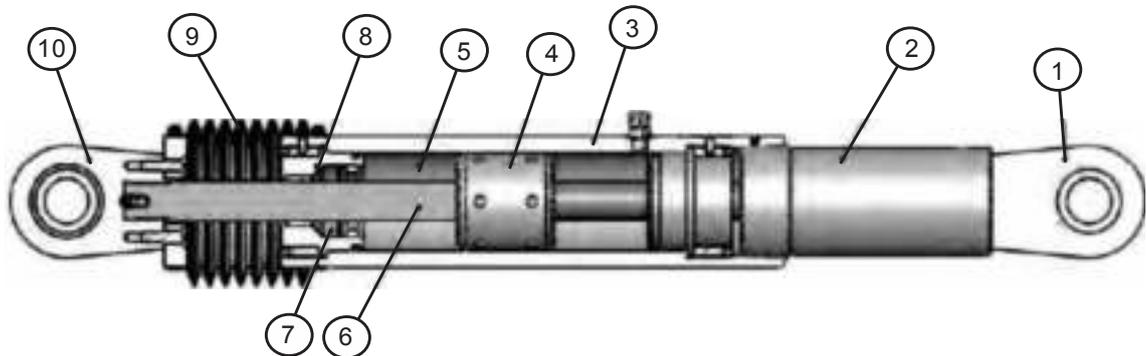


Fig. 1.5 Componentes de los disipadores viscosos

1. Horquilla final con tratamiento térmico de aleaciones de acero con protección contra la corrosión.
2. Acero al carbono forjado en aluminio con protección contra la corrosión.
3. Cilindro con tratamiento térmico de aleaciones de acero, protegido contra la corrosión a través de placas o pintura.
4. Cabeza del pistón de acero sólido o de bronce.
5. Fluido viscoso, silicona incompresible.
6. Vástago de acero inoxidable.
7. Sellos / rodamientos de sello, juntas dinámicas.
8. Tapa con tratamiento térmico de aleaciones de acero, protegido contra la corrosión a través de placas o pintura.
9. Fuelle, nylon reforzado de neopreno.
10. Cojinete esférico forjado con aleación de calidad aeronáutica.

El disipador fluido viscoso (figura 1.6) consiste en esencia de dos elementos: un cilindro de alta resistencia y de un pistón (ambos de acero inoxidable). El cilindro contiene en su interior un fluido perteneciente a la familia de las siliconas (es resistente al fuego, estable a los cambios de temperatura y a los largos períodos de tiempo).

El pistón tiene en uno de sus bordes una cabeza (figura 1.7) con pequeños orificios. Esta divide el interior del cilindro en dos cámaras.

Ante una excitación sísmica, se produce el deslizamiento del pistón dentro del cilindro, este movimiento ocasiona el paso del fluido de una cámara a otra (figura 1.8), a su vez genera una presión diferencial, la misma que origina la fuerza de amortiguamiento.

Debido al desplazamiento interno del pistón se genera la conversión de energía cinética en calor, lo que produce la expansión y contracción térmica del fluido, debido a esto el

cilindro contiene una tercera cámara, denominada de acumulación, que permite que se puedan compensar las variaciones de fluido (volumen).

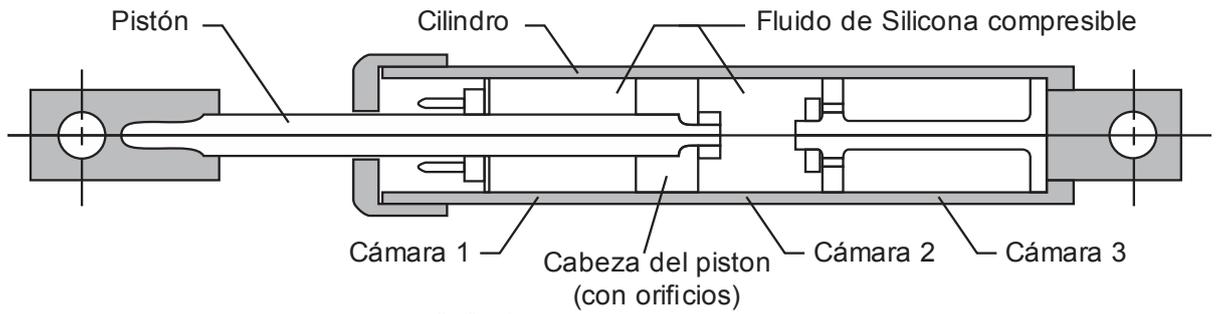


Fig. 1.6 Corte de un disipador viscoso

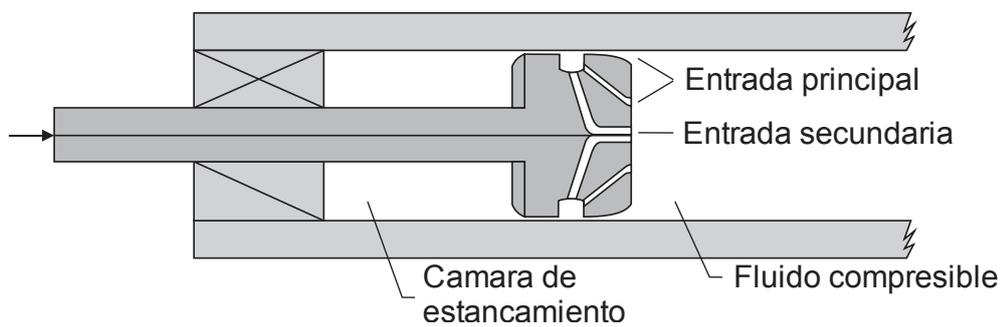


Fig. 1.7 Detalle de la cabeza del pistón

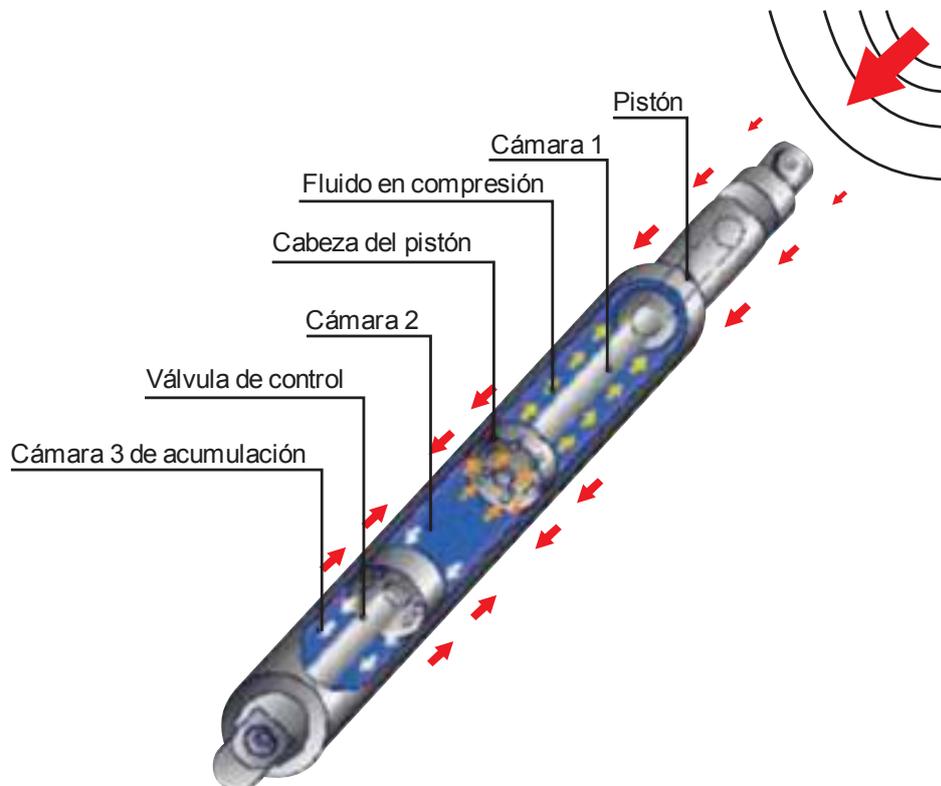


Fig. 1.8 Funcionamiento de los disipadores viscosos

## 1.5 ECUACIÓN GENERAL

Como se acaba de mencionar, la forma de trabajo de estos disipadores es simple, durante un sismo la estructura experimenta desplazamientos relativos entre los pisos, los que a su vez generan movimientos y aceleraciones en el dispositivo viscoso, el mismo que regula el paso del fluido a través de pequeños orificios, la energía sísmica se disipa tan rápido como circula este fluido de una cámara a otra.

La fuerza generada en cada disipador viscoso se caracteriza por la siguiente ecuación:

$$F = CV^\alpha \quad (1.2)$$

Dónde:

F - fuerza en el disipador

C - constante de amortiguamiento

V - velocidad relativa en el amortiguador

$\alpha$  - coeficiente que varía entre 0.4 y 0.6 para edificaciones

Es importante observar que no hay ninguna fuerza de resorte en esta ecuación. La fuerza del disipador varía sólo con la velocidad. Para una velocidad dada, la fuerza será la misma en cualquier punto del dispositivo.

Para estimar el valor del coeficiente de amortiguamiento (C) para dispositivos no-lineales se puede emplear la siguiente ecuación extraída del FEMA 274

$$\beta_H = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{ij}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (1.3)$$

Dónde:

$\beta_H$  - amortiguamiento viscoso de la estructura

$\lambda$  - parámetro lambda

$C_j$  - coeficiente de amortiguamiento del disipador j

$\phi_{ij}$  - desplazamiento relativo entre ambos extremos del disipador j en la dirección horizontal  
(con nuestro sismo de diseño)

$\theta_j$  - ángulo de inclinación del disipador j

A - amplitud de desplazamiento del modo fundamental (desplazamiento modal de la losa del último nivel)

$\omega$  - frecuencia angular

$m_i$  - masa del nivel i

$\phi_i$  - desplazamiento del nivel i (con nuestro sismo de diseño)

El parámetro  $\lambda$  es dependiente del valor del exponente de velocidad  $\alpha$  y el FEMA 274 nos facilita la tabla 1.1

Tabla 1.1

Exponente $\alpha$	Parámetro $\lambda$
0.25	3.7
0.50	3.5
0.75	3.3
1.00	3.1
1.25	3.0

El ángulo de inclinación  $\theta_j$  y el desplazamiento relativo del disipador de energía  $\phi_{ij}$  se muestran en la figura 1.9

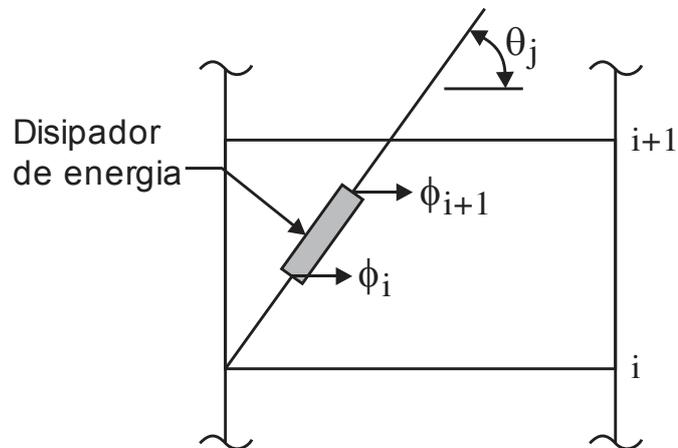


Fig. 1.9 Ángulo de inclinación y desplazamiento relativo del disipador de energía

Es importante señalar que la ecuación 1.4 considera un coeficiente de amortiguamiento constante para todos los dispositivos. El mismo que se puede estimar una vez se conozca las demás variables. De esta manera, despejando la ecuación 1.3 obtenemos:

$$\sum C_j = \frac{\beta_H \cdot 2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \left( \sum_i m_i \phi_i^2 \right)}{\lambda \left( \sum \phi_{ij}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j \right)} \quad (1.4)$$

Así mismo, el valor de  $\beta_H$  depende del amortiguamiento objetivo que se desee alcanzar, este valor se puede calcular empleando el siguiente procedimiento:

1. Se determina el factor de reducción de respuesta B

$$B = \frac{D_{\text{máx}}}{D_{\text{objetivo}}} \quad (1.5)$$

Donde la distorsión máxima  $D_{\text{máx}}$  se obtiene por medio del análisis tiempo-historia para el sismo de diseño seleccionado y la distorsión objetivo  $D_{\text{objetivo}}$  por la Norma de Diseño Sismo-Resistente E030 o por medio de la relación daño-distorsión de la metodología HAZUS.

2. Se calcula el amortiguamiento efectivo  $\beta_{\text{eff}}$

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_0)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{\text{eff}})} \quad (1.6)$$

Donde  $\beta_0$  es el amortiguamiento inherente de la estructura que usualmente se fija en 5% para estructuras de concreto armado.

De esta manera, se obtiene el amortiguamiento efectivo, este incluye la acción del disipador de energía y el amortiguamiento inherente de la estructura.

3. Descontando el amortiguamiento inherente se obtiene el amortiguamiento viscoso que se requiere.

$$\beta_H = \beta_{\text{eff}} - 5\% \quad (1.7)$$

El exponente " $\alpha$ " define la reacción del dispositivo ante los impactos de velocidad, a su vez, determina el comportamiento histerético de los disipadores empleados.

Los disipadores viscosos tienen un valor  $\alpha = 1$  y son llamados "disipadores lineales", en ellos la fuerza del disipador es directamente proporcional a la velocidad relativa.

Los disipadores con un valor de  $\alpha$  mayor o menor de 1, son los llamados "disipadores no lineales". Aquellos con valores menores a 1 son efectivos para minimizar los pulsos de alta velocidad, mientras aquellos con el valor de  $\alpha$  mayor a 1, habitualmente no son empleados en edificaciones, porque necesitarían de grandes velocidades para incrementar significativamente la fuerza en el disipador.

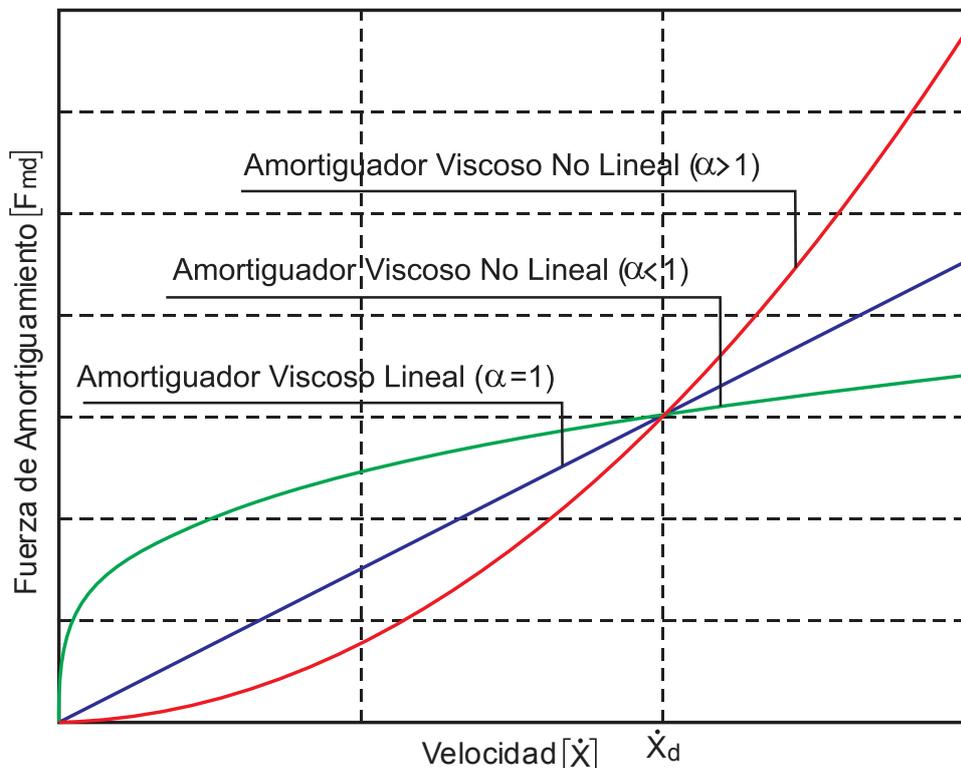


Fig. 1.10 Relación Velocidad vs. Fuerza del Disipador

En la figura 1.10 se puede apreciar la eficiencia del Disipador Viscoso No Lineal ( $\alpha < 1$ ), ya que para pequeñas velocidades relativas, puede desarrollar una mayor fuerza de amortiguamiento en comparación a los otros tipos de Disipadores ( $\alpha = 1$  y  $\alpha > 1$ ).

En la mayoría de los casos, el valor del exponente de velocidad  $\alpha$  está comprendido en el rango de 0.3 a 1.0. Los valores de  $\alpha$  que han demostrado ser los más empleados para el diseño sísmico de edificios y de puentes están en el orden de 0.4 a 0.5

Para el caso de puentes con bajas solicitaciones sísmicas, se puede emplear un valor de  $\alpha = 2$ , mientras que para todas las estructuras diseñadas bajo cargas de viento se suelen emplear valores en el rango de 0.5 a 1

## 1.6 RIGIDEZ DEL DISPOSITIVO “K” (RIGIDEZ DEL BRAZO METÁLICO)

Como ya se mencionó, anteriormente, este dispositivo solo depende de la velocidad para controlar la respuesta dinámica de la estructura. Para poder lograr esto, en la modelación se debe considerar la rigidez del sistema con un valor muy alto.

Es así que la rigidez que se debe tomar para la modelación es la del brazo metálico (que conecta el dispositivo con la estructura). Esto debido a que la rigidez axial de este es mucho mayor que la del disipador. La rigidez de este brazo se calcula con la ecuación 1.8

$$K = \frac{EA}{L} \quad (1.8)$$

Dónde:

E - módulo de elasticidad del acero

A - área de la sección del brazo metálico

L - longitud del brazo metálico

Es importante que este perfil metálico tenga un área (A) significativa, esto para minimizar las deflexiones elásticas en el brazo y maximizar las del disipador, logrando, de esta manera, que el dispositivo se active completamente ante una excitación sísmica.

Asimismo, es importante que el perfil metálico seleccionado tenga suficiente momento de inercia (I) y área (A) para que este tenga suficiente resistencia contra el pandeo en la dirección de compresión.

Para la selección del perfil metálico es muy común emplear perfiles del tipo HSS o PIPE, por las razones de estética y por las facilidades que se obtiene en la instalación.

## 1.7 COMPORTAMIENTO DESPLAZAMIENTO VS FUERZA

Imaginemos un pórtico como el mostrado en la figura 1.11. Este al ser expuesto a una carga sísmica experimenta desplazamientos y sale del equilibrio ( $t_0$ ), para que en un tiempo ( $t_1$ ) alcance su desplazamiento máximo, es en ese instante donde la estructura comienza a

trasladarse hacia la dirección contraria, en un tiempo ( $t_2$ ) regresa nuevamente al equilibrio para que posteriormente alcance nuevamente el desplazamiento máximo ( $t_3$ ).

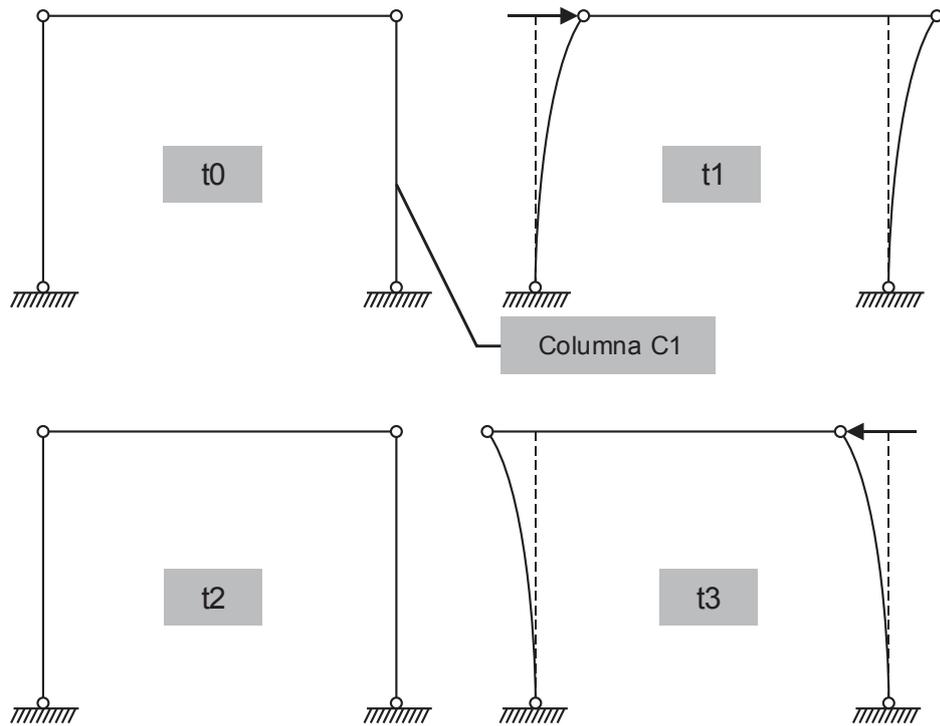


Fig. 1.11 Comportamiento de un pórtico ante una excitación sísmica

Ahora, si sobre este mismo pórtico se anexara un disipador de energía viscoso (figura 1.12), cuando el pórtico llegue a su desplazamiento máximo ( $t_1$ ), la elongación en el dispositivo (producto de la fuerza de tracción) será máxima, cuando el pórtico regresa al equilibrio ( $t_2$ ), las deformaciones en el dispositivo serán igual a cero, pues este también regresa a su posición inicial, y nuevamente la deformación en el disipador (por la fuerza de compresión) será máxima en el tiempo ( $t_3$ ).

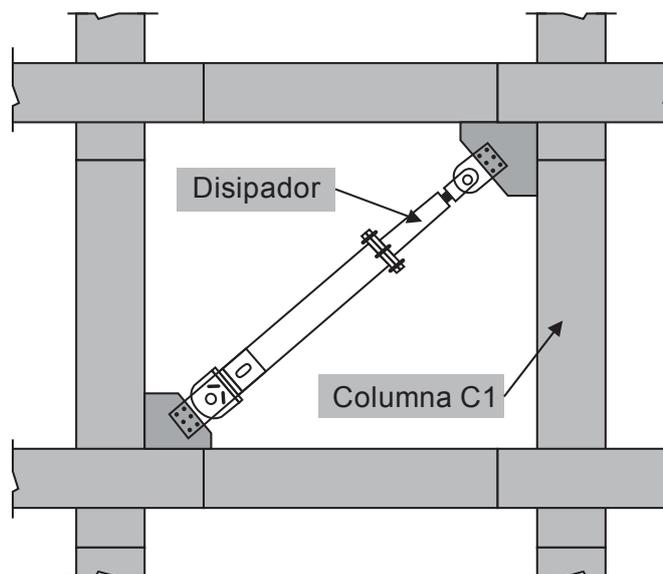


Fig. 1.12 Disipador de energía viscoso en el pórtico de análisis

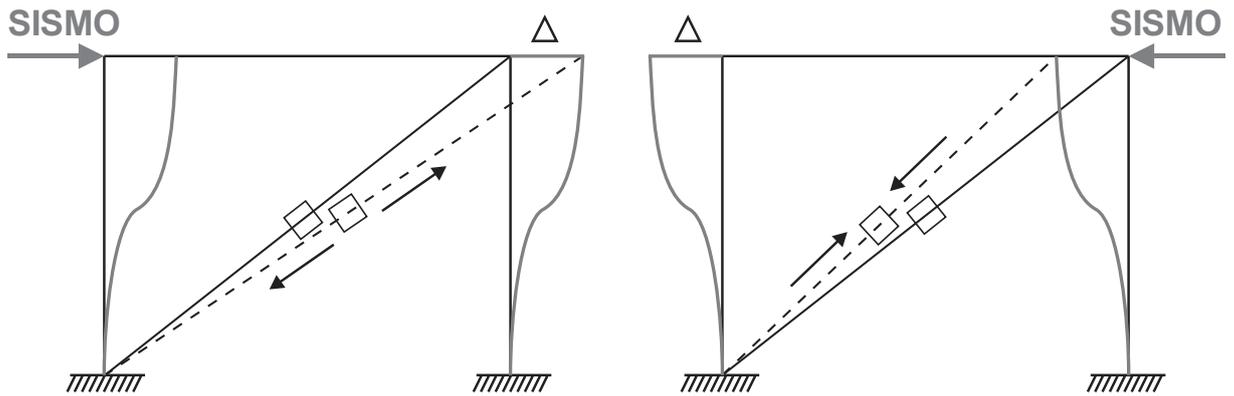


Fig. 1.13 Desplazamientos en el disipador viscoso en los momentos (t1) y (t3)

Fuente: CDV Ingeniería Antisísmica

Por otro lado, el comportamiento del pórtico puede ser idealizado como si fuese un péndulo invertido, tal como se muestra en la figura 1.14, donde  $F$  es la fuerza y  $\Delta$  es el desplazamiento relativo del dispositivo.

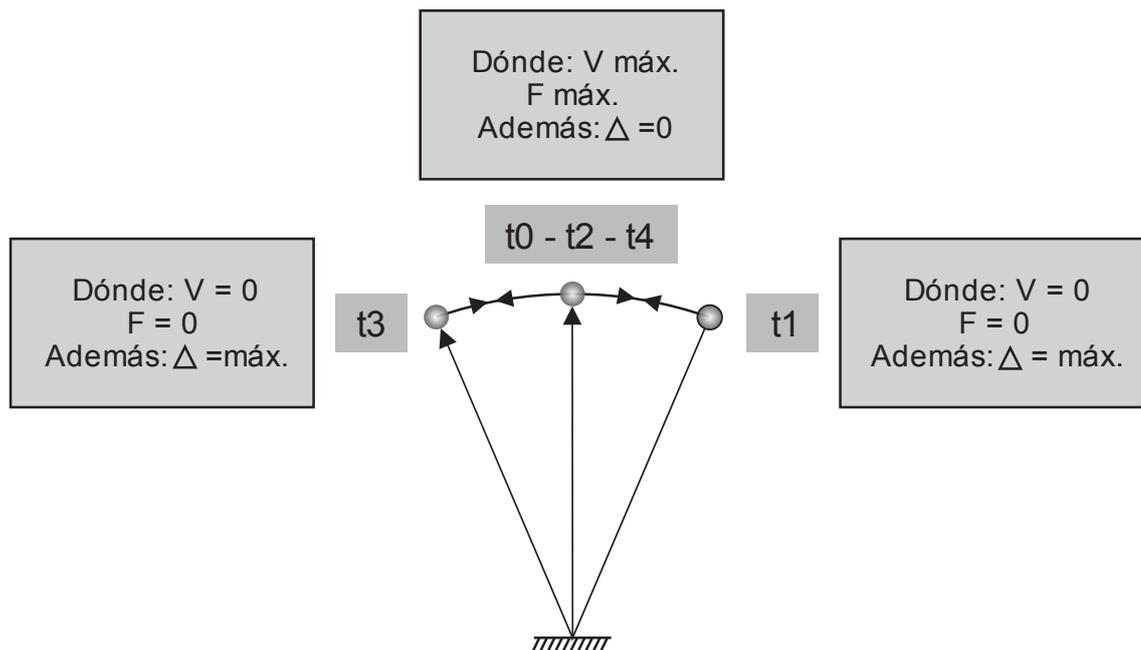


Fig. 1.14 Idealización tipo péndulo invertido del comportamiento de un pórtico ante una excitación sísmica

Como se indicó anteriormente, los disipadores viscosos dependen de la velocidad para disipar energía, tal es así que la fuerza que se genera en estos dispositivos es  $F = CV^\alpha$ . Teniendo en consideración esto, se puede ver que cuando el pórtico llegue a su

desplazamiento máximo ( $t_1$ ) y ( $t_3$ ), la fuerza de amortiguamiento en el dispositivo viscoso será igual a cero, pues en este instante la velocidad es igual a cero.

Asimismo, la fuerza máxima de amortiguamiento ocurre cuando la velocidad es máxima y esto se da cuando el pórtico entra en equilibrio ( $t_2$ ), es decir, cuando el desplazamiento en las columnas es igual a cero.

Así la curva histerética o curva desplazamiento vs fuerza del disipador viscoso queda expresada como la figura 1.15

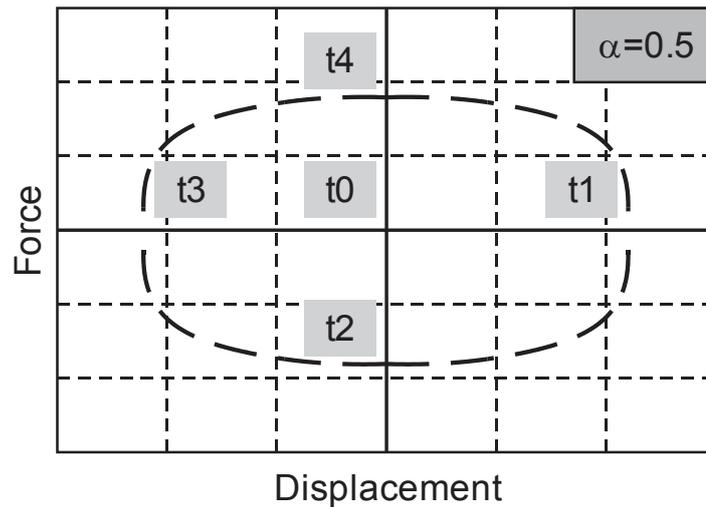


Fig. 1.15 Relación Desplazamiento vs Fuerza (curva histerética) de un disipador viscoso

## 1.8 CRITERIOS DE UBICACIÓN

La mejor ubicación de los disipadores viscosos se consigue a través de un proceso iterativo, en donde el diseñador debe probar diversos modelos y ubicaciones. En este proceso es importante tener en cuenta la arquitectura y el uso del edificio; por esta razón los profesionales encargados del proyecto tanto en arquitectura como en diseño estructural, deben trabajar conjuntamente.

La Norma ASCE 7-10 en su capítulo 18 da algunas recomendaciones que se deben tomar en cuenta:

- La estructura no debe presentar irregularidades.
- Se deben emplear como mínimo dos dispositivos en la dirección a reforzar.
- Se deben disponer los dispositivos en todos los niveles.
- Para no generar torsión se debe buscar la simetría.

Existen diversas configuraciones, sin embargo los que comúnmente se emplean son Chevron y Diagonal, en ambos, se requiere de brazos metálicos para conectar el dispositivo con la estructura.

En la disposición Chevron, el dispositivo se coloca en posición horizontal (en forma paralela al plano del techo), logrando una eficiencia del 100%, debido a que en esta posición, los disipadores absorben las fuerzas horizontales directamente, es decir, que se

emplea toda la capacidad de estos para controlar los movimientos laterales producidos por la excitación sísmica.

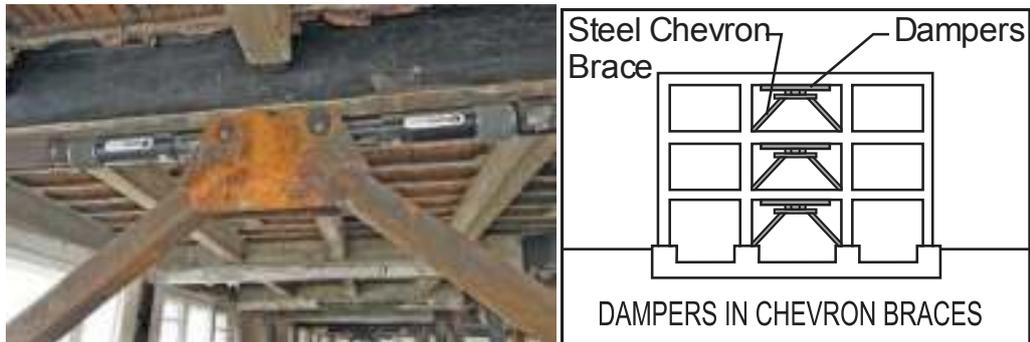


Fig. 1.16 Disposición Chevron

La principal desventaja que se encuentra con el empleo de esta disposición es que produce sobreesfuerzos en la parte intermedia de la viga cercana al disipador. Para controlar estos esfuerzos se emplea un refuerzo adicional a través de planchas o anclajes, tal como se muestra en la figura 1.17



Fig. 1.17 Refuerzo adicional en la disposición Chevron

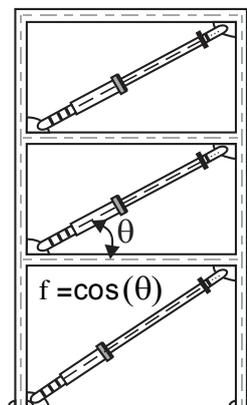


Fig. 1.18 Esquema de la disposición diagonal

En la disposición diagonal, el disipador viscoso se orienta en el ángulo diagonal del pórtico, tal como debe ser ubicado, mostrado en la figura 1.18. El arreglo diagonal tiene

menor eficiencia que el Chevron, ya que, en este caso, solo la componente horizontal participa en la absorción de fuerzas horizontales.

El amortiguamiento que brinde depende del ángulo de inclinación del brazo metálico que va sostener al disipador, mediante la expresión  $f = \cos \theta$

Debido a que el disipador es anexado a la estructura en un nudo rígido (unión viga-columna) no se requiere de ningún refuerzo adicional en ningún elemento del pórtico, siendo así la disposición más económica, pues solo requiere extensores (brazos metálicos) para la instalación de los disipadores.

Como no genera sobreesfuerzos en la estructura, este tipo de arreglo puede ser diseñado e instalado tanto para nuevas estructuras como para las ya existentes que requieran de reforzamiento, siendo así muy efectivo para fines de rehabilitación.

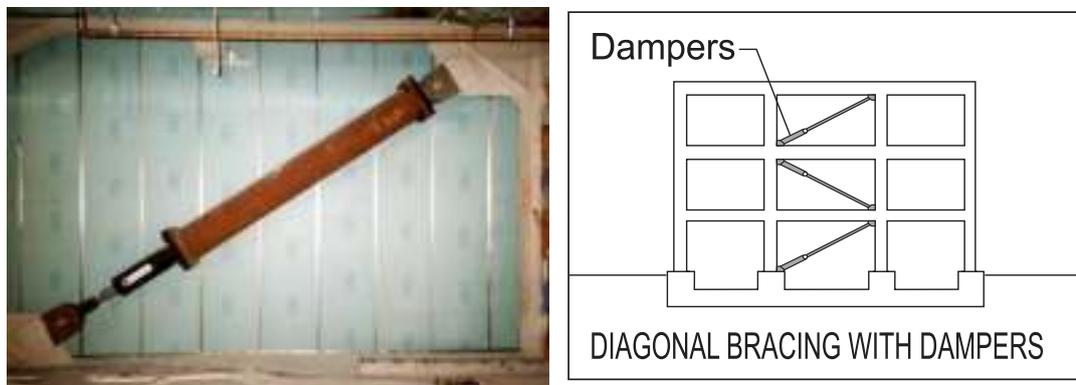


Fig. 1.19 Disposición Diagonal

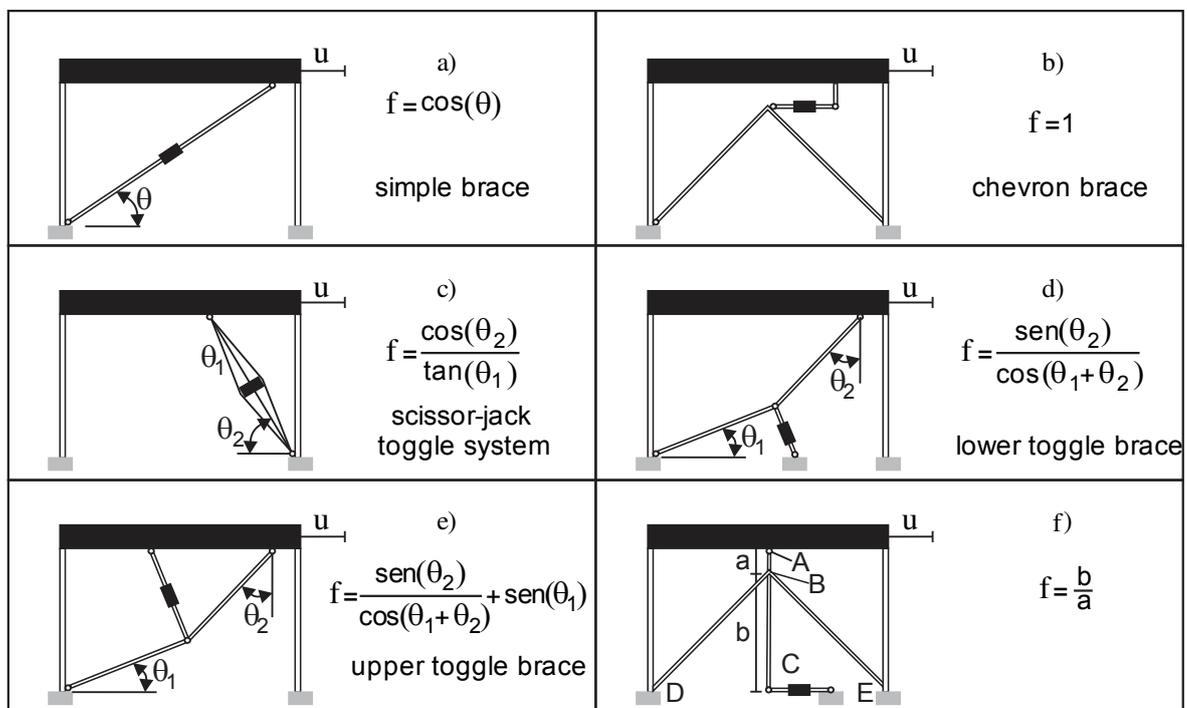


Fig. 1.20 Diferentes configuraciones del disipador viscoso

Fuente: Passive control of linear structures equipped with nonlinear viscous dampers and amplification mechanisms – M. di Paola, G. Navarra

En la figura 1.20 se muestran otros arreglos que también se pueden tomar en cuenta al momento de diseñar el sistema de disipación empleando disipadores viscosos.

## **1.9 RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO**

### **1.9.1 NORMAS Y REQUERIMIENTOS DEL CÓDIGO ASCE 7-10**

La Norma ASCE 7-10 en su capítulo 18 “Requerimientos de diseño sísmico para estructuras con sistemas de disipación” plantea 4 procedimientos para el análisis de estructuras provistas de disipadores.

#### **Procedimientos no lineales**

- Análisis de la respuesta no-lineal tiempo-historia
- Análisis no-lineal estático

#### **Procedimientos lineales**

- Análisis de la respuesta espectral
- Análisis de fuerza lateral equivalente

En nuestro país el procedimiento de análisis para una estructura provista de disipadores de energía se ha fijado hacia el empleo del análisis de la respuesta no-lineal tiempo-historia.

### **1.9.2 RECOMENDACIONES PARA EL ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA**

Los registros sísmicos deben ser apropiadamente seleccionados (deben ser concordantes con las características del suelo de cimentación del proyecto) y escalados individualmente.

Al menos 7 pares de registros sísmicos (en sus componentes horizontales) deben ser empleados para el análisis tiempo-historia, las fuerzas, desplazamientos y velocidades pueden tomarse como el promedio de los obtenidos en el análisis.

Si menos de 7 pares de registros sísmicos son empleados, las fuerzas, desplazamientos y velocidades deben tomarse como el máximo valor obtenido del análisis tiempo-historia.

Para el caso peruano, los especialistas de CDV Ingeniería Antisísmica, recomiendan emplear un mínimo de 3 pares de registros sísmicos, los cuales deben ser escalados a un espectro de diseño, donde el valor de R sea igual a 1, tal como lo señala la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente. Los valores que se tomen para el cálculo de las propiedades del sistema de disipación serán aquellos que se ajusten más al espectro de diseño, considerando una variación máxima de 1,5% entre las derivas obtenidas del análisis tiempo-historia y del análisis con el espectro de diseño.

### 1.9.3 RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE CONEXIONES

Esta Norma señala que las conexiones deben ser evaluadas usando el criterio de diseño por resistencia y que deben ser diseñadas para que resistan las fuerzas, desplazamientos y velocidades del máximo sismo esperado, igual a 1,5 del sismo de diseño.

Para el diseño de las conexiones tener en cuenta que hay algunos elementos que son proporcionados por el mismo proveedor y que se obtienen al comprar el disipador viscoso, todos los demás elementos deberán ser diseñados.

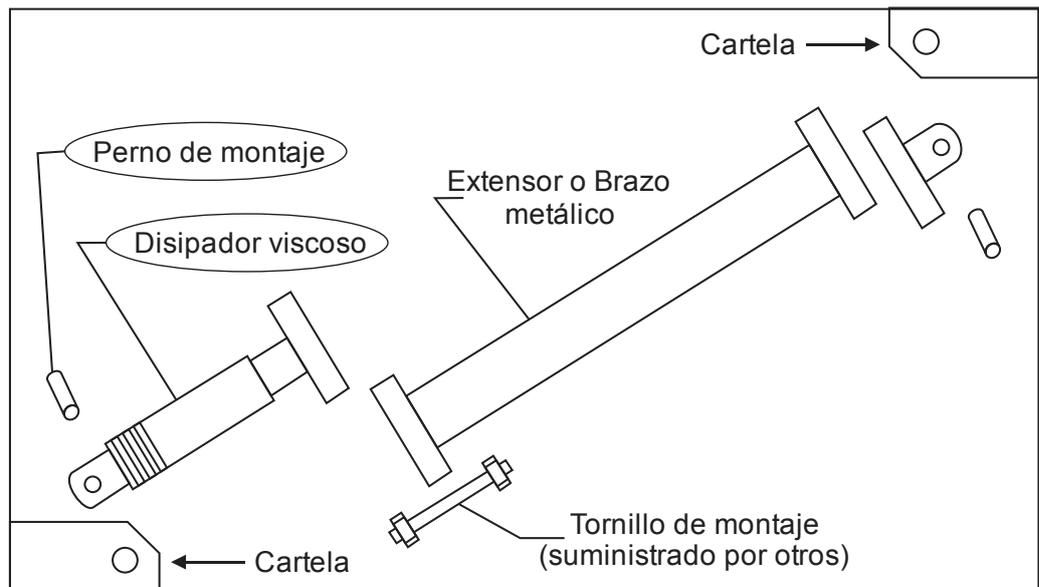


Fig. 1.21 Conexiones en la disposición diagonal

Fuente: Taylor-SAP2000 ETABS modeling

### 1.9.4 RECOMENDACIONES PARA LA MODELACIÓN

La base puede ser modelada como perfectamente empotrada o se puede considerar las propiedades del suelo a través de la interacción suelo-estructura.

El amortiguamiento inherente de la estructura debe ser basado en el tipo de material que se emplee, la configuración y el comportamiento de la estructura y de los elementos no estructurales. A menos de que se pueda probar un amortiguamiento mayor, este se tomará como máximo el 5% del amortiguamiento crítico para todos los modos de vibración.

## CAPÍTULO 2

### EDIFICIO SIN DISIPADORES DE ENERGÍA

#### 2.1 OBJETO DE INVESTIGACIÓN

Para la siguiente investigación se empleó un edificio de oficinas de concreto armado de 8 pisos y presenta una configuración regular tanto en planta como en elevación.

Las dimensiones en planta son de 20 metros en el eje X y de 30 metros en el eje Y. El edificio se va a ubicar geográficamente en la ciudad de Lima, el suelo donde estará plantada la cimentación será grava de buena calidad.

El sistema estructural es aporticado, es decir, está conformado por vigas y columnas en ambas direcciones. Se emplearán en los entrepisos losas macizas de 15 centímetros de espesor, las cuales actuarán como diafragmas rígidos.

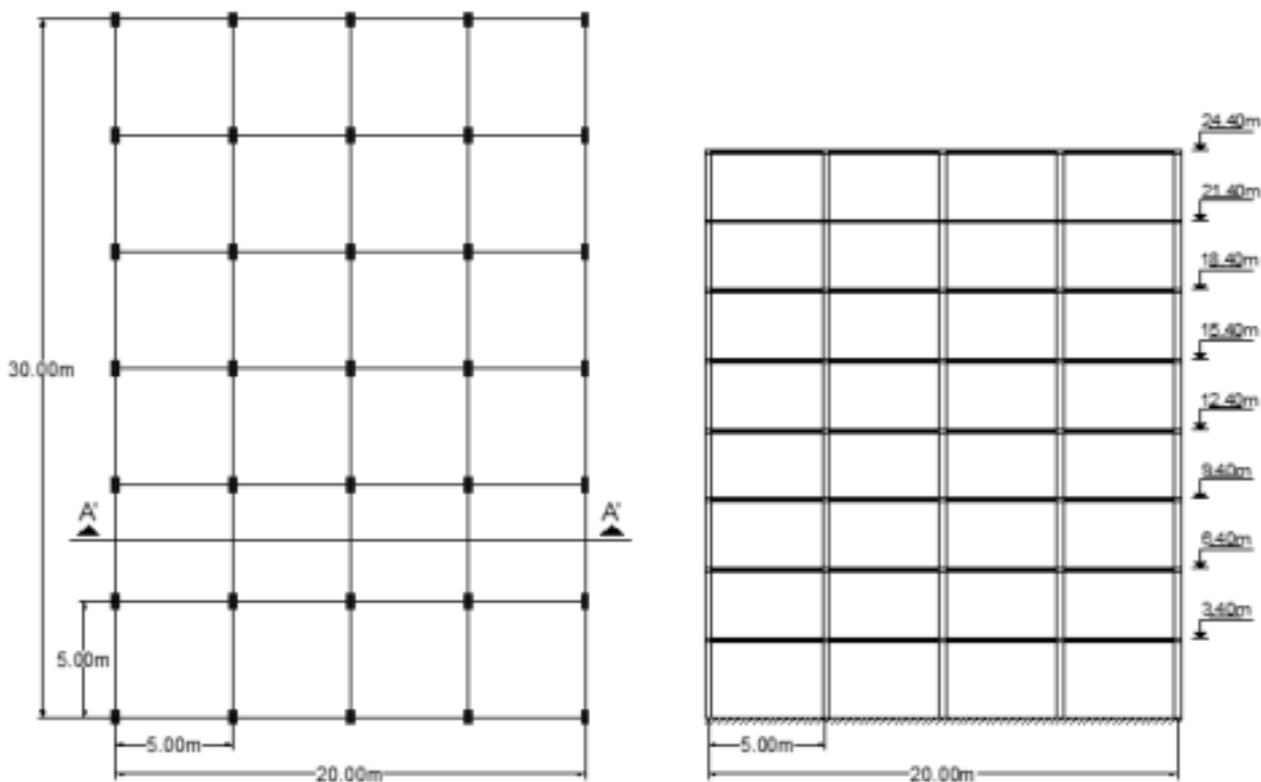


Fig. 2.1 Piso típico y Corte A'-A' de la edificación

El primer piso de la estructura tiene una altura de 3.4 metros y los siete restantes de 3.0 metros, todas las columnas son de 30 x 60 cm y las vigas (tanto longitudinales como transversales) tendrán un espesor de 30 centímetros y un peralte de 60 centímetros.

## 2.2 CONSIDERACIONES PARA LA MODELACIÓN

### 2.2.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

A continuación, en la tabla 2.1, se presentan las características de los materiales a emplear para cada uno de los elementos de la estructura.

Tabla 2.1 Propiedades del concreto y acero para el diseño

Propiedades del concreto		
Resistencia a la compresión	$f_c$	210kgf/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad	$E_c$	217371kgf/cm <sup>2</sup>
Peso específico	$\gamma$	2400kgf/m <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson	$\mu$	0.2
Propiedades del acero		
Esfuerzo de fluencia	$f_y$	4200kgf/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad	$E_s$	2000000kgf/cm <sup>2</sup>

### 2.2.2 CARGAS CONSIDERADAS PARA EL ANÁLISIS

#### A) CARGA VIVA

Se emplearon los valores que se establecen en la tabla 1 de la Norma E020 (Cargas), es decir 250kgf/m<sup>2</sup> de sobrecarga para oficinas en los pisos típicos y 100kgf/m<sup>2</sup> para la azotea.

#### B) CARGA MUERTA

La carga muerta está constituida principalmente por su peso propio, piso terminado y tabiquería, empleando los siguientes valores:

Piso terminado: 100kgf/m<sup>2</sup> (1er al 8vo piso)

Tabiquería: 100kgf/m<sup>2</sup> (1er al 7mo piso)

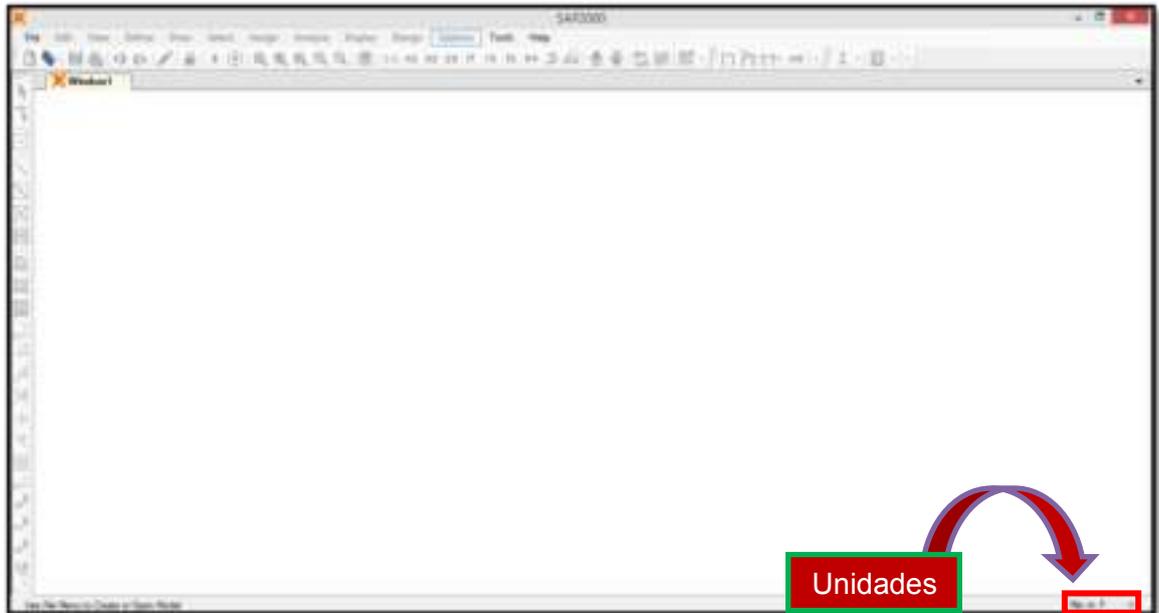
#### C) PESO DE LA EDIFICACIÓN

Para el peso de cada nivel se tomó en cuenta el 100% de la carga muerta y el 25% de la carga viva, debido a que la edificación es de categoría C (edificio común) de acuerdo a la Norma E030 de Diseño Sismorresistente.

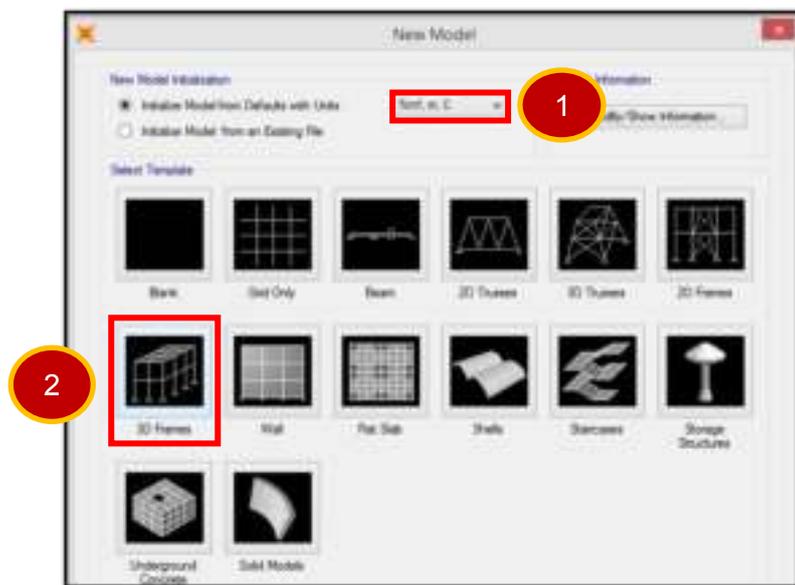
## 2.3 MODELACIÓN ESTRUCTURAL

### 2.3.1 MODELAMIENTO GEOMÉTRICO

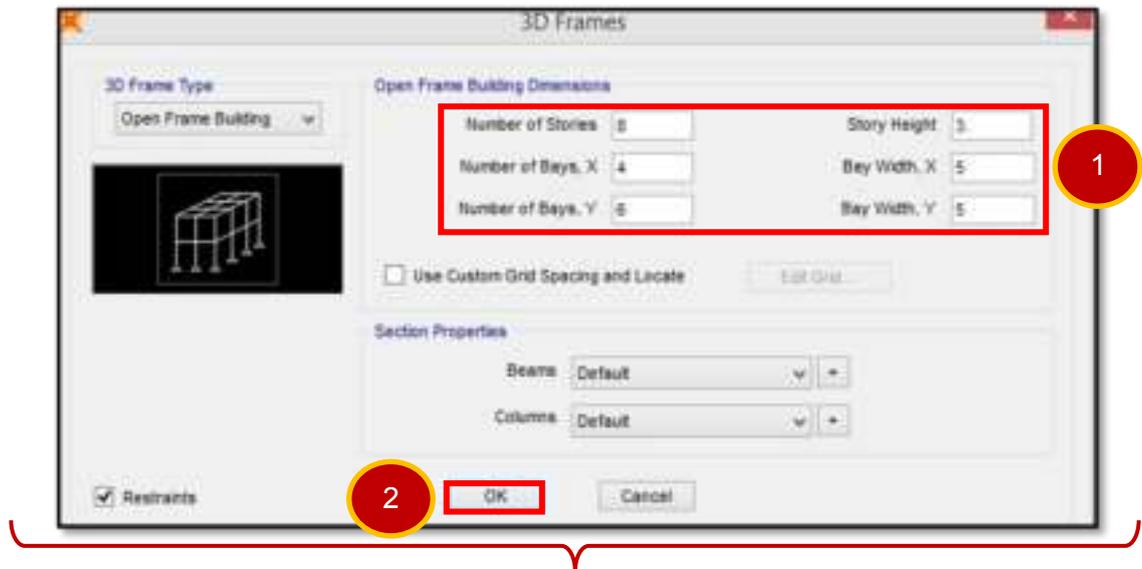
1. Ingresamos al programa **SAP2000 v.17**
2. Al ingresar observamos la siguiente ventana



3. Definimos las unidades en **Tonf,m,C**
4. Hacemos click en el botón de acceso rápido  (**New Model...**), al hacerlo aparecerá una ventana emergente, la misma que se muestra a continuación.

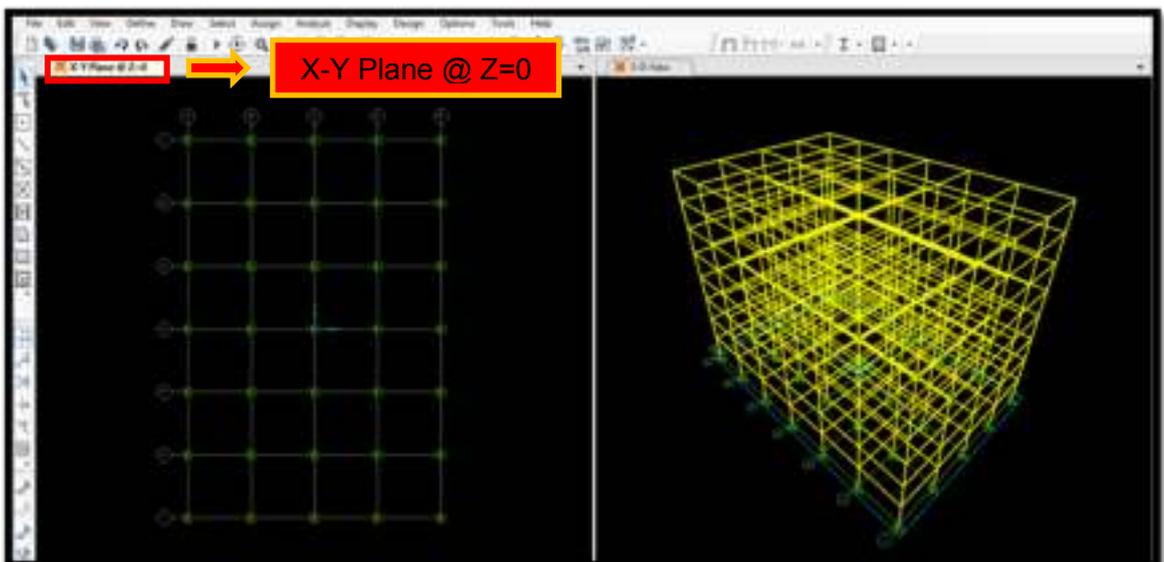


5. En esta ventana primero verificamos que las unidades de trabajo sean las correctas, posteriormente seleccionamos la opción **3D Frames**
6. Cuando se abre la ventana **3D Frames**, introduciremos la siguiente información.

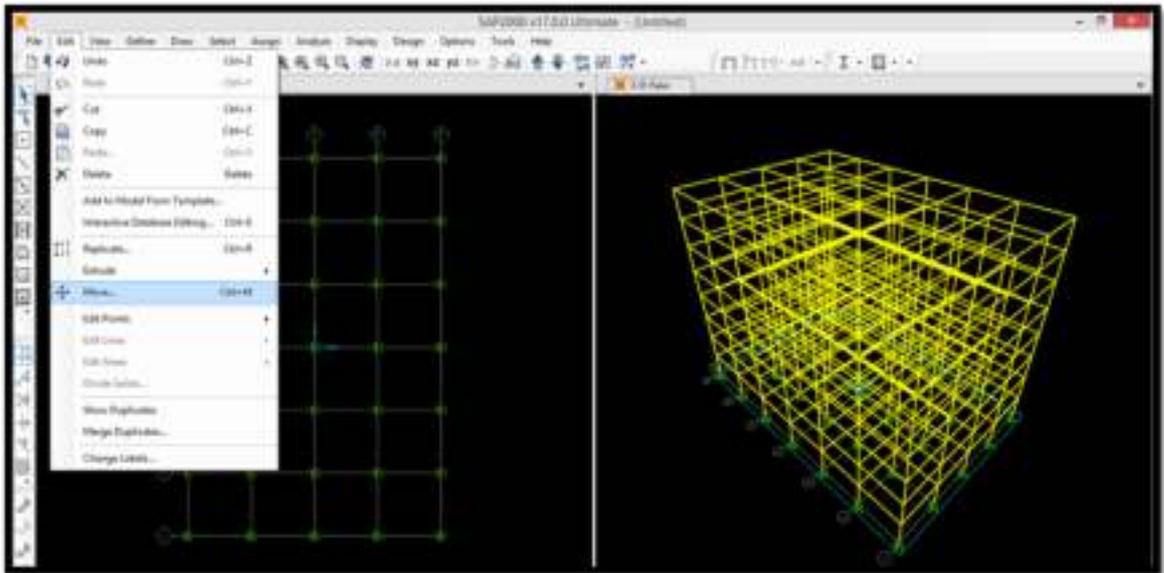


Número de pisos	: 8	Altura del piso típico	: 3.00 m
Número de tramos en X	: 4	Longitud de vanos en X	: 5.00 m
Número de tramos en Y	: 6	Longitud de vanos en Y	: 5.00 m

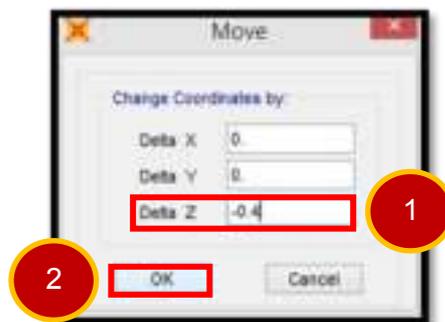
7. Una vez hayamos ingresado estos datos, el programa nos mostrará el sistema de vigas y columnas del edificio. Debemos recordar que la altura de las columnas del primer nivel no es de 3.00m sino de 3.40m
8. Para hacer esta corrección, en la ventana de trabajo nos posicionamos en la vista XY a una altura Z=0 y seleccionaremos todos los nudos tal como se muestra a continuación



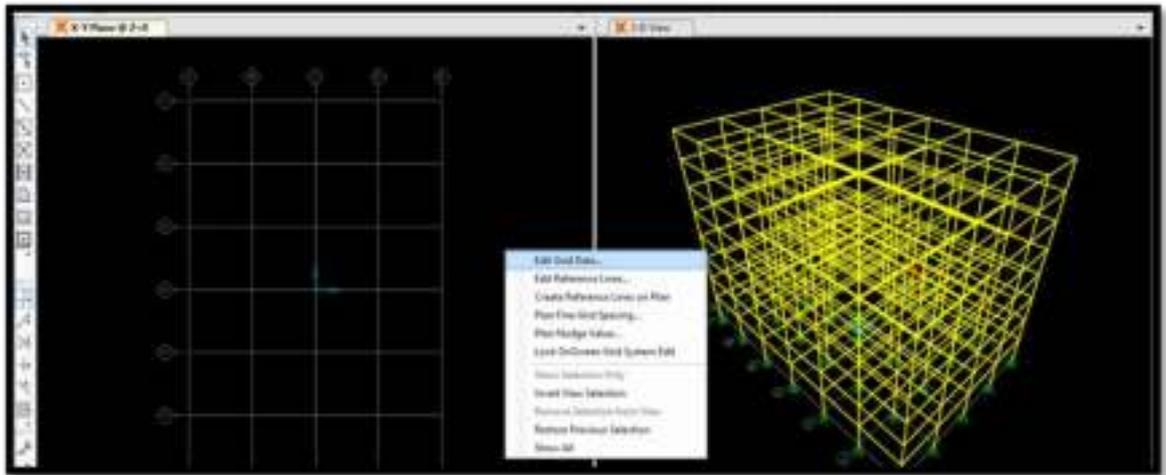
9. Lo que haremos ahora es mover estos nudos unos 40 centímetros hacia abajo, para ello ingresamos a la opción **Edit**→**Move**



10. En la ventana emergente señalar que se desea mover los nudos seleccionados - 0.4m en la dirección Z



11. Una vez realizado este paso podremos observar que efectivamente los nudos se han desplazado 40cm hacia abajo, lo que además ha generado que las columnas del primer nivel ya no sean de 3m sino de 3.4m  
 Como se podrá apreciar, **para modelar edificios con disipadores viscosos, la altura de las columnas del primer piso será exactamente igual a la altura del primer nivel**, con la finalidad de obtener el ángulo de inclinación adecuado del disipador.
12. Debido a que el sistema de Grillas no se modifica automáticamente no podremos visualizar los nudos desplazados, es por esto que tendremos que realizar algunos ajustes. Para ello, daremos click en la ventana de trabajo y seleccionaremos la opción **Edit Grid Data**



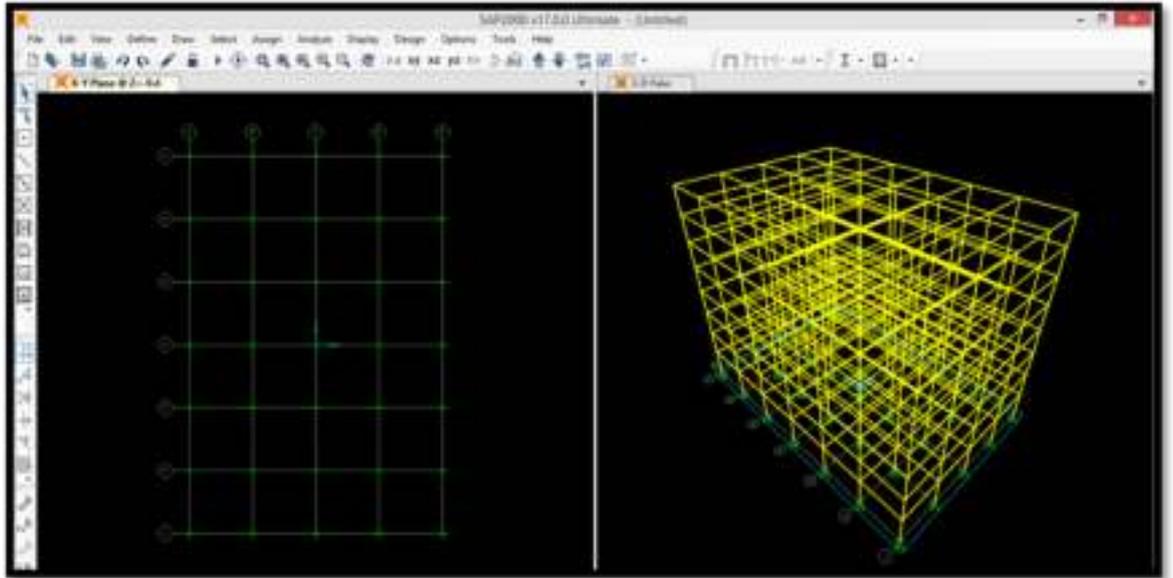
13. En la ventana emergente **Coordinate / Grid Systems** seleccionamos al sistema de grillas **GLOBAL** y, posteriormente, daremos un click en **Modify / Show System**



14. Se abrirá una ventana llamada **Define Grid System Data**, en la parte inferior en **Z Grid Data** señalar que la primera grilla que se muestre esté ubicada a **-0.4m**. Luego seleccionar la opción **Ok** hasta que se muestre nuevamente la ventana de trabajo.

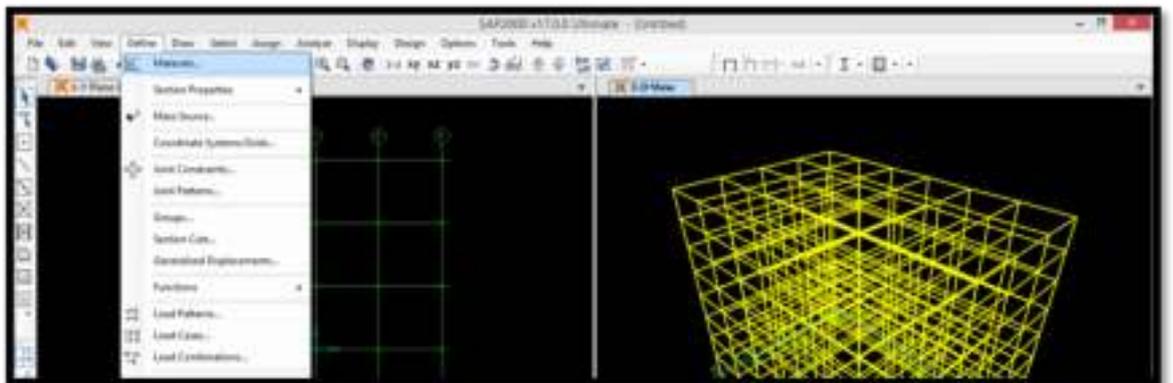
Z Grid Data						
	Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	
1	Z1	-0.4	Primary	Show	End	
2	Z2	3	Primary	Show	End	
3	Z3	6	Primary	Show	End	
4	Z4	9	Primary	Show	End	
5	Z5	12	Primary	Show	End	
6	Z6	15	Primary	Show	End	
7	Z7	18	Primary	Show	End	
8	Z8	21	Primary	Show	End	

15. Una vez realizado este cambio ya podremos visualizar los nudos de cimentación.

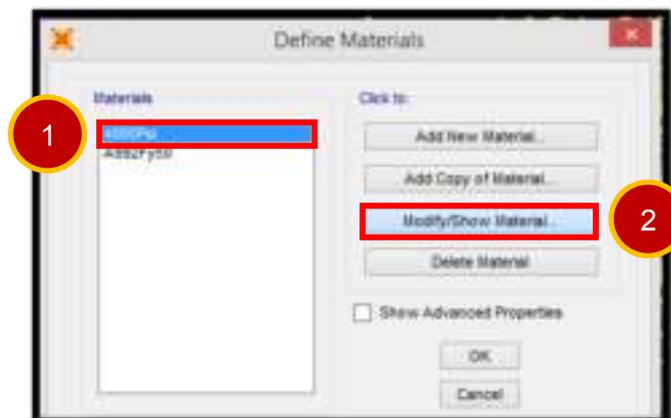


### 2.3.2 ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES DEL CONCRETO

16. Ingresaremos a la opción **Define** y seleccionaremos la opción **Materials**

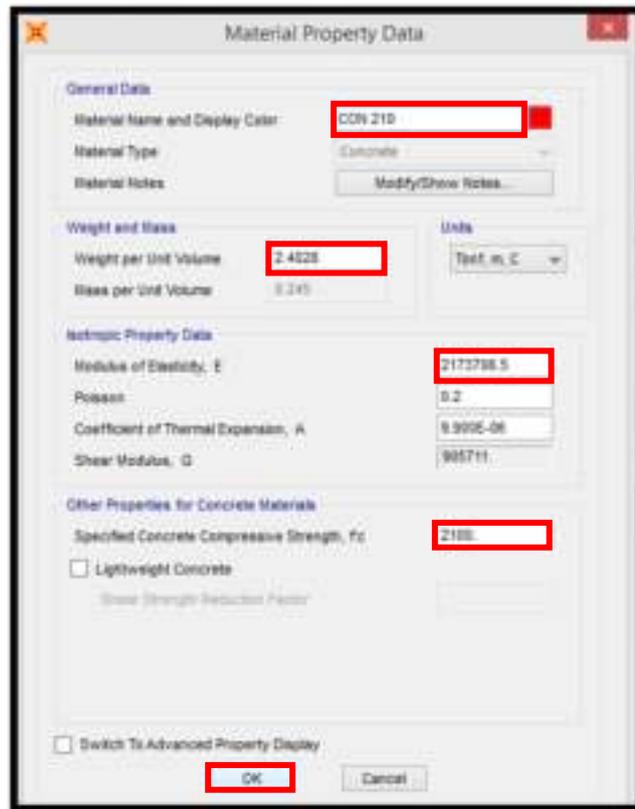


17. Una vez sea abierta la ventana **Define Materials** seleccionamos **4000Psi**, es decir, concreto y luego daremos click en **Modify / Show Materials**



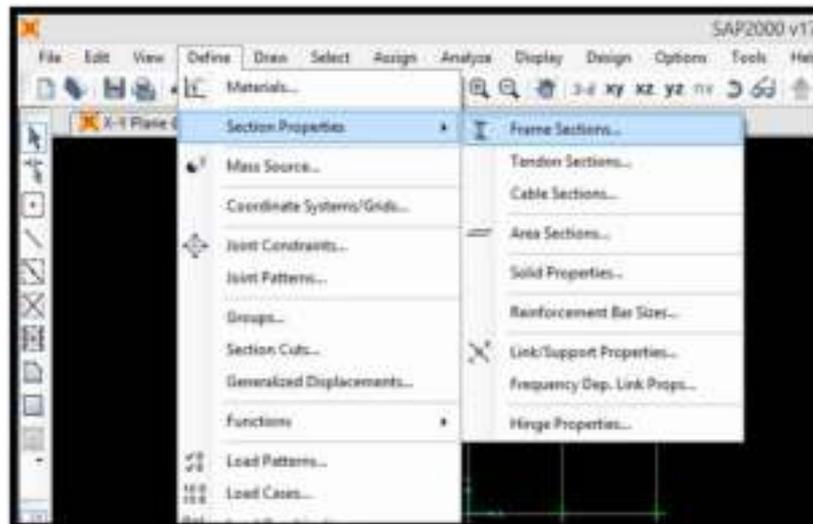
18. En la ventana emergente podremos ver y modificar las propiedades del concreto, las mismas que se muestran en la siguiente página. Es importante recordar que las unidades con las que el programa está trabajando son Tonf y metros. En la

siguiente imagen se muestra, de manera enmarcada, los datos que debemos colocar.

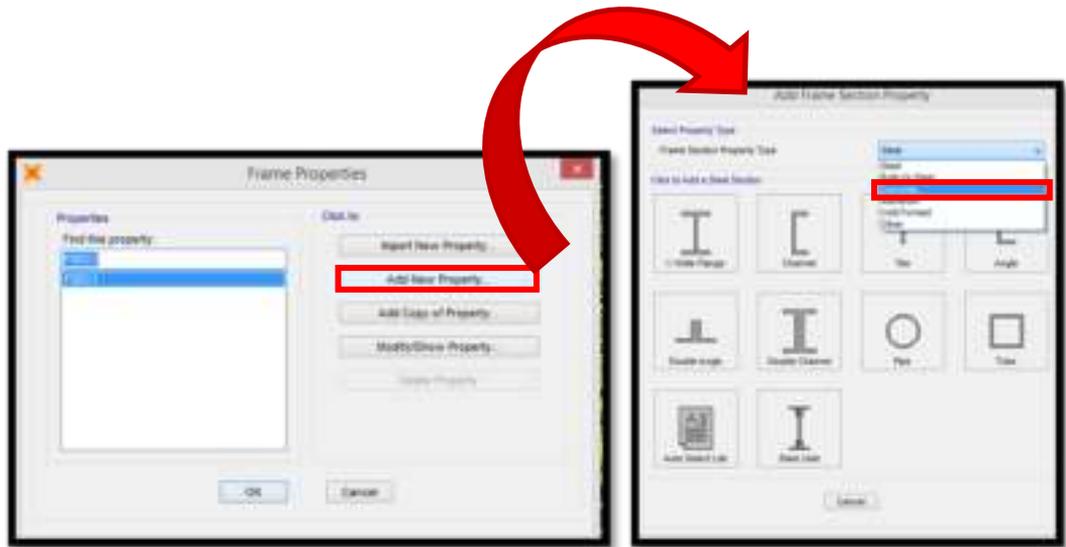


### 2.3.3 ASIGNACIÓN DE LAS SECCIONES DE COLUMNAS Y VIGAS

19. En el menú principal nos dirigiremos a **Define**→**Section Properties**→**Frame Sections**



20. Se abrirá una ventana llama **Frame Properties** aquí simplemente señalar que se desea añadir una nueva propiedad a través de la opción **Add New Property**. Al hacer esto emergerá la ventana **Add Frame Section Property**, en donde en el tipo de sección seleccionaremos **Concrete**.



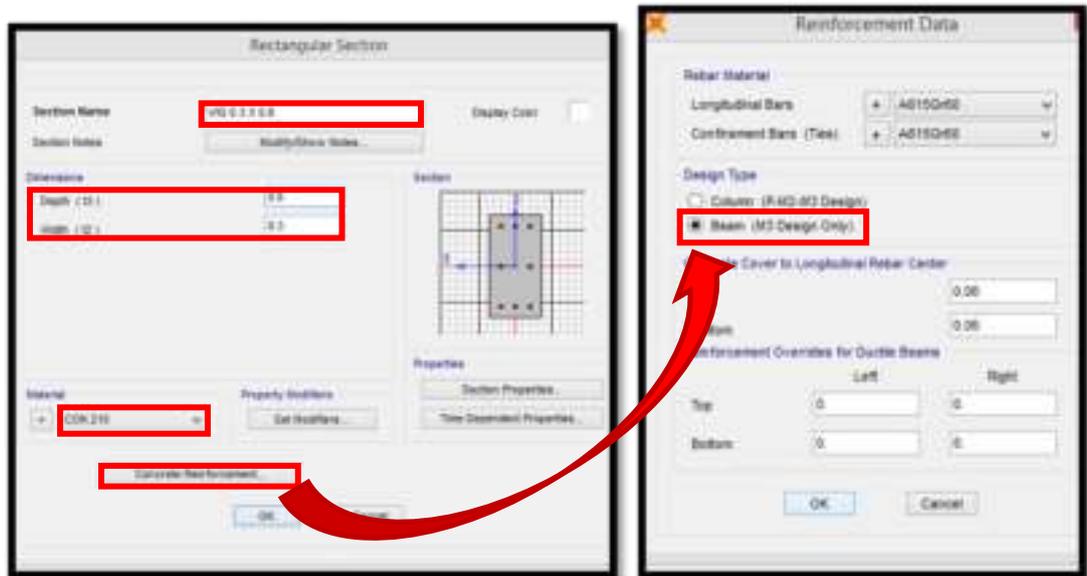
21. Tanto las columnas como las vigas que se van a emplear en este trabajo son de sección rectangular.



22. Iniciamos creando la sección de las columnas tal como se muestra en la siguiente imagen. Es importante verificar que el material que se vaya a emplear sea **CON 210**. No olvidar de verificar con la opción **Concrete Reinforcement** que se trata de una columna.



23. Nuevamente repetimos los pasos 20 y 21 esta vez para crear la sección que tendrán las vigas, en este caso, es importante seleccionar la opción **Concrete Reinforcement** y señalar que se trata de una viga y no de una columna.

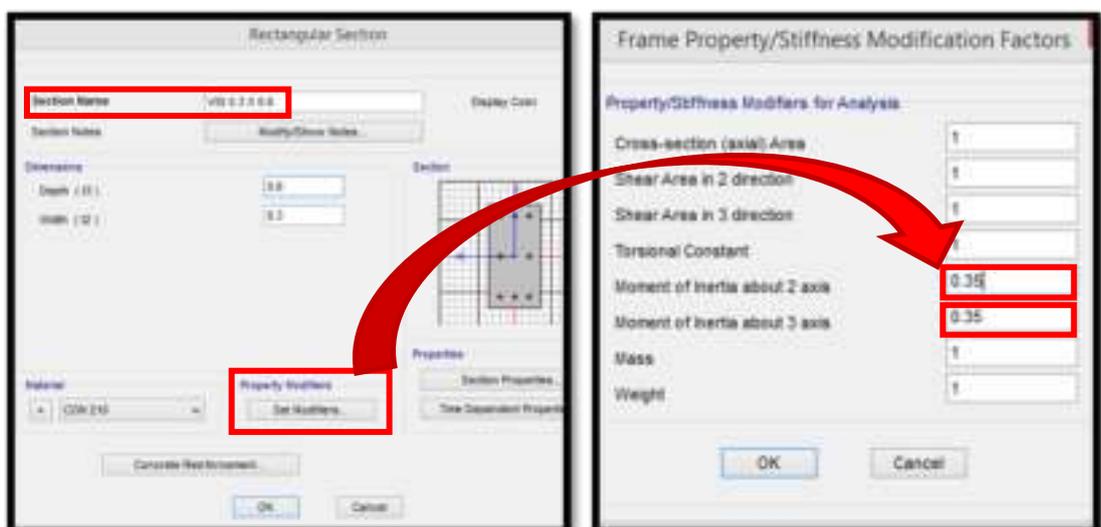


Algunos ingenieros estructurales emplean las sugerencias del **ACI 318 M-05 (American Concrete Institute)** para trabajar con secciones agrietadas (Artículo 10.11.1), esta norma nos señala que es importante tomar en consideración la presencia de secciones agrietadas a lo largo de los diferentes elementos estructurales (columnas, vigas y muros).

El ACI 318 M-05 nos dice que consideremos una fisuración en vigas y columnas de:

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

Donde  $I_g$  es la sección Bruta del elemento.



Para considerar las secciones agrietadas en nuestro modelo estructural seleccionar **Set Modifiers**, tal como se muestra en la página anterior.

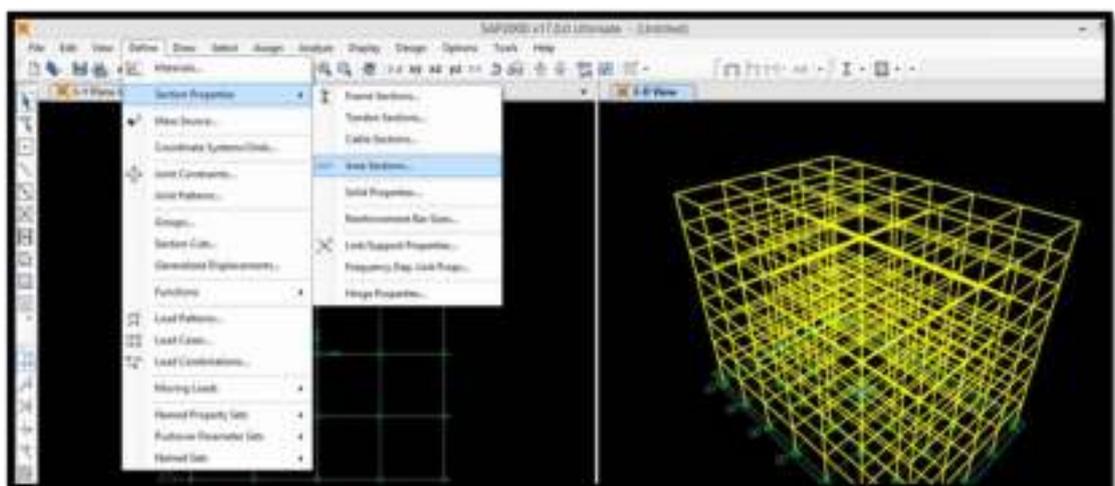
En dicha figura se puede observar que el porcentaje de fisuración se coloca en las opciones **Moment of Inertia about 2 axis** y **Moment of Inertia about 3 axis**, siendo los valores de 0.35 en ambos casos, debido a que se trata de la sección de la viga, para el caso de columnas estos valores tendrían que ser de 0.70 en ambos casos.

Es importante mencionar que el agrietamiento de vigas y columnas es opcional, esta consideración depende netamente del ingeniero estructural. Además hay que tener en cuenta que realizando este paso se puede caer en el sobredimensionamiento de la estructura por lo que a opinión de los autores no es recomendable seguir este criterio.

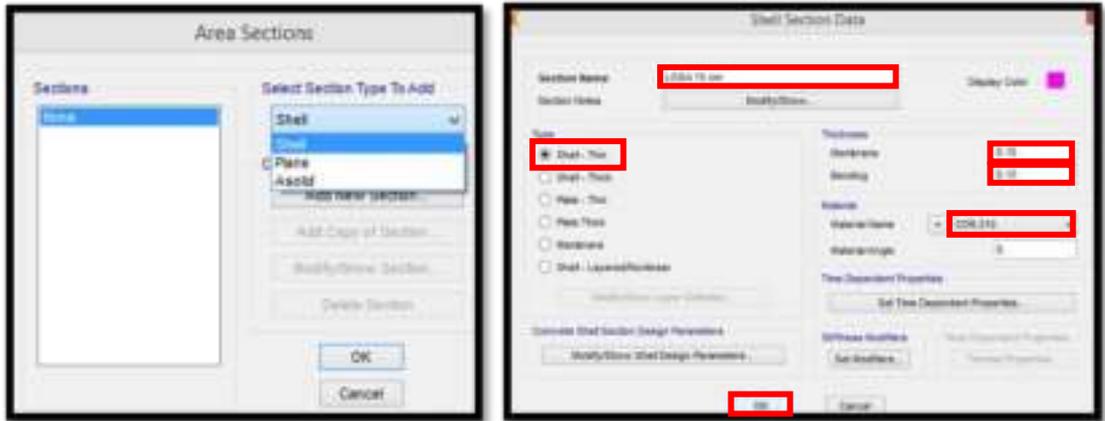
Los ingenieros estructurales de **CDV Ingeniería Antisísmica** tampoco toman en cuenta esta recomendación, por lo que en el presente trabajo **NO se consideró el fisuramiento de las secciones de vigas y columnas**, solo se menciona este paso para que el interesado tenga conocimiento de la modelación con este criterio.

#### 2.3.4 DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS TIPO ÁREA

24. Para esta estructura solo será necesario crear un solo elemento tipo área, la losa maciza de 15 centímetros de espesor que se empleará como losa de techo para cada uno de los niveles. Para ello seleccionamos la opción **Define**→**Section Properties**→**Area Sections**

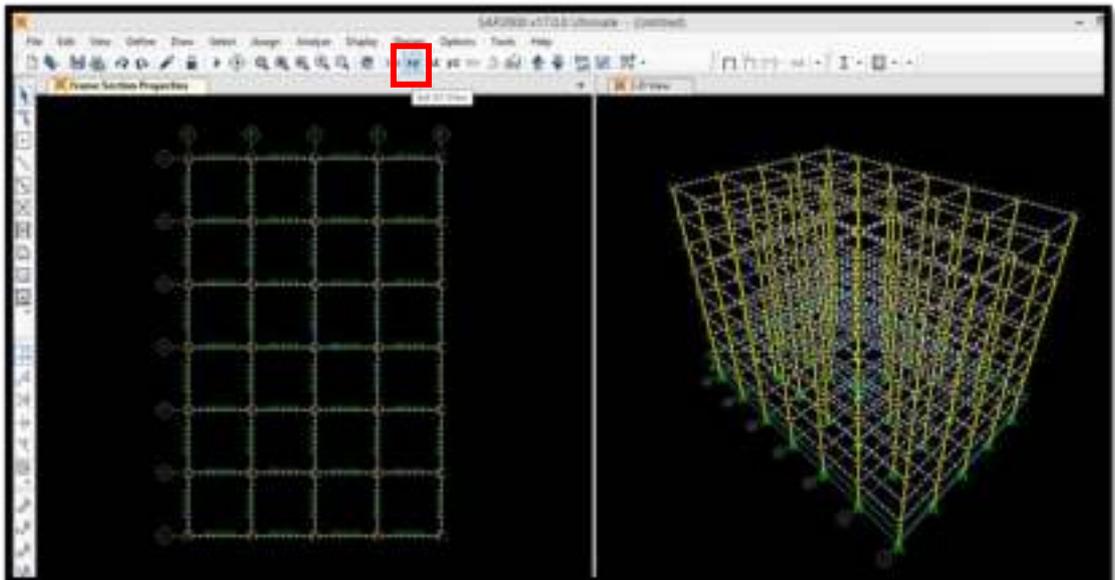


25. En la ventana emergente seleccionamos el tipo de sección a emplear, como es una losa maciza para techo será del tipo **Shell (Shell-Thin)**. Es importante verificar que el material sea **CON210**

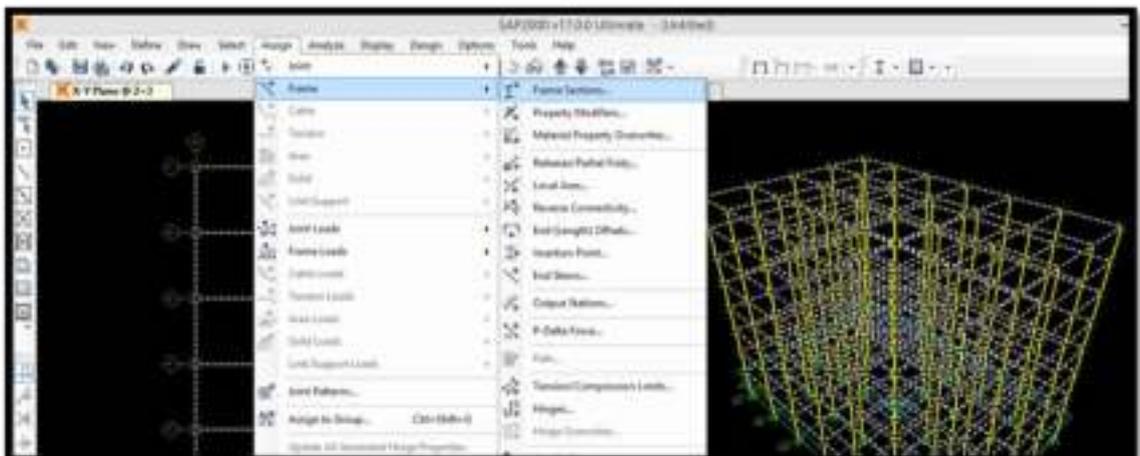


### 2.3.5 ASIGNACIÓN DE COLUMNAS, VIGAS Y LOSAS

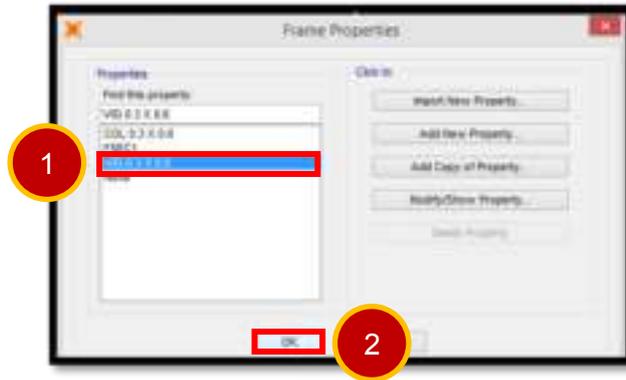
26. En la ventana de trabajo (vista XY) seleccionamos las vigas de todos los niveles.



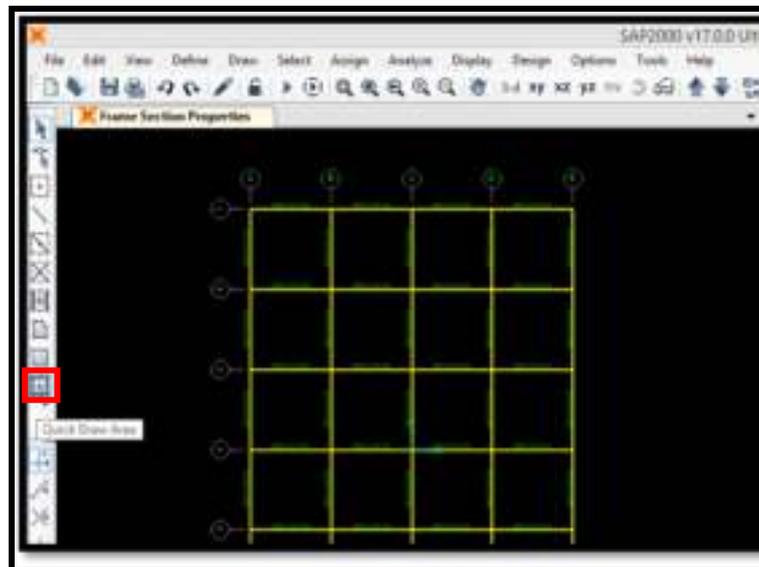
27. Ingresamos a la opción **Assign**→**Frame**→**Frame Sections**



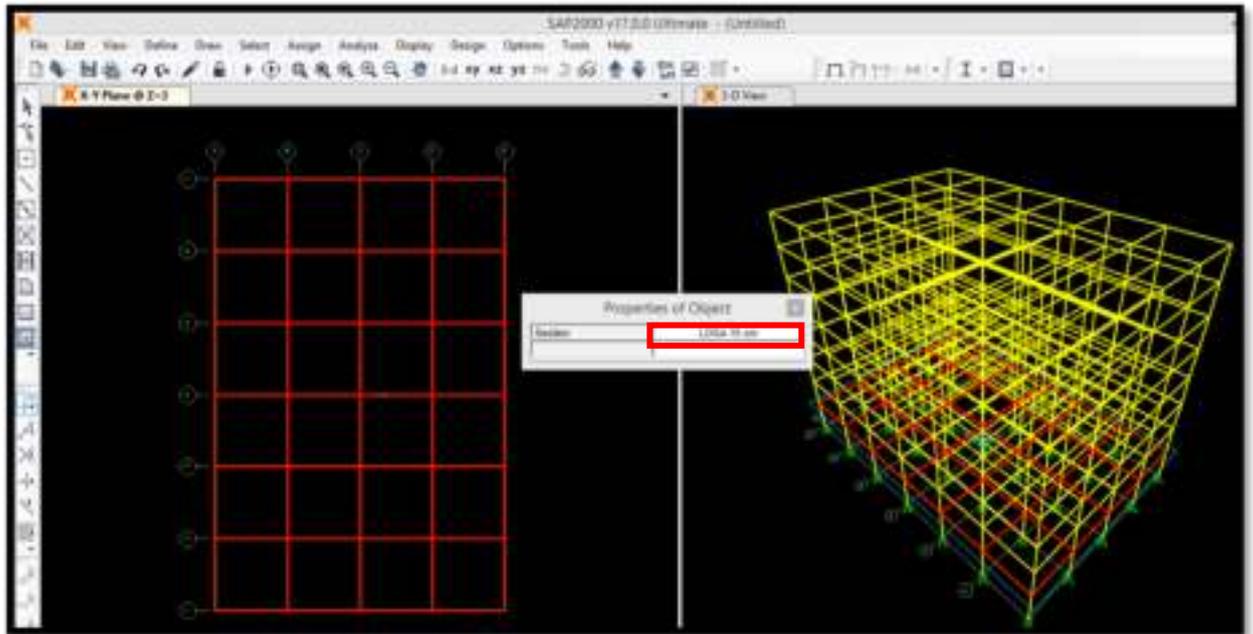
28. Luego, en la ventana emergente **Frame Properties** le indicaremos al programa que asigne la sección **VIG 0.3 x 0.6** a los elementos seleccionados.



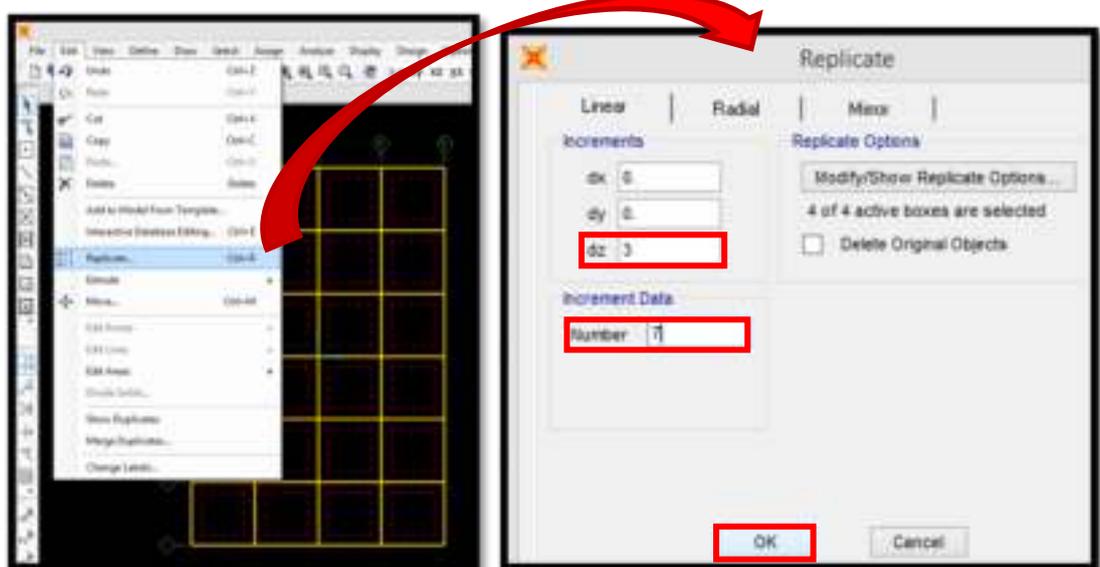
29. Para el caso de las columnas el procedimiento es exactamente igual, esta vez en la ventana de trabajo (vista **YZ**) seleccionamos todas las columnas del modelo.
30. Repetir los pasos 27 y 28, asignando la sección **COL 0.3 x 0.6**
31. Ahora procedemos a asignar las losas de entrepiso, para ello, hacemos click en el comando  **Quick Draw Area**



32. Luego en la ventana de trabajo (vista **XY-Primer techo**) asignamos las losas dando un click en todos los paños (uno por uno).



33. Luego, hacemos click sobre cada uno los paños creados, posteriormente seleccionamos la opción **Edit→Replicate** y en la ventana que emerja señalaremos que deseamos replicar los elementos seleccionados 7 veces a +3 metros uno del otro en la dirección Z.

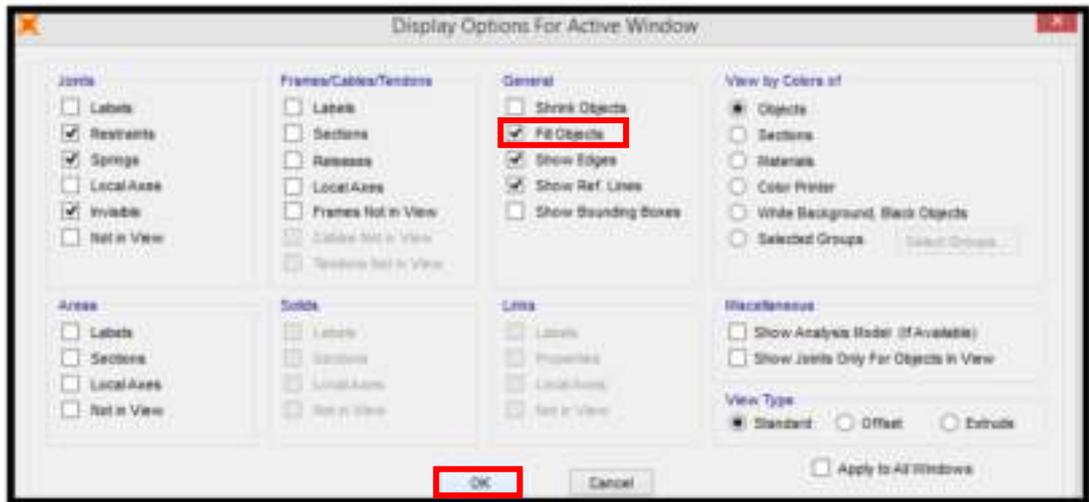


Es importante que en el paso anterior no se hayan seleccionado ni vigas ni nudos, solo las losas porque si no estos también se replicarán.

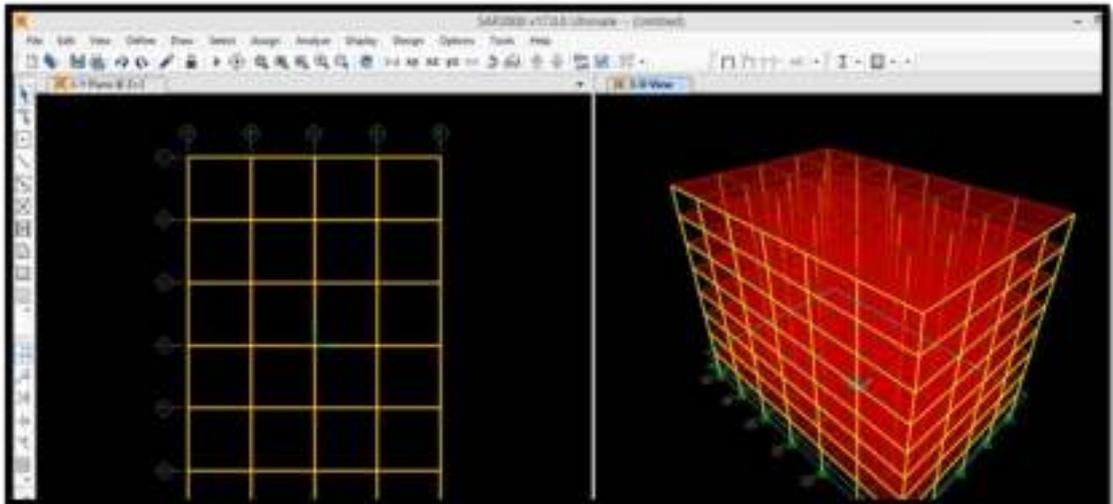
34. Para tener una visualización más agradable del modelo, hacemos click en la opción  **Set Display Options**.



35. En la ventana que se abre **Display Options For Active Window** en **General** habilitar la configuración **Fill Objects**.



36. Finalmente el modelo quedará tal como se muestra en la siguiente figura.



### 2.3.6 ASIGNACIÓN DE BRAZOS RÍGIDOS (COLUMNA-VIGA)

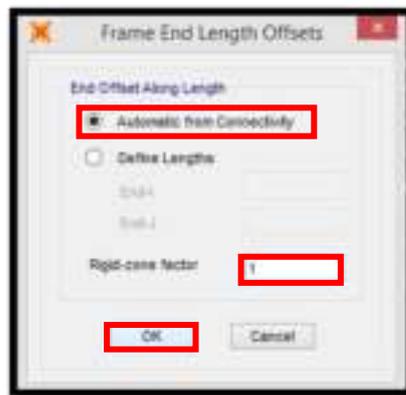
37. Para asignar los brazos rígidos se requiere como primer paso seleccionar todas las vigas del modelo creado, para ello ingresamos a **Select**→**Select**→**Properties**→**Frame Sections** y seleccionar **VIG 0.3 x 0.6**



38. Al finalizar el paso 37 podremos observar que todas las vigas del modelo han sido seleccionadas, ahora ingresamos a **Assign**→**Frame**→**End(Length) Offsets**

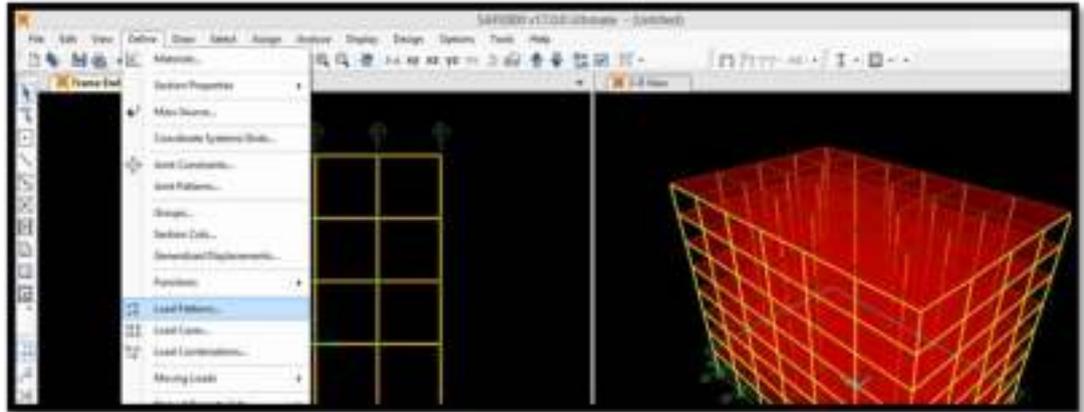


39. En la ventana que se abra habilitar la opción **Automatic from Connectivity** y señalar que el factor de rigidez sea igual a 1 (conexión perfectamente rígida)

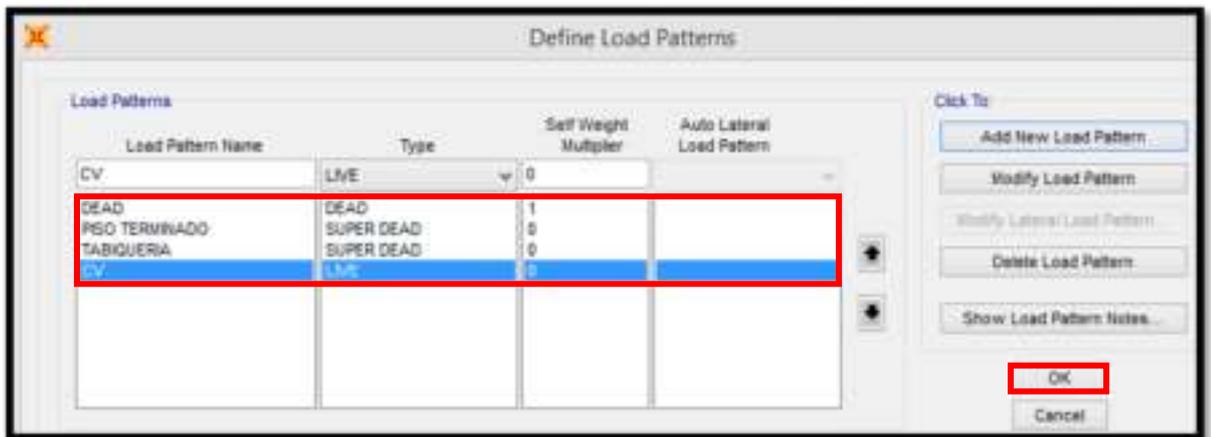


### 2.3.7 CREACIÓN DE PATRONES DE CARGA Y FUENTE DE MASA

40. Para poder asignar cargas vivas o muertas, primero hay que señalarle al programa que tipo de cargas tenemos, para ello ingresar a **Define**→**Load Patterns**

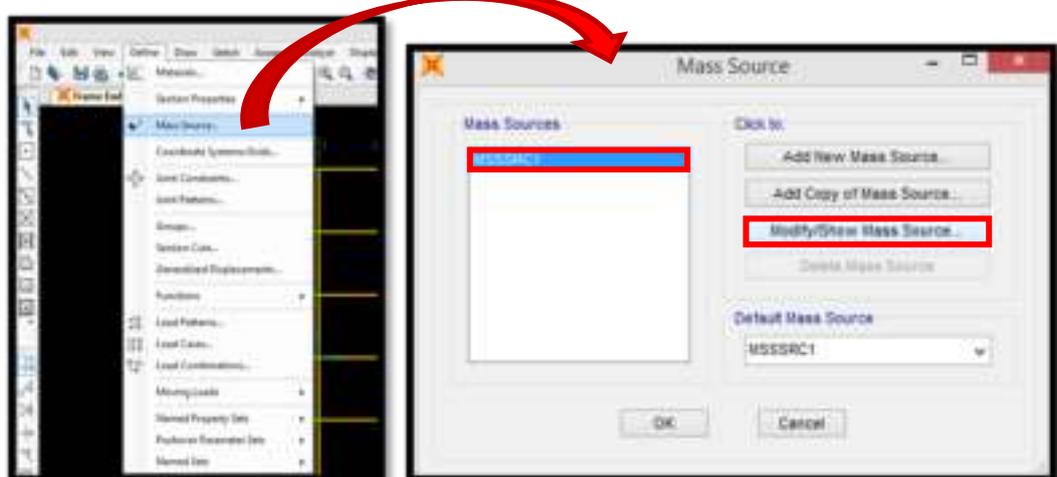


41. Generamos los siguientes tipos de cargas: PISO TERMINADO, TABIQUERIA y CV (carga viva); DEAD ya viene de manera predeterminada.

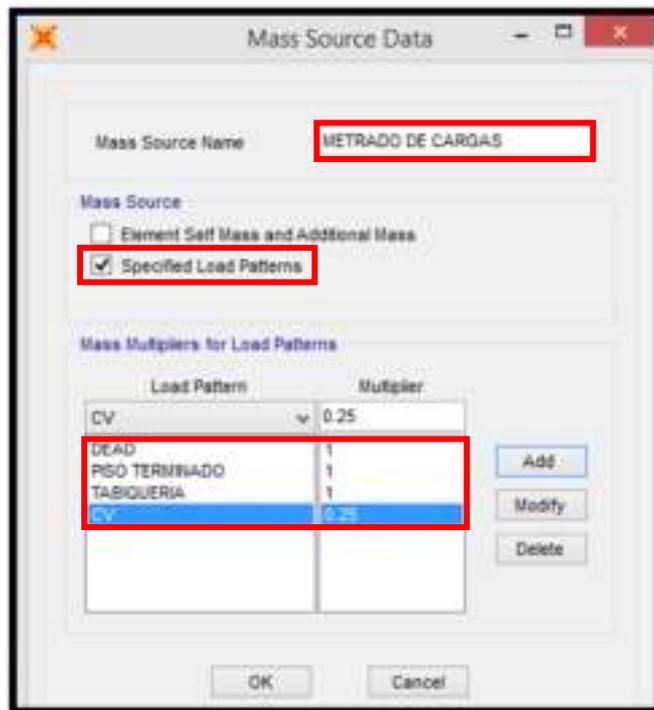


42. Una vez tengamos determinados nuestros tipos de cargas, podremos definir la fuente de masa. La fuente de masa es en esencia el metrado de cargas que realiza el software para efectuar el análisis estructural.

43. Ingresamos a **Define**→**Mass Source** y en la ventana emergente veremos que la fuente de masa que viene por defecto es **MSSSRC1**, la seleccionamos y hacemos click en **Modify / Show Mass Source**



44. Cambiamos el nombre por **METRADO DE CARGAS** y señalamos que la fuente de masa sea a través de patrones de carga específicos, la carga **DEAD** es el peso propio y siempre se considera el 100% de la misma, así mismo, las cargas muertas **PISO TERMINADO** y **TABIQUERIA** tienen un factor de 1, es decir, también se considera el 100% de ellas. Con respecto a la carga viva solo se considera un 25% de ella por ser una edificación que clasifica como tipo C (Edificación Común) según la Norma de Diseño Sismorresistente E030



### 2.3.8 ASIGNACIÓN DE CARGA VIVA Y CARGA MUERTA

45. Las cargas que asignaremos a nuestro modelo serán:

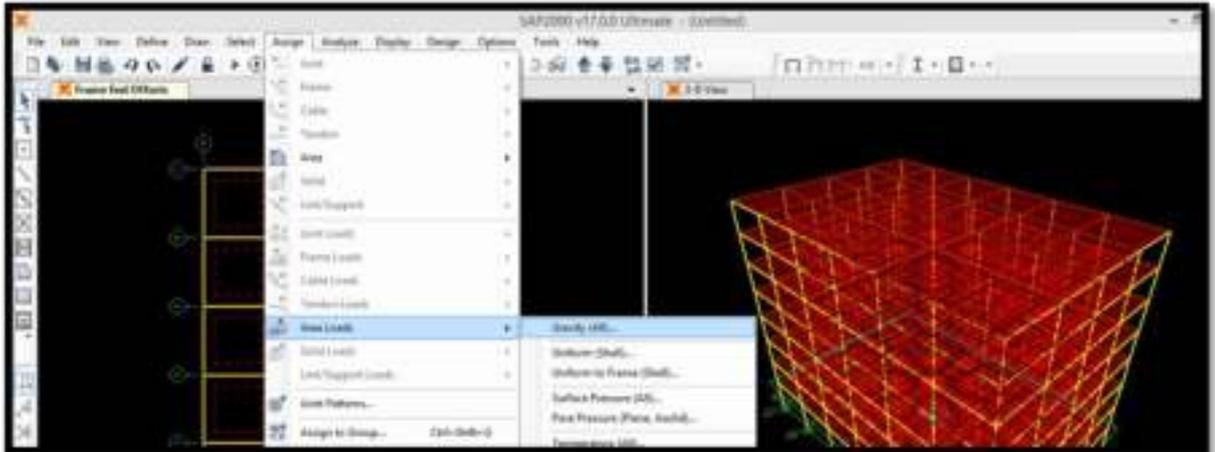
PISO TERMINADO =  $100\text{kg/m}^2 = 0.1\text{Tn/m}^2$  → En todos los techos

TABIQUERIA =  $100\text{kg/m}^2 = 0.1\text{Tn/m}^2$  → Del 1er techo al 7mo

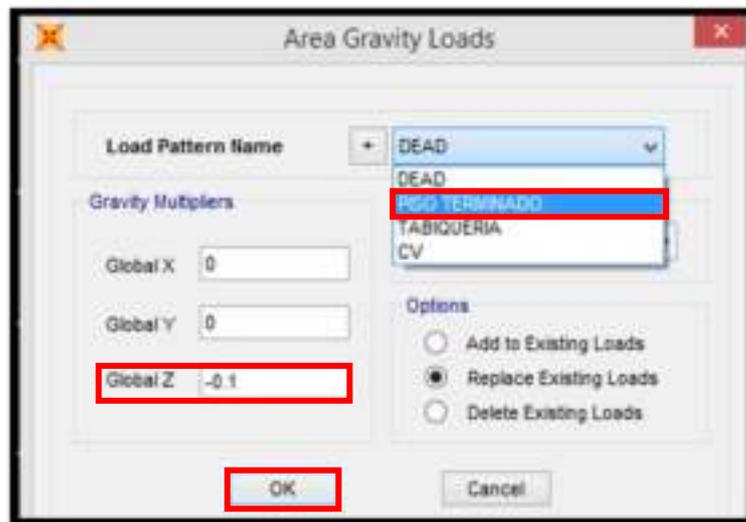
CV =  $250\text{kg/m}^2 = 0.25\text{Tn/m}^2$  → Del 1er techo al 7mo

=  $100\text{kg/m}^2 = 0.1\text{Tn/m}^2$  → En el 8avo techo

46. Como ejemplo solo se mostrará la asignación de la carga **PISO TERMINADO**, quedando a cargo del lector asignar las cargas de **TABIQUERIA** y **CV** donde correspondan (ver paso 45). De manera inicial seleccionamos las losas de todos los niveles (debido a que esta carga se asigna en todos los techos); posteriormente nos dirigimos a **Assign**→**Area Loads**→**Gravity(All)**

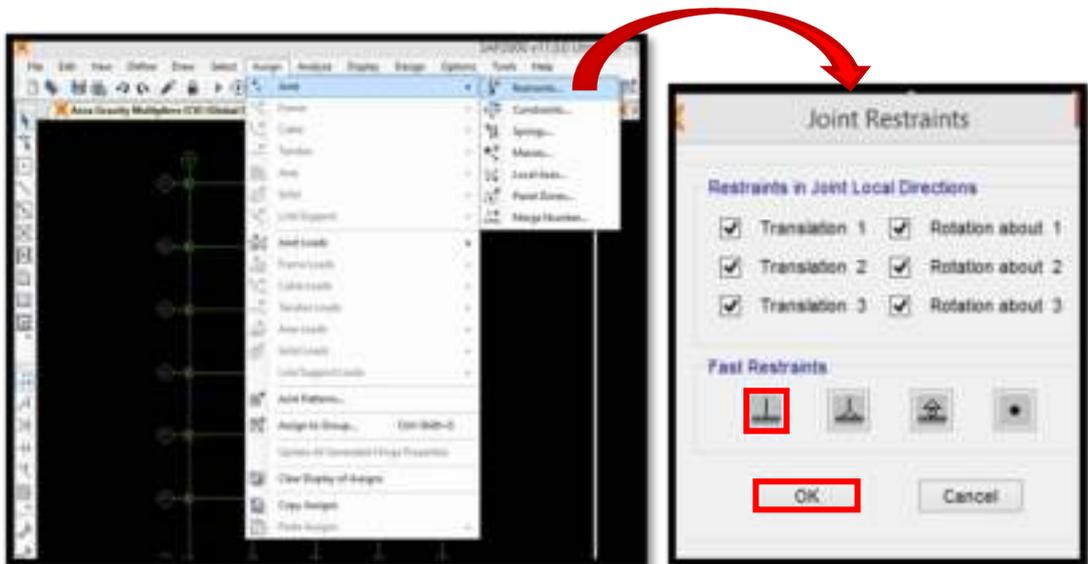


47. Indicar que se desea asignar la carga tipo PISO TERMINADO con una magnitud igual a  $0.1 \text{ Tn/m}^2$  en la dirección Z



### 2.3.9 EMPOTRAMIENTO EN LA BASE, ASIGNACIÓN DE CENTRO DE MASA Y CREACIÓN DE DIAFRAGMAS

48. Tal como lo indica la norma ASCE 7-10 (Cap.18) la estructura que vaya a usar disipadores de energía puede ser modelada considerando el efecto de la interacción suelo-estructura o simplemente la base empotrada. En este caso, por ser un trabajo centrado en el tema de disipadores de energía, **NO** se considerará el efecto de la interacción suelo-estructura pudiendo ser este un tema para futuros trabajos o investigaciones.
49. Para modelar el empotramiento nos dirigimos a la base de nuestra estructura y seleccionamos todos los nudos (vista **XY**)
50. Luego iremos a **Assign**→**Joint**→**Restraints** y en la ventana **Joint Restraints** indicar que se desea el empotramiento de los nudos.

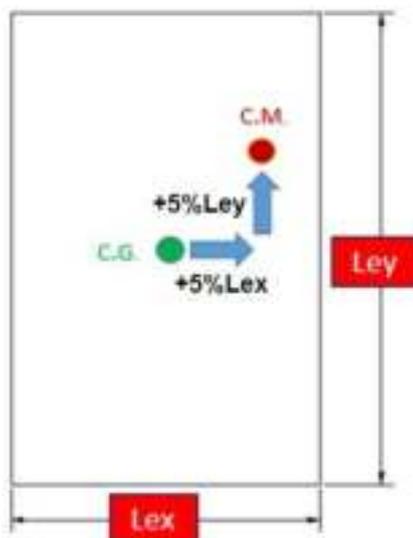


Desafortunadamente el programa SAP2000 a diferencia del ETABS no nos indica, de manera automática, donde están ubicados los centros de masa de cada nivel por lo que estos deben ser calculados y asignados de manera manual.

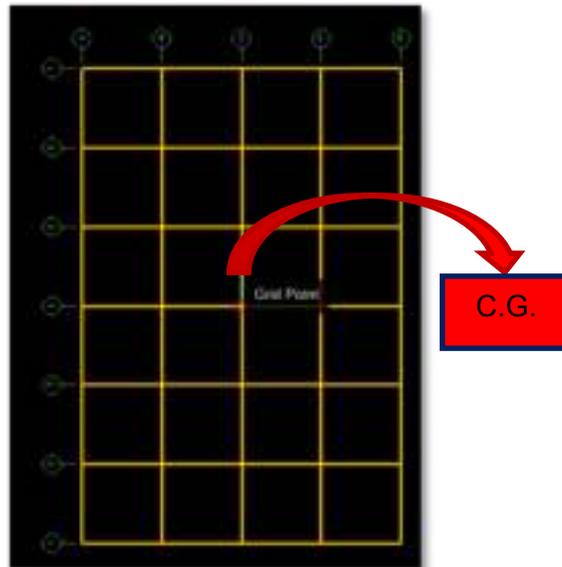
La ubicación de los centros de masa está determinada por la configuración de los elementos de corte (columnas y placas), los centros de masa están en función de los pesos y las rigideces de los mismos.

En edificaciones como esta investigación, debido a su configuración simple, los centros de masa de cada nivel se pueden ubicar considerando la excentricidad accidental en cada dirección.

Es decir, primero se determina cual es el centro geométrico C.G. y luego, tomando este punto como referencia, se añade 5% de la longitud efectiva de la edificación tanto en el eje X como en el eje Y ( $L_{ex}$  y  $L_{ey}$ ), siendo así que la ubicación de este nuevo punto será nuestro centro de masa C.M.

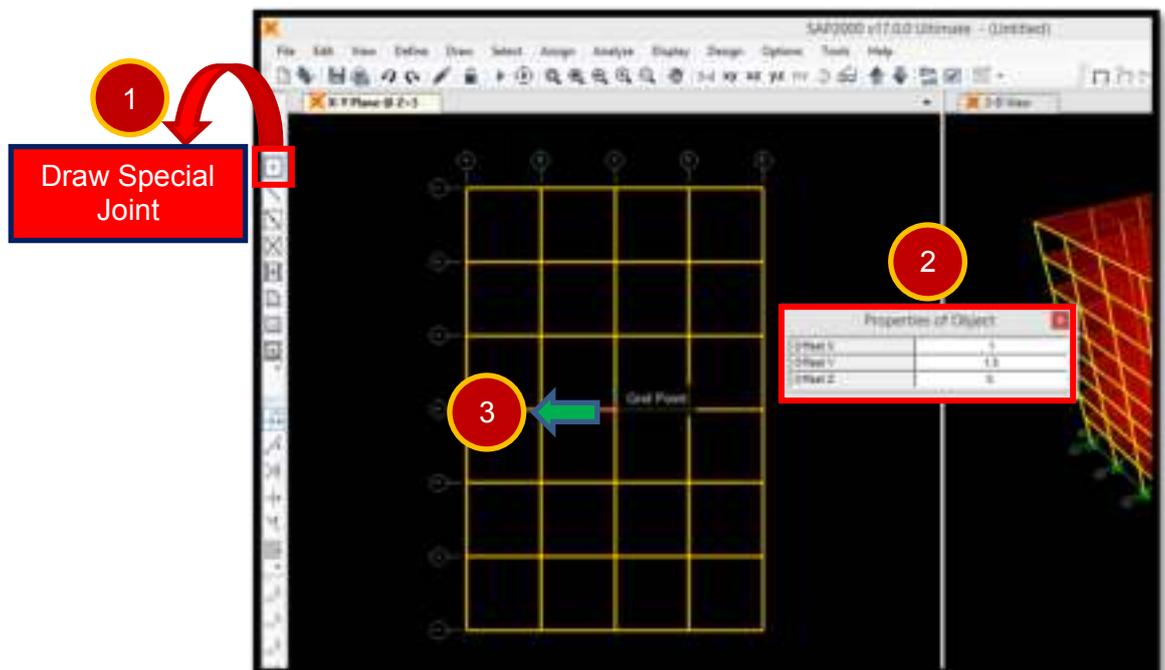


51. Considerando que la longitud efectiva en el eje X e Y son 20m y 30m respectivamente, el centro geométrico C.G. será el que se muestra en la siguiente imagen

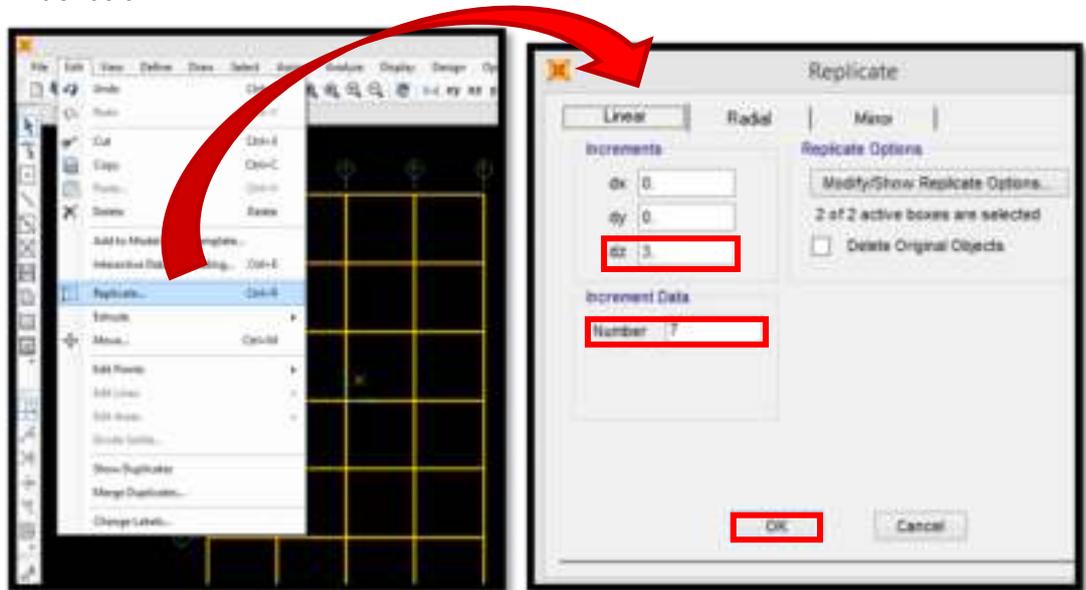


52. Una vez ubicado el C.G. podemos crear el centro de masa. El centro de masa estará a una distancia de +5% de 20m en el eje X (es decir a 1m) y +5% de 30m en el eje Y (es decir a 1.5m) del C.G.

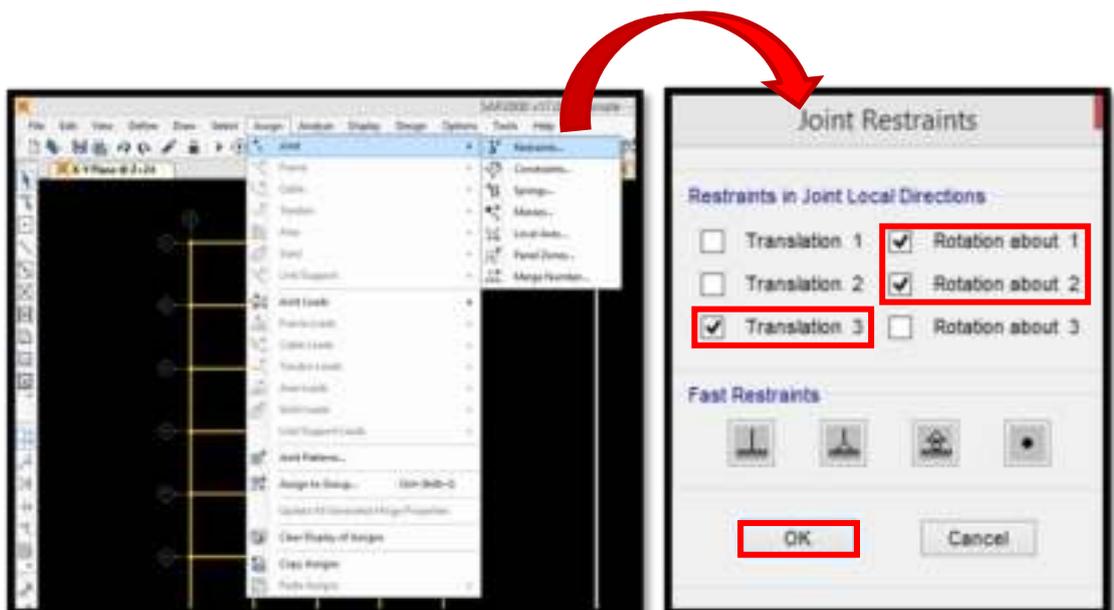
53. Para crear el centro de masa nos ubicamos en el primer techo, luego hacemos click en la opción **Draw Special Joint**, nos pedirá la longitud en X e Y que tendrá nuestro nuevo punto con respecto al C.G., en este caso será **Offset X = 1** y **Offset Y = 1.5**; finalmente daremos un click en el C.G.



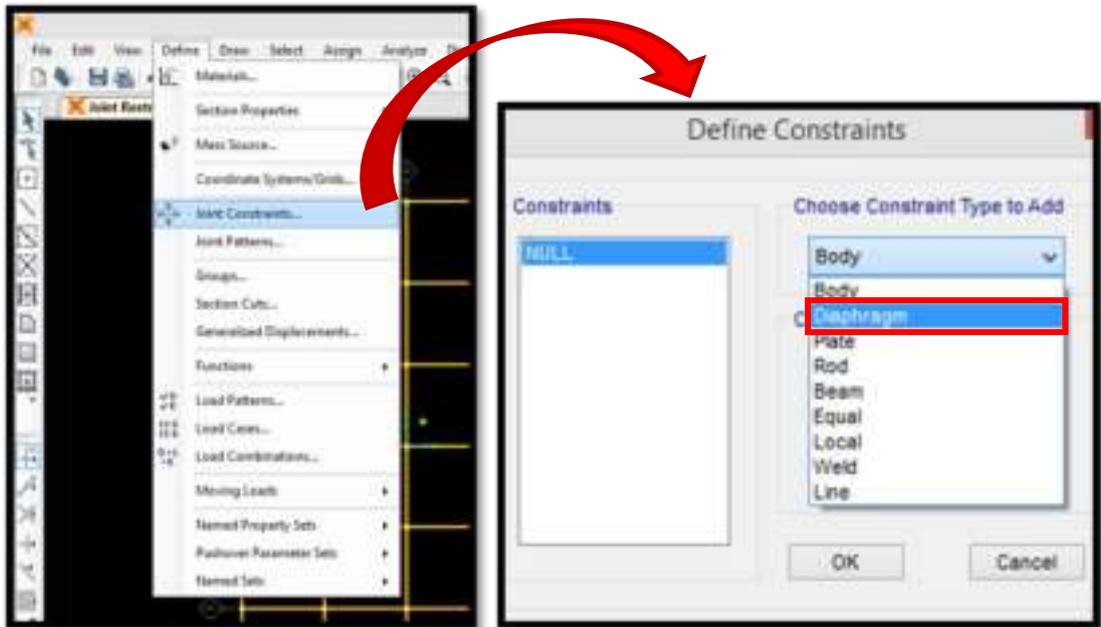
54. Replicamos el C.M. creado hacia los demás techos (2do al 8vo), para ello, primero seleccionamos el nudo creado, luego nos dirigimos a la opción **Edit**→**Replicate**, en la ventana que se abra le señalamos al programa que deseamos replicar el nudo 7 veces en la dirección Z a una distancia de +3m uno del otro.



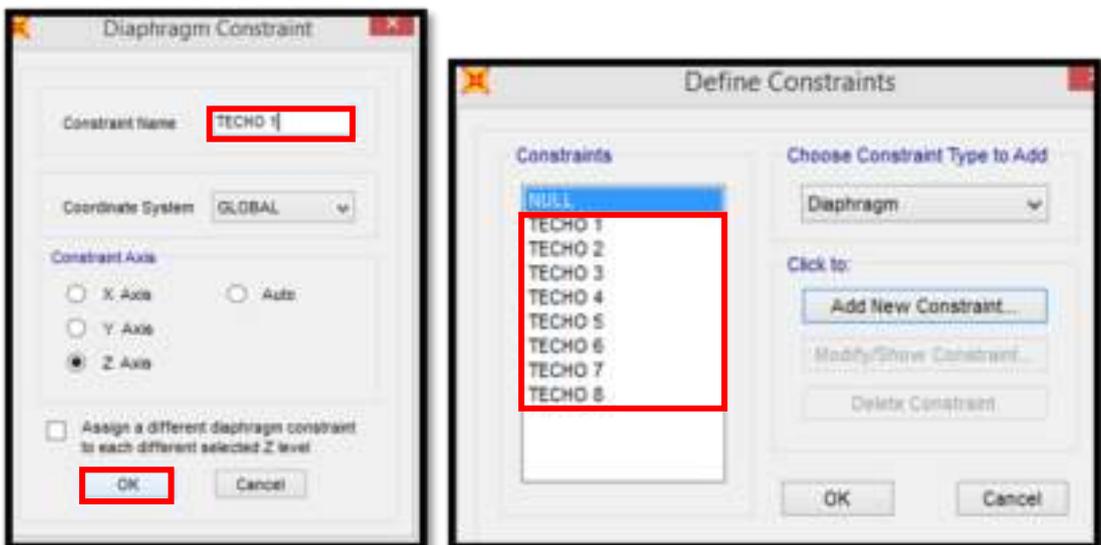
55. Los C.M. tienen ciertas restricciones que se deben asignar en el modelo: no se pueden desplazar en la dirección vertical Z (**Translation 3**) ni rotar en los ejes X e Y (**Rotation about 1** y **Rotation about 2**); para asignar estas restricciones seleccionamos los C.M. de todos los niveles (1er al 8vo), luego nos dirigimos a la opción **Assign**→**Joint**→**Restraints** tal como se muestra en la figura.



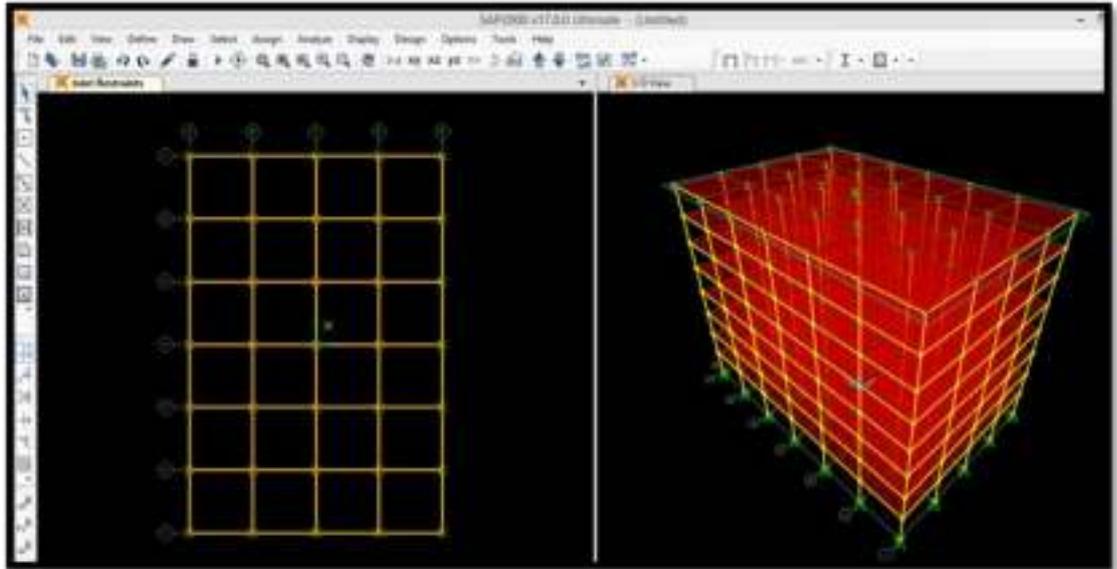
56. Ahora creamos los diafragmas rígidos con la ayuda de la opción **Define**→**Joint Constraints**, en la ventana que se abra (**Define Constraints**) seleccionamos la opción **Diaphragm** y hacemos click en **Add New Constraints**.



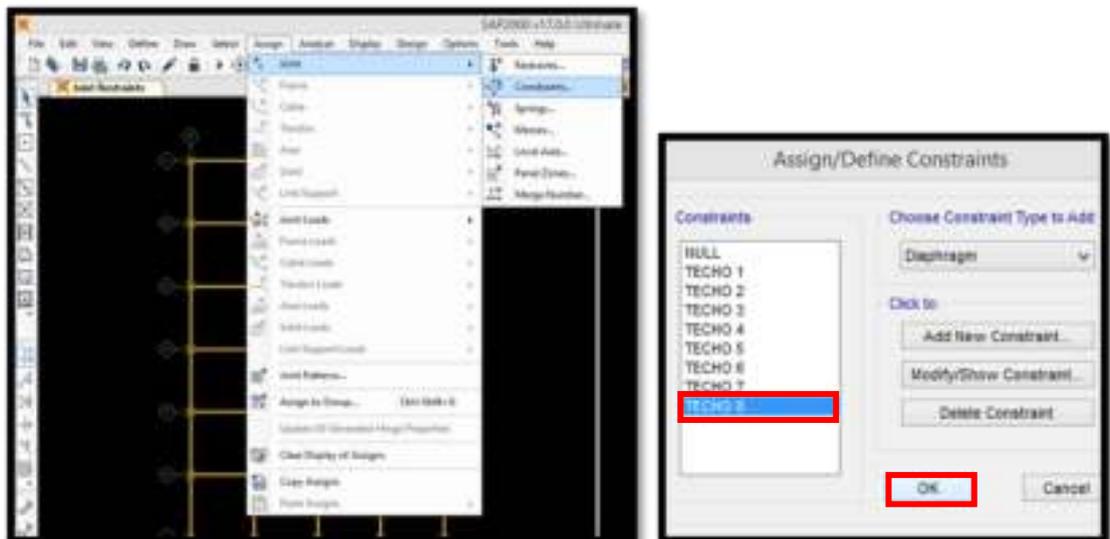
57. Lo único que tenemos que hacer en la ventana emergente es escribir el nombre de nuestro diafragma, en este caso por ser el primero será **TECHO 1**. Nuevamente realizaremos los pasos 56 y 57 hasta crear los diafragmas de todos los niveles uno por uno.



58. Finalmente, asignamos los diafragmas en cada nivel, iniciaremos seleccionando todos los nudos (incluyendo el C.M.) del último techo.



59. Nos dirigimos a la opción **Assign**→**Joint**→**Constraints** y le indicaremos al programa que deseamos asignarles el diafragma **TECHO 8**, luego seleccionamos los nudos del 7mo techo incluyendo el C.M y le asignaremos el diagrama **TECHO 7**. Repetimos el mismo proceso hasta asignar todos los diafragmas.



60. Finalmente, guardamos el modelo en SAP2000 como MODELAMIENTO GEOMÉTRICO.

## 2.4 ANÁLISIS SÍSMICO

### 2.4.1 RECOMENDACIONES Y PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS

Se emplearon las recomendaciones de la Norma **ASCE 7-10** en su capítulo 18 (requerimientos de diseño sísmico para estructuras con sistemas de disipación)

para la determinación del sismo de diseño, el mismo que se empleó para el cálculo de las propiedades de los disipadores. Asimismo, se siguieron los lineamientos de la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente y las recomendaciones de los especialistas de la empresa **CDV Ingeniería Antisísmica**, los cuales emplean esta misma norma (ASCE 7-10) pero ajustando algunos criterios en concordancia a la realidad de nuestro país.

#### **A) RECOMENDACIONES**

- ✓ Los registros sísmicos que se empleen deben reflejar la realidad del proyecto, es decir, deben de haber sido tomados en suelos con características similares al suelo donde se plantará la cimentación.
- ✓ Se deben de emplear al menos 3 registros sísmicos en sus dos componentes horizontales.
- ✓ La Norma Peruana señala que estos registros deben ser escalados a un espectro de diseño, este espectro de pseudo-aceleraciones debe ser calculado fijando el valor del coeficiente de reducción sísmica  $R=1$ .

#### **B) PROCEDIMIENTO**

Los pasos que se han de seguir para determinar el sismo de diseño son los siguientes:

1. Realizar el análisis dinámico espectral de la edificación y calcular las derivas de entrepiso considerando el coeficiente de reducción sísmica  $R=1$ , esta reducción del valor de  $R$  se realiza para que el edificio entre en el rango inelástico ante un sismo severo. Es importante tener en cuenta que para la obtención de distorsiones, los desplazamientos laterales calculados en el análisis ya no se multiplican por  $0.75 \cdot R$  sino simplemente por 1.
2. Escalar los acelerogramas en sus dos componentes al espectro de diseño (paso 1). Para poder obtener una mayor exactitud se recomienda emplear un software especializado para tal tarea, en esta investigación se realizó el escalamiento con el programa SeismoMatch versión 2.1.0 (recomendado por Taylor Devices Inc.).
3. Realizar el análisis tiempo-historia con los acelerogramas escalados. Es importante tener en cuenta que los registros sísmicos han sido tomados en dos componentes (E-W y N-S) de manera que el método correcto para analizar la estructura se muestra en las figuras 2.2 y 2.3

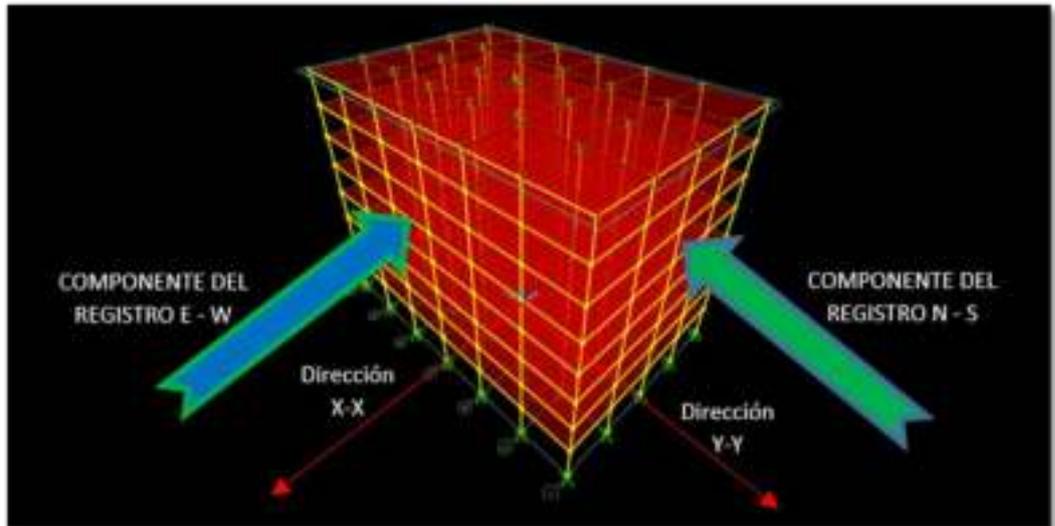


Fig. 2.2 Primer Caso de análisis

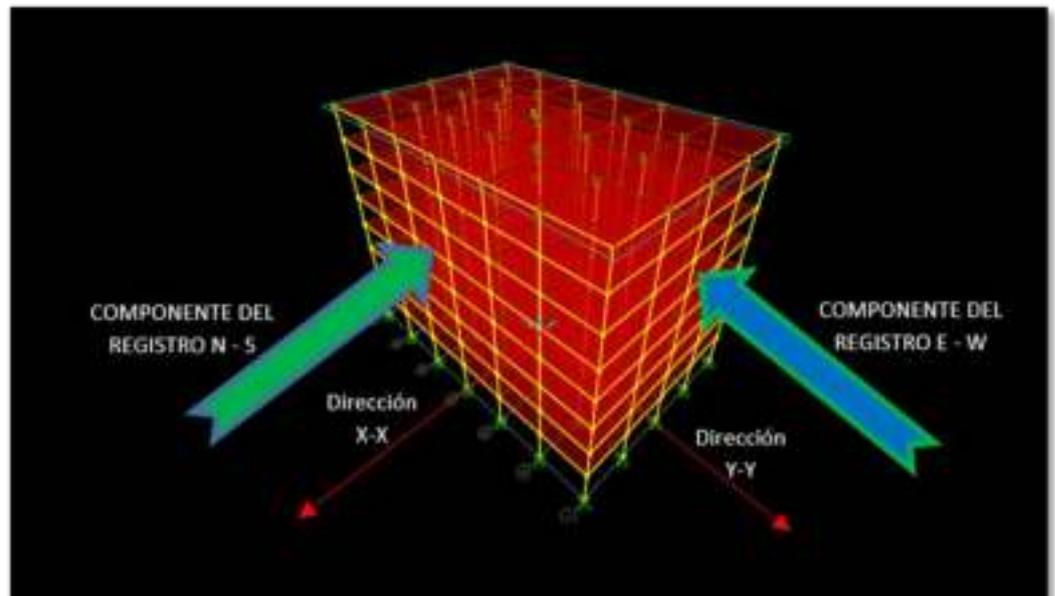


Fig. 2.3 Segundo caso de análisis

Por cada registro sísmico que se emplee en el análisis tiempo-historia, deberán analizarse dos casos por separado, el caso 1, cuando la componente E-W del registro sísmico actúa sobre la dirección X-X de la estructura mientras que sobre la dirección Y-Y lo hace la componente N-S y el caso 2, donde la componente N-S del registro sísmico actúa sobre la dirección X-X mientras que sobre la dirección Y-Y lo hace la componente E-W.

Finalmente, para determinar el sismo de diseño, realizar una comparación entre las distorsiones de entrepiso obtenidas del análisis dinámico espectral (paso 1) y del análisis tiempo-historia (paso 3). El sismo de diseño será

aquel que se ajuste más a las distorsiones obtenidas del análisis dinámico espectral (comportamiento esperado).

A continuación se muestra el procedimiento expuesto donde se determinó el sismo de diseño que, posteriormente, se empleó para el diseño del sistema de disipación.

## 2.4.2 ANÁLISIS DINÁMICO ESPECTRAL

Hasta el momento se logró modelar geoméricamente la estructura, ahora realizaremos el análisis estructural de la edificación; para ello, seguiremos el siguiente procedimiento:

### 1. Determinamos los parámetros sísmicos

Factor de Zona (Z), la ciudad de Lima se encuentra ubicada en la zona sísmica 3, por lo tanto según la Tabla N° 1 de la Norma E030-2006 le corresponde un valor de  $Z=0.4$

Parámetros del Suelo (S) y (Tp), según la descripción de la edificación (ver pág. 23) la estructura estará ubicada sobre un suelo tipo S1 (Rígido), al mismo que le corresponde un factor de amplificación del suelo  $S=1$  y un período  $Tp=0.4s$  como se indica en la Tabla N° 2 de la Norma E030-2006

Categoría de la Edificación (U), según la Tabla N° 3 de la Norma E030-2006, a una edificación común (Oficinas) le corresponde un factor  $U=1$ .

Factor de Reducción (R), como se mencionó, anteriormente, este valor se toma en base a consideraciones especiales, fijándose su valor  $R=1$  (Fuente: ASCE 7-10 Capítulo 16)

Tabla 2.2 Parámetros sísmicos

Parámetros	Direcciones X e Y
Z	0.4
U	1
S	1
Tp	0.4s
Rxx=Ryy	1

2. Abrir una hoja de cálculo, en este caso emplearemos el Software Excel 2013
3. Iniciaremos creando una plataforma del Factor de amplificación sísmica del suelo (C) vs el período (T)

T	C
0	2.500
0.2	2.500
0.4	2.500
0.6	1.667
0.8	1.250
1	1.000
1.2	0.833
1.4	0.714
1.6	0.625
1.8	0.556
2	0.500
2.2	0.455
2.4	0.417
2.6	0.385
2.8	0.357
3	0.333
3.2	0.313
3.4	0.294
3.6	0.278
3.8	0.263
4	0.250

La fórmula que describe la relación entre estos valores es:

$$C = 2.5 \left( \frac{T_p}{T} \right) \leq 2.5$$

Dónde:

$$T_p = 0.4s$$

La fórmula en Excel será:

$$=SI(2.5*(0.4/B8)<2.5)$$

Para esta investigación el valor de T se tomó desde 0 hasta 8 con una frecuencia de 0.2s

- Una vez tengamos los valores de C simplemente los multiplicamos por Z, U y S

T	C
0	2.500
0.2	2.500
0.4	2.500
0.6	1.667
0.8	1.250
1	1.000
1.2	0.833
1.4	0.714
1.6	0.625
1.8	0.556
2	0.500

PARAMETROS SISMICOS	
Z	0.4
U	1
S	1

T	S
0	1.000
0.2	1.000
0.4	1.000
0.6	0.667
0.8	0.500
1	0.400
1.2	0.333
1.4	0.286
1.6	0.250
1.8	0.222
2	0.200

La gravedad no ha sido considerada aun en los cálculos, el valor de esta será introducida directamente en el programa SAP2000 y al momento de ingresar el espectro de diseño en el software SeismoMatch v.2.1.0

En la figura 2.4 se muestra el espectro de pseudo-aceleraciones (espectro objetivo), el cual será empleado para escalar los acelerogramas seleccionados para el análisis tiempo-historia.

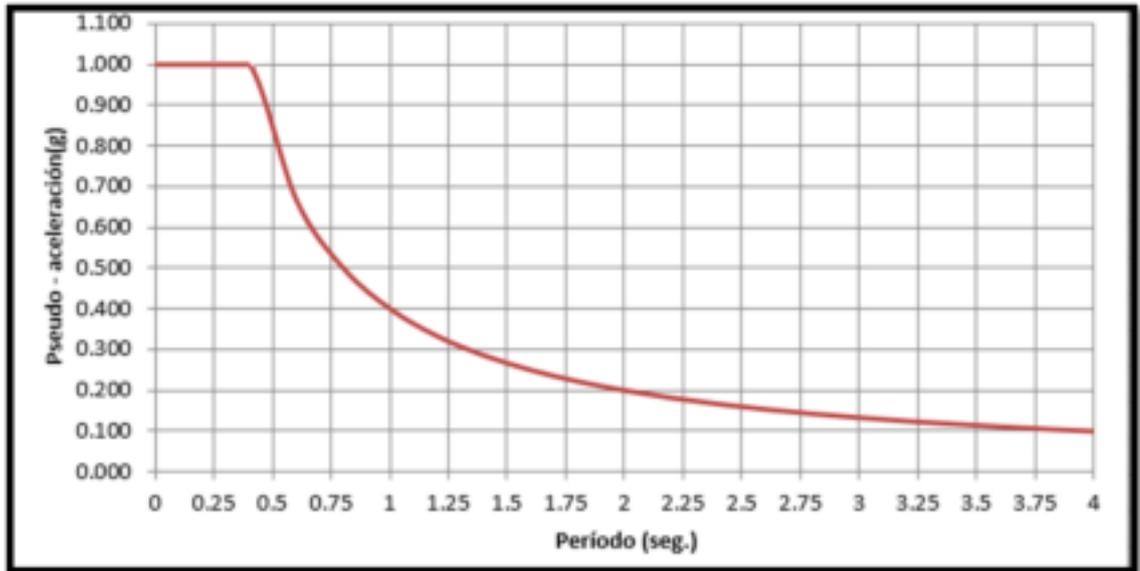
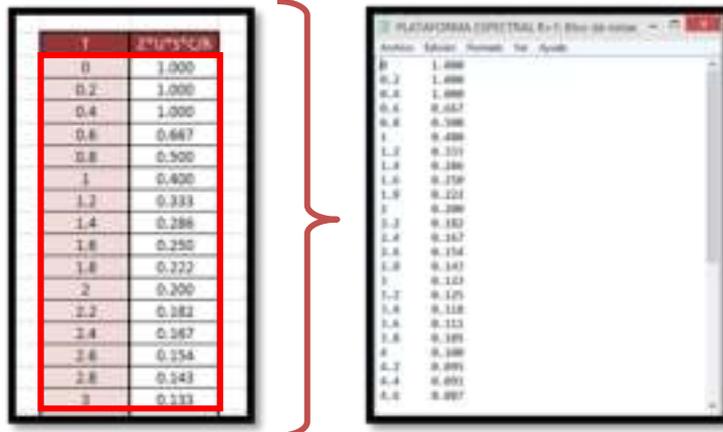
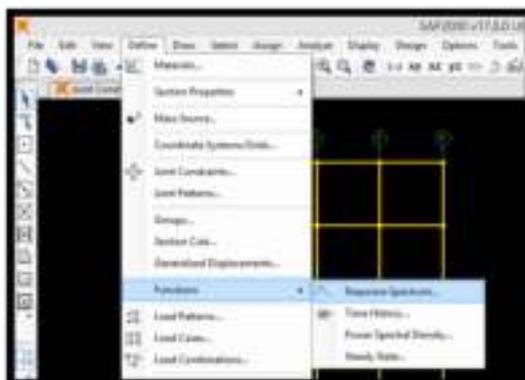


Fig. 2.4 Espectro de pseudo - aceleración (R=1)

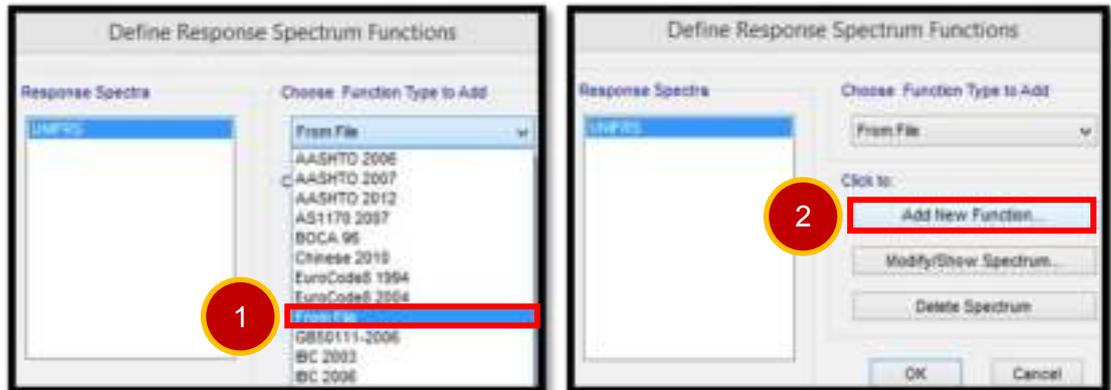
- Para iniciar con el análisis dinámico espectral de la edificación, copie los valores de T vs ZUCS/R y llévelos a un bloc de notas, guarde al archivo como PLATAFORMA ESPECTRAL R=1



- Ingresamos al programa SAP2000 y abrimos nuestro archivo MODELAMIENTO GEOMÉTRICO (creado en la página 46)
- Para generar el análisis espectral nos dirigimos a **Define**→**Functions**→**Response Spectrum**



8. En la ventana **Define Response Spectrum Functions** señalar que deseamos importar la plataforma espectral de un archivo (**From File**) y daremos un click en **Add New Function**

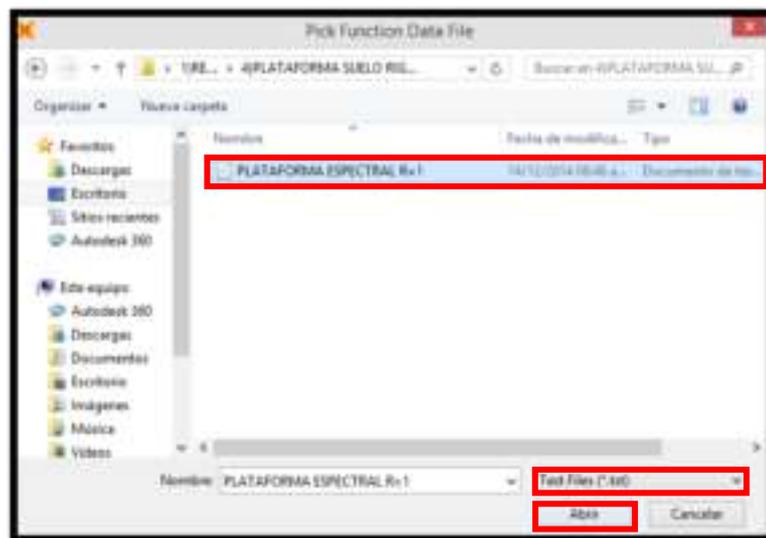


9. Se abrirá la ventana **Response Spectrum Functions Definition**; en ella ingresamos la siguiente información:

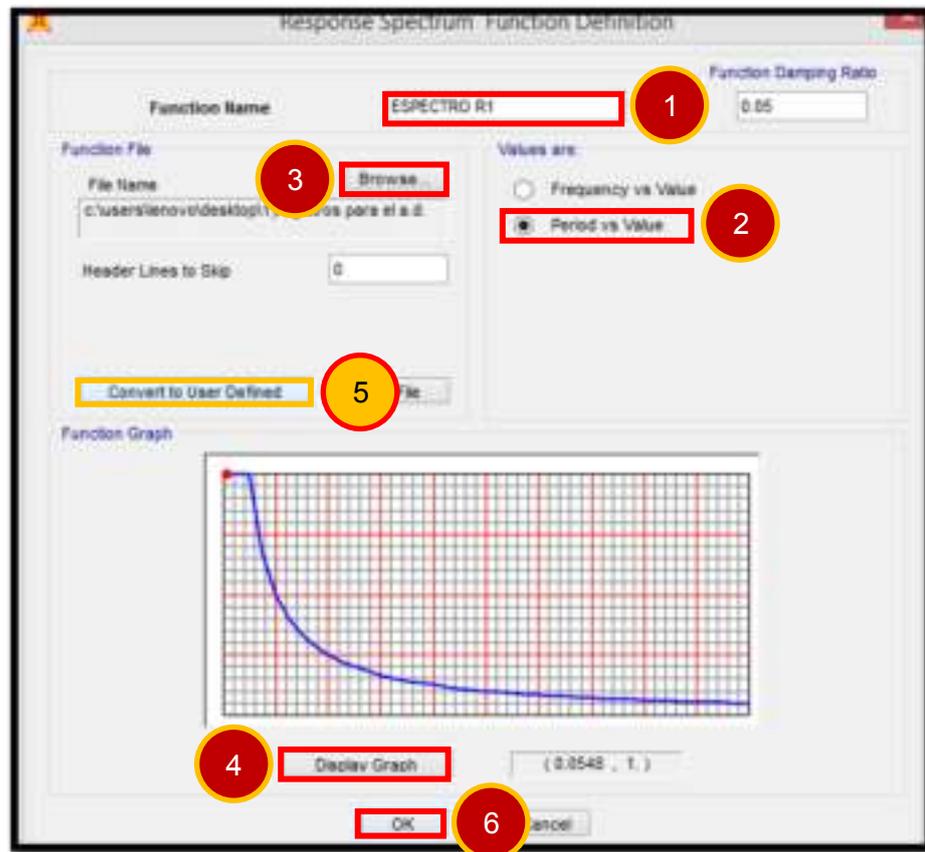
Function Name : **ESPECTRO R1**

Values are : **Period vs Value** → es decir T vs ZUCS/R

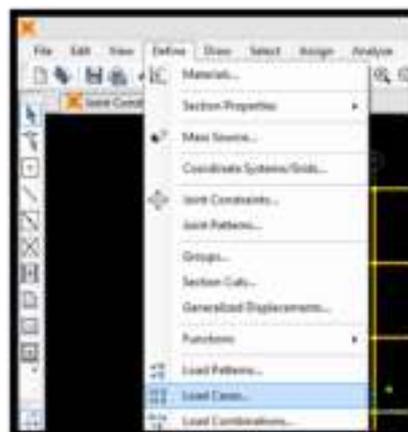
10. Daremos un click en **Browse** y buscaremos la ubicación del archivo creado en el paso 5 (PLATAFORMA ESPECTRAL R=1), recuerde que es un archivo tipo texto – **Text Files (\*.txt)**



11. Para poder visualizar de manera gráfica los datos importados daremos un click en **Display Graph** y en la siguiente imagen se muestran los pasos 9, 10 y 11



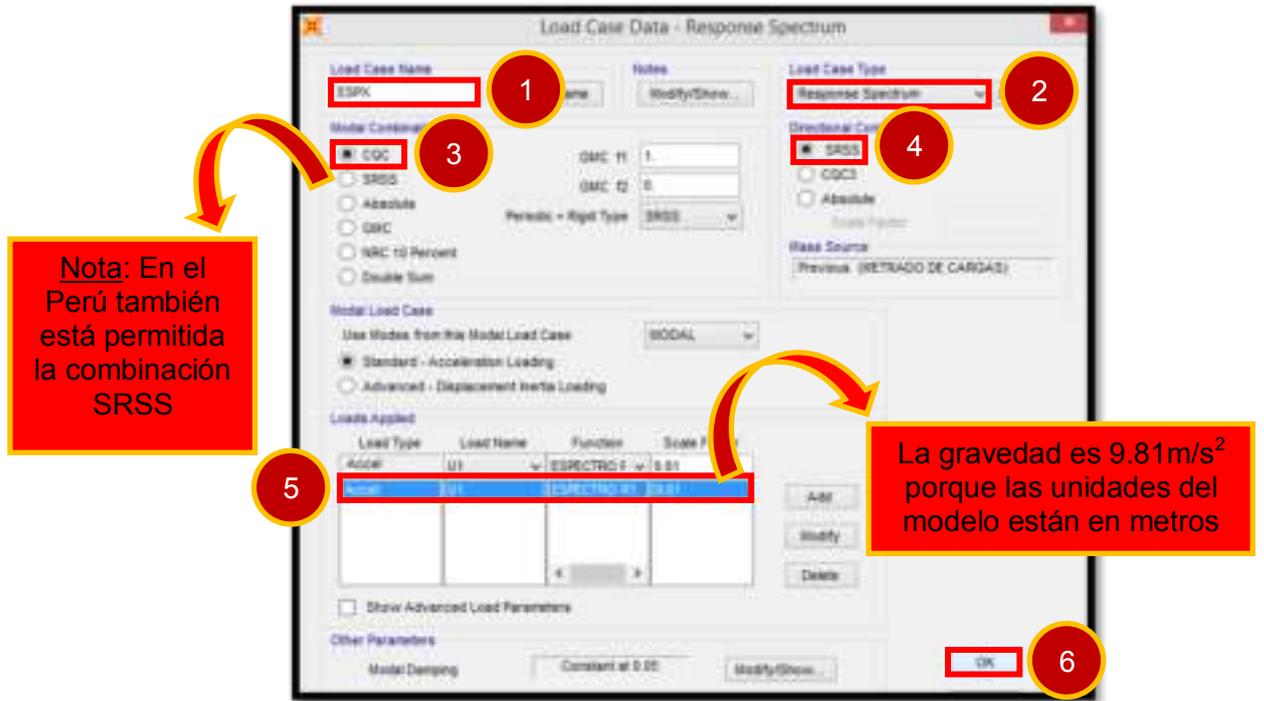
12. De manera opcional usted puede hacer que el programa guarde el archivo importado, convirtiéndolo en un archivo propio de nuestro modelo (Opción **Convert to User Defined**); si no se realiza este paso cada vez que cambiemos la ubicación de nuestro archivo SDB o el archivo **PLATAFORMA ESPECTRAL R=1** tendremos nuevamente que cargar la plataforma espectral (ver paso 10)
13. Procedemos a generar los casos de carga para este tipo de análisis, para ello, nos dirigimos a **Define**→**Load Cases**



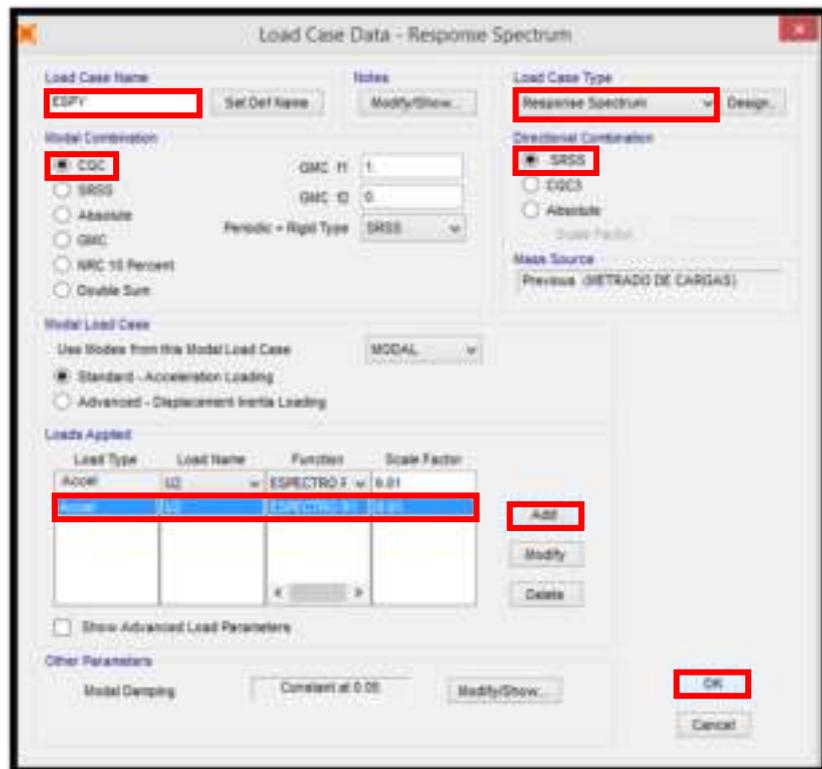
14. Se abrirá la ventana **Load Case Data – Response Spectrum**, a este tipo de estado de carga lo vamos a denominar **ESPX** (representa al sismo en la

dirección X), el tipo de análisis será **Response Spectrum**, la Combinación Modal será **CQC** (Combinación cuadrática completa), la dirección de la combinación será **SRSS** (Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados)

15. El tipo de carga será una aceleración en la Dirección X (**U1**), la función a emplear será la que creamos en los pasos (7-11), es decir, **ESPECTRO R1** y es en la opción **Scale Factor** donde ingresaremos la gravedad. En la siguiente imagen se muestran los pasos 14 y 15

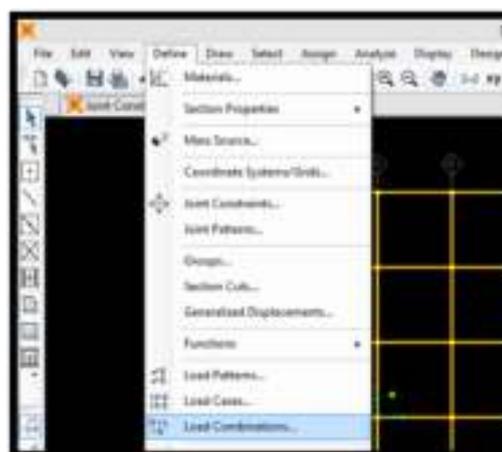


16. Realizaremos el mismo procedimiento (pasos 14 y 15), esta vez trabajaremos con la dirección Y, a este tipo de estado de carga lo vamos a denominar **ESPY**, siendo la única variación que la aceleración será en la dirección Y(**U2**)

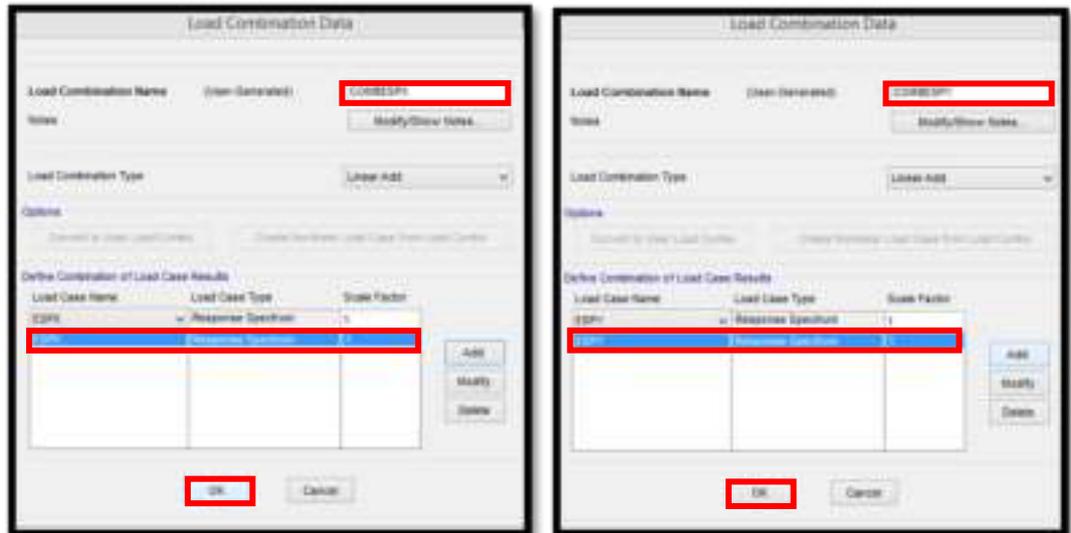


17. Como se mencionó anteriormente (ver paso 1 de la página 47) los desplazamientos que obtengamos en los C.M. ya no se amplifican por  $0.75 \cdot R$ , así que crearemos combinaciones de carga con un factor de amplificación igual a 1. Este paso es opcional, solo se realizará para reforzar la idea y porque es costumbre en este tipo de análisis visualizar los desplazamientos empleando combinaciones en ambas direcciones.

18. Para crear las combinaciones nos dirigiremos a **Define** → **Load Combinations**



19. En la ventana emergente hacer click en **Add New Combo**, al hacer esto se abrirá la ventana **Load Combination Data** e ingresamos los datos tal como se muestra a continuación.

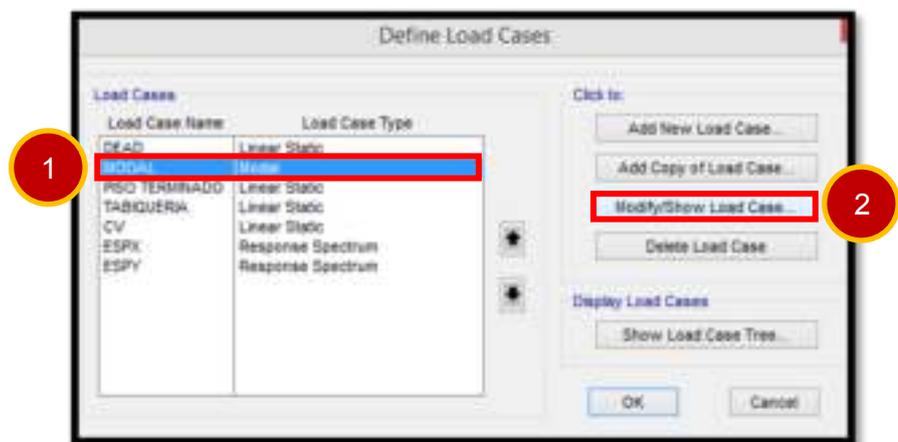


20. Para finalizar el modelo y poder visualizar los resultados es indispensable ajustar el número de modos considerados para el análisis.

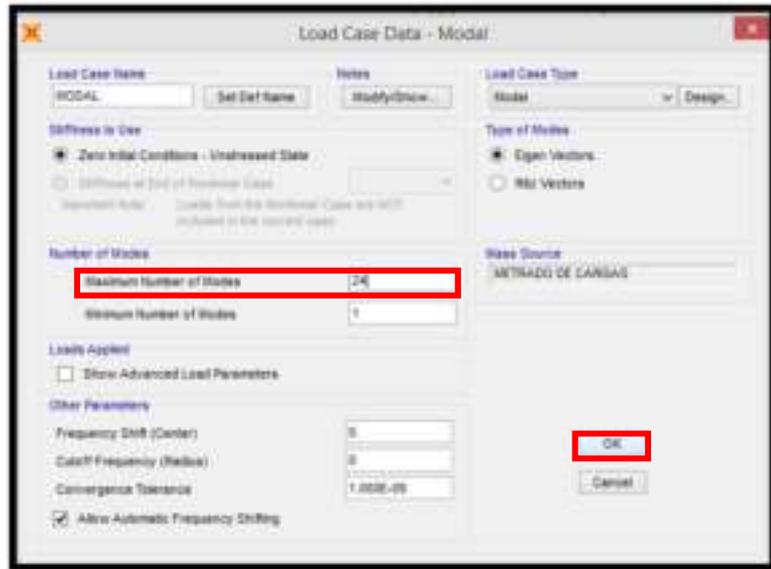
En las oficinas de proyectos se consideran 3 modos por piso, en este caso se utilizaron un total de  $8 \times 3 = 24$  modos de vibración.

21. Para ajustar el número de modos nos dirigimos a **Define** → **Load Cases**

22. Seleccionar **Modal** y hacer click en **Modify / Show Load Case**

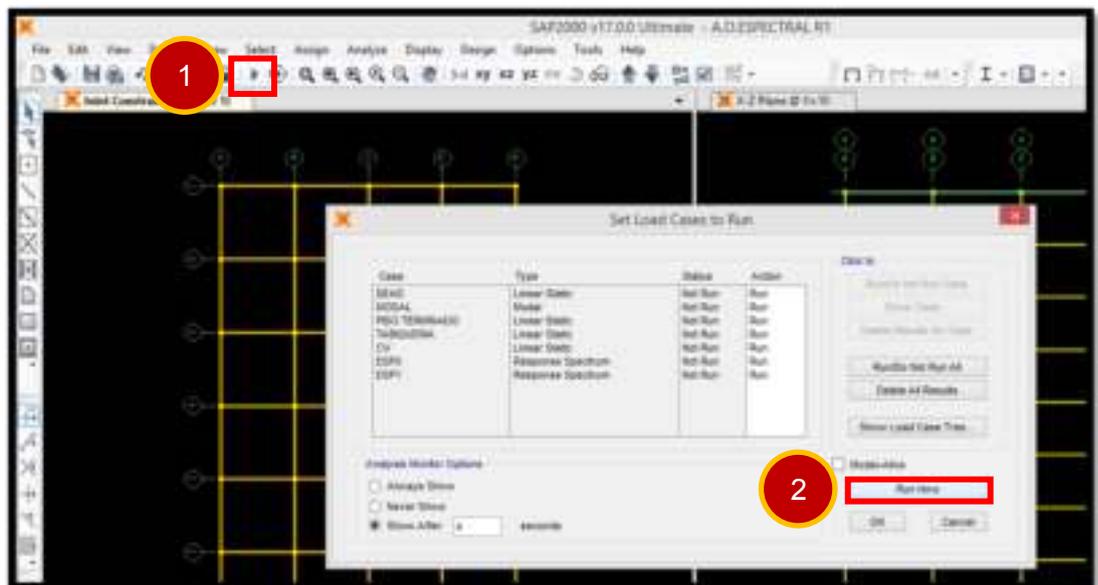


23. Se abrirá la ventana **Load Case Data – Modal**, en la opción **Maximum Number of Modes** ingresar el número de modos que deseamos se considere para el análisis, en este caso **24**



24. Finalmente, ya tenemos el modelo concluido y ahora podremos visualizar las distorsiones obtenidas en nuestro análisis.

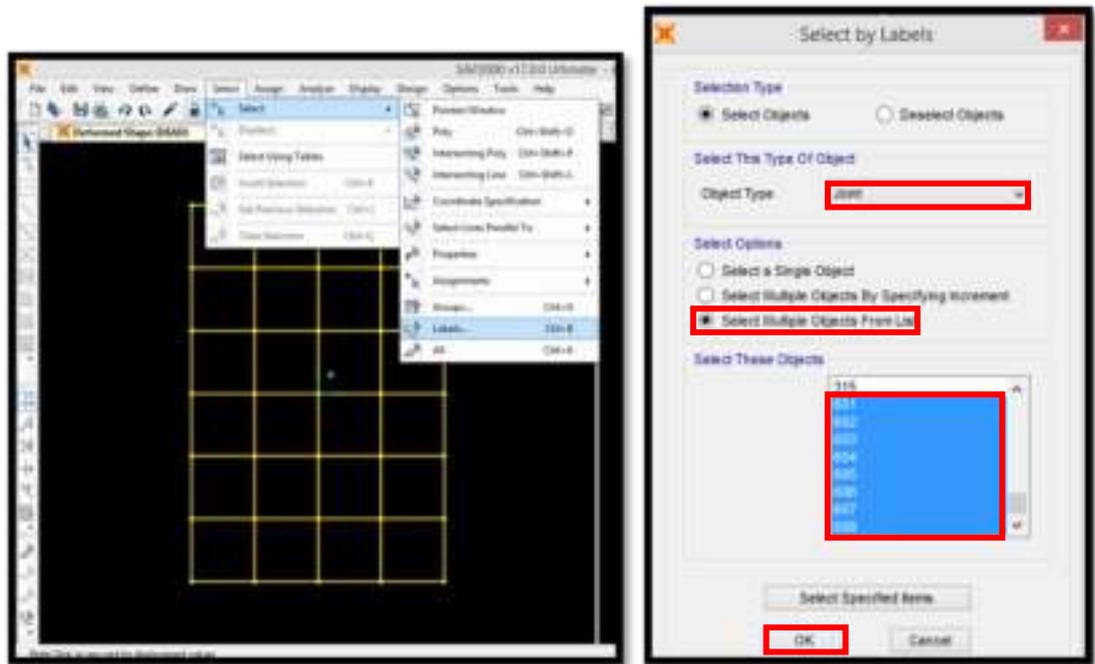
25. Ahora corremos el modelo, para ello, hacemos click en la opción **Run Analysis**, en la ventana emergente no realizar ningún cambio solo dar un click en **Run Now**



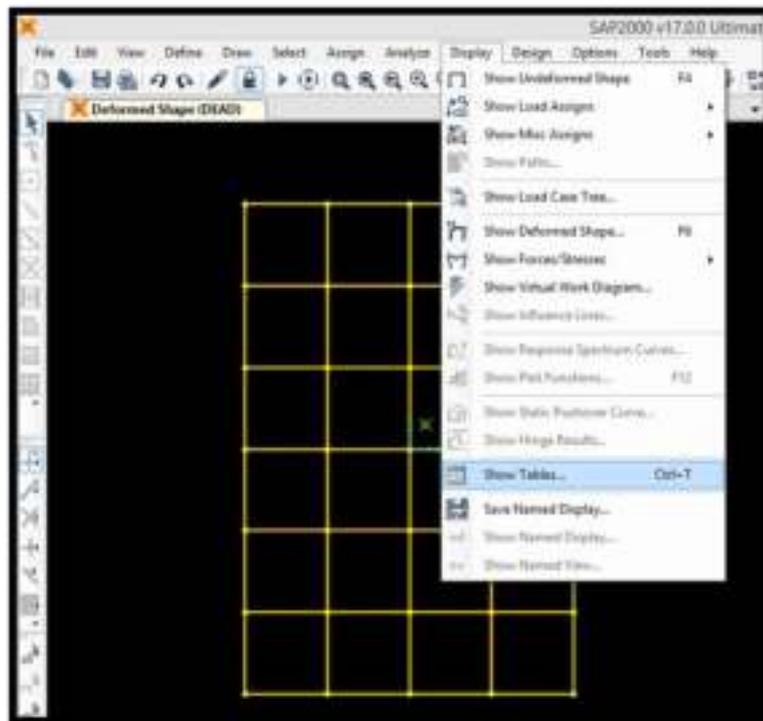
26. Una vez el modelo haya corrido seleccionamos los centros de masa de cada nivel (para visualizar sus desplazamientos), para ellos nos dirigiremos a **Select**→**Labels**

27. En la ventana **Select by Labels** nos dirigimos a las opciones de selección y señalamos que deseamos seleccionar múltiples nudos de una lista, en la parte final de la lista estarán los nudos 601, 602, ..., 608 los cuales son

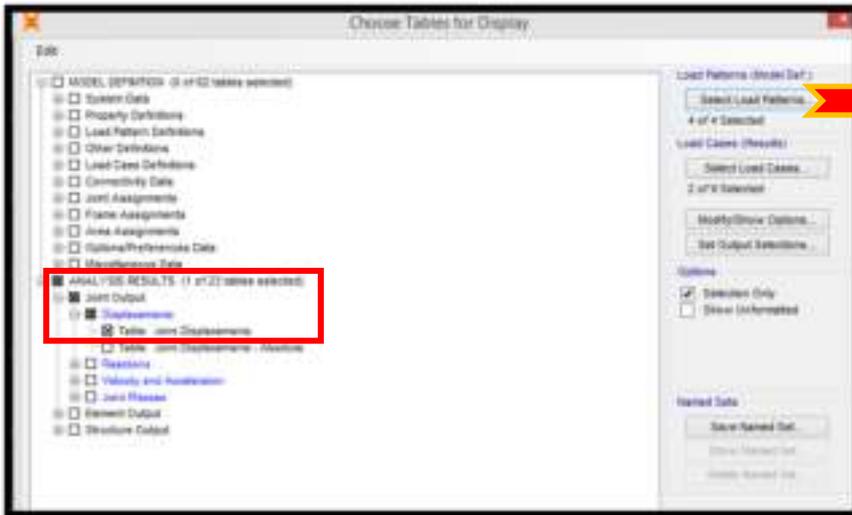
nuestros C.M del 1er al 8avo piso. En las siguientes imágenes se muestran los pasos 26 y 27



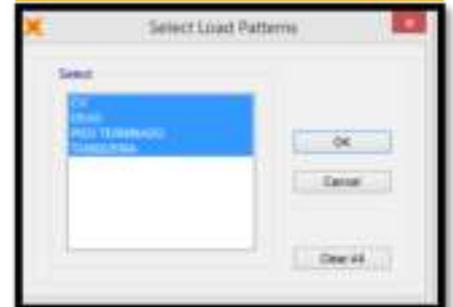
28. Posteriormente iremos a la opción **Display**→**Show Tables**



29. Se abrirá la ventana **Choose Tables for Display** en ella abriremos la siguiente ruta



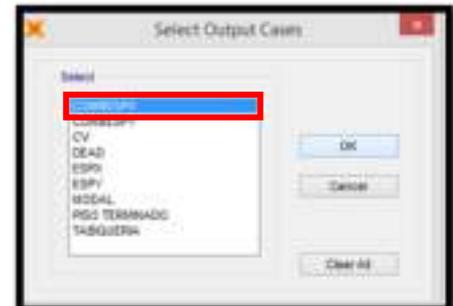
Le pedimos al software que considere el peso propio, cargas vivas y muertas (Estas casillas siempre deben estar seleccionadas)



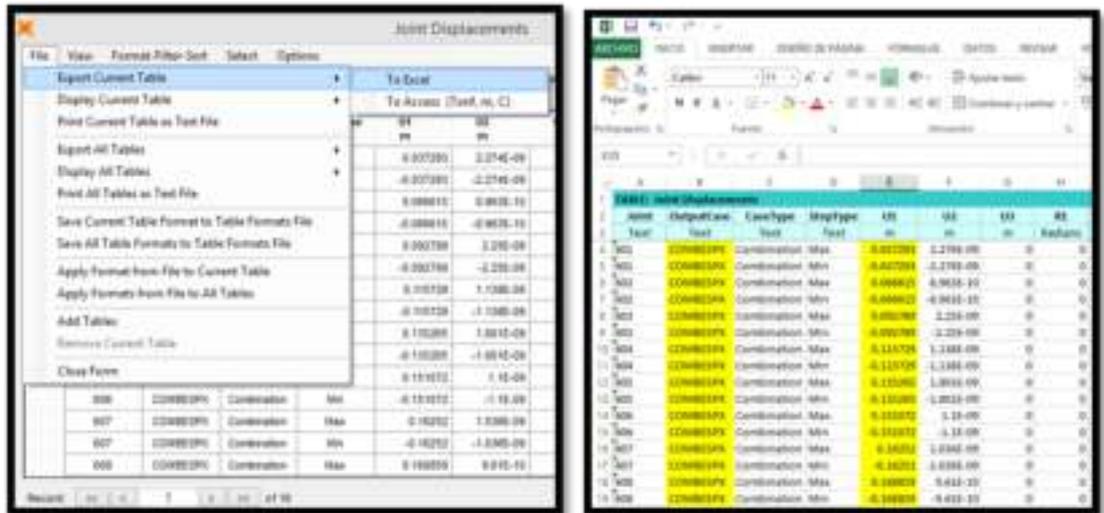
30. Señalaremos que deseamos visualizar los desplazamientos en X, seleccionaremos COMBESPX tal como se muestra a continuación.



Seleccionaremos el tipo de desplazamiento que deseamos obtener, en X (COMBESPX), en Y (COMBESPY) o desplazamientos modales (MODAL)



31. SAP2000 nos permite exportar las tablas a Excel tal como muestra en las siguientes imágenes, recordar que estamos viendo los desplazamientos en U1 (COMBESPX), para la dirección Y (COMBESPY) tendremos que ver los desplazamientos en U2.



32. Los desplazamientos y las distorsiones obtenidas del Análisis Dinámico Espectral en ambas direcciones se muestran a continuación.

Tabla 2.3 Control de distorsiones en dirección X – X

PISO	Desplazamiento en los centro de masas (m)	Distorsión de entrepiso D/h	Norma E030 (Distorsión máxima)	Control Norma E030
8	0.1689	0.0021	0.007	SI
7	0.1625	0.0038	0.007	SI
6	0.1511	0.0053	0.007	SI
5	0.1353	0.0065	0.007	SI
4	0.1157	0.0076	0.007	NO
3	0.0928	0.0087	0.007	NO
2	0.0666	0.0098	0.007	NO
1	0.0373	0.0110	0.007	NO

Tabla 2.4 Control de distorsiones en dirección Y – Y

PISO	Desplazamiento en los centro de masas (m)	Distorsión de entrepiso D/h	Norma E030 (Distorsión máxima)	Control Norma E030
8	0.1057	0.00143	0.007	SI
7	0.1014	0.00251	0.007	SI
6	0.0938	0.00352	0.007	SI

5	0.0833	0.00439	0.007	SI
4	0.0701	0.00514	0.007	SI
3	0.0547	0.00577	0.007	SI
2	0.0374	0.00622	0.007	SI
1	0.0188	0.00552	0.007	SI

33. Finalmente, para concluir guardaremos el modelo SAP2000 como A.D.ESPECTRAL R1

### 2.4.3 ESCALAMIENTO DE ACELEROGRAMAS AL ESPECTRO DE DISEÑO

A continuación se mostrará de donde se descargaron los registros sísmicos y como estos fueron escalados al espectro objetivo (R=1) empleando el software SeismoMatch v.2.1

1. Los registros sísmicos o acelerogramas deben de haber sido tomados en suelos que reflejen la realidad sobre la cual se proyecta el edificio, estos registros sísmicos deberán ser provistos por el Instituto Geofísico Del Perú o podrán obtenerse del REDACIS (Red Acelerografica del CISMID)
2. En este caso debido a que la edificación se ubica en la ciudad de Lima sobre un suelo de Grava de buena calidad, los registros sísmicos deben de haber sido tomados en suelos tipo S1 (Muy Rígidos - Gravas)

Los registros sísmicos que se consideraron para esta investigación son los siguientes:

Tabla 2.5 Ubicación de las estaciones

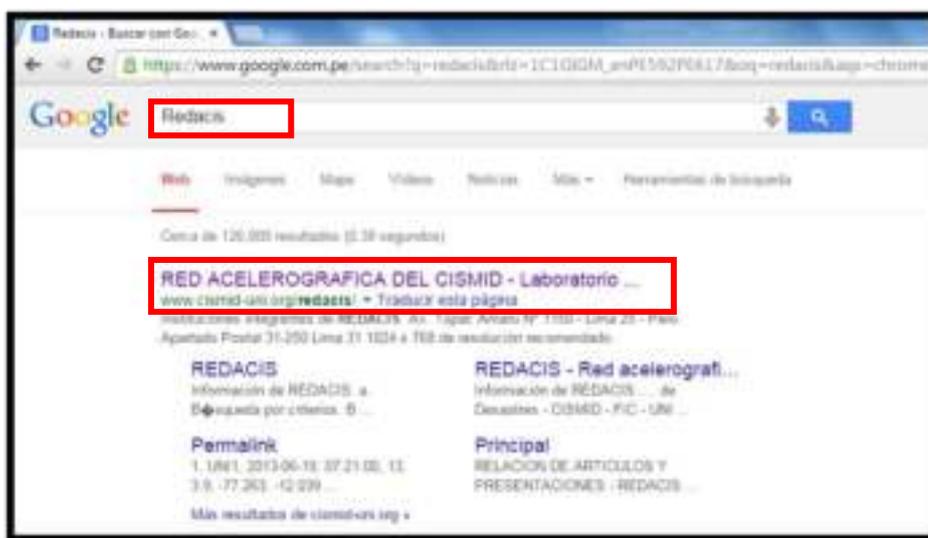
Sismo	Ubicación de la estación	Tipo de suelo
17 de octubre de 1966	Parque de la reserva (Lima)	Grava gruesa (S1)
31 de mayo de 1970	Parque de la reserva (Lima)	Grava gruesa (S1)
03 de octubre del 1974	Parque de la reserva (Lima)	Grava gruesa (S1)

Tabla 2.6 Registros sísmicos considerados para el análisis

Localización de la estación	Fecha	Componentes	Aceleración máxima (cm/s <sup>2</sup> )	Duración (s)
Lima	17 de octubre de 1966	E - W	-180.6	65.64
		N - S	-269.3	
Lima	31 de mayo de 1970	E - W	-104.8	45.16

		N - S	-97.7	
Lima	3 de octubre del 1974	E - W	-192.5	97.96
		N - S	179	

- Para descargar los registros sísmicos nos dirigimos al buscador de Google y escribiremos **REDACIS**, ingresaremos a la primera opción (**RED ACELEROGRÁFICA DEL CISMID – Laboratorio**)



- Una vez dentro del sitio web pediremos que se nos muestre los registros sísmicos que disponen.



5. Una vez ejecutado el paso 4 podremos ver la lista completa de las estaciones acelerográficas del Perú, en cada una podremos encontrar los registros sísmicos que se hayan tomado en ellas. Nos dirigimos a la parte final de la página y pedimos que nos muestren los registros sísmicos registrados en Lima desde 1951 a 1974.



6. Finalmente, podremos observar todos los sismos registrados en Lima antes de 1974, seleccionaremos los más representativos.

  
**RED ACELEROGRAFICA (REDACE)**  
**BASE DE DATOS**  
 Derechos Reservados © CISMID 2007

**REGISTROS SISMICOS**

No.	Estación	fecha	Hora	Lat	Long	Ml	Mw	Ms	mb	Prof	Descarga
1	prq	1951-01-31	11:39	12.21	78.93	6.0		5.5		50	prq_d
2	prq	1966-10-17	16:41	10.83	78.65				6.4		prq_d
3	prq	1970-05-31	15:23	09.27	78.84		7.9	7.8	6.4	71.30	prq_d
4	prq	1971-11-29	15:14	11.34	77.79		5.6		5.3	53.90	prq_d
5	zar	1974-01-05	03:33	12.38	76.28		6.5	6.6	6.1	91.70	zar_d
6	prq	1974-10-03	09:21	12.28	77.54		6.1	7.8	6.2	21.20	prq_d
7	acc	1974-10-03	09:21	12.28	77.54		6.1	7.8	6.2	21.20	acc_d
8	prq	1974-10-05	03:33	12.38	76.28		6.5	6.6	6.1	91.70	prq_d
9	mol	1974-11-09	07:59	12.52	77.59			7.2	6.0	12.80	mol_d
10	prq	1974-11-09	07:59	12.52	77.59			7.2	6.0	12.80	prq_d

Nota: Los sismos de 1966 ,1970 y 1974 son los que usualmente se toman cuando se tiene que realizar un análisis tiempo-historia en edificaciones ubicadas en Lima.

Como ejemplo, a continuación se muestra el Registro del sismo del 17 de octubre de 1966

Notas:

- 1) Solo se muestran las aceleraciones de los 0.04 primeros segundos
- 2) Prestar atención a los datos resaltados

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
 CENTRO PERUANO-JAPONÉS DE INVESTIGACIONES  
 SÍSMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES  
 AV. TÚPAC AMARU N° 1150 - Lima 25 - PERÚ Apartado Postal 31-250 Lima 31  
 Teléfonos (51 - 1) 482-0777, 482-0804, 482-0790 FAX 481-0170  
 e-mail: director@cismid.uni.edu.pe http://www.cismid.uni.edu.pe

ARCHIVO ESTANDAR DE ACELERACIÓN:

NOMBRE DEL ARCHIVO : PRQ-6610171641

REF. CATALOGO ACELEROGRAMAS :

DATOS DE LA ESTACIÓN :

NOMBRE DE LA ESTACION : PARQUE DE LA RESERVA

CLAVE DE LA ESTACIÓN : PRQ

LOCALIZACIËN DE LA ESTACIÓN : Parque de la Reserva  
 : Lima

COORDENADAS DE LA ESTACIÓN : 12.06°LAT. S  
 : 77.05°LONG. W

ALTITUD(msnm) :

TIPO DE SUELO : Grava gruesa

INSTITUCIÓN RESPONSABLE :

DATOS DEL ACELEROGRAFO :

MODELO DEL ACELEROGRAFO :

NÚMERO DE SERIE DEL ACELEROGRAFO :

NÚMERO DE CANALES : 3

ORIENTACIÓN, Canal1/Canal2/Canal3 : E-W N-S U-D

FREC. DE MUESTREO, Canal1/Canal2/Canal3 (muestra: 50 50 50  
 MAX. AMPLITUD DE SENSORES, Canal1/Canal2/Canal3 :

PERIODO DEL INSTRUMENTO, Canal1/Canal2/Canal3 (s: 0.064 0.064 0.065  
 AMORTIGUAMIENTO DE SENSORES, Canal1/Canal2/Canal: 0.55 0.59 0.53  
 INTERVALO DE MUESTREO, Canal1/Canal2/Canal3 (s) : 0.02 0.02 0.02

UMBRAL DE DISPARO, Canal1/Canal2/Canal3 (Gal) :

MEMORIA DE PRE-EVENTO (s) :

TIEMPO DE POST-EVENTO (s) :

DATOS DEL SISMO:

FECHA DEL SISMO : 17 de Octubre de 1966

HORA EPICENTRO (LOCAL) : 16:41

COORDENADAS DEL EPICENTRO : 10.70°LAT. S  
 : 78.70°LONG. W

PROF. FOCAL /DIST. EPIC. /DIST. HIPOC. (Km) : 24 237 239

MAGNITUD : Mb MS MW  
 : 6.3\*\* 7.5\*\* 7.75S  
 : 6.4\* 8\* 8.1\*

FUENTE DE LOS DATOS EPICENTRALES : USCGS(\*\*) Silgado(S)  
 IGP(\*)

DATOS DE ESTE REGISTRO:

HORA DE LA PRIMERA MUESTRA (GMT-5) :

**DURACIÓN DEL REGISTRO** (s), Canal1/Canal2/Canal3 : **65.64** 65.62 65.66

**NUM. TOTAL DE MUESTRAS**, Canal1/Canal2/Canal3 : **3283** 3282 3284

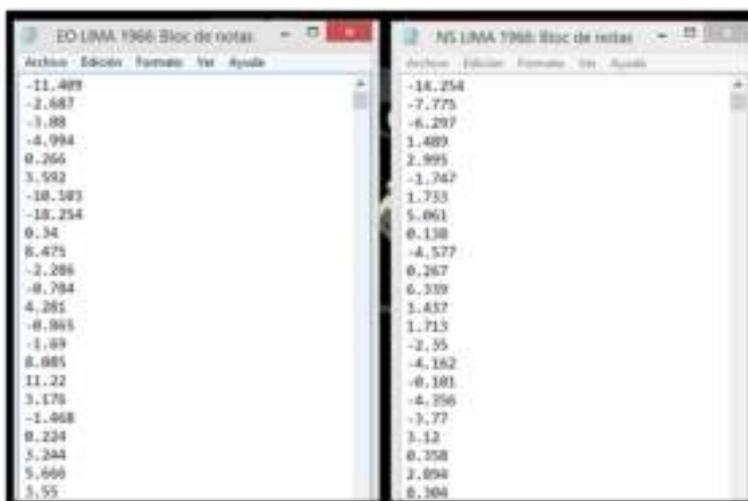
**ACEL. MAX. (GAL)**, Canal1/Canal2/Canal3 : **-180.6 -269.3** 94.2

**UNIDADES DE LOS DATOS** : **Gal (cm/s/s)**

DATOS DE ACELERACION:

DT	E-W	N-S	U-D
0.00	-11.409	-14.254	4.153
0.02	-2.687	-7.775	-5.003
0.04	-3.080	-6.297	-4.567

- Antes de proceder al escalamiento de los registros sísmicos debemos copiar los valores de las Direcciones E-W y N-S en un bloc de notas (cada una por separado)



- Guarde la componente EO como **EO LIMA 1966** y la componente NS como **NS LIMA 1966**
- Como ejemplo se mostrará el escalamiento de la componente EO del sismo de Lima del 66, para ello, emplearemos un software especializado (SeismoMatch), quedando a cargo del interesado repetir el mismo procedimiento para escalar la componente NS del mismo sismo y las componentes EO y NS de los sismos de Chimbote del 70 y Lima del 74.

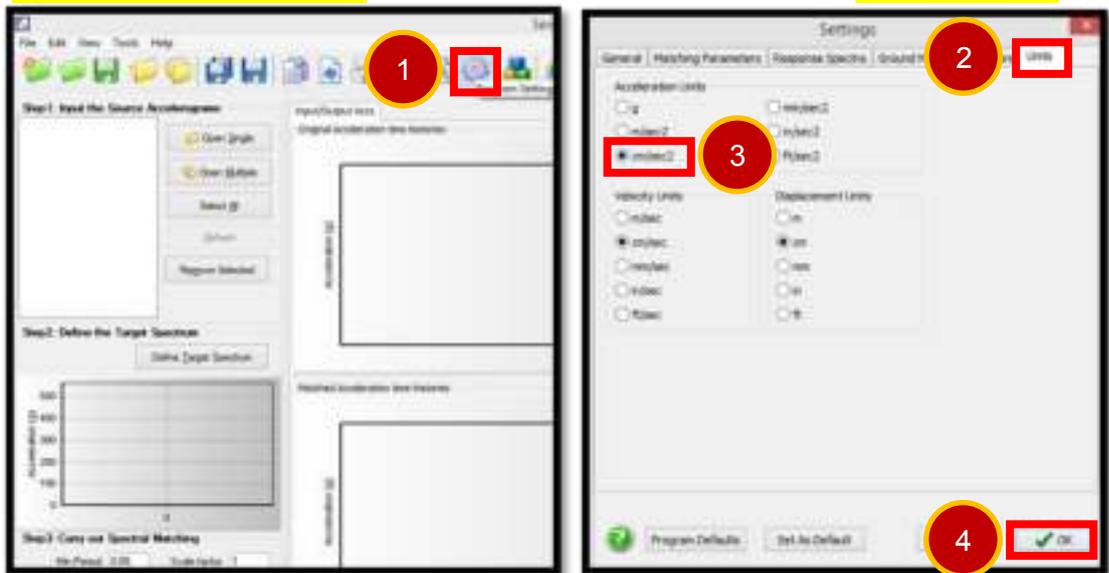
**OBSERVACIONES IMPORTANTES:**

- Antes de iniciar con el escalamiento es recomendable tener en una sola carpeta los archivos tipo texto **EO LIMA 1966**, **NS LIMA 1966** y el archivo **PLATAFORMA ESPECTRAL R=1** (fue creado anteriormente).

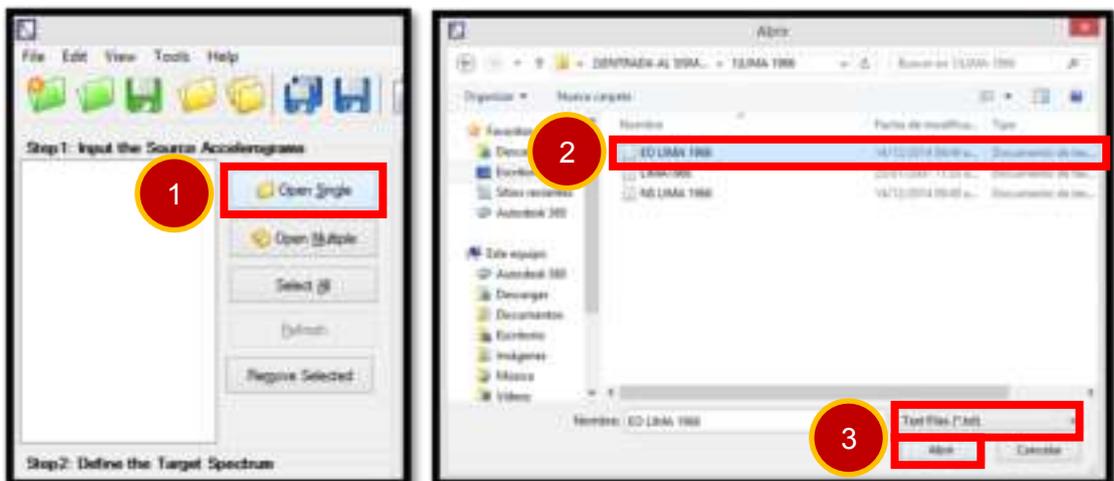
- Debemos contar con una licencia de uso, si no la tenemos no podremos exportar los registros escalados. Obtener una licencia académica es sencillo si contamos con un correo universitario, luego llenar nuestros datos y enviarlos; en un plazo de 1 o 2 días nos estarán llegando nuestro nombre de usuario y una contraseña.
10. Ingresamos al Software **SeismoMatch v.2.1.0** (programa recomendado por Taylor – Principal fabricante de disipadores de energía viscosos).
  11. Definimos las unidades, estas siempre serán las unidades del registro sísmico, en este caso las unidades son Gal ( $\text{cm/s}^2$ )

UNIDADES DE LOS DATOS

: Gal ( $\text{cm/s/s}$ )

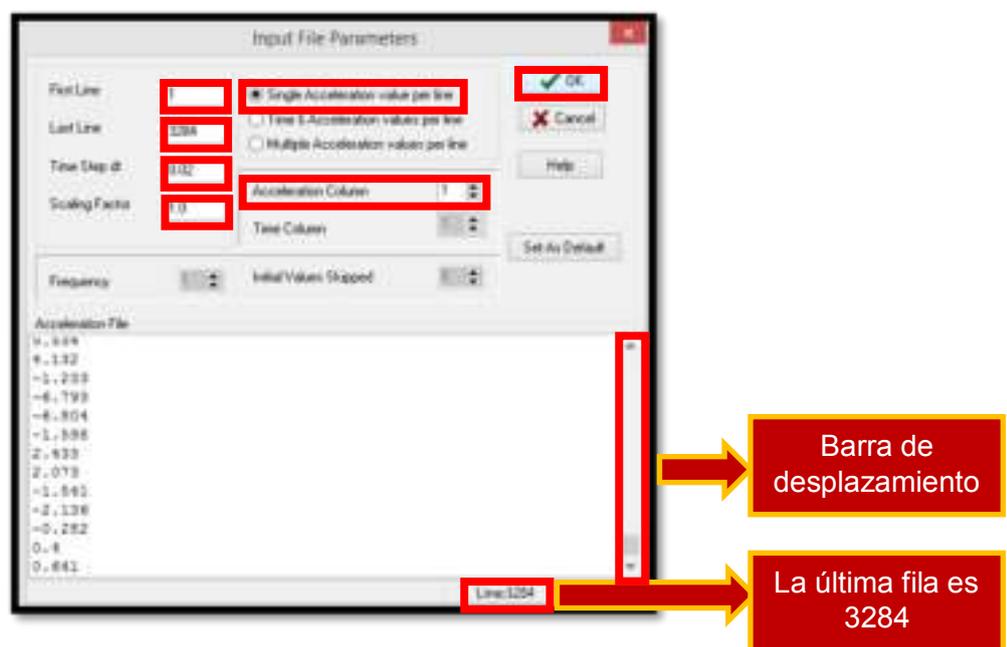


12. Con las unidades definidas procedemos a importar la componente EO de nuestro registro, para ello, nos dirigimos a **Step 1: Input the Source Accelerograms** → **Open Single** y buscamos la ubicación de nuestro archivo EO LIMA 1966 (recuerde que es un archivo tipo texto **\*.txt**)



Nota: El programa SeismoMatch nos permite importar las dos componentes a la vez, por recomendación de los autores y para evitar confusiones, es mejor trabajar cada componente por separado, comenzar con la componente EO y una vez la haya escalado y exportado proseguir con la componente NS.

- Una vez concluyamos con el paso 12 se abrirá la ventana **Input File Parameters**, el programa nos solicitará la siguiente información; en qué línea comienzan las aceleraciones, en que línea acaban, cual es el intervalo de muestreo, cual es el factor escala, los datos ingresados son solo aceleraciones por cada línea o tiempo vs aceleraciones, en que columna se encuentran las aceleraciones.



En el caso de nuestro archivo EO LIMA 1966

- ✓ Las aceleraciones comienzan desde la primera fila.
- ✓ Las aceleraciones terminan en la fila 3284 (para ver este dato emplear la barra de desplazamiento y dirigirse a la última fila existente)
- ✓ El intervalo de muestreo es un dato del registro sísmico

**INTERVALO DE MUESTREO, Canal1/Canal2/Canal3 (s): 0.02 0.02 0.02**

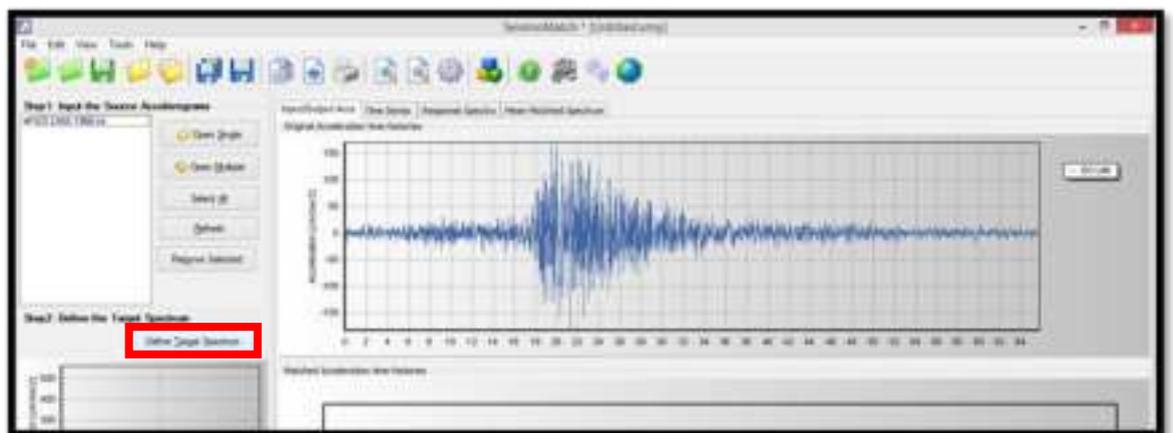
Donde Canal1 es la componente EO, Canal2 es la componente NS y Canal3 son las aceleraciones sobre la vertical (los datos del Canal3 no se emplean).

- ✓ El factor escala es 1, ya que las unidades del programa son las mismas que las unidades del registro sísmico.
- ✓ Los valores son solo aceleraciones.
- ✓ Las aceleraciones se encuentran en la primera columna.

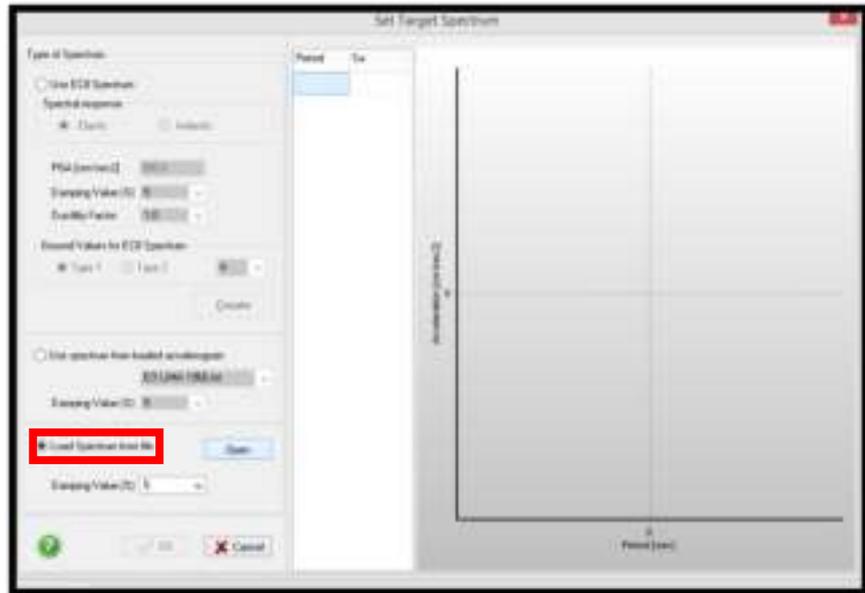
14. Al llenar los datos y seleccionar la opción OK aparecerá un mensaje de confirmación, algunas veces los registros sísmicos tienen entre los valores de las aceleraciones algunos errores como por ejemplo alguna coma repetida, un espacio en blanco, una letra entre los valores, etc. En estos casos no aparecerá la ventana de confirmación; el programa nos señalará que no ha podido leer bien los datos y no nos dejará avanzar hasta solucionar el problema.



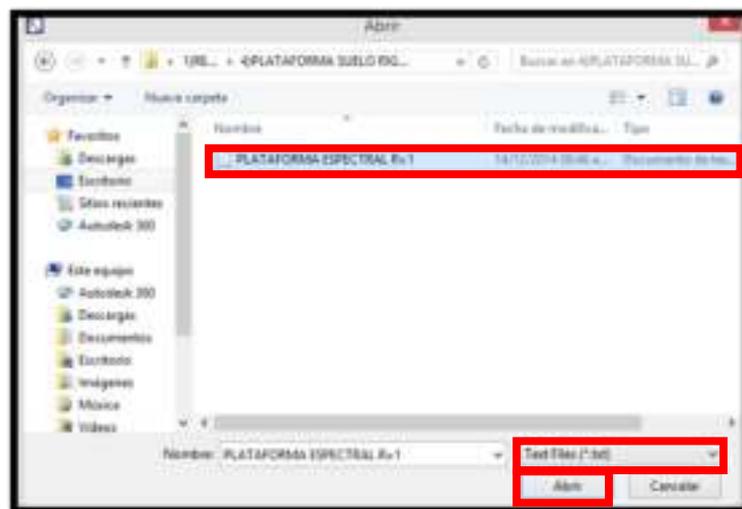
15. Una vez tengamos nuestra componente correctamente importada procederemos a definir el espectro objetivo o de diseño, para ello dirigirse a **Step2: Define the Target Spectrum**→**Define Target Spectrum**



16. Se abrirá la ventana **Set Target Spectrum**, le señalaremos al programa que deseamos importar nuestro espectro de un archivo, para ello debemos marcar la casilla **Load Spectrum from file** y dar un click en **Open**

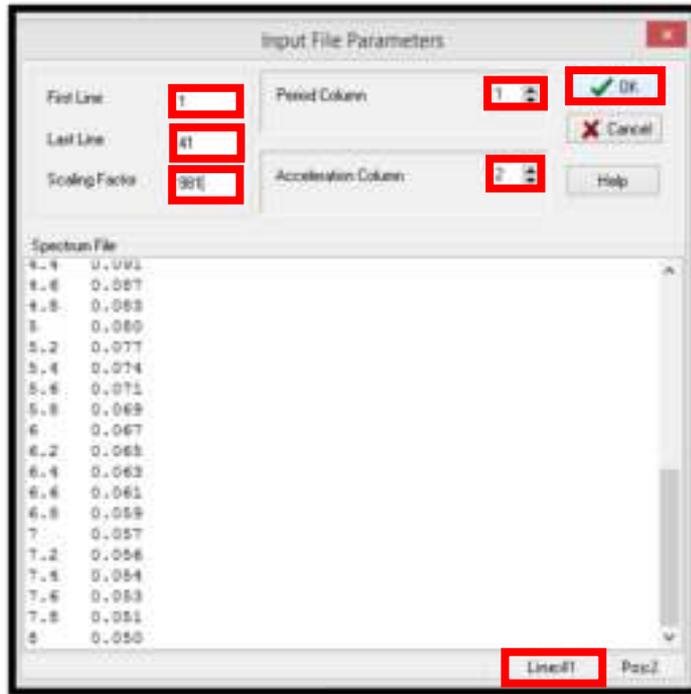


17. Ahora, buscaremos la ubicación de nuestro archivo PLATAFORMA ESPECTRAL R=1 y lo cargaremos

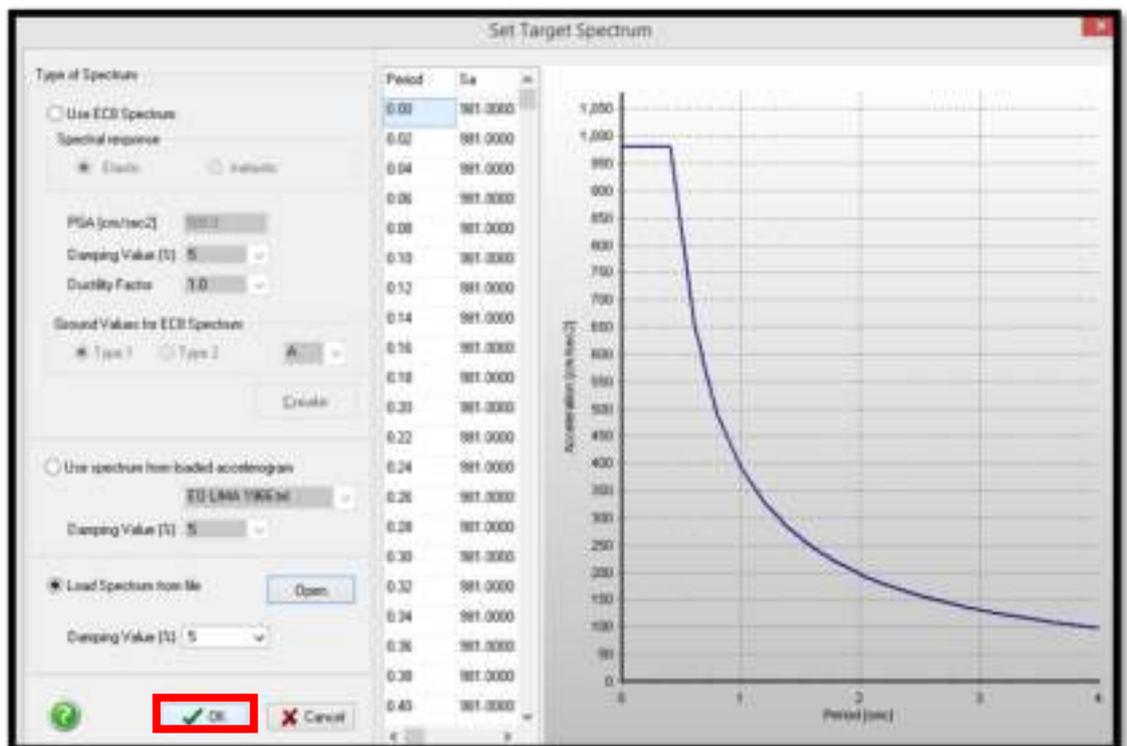


18. Una vez hayamos cargado nuestro archivo se abrirá la ventana **Input File Parameters**, SeismoMatch nos solicitará la siguiente información:

- ✓ En que fila comienzan las aceleraciones: Será en la 1era
- ✓ En que fila acaban las aceleraciones: En la 41 (emplear barra de desplazamiento)
- ✓ Scaling Factor: Será 981 (al momento de crear el espectro no se consideró la gravedad, es en este paso donde debemos hacerlo, debido a que las unidades del programa son  $\text{cm/s}^2$  la gravedad será igual a  $981 \text{ cm/s}^2$ ).
- ✓ En que columna se encuentra el periodo: Será en la 1era
- ✓ En que columna se encuentran las aceleraciones: Será en la 2da



19. El programa nos mostrará el espectro de aceleraciones en base a los datos que acabamos de ingresar, para proseguir daremos un click en **OK**.



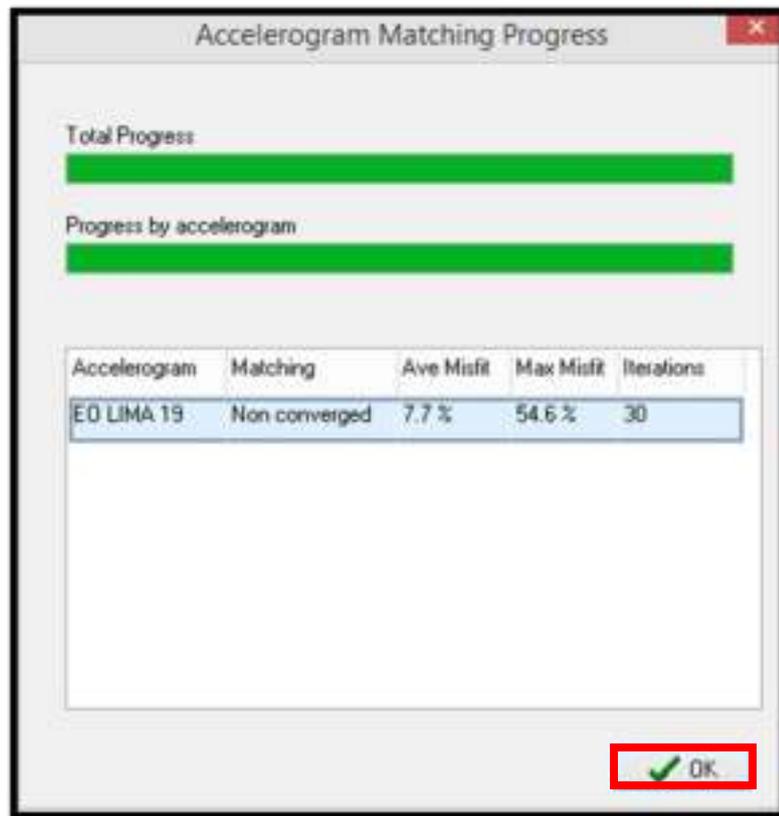
20. Para iniciar el escalamiento de nuestra componente EO el programa nos pide realizar una configuración final, por lo que nos dirigimos nuevamente a **Step2: Define the Target Spectrum**, nos solicita indicar cuál será el mínimo y el máximo periodo que considerará al momento de escalar la componente, si se ha de emplear factor escala y la tolerancia de ajuste.

Los valores de **Min. Periodo** y **Max. Periodo** se pueden tomar como 0.05 y 4, respectivamente, para todos los casos, el factor escala será igual a 1, ya que el espectro que hemos cargado (PLATAFORMA ESPECTRAL R=1) ya se encuentra en las unidades del programa y la tolerancia es el grado de ajuste que deseamos que se logre, es decir, a menor tolerancia los valores de nuestra componente EO se ajustarán más al espectro de diseño.

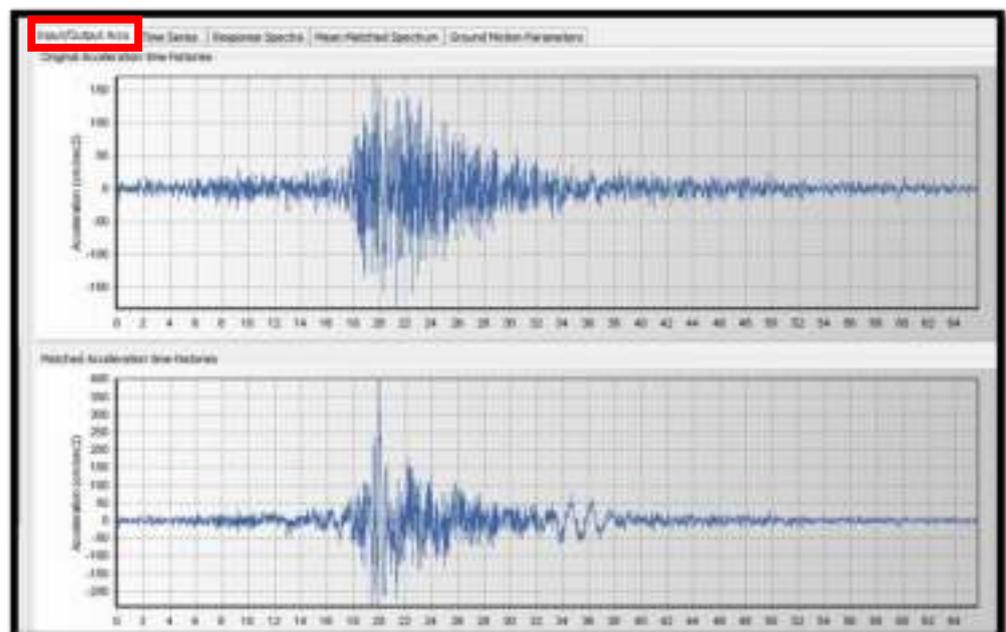
Ingresados todos los datos dar un click en **Do Matching** para iniciar con el escalamiento de los valores.



21. Una vez el escalamiento de datos esté concluido podremos visualizar los gráficos comparativos entre la componente EO original y la escalada.



22. En la pestaña **Input/Output** podremos observar que la máxima aceleración en la componente EO original es de  $-180.592 \text{ cm/s}^2$  mientras que en la componente EO escalada este valor es igual a  $398.40434 \text{ cm/s}^2$



23. Para ver estos datos en tablas ir a la pestaña **Time Series**→**Table**

Input/Output Acc Time Series Response Spectra Mean Matched Spectrum Ground Motion Parameters

Original Accelerograms Matched Accelerograms Comparing Time Series Table

EO LIMA 1966.txt

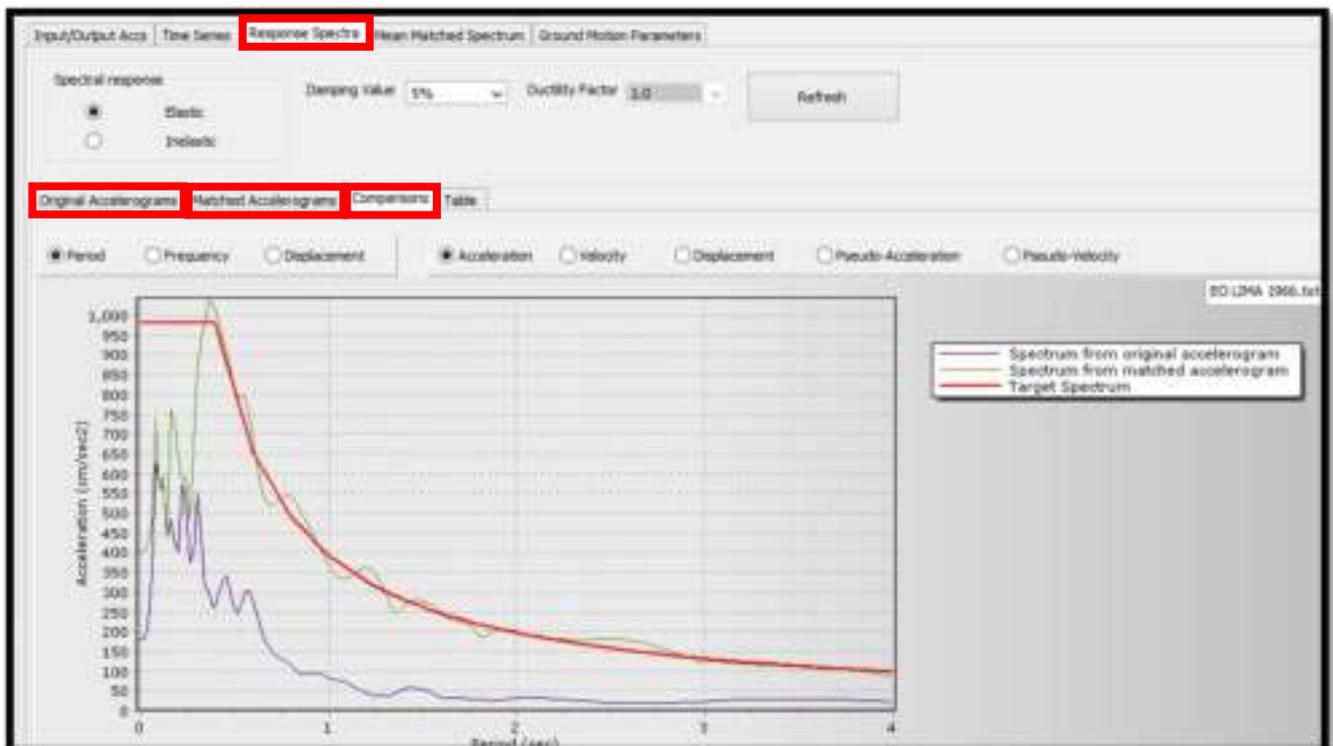
Time Series from Original Accelerogram

Time (s)	Acc (m/sec <sup>2</sup> )	Vel (m/sec)	Disp (m)
0.00000	-11.40900	0.00000	0.00000
0.02000	-2.68700	-0.14096	-0.00170
0.04000	-3.08000	-0.19963	-0.00538
0.06000	-4.99400	-0.27937	-0.00980
0.08000	0.26600	-0.32665	-0.01603
0.10000	3.59200	-0.28807	-0.02229
0.12000	-10.10300	-0.35318	-0.02825
0.14000	-18.25400	-0.43675	-0.03788
0.16000	0.34000	-0.41589	-0.05302
0.18000	3.47500	-0.32774	-0.06872
0.20000	-2.28600	-0.46585	-0.08221
0.22000	-0.78400	-0.49955	-0.09598
0.24000	4.28100	-0.46158	-0.10973
0.26000	-0.86500	-0.42742	-0.12245
0.28000	-1.69000	-0.45297	-0.13523

Time Series from Matched Accelerogram

Time (s)	Acc (m/sec <sup>2</sup> )	Vel (m/sec)	Disp (m)
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.02000	-11.40900	-0.14096	-0.00170
0.04000	-2.68700	-0.25505	-0.00474
0.06000	-3.08000	-0.31272	-0.01041
0.08000	-4.99400	-0.38346	-0.01741
0.10000	0.26600	-0.44074	-0.02592
0.12000	3.59200	-0.48256	-0.03446
0.14000	-10.10300	-0.46727	-0.04270
0.16000	-18.25400	-0.37084	-0.05461
0.18000	0.34000	-0.32998	-0.07204
0.20000	3.47500	-0.44183	-0.08903
0.22000	-2.28600	-0.37794	-0.10589
0.24000	-0.78400	-0.43364	-0.12184
0.26000	4.28100	-0.37767	-0.13787
0.28000	-0.86500	-0.34151	-0.15287

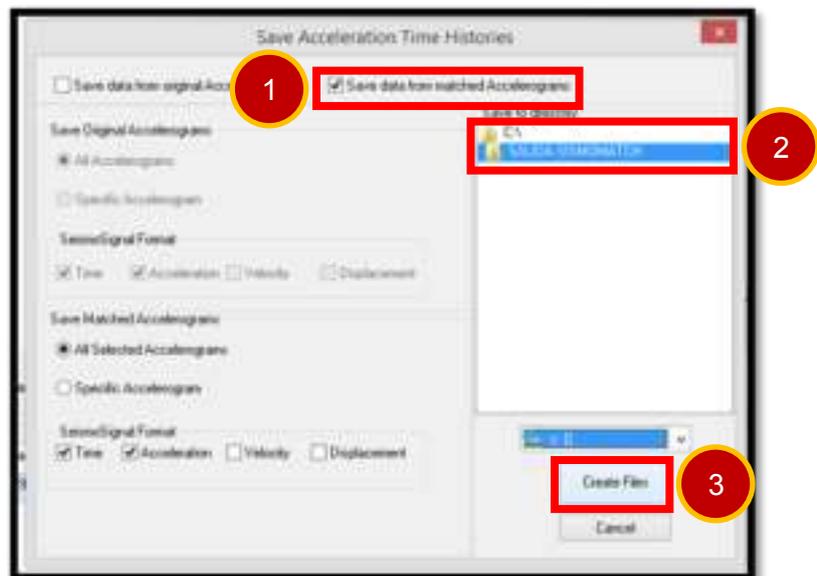
24. En la pestaña **Response Spectra** podremos ver nuestro registro original en formato aceleración vs periodo, así mismo podremos ver el registro ya escalado y también la comparación entre el registro original y el escalado tal como se muestra en la imagen.



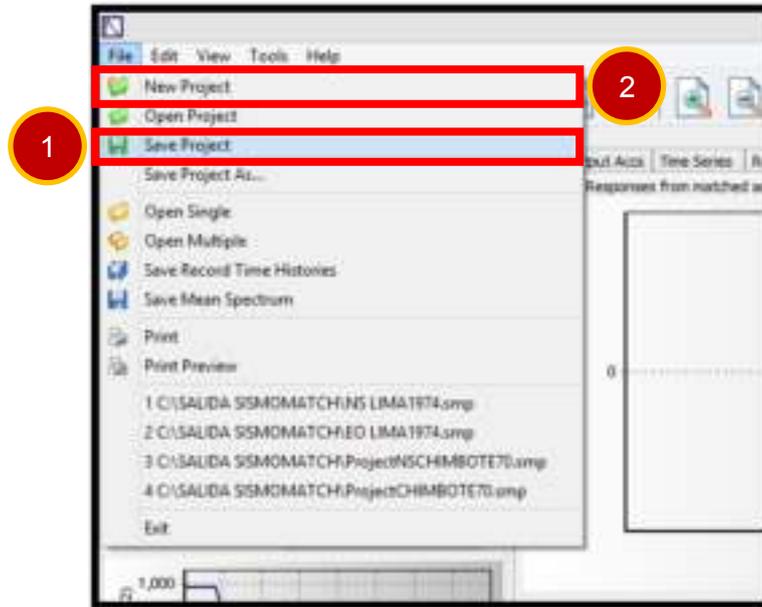
25. Para exportar nuestro registro escalado nos dirigimos a la pestaña **Mean Matched Spectrum**, en ella seleccionaremos en **Matched Accelerograms** la casilla EO LIMA 1966.txt y finalmente **Save Record THs**



26. Finalmente, señalaremos que deseamos que se guarden los datos de nuestro acelerograma ya escalado y seleccionaremos la ubicación donde queremos que se guarde nuestro archivo.



27. Para guardar lo avanzado en el programa con respecto al escalamiento de nuestra componente EO ir a **File→Save Project**. Antes de iniciar el escalamiento de la componente NS cerrar el archivo actual y abrir otro (**File→New Project**)



28. El archivo que se exportó en el paso 26 es el siguiente:

Time(sec)	Acc(cm/sec <sup>2</sup> )
0.00000	0.00000
0.02000	-11.40900
0.04000	-2.68700
0.06000	-3.00000
0.08000	-4.99400
0.10000	0.26600
0.12000	3.59200
0.14000	-10.10300
0.16000	-18.25400
0.18000	0.34000
0.20000	8.42500

Nota:

- ✓ Es muy importante notar que los valores inician a partir de la fila 6.
- ✓ Como recomendación de los autores, para no confundir los archivos tipo texto de las **componentes originales** con las de las **componentes ya escaladas**, cambiar el nombre de las segundas - por ejemplo para este caso M-EO LIMA 66

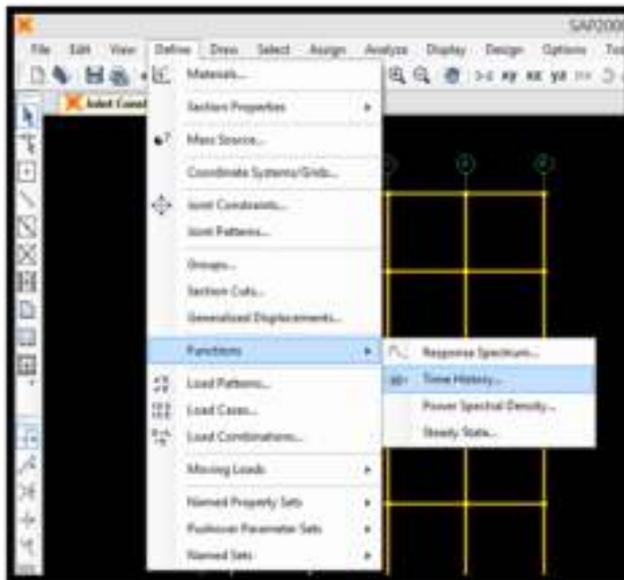
Como se mencionó, anteriormente, queda a cargo del interesado escalar la componente NS del sismo de Lima del 66, así como ambas componentes de los sismos de Chimbote del 70 y Lima del 74.

## 2.4.4 ANÁLISIS LINEAL TIEMPO-HISTORIA

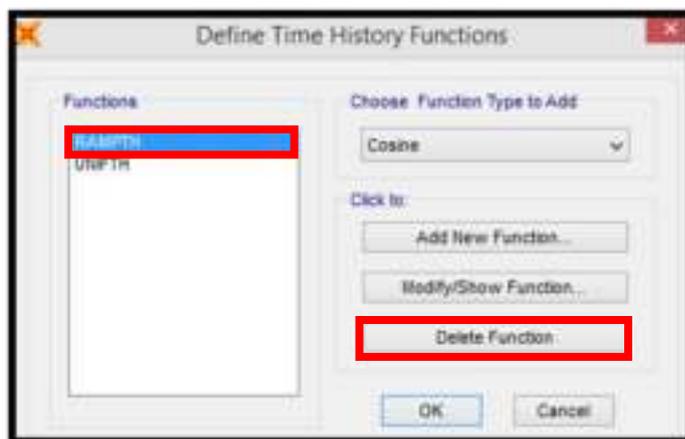
Una vez que tengamos nuestros 3 acelerogramas escalados al espectro de diseño en sus dos componentes podremos realizar el Análisis Dinámico Tiempo Historia.

A continuación se muestra el procediendo detallado para realizar el A.D. TH con el Sismo de Lima del 66 en el programa SAP2000

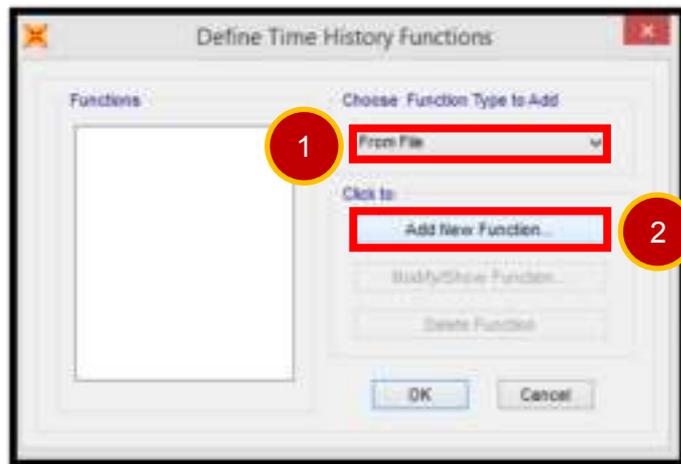
1. Ingresamos al programa SAP2000 v.17
2. Cargamos nuestro archivo MODELAMIENTO GEOMÉTRICO
3. Iniciamos importando nuestras componentes escaladas EO y NS, para ello, ir a **Define**→ **Functions**→**Time History**



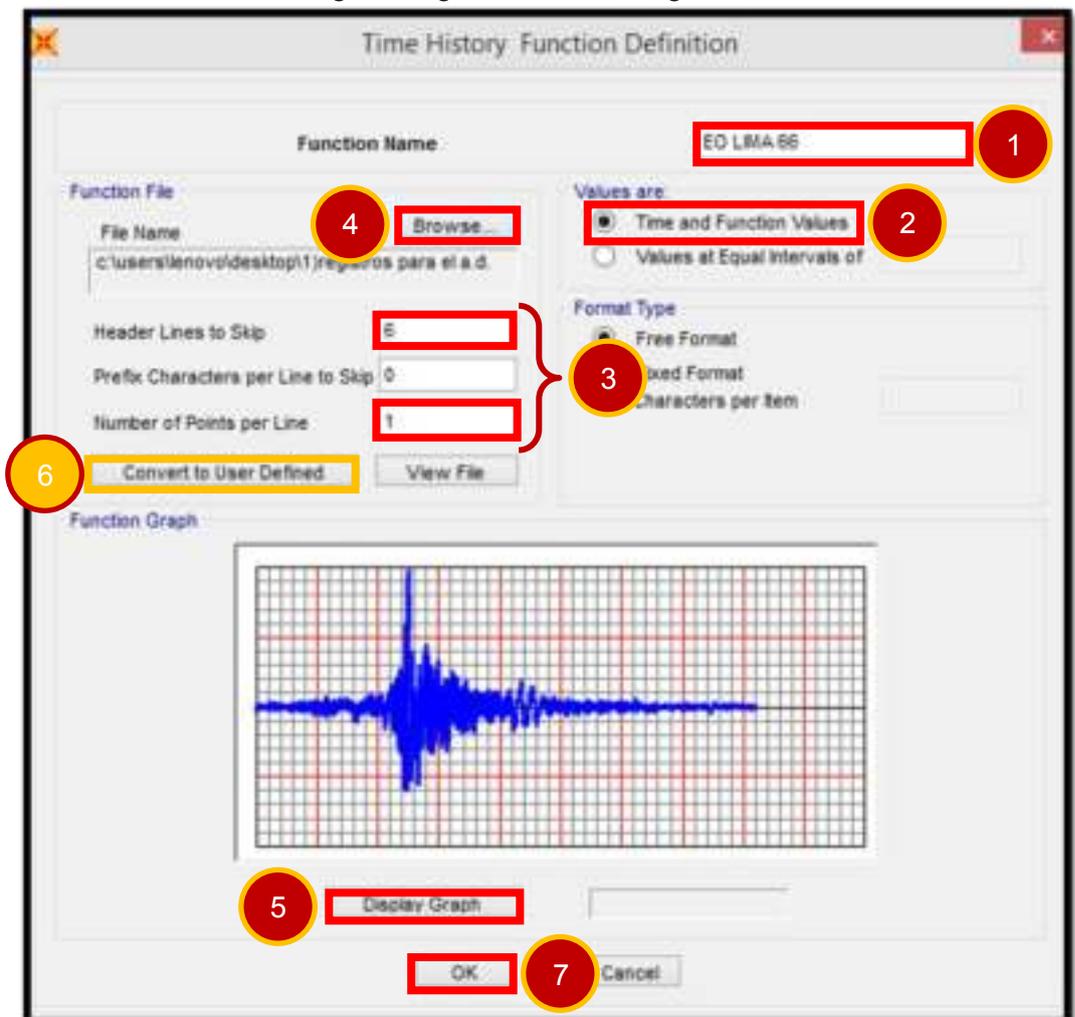
4. Encontraremos por defecto las funciones **RAMPTH** y **UNIFTH**, las seleccionaremos una por una y con la opción **Delete Function** las eliminamos.



5. Ahora le indicaremos al programa que deseamos cargar nuestra componente EO de un archivo (**From File**)



6. En la ventana emergente ingresaremos los siguientes datos:



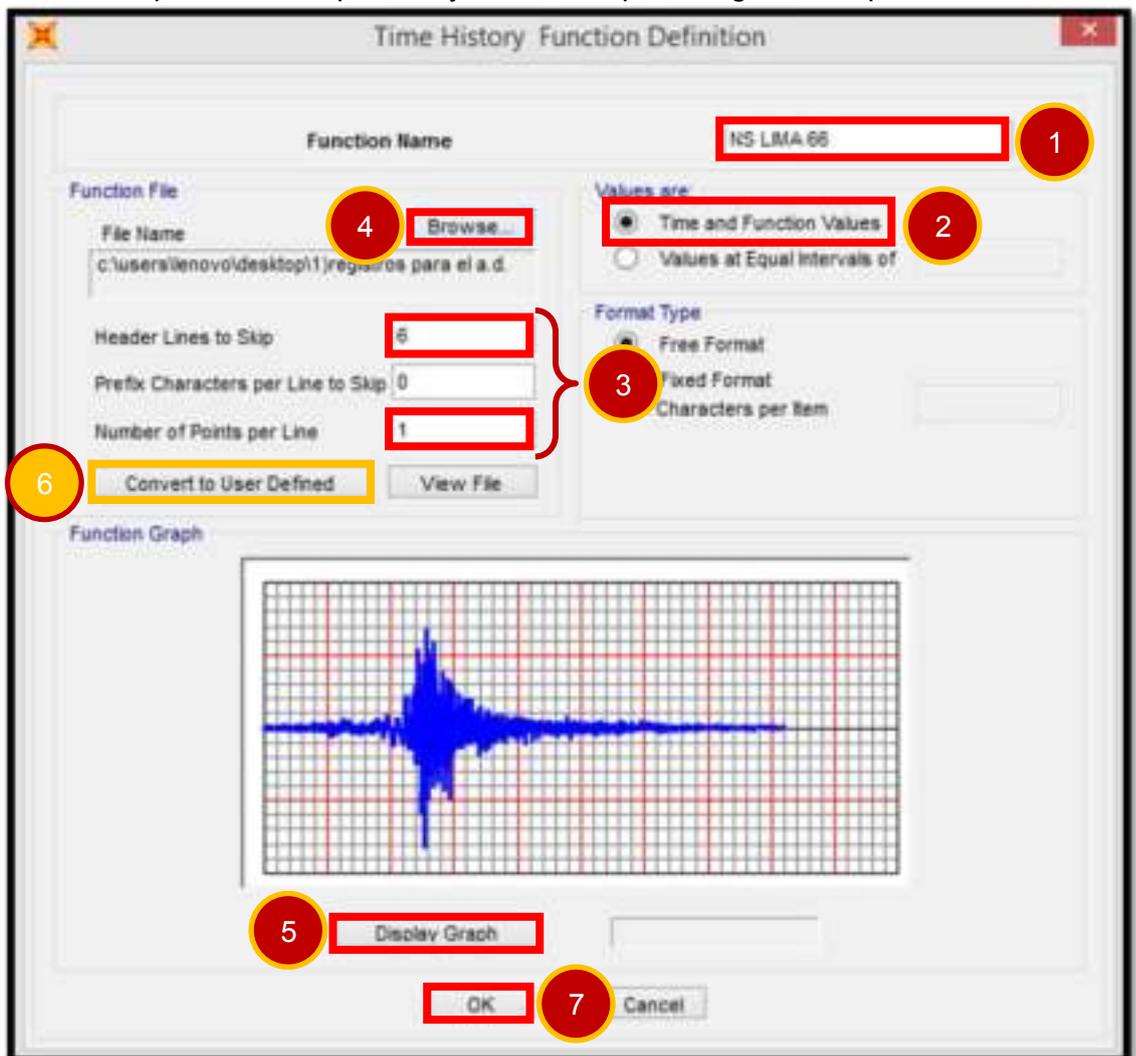
- ✓ El nombre de la función será **EO LIMA 66**
- ✓ Los valores importados están en formato **Tiempo vs Aceleraciones**
- ✓ Los valores empiezan en la **6ta fila**
- ✓ El número de valores (aceleraciones) por fila es 1

✓ En Browse buscar la ubicación de nuestro archivo tipo texto M-EO LIMA 66

✓ Click en Display Graph para ver el archivo de manera grafica

De manera opcional con el comando **Convert to User Defined** usted puede hacer que el programa guarde el archivo importado, convirtiéndolo en un archivo propio de nuestro modelo; si no se realiza este paso cada vez que movamos el archivo SDB o el archivo M-EO LIMA 66 tendremos que cargarlo nuevamente.

7. Repetiremos los pasos 5 y 6, esta vez para cargar la componente NS.



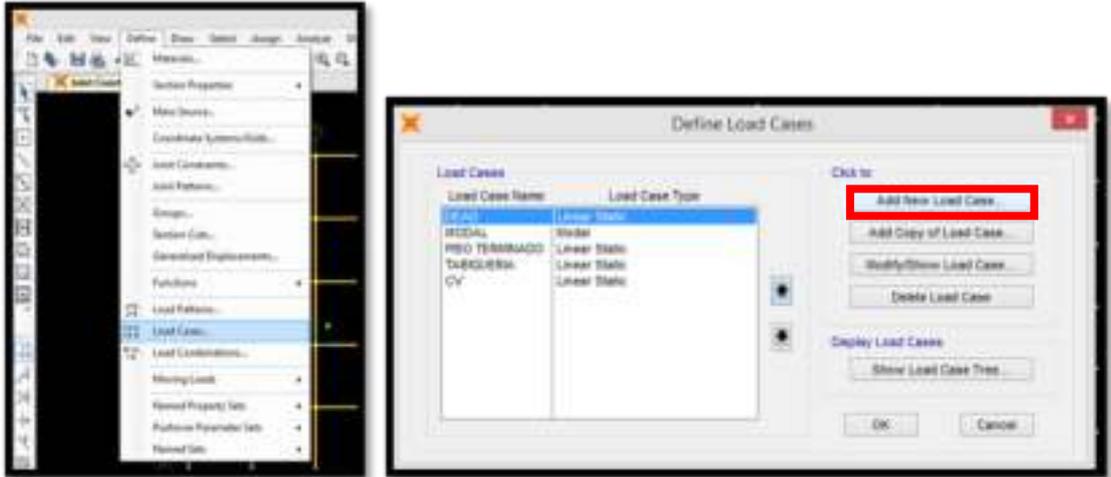
8. Recordando lo expuesto en la página 48

Los registros sísmicos han sido tomados en dos componentes (E-W y N-S) de manera que el método correcto para analizar la estructura es la siguiente:

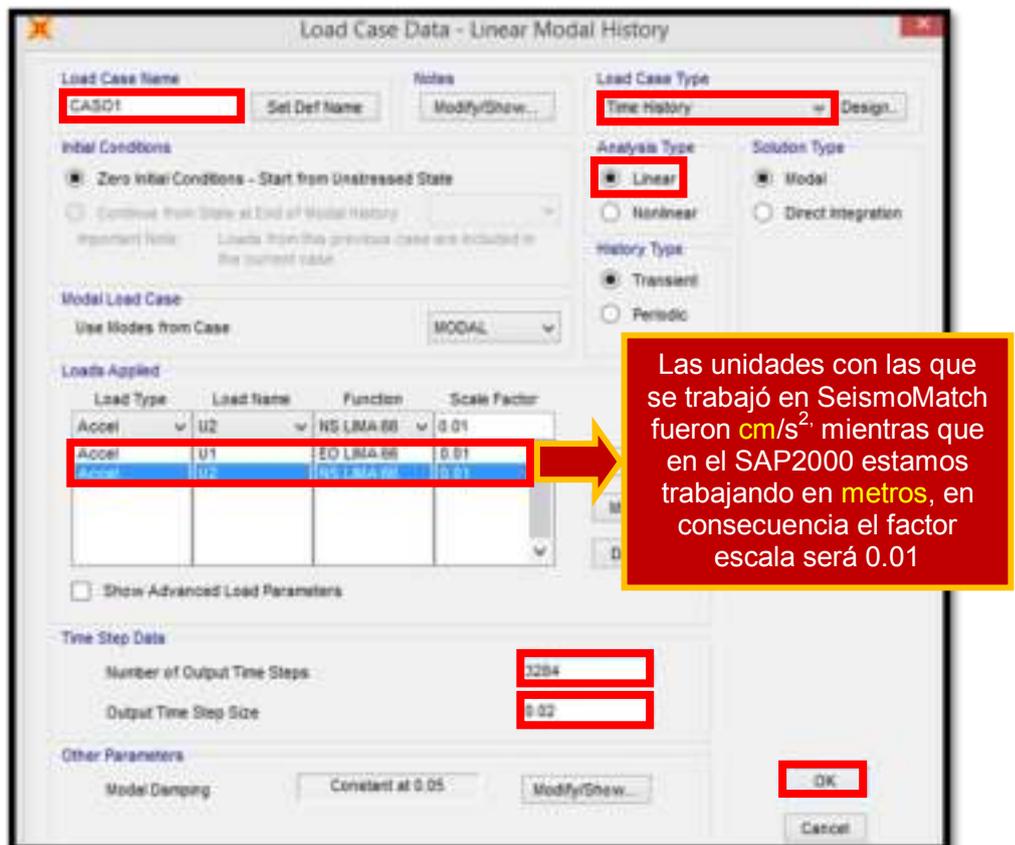
Por cada registro sísmico que se emplee en el Análisis Tiempo-Historia, deberán analizarse dos casos por separado, el **Caso 1**, cuando la **Componente E-W** del registro sísmico actúa sobre la **Dirección X-X** de la estructura mientras que sobre la **Dirección Y-Y** lo hace la **Componente N-**

S y el **Caso 2**, donde la **Componente N-S** del registro sísmico actúa sobre la **Dirección X-X** mientras que sobre la **Dirección Y-Y** lo hace la **Componente E-W**.

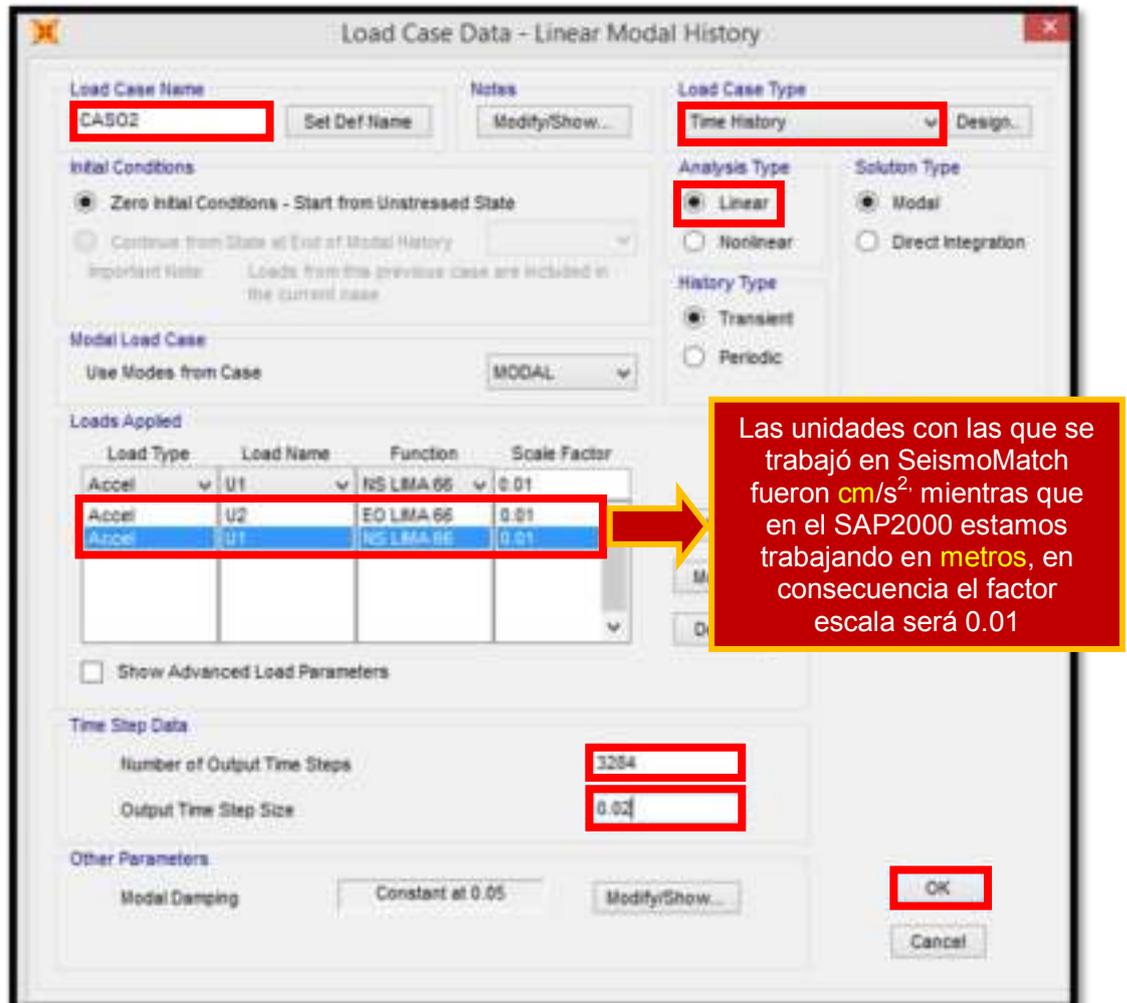
9. Para crear los casos de análisis nos dirigiremos a **Define**→**Load Cases** y en la ventana **Define Load Cases** daremos un click en **Add New Load Case**



10. Crearemos el **Primer caso de análisis** (Cuando la **Componente E-W** actúa sobre la **Dirección X-X** mientras que sobre la **Dirección Y-Y** lo hace la **Componente N-S**). El programa nos solicitará la siguiente información: El tipo de análisis será **Lineal Tiempo-Historia**, el número de valores ingresados es **3284**, los intervalos entre valores son de **0.02s**



11. Crearemos el **Segundo caso de análisis** (Cuando la **Componente E-W** actúa sobre la **Dirección Y-Y** mientras que sobre la **Dirección X-X** lo hace la **Componente N-S**). El programa nos solicitará la siguiente información: El tipo de análisis será **Lineal Tiempo-Historia**, el número de valores ingresados es **3284**, los intervalos entre valores son de **0.02s**



12. Ya para concluir no olvide ajustar el número de modos de vibración (tal como se hizo en el Análisis Dinámico Espectral con  $R=1$ ). Para ello nos dirigiremos a **Define**→**Load Cases**; seleccionaremos **Modal**, daremos click en **Modify / Show Load Case** y escribiremos 24 (24 modos de vibración) en **Maximum Number of Modes**
13. Correremos el programa y verificaremos los desplazamientos en los centros de masa para cada caso de análisis.
14. Guardaremos el modelo como A.D.TH LIMA 1966; queda a cargo del interesado realizar el análisis tiempo historia de los sismos de Chimbote 70 y Lima 74. Al final guarde los modelos como A.D.TH CHIMBOTE 1970 y A.D.TH LIMA 1974 respectivamente.

15. A continuación se muestran los desplazamientos y las distorsiones de entrepiso para cada caso de análisis - sismos de 1966,1970 y 1974

Sismo de Lima del 17 de octubre de 1966

Tabla 2.7 Caso1: Dirección X - Componente EO / Dirección Y - Componente NS

Piso	Desplazamiento de C.M. en X (m)	Distorsión en X ( $\Delta$ )	Desplazamiento de C.M. en Y (m)	Distorsión en Y ( $\Delta$ )
8	0.1731	0.0032	0.1137	0.0017
7	0.1635	0.0059	0.1086	0.0030
6	0.1458	0.0078	0.0995	0.0043
5	0.1222	0.0082	0.0866	0.0053
4	0.0978	0.0065	0.0707	0.0059
3	0.0784	0.0072	0.0530	0.0060
2	0.0568	0.0083	0.0351	0.0059
1	0.0321	0.0094	0.0173	0.0051

Tabla 2.8 Caso2: Dirección X - Componente NS / Dirección Y - Componente EO

Piso	Desplazamiento de C.M. en X (m)	Distorsión en X ( $\Delta$ )	Desplazamiento de C.M. en Y (m)	Distorsión en Y ( $\Delta$ )
8	0.1676	0.0025	0.1181	0.0018
7	0.1600	0.0038	0.1128	0.0031
6	0.1485	0.0038	0.1034	0.0043
5	0.1372	0.0051	0.0906	0.0052
4	0.1220	0.0072	0.0749	0.0060
3	0.1004	0.0089	0.0571	0.0062
2	0.0737	0.0107	0.0384	0.0064
1	0.0414	0.0122	0.0193	0.0057

Sismo de Chimbote del 31 de mayo de 1970

Tabla 2.9 Caso1: Dirección X - Componente EO / Dirección Y - Componente NS

Piso	Desplazamiento de C.M. en X (m)	Distorsión en X ( $\Delta$ )	Desplazamiento de C.M. en Y (m)	Distorsión en Y ( $\Delta$ )
8	0.1755	0.0023	0.1059	0.0015
7	0.1686	0.0035	0.1015	0.0026
6	0.1581	0.0052	0.0936	0.0037
5	0.1425	0.0068	0.0826	0.0045
4	0.1222	0.0082	0.0691	0.0051
3	0.0977	0.0094	0.0537	0.0057
2	0.0696	0.0104	0.0366	0.0061
1	0.0385	0.0113	0.0183	0.0054

Tabla 2.10 Caso2: Dirección X - Componente NS / Dirección Y - Componente EO

Piso	Desplazamiento de C.M. en X (m)	Distorsión en X ( $\Delta$ )	Desplazamiento de C.M. en Y (m)	Distorsión en Y ( $\Delta$ )
8	0.1637	0.0017	0.1024	0.0013
7	0.1586	0.0033	0.0984	0.0024
6	0.1488	0.0032	0.0911	0.0034
5	0.1393	0.0046	0.0809	0.0043
4	0.1256	0.0071	0.0681	0.0050
3	0.1042	0.0093	0.0532	0.0056
2	0.0764	0.0111	0.0365	0.0060
1	0.0430	0.0127	0.0183	0.0054

Sismo de Lima del 3 de octubre del 1974

Tabla 2.11 Caso1: Dirección X - Componente EO / Dirección Y - Componente NS

Piso	Desplazamiento de C.M. en X (m)	Distorsión en X ( $\Delta$ )	Desplazamiento de C.M. en Y (m)	Distorsión en Y ( $\Delta$ )
8	0.1761	0.0022	0.0894	0.0011
7	0.1696	0.0041	0.0860	0.0021
6	0.1573	0.0057	0.0797	0.0030
5	0.1402	0.0072	0.0706	0.0039
4	0.1185	0.0081	0.0589	0.0046
3	0.0942	0.0091	0.0452	0.0049
2	0.0669	0.0100	0.0305	0.0051
1	0.0370	0.0109	0.0152	0.0045

Tabla 2.12 Caso2: Dirección X - Componente NS / Dirección Y - Componente EO

Piso	Desplazamiento de C.M. en X (m)	Distorsión en X ( $\Delta$ )	Desplazamiento de C.M. en Y (m)	Distorsión en Y ( $\Delta$ )
8	0.1574	0.0022	0.0995	0.0014
7	0.1507	0.0040	0.0955	0.0024
6	0.1386	0.0055	0.0882	0.0034
5	0.1221	0.0067	0.0780	0.0042
4	0.1020	0.0076	0.0653	0.0049
3	0.0792	0.0081	0.0506	0.0054
2	0.0548	0.0083	0.0344	0.0057
1	0.0298	0.0088	0.0172	0.0050

16. Así con las distorsiones obtenidas del análisis dinámico espectral y tiempo-historia se muestran las siguientes tablas de resumen.

Tabla 2.13 Distorsiones obtenidas en X-X  
(Dinámico Espectral y Tiempo-Historia)

Piso	A.D. Espectral	ANALISIS DINAMICO TIEMPO-HISTORIA					
		LIMA 1966		CHIMBOTE 1970		LIMA 1974	
		CASO 1	CASO 2	CASO 1	CASO 2	CASO 1	CASO 2
8	0.0021	0.0032	0.0025	0.0023	0.0017	0.0022	0.0022
7	0.0038	0.0059	0.0038	0.0035	0.0033	0.0041	0.0040
6	0.0053	0.0078	0.0038	0.0052	0.0032	0.0057	0.0055
5	0.0065	0.0082	0.0051	0.0068	0.0046	0.0072	0.0067
4	0.0076	0.0065	0.0072	0.0082	0.0071	0.0081	0.0076
3	0.0087	0.0072	0.0089	0.0094	0.0093	0.0091	0.0081
2	0.0098	0.0083	0.0107	0.0104	0.0111	0.0100	0.0083
1	0.0110	0.0094	0.0122	0.0113	0.0127	0.0109	0.0088

Tabla 2.14 Distorsiones obtenidas en X-X  
(Dinámico Espectral y Tiempo-Historia)

Piso	A.D. Espectral	ANALISIS DINAMICO TIEMPO-HISTORIA					
		LIMA 1966		CHIMBOTE 1970		LIMA 1974	
		CASO 1	CASO 2	CASO 1	CASO 2	CASO 1	CASO 2
8	0.0014	0.0017	0.0018	0.0015	0.0013	0.0011	0.0014
7	0.0025	0.0030	0.0031	0.0026	0.0024	0.0021	0.0024
6	0.0035	0.0043	0.0043	0.0037	0.0034	0.0030	0.0034
5	0.0044	0.0053	0.0052	0.0045	0.0043	0.0039	0.0042
4	0.0051	0.0059	0.0060	0.0051	0.0050	0.0046	0.0049
3	0.0058	0.0060	0.0062	0.0057	0.0056	0.0049	0.0054
2	0.0062	0.0059	0.0064	0.0061	0.0060	0.0051	0.0057
1	0.0055	0.0051	0.0057	0.0054	0.0054	0.0045	0.0050

Note que las distorsiones obtenidas con el análisis tiempo-historia (en cada caso de análisis) se asemejan a las distorsiones obtenidas en el análisis dinámico espectral con  $R=1$ , lo que demuestra que el escalamiento de los registros sísmicos (en sus dos componentes) se realizó correctamente.

#### 2.4.5 DETERMINACIÓN DEL SISMO DE DISEÑO

En las siguientes tablas se muestran las variaciones que presentan las distorsiones calculadas en cada caso de análisis con respecto a las distorsiones obtenidas del análisis dinámico espectral, como criterio adicional se recomienda descartar aquellos casos en los cuales esta variación sea mayor o igual a 1.5(‰) en cualquiera de las direcciones (sea X o Y)

Tabla 2.15 Variaciones entre las distorsiones obtenidas en X-X  
(Dinámico Espectral vs Tiempo-Historia)

Piso	ANALISIS DINAMICO TIEMPO-HISTORIA					
	LIMA 1966		CHIMBOTE 1970		LIMA 1974	
	CASO 1	CASO 2	CASO 1	CASO 2	CASO 1	CASO 2
8	-0.0011	-0.0004	-0.0002	0.0004	-0.0001	-0.0001
7	-0.0021	0.0000	0.0003	0.0006	-0.0003	-0.0002
6	-0.0026	0.0015	0.0001	0.0021	-0.0004	-0.0002
5	-0.0016	0.0014	-0.0003	0.0020	-0.0007	-0.0002
4	0.0012	0.0004	-0.0005	0.0005	-0.0005	0.0000
3	0.0015	-0.0002	-0.0006	-0.0006	-0.0004	0.0006
2	0.0015	-0.0010	-0.0006	-0.0013	-0.0002	0.0015
1	0.0015	-0.0012	-0.0003	-0.0017	0.0001	0.0022

Tabla 2.16 Variaciones entre las distorsiones obtenidas en Y-Y  
(Dinámico Espectral vs Tiempo-Historia)

Piso	ANALISIS DINAMICO TIEMPO-HISTORIA					
	LIMA 1966		CHIMBOTE 1970		LIMA 1974	
	CASO 1	CASO 2	CASO 1	CASO 2	CASO 1	CASO 2
8	-0.0003	-0.0003	-0.0001	0.0001	0.0003	0.0001
7	-0.0005	-0.0006	-0.0001	0.0001	0.0004	0.0001
6	-0.0008	-0.0008	-0.0001	0.0001	0.0005	0.0001
5	-0.0009	-0.0008	-0.0001	0.0001	0.0005	0.0001
4	-0.0007	-0.0008	0.0000	0.0002	0.0006	0.0003
3	-0.0002	-0.0004	0.0001	0.0002	0.0009	0.0004
2	0.0003	-0.0002	0.0001	0.0002	0.0011	0.0005
1	0.0004	-0.0002	0.0001	0.0001	0.0010	0.0005

Se descarta el Sismo de Lima 1966 en sus dos casos de análisis, así mismo, el caso 2 de los sismos de Chimbote 1970 y Lima 1974

Quedando así los sismos Chimbote 1970 y Lima 1974 (Caso 1), se consideró como sismo de diseño el de Chimbote Caso 1 por ser el que presenta menores variaciones con respecto al comportamiento esperado. Con este sismo se calcularon las propiedades del disipador viscoso.

- ✓ Sismo de Diseño : Chimbote 1970 – Caso de análisis 1
- ✓ Distorsión Máxima en X : 11.3 ‰
- ✓ Distorsión Máxima en Y : 6.1 ‰

Tabla 2.17 Control de distorsiones en dirección X – X

PISO	Desplazamiento de C.M. (m)	Distorsión de entrepiso D/h	Norma E030 (Distorsión máxima)	Control E030
8	0.1755	0.0023	0.007	SI
7	0.1686	0.0035	0.007	SI
6	0.1581	0.0052	0.007	SI
5	0.1425	0.0068	0.007	SI
4	0.1222	0.0082	0.007	NO
3	0.0977	0.0094	0.007	NO
2	0.0696	0.0104	0.007	NO
1	0.0385	0.0113	0.007	NO

Tabla 2.18 Control de distorsiones en dirección Y – Y

PISO	Desplazamiento de C.M. (m)	Distorsión de entrepiso D/h	Norma E030 (Distorsión máxima)	Control E030
8	0.1059	0.0015	0.007	SI
7	0.1015	0.0026	0.007	SI
6	0.0936	0.0037	0.007	SI
5	0.0826	0.0045	0.007	SI
4	0.0691	0.0051	0.007	SI
3	0.0537	0.0057	0.007	SI
2	0.0366	0.0061	0.007	SI
1	0.0183	0.0054	0.007	SI

## CAPÍTULO 3

### EDIFICIO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

#### 3.1 DETERMINACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE DISEÑO

Para este trabajo se consideró como **distorsión objetivo** el valor de 7‰, es decir, la distorsión máxima permitida para estructuras de concreto armado tal como lo indica la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente. Los cálculos se realizaron solo para el eje XX, en donde la distorsión máxima (11.3‰) es superior a la permitida; el eje YY por tener una distorsión de 6.1‰ no requiere de disipadores.

Para calcular el amortiguamiento viscoso necesario para llegar a la distorsión objetivo (7‰) se sigue el siguiente procedimiento:

Como primer paso se determina el **factor de reducción de respuesta (B)** mediante el cociente:

$$B = \frac{D_{\text{máx}}}{D_{\text{objetivo}}} \quad (3.1)$$

Donde la distorsión máxima  $D_{\text{máx}}$  es la obtenida del análisis tiempo historia para el sismo de diseño seleccionado.

$$B_{xx} = \frac{0.0113}{0.007} = 1.614$$

Luego, se determina el **amortiguamiento efectivo**  $\beta_{\text{eff}}$  despejando la siguiente ecuación:

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_o)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{\text{eff}})} \quad (3.2)$$

Donde  $\beta_o$  es el **amortiguamiento inherente** de la estructura que usualmente se fija en 5% para estructuras de concreto armado.

De esta manera, se obtiene el amortiguamiento efectivo, este incluye la acción del disipador de energía y el amortiguamiento inherente de la estructura.

$$\beta_{\text{eff},xx} = 23.12\%$$

Descontando el amortiguamiento inherente se obtiene el amortiguamiento viscoso que se requiere.

$$\beta_{H,xx} = 23.12 - 5 = 18.12\%$$

### **OBSERVACIONES IMPORTANTES:**

#### ✓ Amortiguamiento mínimo y máximo para fines de diseño

Según los fabricantes, se recomienda que los disipadores de energía viscosos sean diseñados teniendo en consideración para el cálculo un amortiguamiento viscoso  $\beta_H$  entre el 20% y 40%.

Si diseñados los disipadores de energía para lograr un amortiguamiento viscoso menor al de 20% el efecto que estos ofrezcan al sistema no será considerable, si deseamos lograr un amortiguamiento mayor al 40% esto está permitido pero solo de manera interna, no para fines de diseño.

En este caso el amortiguamiento viscoso requerido es de  $18.12\% \approx 20\%$ , si diseñamos los disipadores de energía con este valor la distorsión máxima que deberíamos alcanzar (Edificio con disipadores) sería igual a  $7\text{‰}$

Para mantener un margen de seguridad y realmente asegurar que se logre un amortiguamiento viscoso de 20% los cálculos se realizaron fijando el amortiguamiento viscoso requerido en 22%

#### ✓ Distorsión objetivo

Como se indicó anteriormente la distorsión objetivo que se empleó en este trabajo fue la de  $7\text{‰}$  (máxima distorsión permisible para estructuras de concreto armado según la **Norma Peruana de Diseño Sismorresistente**), sin embargo para la determinación de la distorsión objetivo también se puede emplear una metodología de diseño basada en el control del daño por medio del control de los desplazamientos laterales.

Con esta metodología se fijan distorsiones objetivo tanto para el eje X como el Y, teniendo como base la propuesta del **Seismology Committee Structural Engineers Association of California (SEAOC)** en su libro Recommended Lateral Force Requirements and Commentary esto para calificar el desempeño sismorresistente y relacionar los conceptos de distorsión y daño estructural siguiendo la propuesta del documento **Multihazard Loss Estimation Methodology (HAZUS)**

En este trabajo no se consideró esta metodología ya que aún no se hace mención a ella ni en la **Norma de Diseño Sismorresistente E030** vigente.

### 3.2 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DEL DISIPADOR

1. Como primer paso, es necesario plantear una disposición inicial, en este caso se emplearán cuatro disipadores en arreglo diagonal (Dirección X-X)



Fig. 3.1 Ubicación de los disipadores en la Dirección X (Vista 3D)

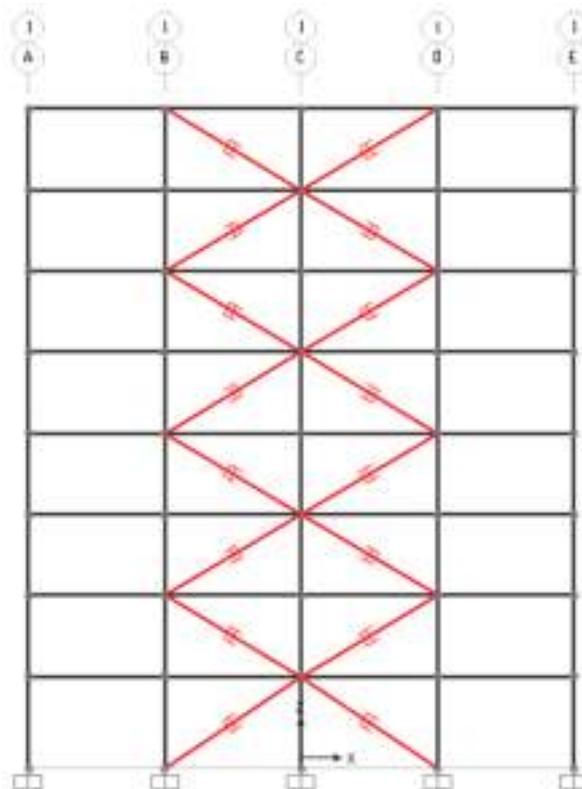


Fig. 3.2 Ubicación de los disipadores en la Dirección X (Vista en elevación).

2. Una vez tengamos definida una disposición inicial, podremos calcular la rigidez del brazo metálico (K) y el coeficiente de amortiguamiento de los disipadores (C)

### 3.2.1 CÁLCULO DE LA RIGIDEZ

Se inicia la interacción considerando un perfil metálico estándar HSS o PIPE STD, en el presente trabajo se partió de un perfil del tipo HSS 7.50 x 0.50

Las propiedades de ese perfil son las siguientes:

Tabla 3.1 Propiedades del perfil HSS 7.50 x 0.50

Dimensiones HSS 7.50 x 0.50				
D ext. (in)	D int. (in)	Espesor (in)	Área (in <sup>2</sup> )	Inercia (in <sup>4</sup> )
7.50	7.035	0.465	10.3	63.9

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

$$K = \frac{EA}{L} \quad (3.3)$$

Dónde:

$$E_{\text{acero}} = 29000 \text{ ksi} = 20.4 \times 10^6 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Área} = 10.3 \text{ in}^2 = 66.45 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

L es la longitud del brazo metálico, en la figura 3.3 se muestra el valor de L considerando la longitud mínima de los disipadores de energía (31 in)

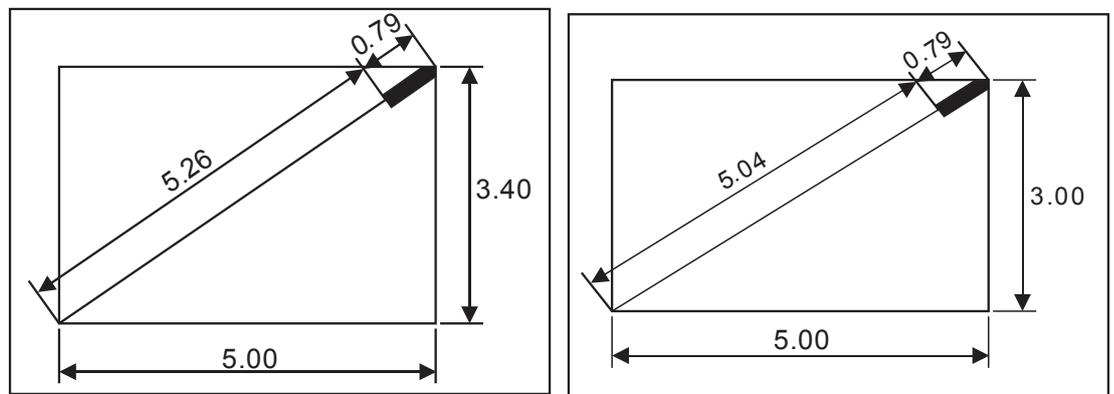


Fig. 3.3 Longitud del brazo metálico primer piso (izquierda) - 2do al 8avo piso (derecha)

Por lo tanto:

L piso N°1 = 5.26 m

L típico = 5.04 m

K piso N°1 = 25776.53 T/m<sup>2</sup>

K típico = 26878.09 T/m<sup>2</sup>

### **OBSERVACIONES IMPORTANTES:**

1) Es común pensar que si estamos modelando disipadores de energía, la rigidez que deberíamos de considerar es la del dispositivo y no la del brazo metálico, esta idea tiene coherencia y puede generar errores en nuestros cálculos si es que la llegamos a utilizar.

El emplear la rigidez del brazo metálico en la modelación de los disipadores es una consideración especial del fabricante, podremos encontrar esta recomendación en el archivo **SAP2000 / ETABS Modeling** (Documento de Taylor Devices)

2) Recordando lo que se vio anteriormente (Ver Capítulo 1) el perfil metálico a emplear debe tener un área significativa, esto para asegurar que todas las deformaciones se den en el disipador y no en el brazo metálico, haciendo que el dispositivo trabaje eficientemente ante un evento sísmico. También es importante la Inercia que tenga nuestro perfil – esto para evitar el posible pandeo de nuestro brazo metálico.

Como recomendación de los autores el perfil **HSS 7.50 x 0.50** se puede emplear como una primera **Sección de prueba**, ya que posee suficiente **Área e Inercia** para cumplir con las exigencias de diseño, es importante mencionar que es el mayor perfil HSS que podemos emplear (**Disipadores de 110kip y 165kip**), los perfiles que tengan mayores dimensiones se entrecruzan con los pernos de la unión **Brazo Metálico – Disipador** (Diseño de acero de las conexiones)

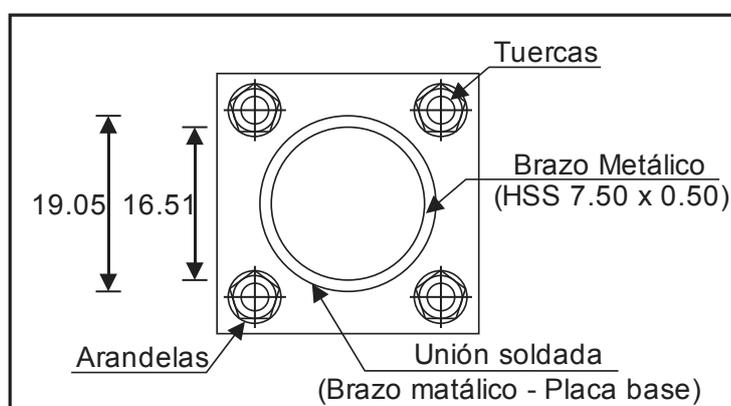


Fig. 3.4 Detalle de la unión Brazo metálico – Placa Base (Disipador de 110kip-Taylor)

Fuente: Tesis “Evaluación del proyecto estructural y optimización del diseño con disipadores de energía viscosos Taylor para una edificación esencial de 6 pisos”

### 3.2.2 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO (C)

Antes de comenzar debemos fijar el valor del exponente de velocidad “α”. Para este caso, por tratarse de un dispositivo no-lineal, se consideró un valor de α=0.5. Posteriormente se procede a resolver la siguiente ecuación 3.4

$$\beta_H = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{ij}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \rightarrow \sum C_j = \frac{\beta_H \cdot 2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} (\sum_i m_i \phi_i^2)}{\lambda (\sum \phi_{ij}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j)} \quad (3.4)$$

Dónde:

$\beta_H$  - amortiguamiento viscoso de la estructura

$\lambda$  - parámetro lambda

$C_j$  - coeficiente de amortiguamiento del disipador j

$\phi_{ij}$  - desplazamiento relativo entre ambos extremos del disipador j en la dirección horizontal (con nuestro sismo de diseño)

$\theta_j$  - ángulo de inclinación del disipador j

A - amplitud de desplazamiento del modo fundamental (desplazamiento modal de la losa del último nivel)

$\omega$  - frecuencia angular

$m_i$  - masa del nivel i

$\phi_i$  - desplazamiento del nivel i (con nuestro sismo de diseño)

Resolución:

✓  $m_i$ : Masa del nivel i

Desafortunadamente el SAP2000 no nos muestra esta información, por lo que se requiere que efectuemos manualmente el metrado de cargas de cada nivel.

Tabla 3.2 Pesos por piso

PISO	Peso (Tn)	Masa(Tn)
8	415.56	42.36
7	500.97	51.07
6	500.97	51.07
5	500.97	51.07
4	500.97	51.07
3	500.97	51.07
2	500.97	51.07
1	507.02	51.68

✓  $\beta_H$ : Amortiguamiento viscoso de la estructura

El valor de  $\beta_H$  ya lo tenemos calculado y es igual a  $\beta_{H,xx} = 22\%$

✓  $\theta_j$ : Ángulo de inclinación del dissipador j

Los dispositivos del primer nivel tienen un ángulo de inclinación de  $34^\circ$

Los dispositivos del segundo al octavo nivel tienen un ángulo de inclinación de  $31^\circ$

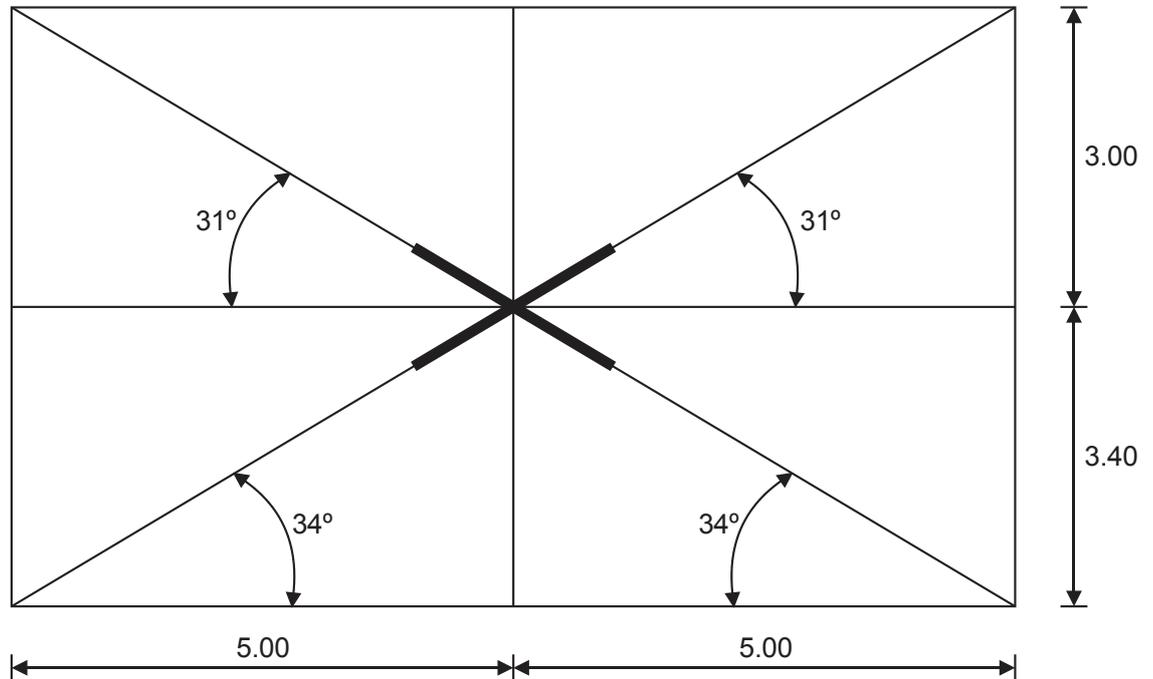


Fig. 3.5 Ángulo de inclinación de los dissipadores en la estructura

- ✓  $\phi_i$ : Desplazamiento del nivel i (con nuestro sismo de diseño: Chimbote-Caso 1)
- ✓  $\phi_{ij}$ : Desplazamiento relativo entre ambos extremos del dissipador j en la dirección horizontal

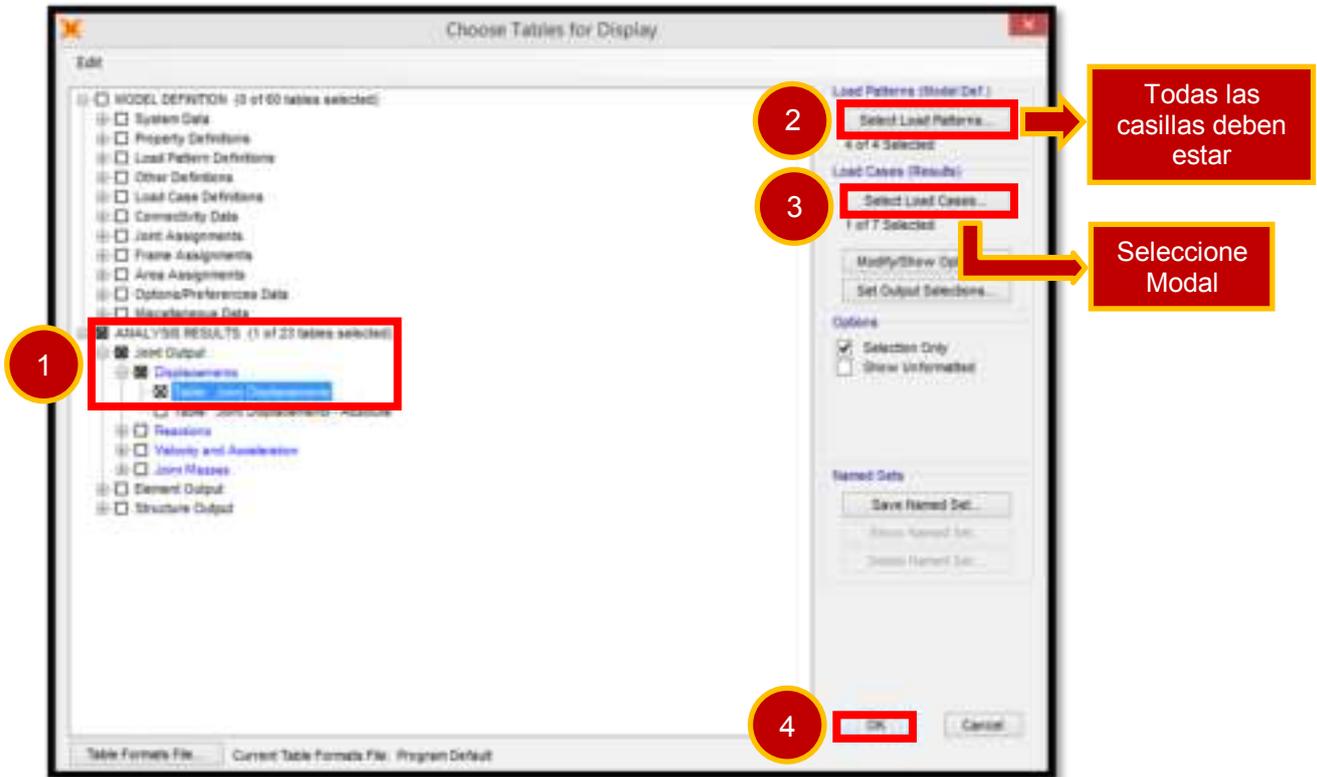
Tabla 3.3 Cálculos para obtener el Desplazamiento relativo  $\phi_{ij}$

NIVEL	$\phi_i$	$\phi_{i+1}$	$\phi_{ij}$ Diferencia
Base	0.0000	0.0385	0.0385
1	0.0385	0.0696	0.0311
2	0.0696	0.0977	0.0281
3	0.0977	0.1222	0.0245
4	0.1222	0.1425	0.0203
5	0.1425	0.1581	0.0156
6	0.1581	0.1686	0.0106
7	0.1686	0.1755	0.0069
8	0.1755		

- ✓ A: Amplitud del desplazamiento del modo fundamental (Desplazamiento modal del techo del último nivel)

Para poder ver los desplazamientos modales abrimos el SAP2000 y cargamos nuestro modelo A.D.TH CHIMBOTE 1970, estos valores también pueden verse en los modelos A.D.TH LIMA 1966, A.D.TH LIMA 1974 y A.D.ESPECTRAL R1

Seleccionamos los centros de masa (1er – 8vo piso), nos dirigimos a **Display**→**Show Tables**, cuando la ventana **Choose Tables for Display** se haya abierto seleccione la siguiente ruta.



Los desplazamientos modales para la dirección X son:

Tabla 3.4 Desplazamiento modal por niveles

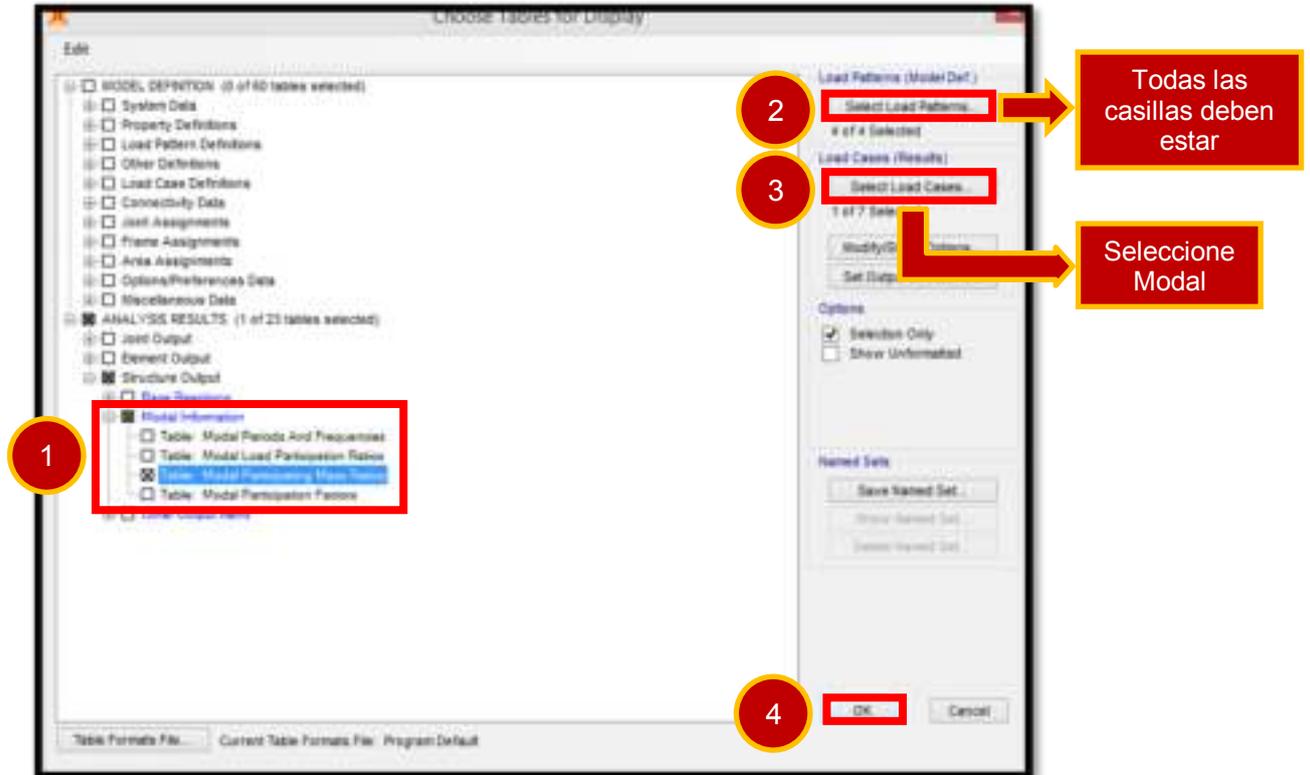
NIVEL	<u>U1</u> Modo 1 (m)
1	0.01522
2	0.02764
3	0.03915
4	0.04946
5	0.05820
6	0.06507
7	0.06983
8	<b>0.07237</b>

De donde, la amplitud es 0.07237

✓  $\omega$ : Frecuencia angular

La frecuencia angular está en función de  $f = \frac{1}{T}$ , donde T es el periodo.

Para poder visualizar los periodos ir a **Display**→**Show Tables**, cuando la ventana **Choose Tables for Display** se haya abierto seleccione la siguiente ruta.



El periodo fundamental de la estructura en la dirección X es 1.32s

Tabla 3.5 Período fundamental de la estructura en X-X

Modo	Período T (s)	Masa Participativa	
		Masa X-X	Masa Y-Y
1	1.320	0.866	0
2	0.969	0	0
3	0.824	0	0.848

La frecuencia angular será:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1.320} = 0.7575$$

Además:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(0.7575) = 4.759 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

✓  $\lambda$  : Parámetro lambda

El parámetro  $\lambda$  es dependiente del valor del exponente de velocidad  $\alpha$

El FEMA 274 nos facilita la siguiente tabla:

Tabla 3.6 Valores de  $\lambda$  respecto al exponente de velocidad  $\alpha$

Exponente $\alpha$	Parámetro $\lambda$
0.25	3.7
0.50	3.5
0.75	3.3
1.00	3.1
1.25	3.0

Así con estos datos se procede a calcular el coeficiente de amortiguamiento del disipador  $C_j$

Tabla 3.7 Cálculos realizados para obtener el coeficiente de amortiguamiento C

NIVEL	Masa (T)	cos $\theta$	cos $\theta^{(1+\alpha)} * \Phi_{rj}^{(1+\alpha)}$	m * $\Phi_i^2$
1	51.68	0.827	0.005674	0.076
2	51.07	0.857	0.004354	0.247
3	51.07	0.857	0.003740	0.487
4	51.07	0.857	0.003047	0.762
5	51.07	0.857	0.002302	1.037
6	51.07	0.857	0.001544	1.276
7	51.07	0.857	0.000861	1.452
8	42.36	0.857	0.000456	1.305
		$\Sigma$	0.0220	6.644

Considerando un amortiguamiento viscoso de  $\beta_{H,xx} = 22\%$  y asumiendo que todos los disipadores tendrán el mismo coeficiente de amortiguamiento, se procede a resolver la siguiente ecuación:

$$\sum C_j = \frac{\beta_H \cdot 2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \left( \sum_i m_i \phi_i^2 \right)}{\lambda \left( \sum \phi_{ij}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j \right)} = \frac{0.22 \times 2\pi \times 0.07237^{1-0.5} \times 4.759^{2-0.5} (6.644)}{3.5(0.0220)} = 333.115$$

Empleando cuatro disipadores por nivel se tendrá:

$$C_j = \frac{333.115}{4} = 83.278 \frac{T \cdot s}{m}$$

Se tomó el valor de  $C_j = 85 \frac{T.s}{m}$ , así finalmente, las propiedades de los disipadores en la Dirección X son las siguientes:

<u>Primer piso</u>	<u>2do al 8avo piso</u>
$C_j = 85 \frac{T.s}{m}$	$C_j = 85 \frac{T.s}{m}$
$K = 25776.53 \text{ T/m}^2$	$K = 26878.09 \text{ T/m}^2$
$\alpha = 0.5$	$\alpha = 0.5$

### **OBSERVACIONES IMPORTANTES:**

#### 1) Exponente de velocidad $\alpha$

En este trabajo para el cálculo del **Coefficiente de amortiguamiento**  $C_j$  se fijó el valor del **Exponente de velocidad**  $\alpha = 0.5$

Los disipadores con un  $\alpha$  de **0.4 a 0.5** han demostrado experimentalmente un buen comportamiento para el diseño de edificaciones con registros sísmicos; sin embargo como una buena práctica se recomienda analizar otras posibilidades, es decir, realizar el cálculo del **Coefficiente de amortiguamiento** con valores de  $\alpha$  desde **0.3 a 1.0** y elegir el caso en el que la estructura muestre un mejor comportamiento antisísmico.

Nota: Si desea seguir esta recomendación recuerde que el valor del **Parámetro lambda**  $\lambda$  es dependiente del **Exponente de velocidad**  $\alpha$  por lo que este también variará.

#### 2) Coefficiente de amortiguamiento $C_j$

Con la ecuación del amortiguamiento viscoso propuesta en el **FEMA 274**, el desarrollo de esta fórmula se encuentra en el documento **Seismic Design of Structures with Viscous Dampers** – escrito por **Hwang, Jenn-Shin** en el año 2002.

$$\beta_H = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{ij}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \rightarrow \sum C_j = \frac{\beta_H \cdot 2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} (\sum_i m_i \phi_i^2)}{\lambda (\sum \phi_{ij}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j)}$$

Dónde:

$\beta_H$  - amortiguamiento viscoso de la estructura

$\lambda$  - parámetro lambda

$C_j$  - coeficiente de amortiguamiento del disipador j

$\phi_{\eta_j}$  - desplazamiento relativo entre ambos extremos del disipador j en la dirección horizontal (con nuestro sismo de diseño)

$\theta_j$  - ángulo de inclinación del disipador j

A - amplitud de desplazamiento del modo fundamental (desplazamiento modal de la losa del último nivel)

$\omega$  - frecuencia angular

$m_i$  - masa del nivel i

$\phi_i$  - desplazamiento del nivel i (con nuestro sismo de diseño)

### 3.3 MODELACIÓN Y ANÁLISIS DEL EDIFICIO CON DISIPADORES DE ENERGÍA

#### 3.3.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se calcularon las propiedades de los disipadores viscosos en base a una distorsión objetivo fijado en 7 ‰

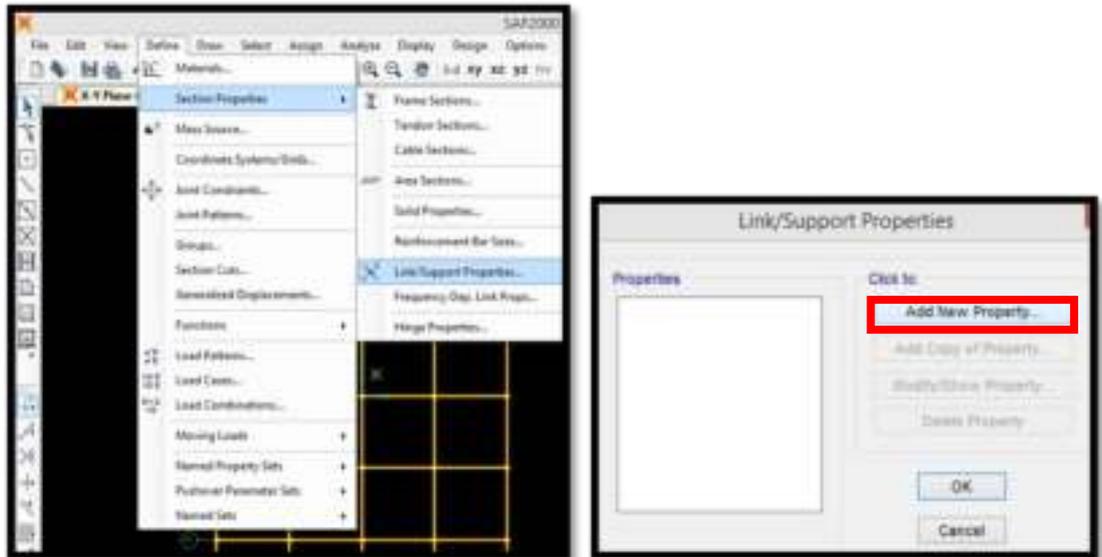
A continuación se muestra una tabla resumen con los resultados de los cálculos realizados.

Tabla 3.8 Propiedades de los disipadores viscosos

Dirección	X-X
1er Nivel	
Rigidez (K) – T/m <sup>2</sup>	25776.53
Coef. Amort. (C) – Tn*s/m	85
Exp. Amort. ( $\alpha$ )	0.5
2do – 8vo Nivel	
Rigidez (K) – T/m <sup>2</sup>	26878.09
Coef. Amort. (C) – Tn*s/m	85
Exp. Amort. ( $\alpha$ )	0.5
Amortiguamiento Viscoso	
22%	

#### 3.3.2 MODELACIÓN DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA VISCOSOS

1. Iniciamos cargando nuestro modelo A.D.TH CHIMBOTE 1970 (Sismo de diseño)
2. Los disipadores de energía en el programa SAP2000 son modelados como elementos **Link** para definir sus propiedades nos dirigimos a **Define**→**Section Properties**→**Link/Support Properties**, en la ventana emergente seleccionar **Add New Property**

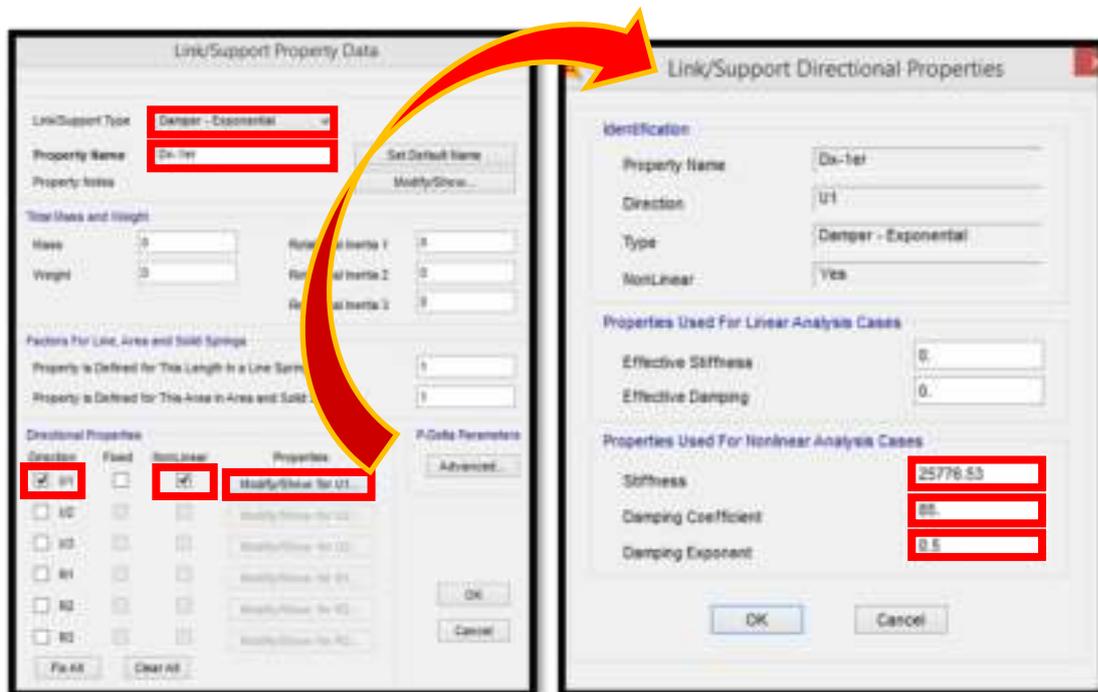


3. El SAP2000 nos solicitará ingresar la siguiente información:

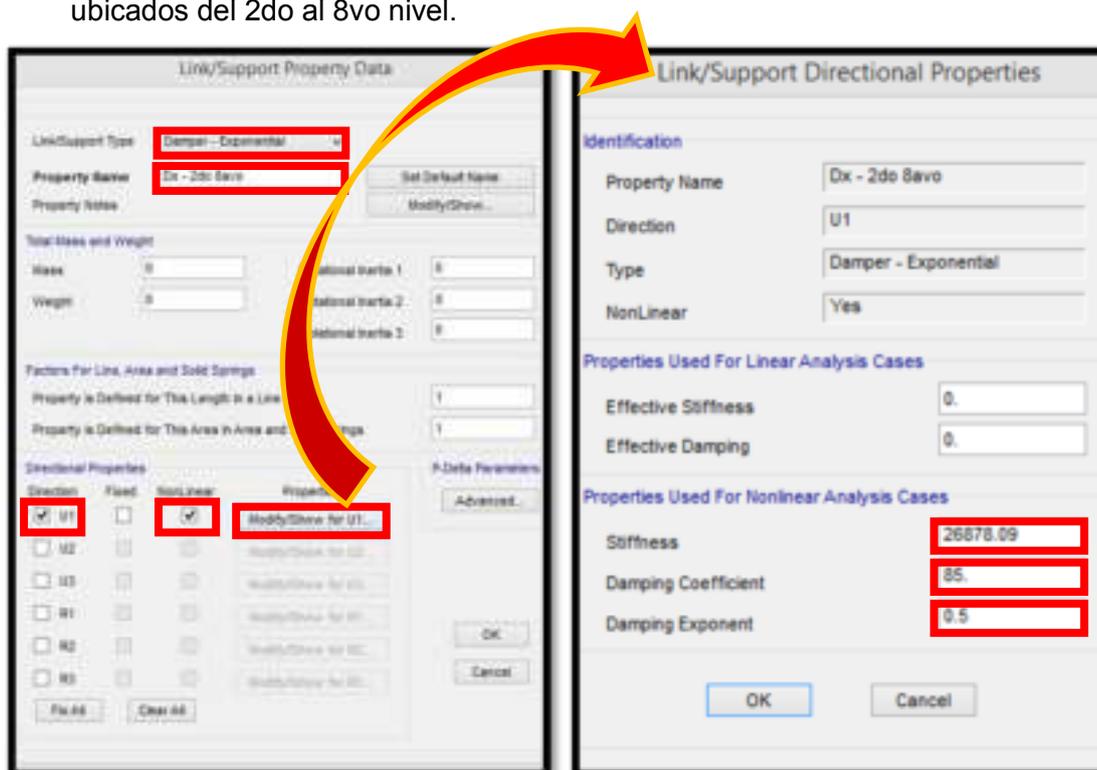
- ✓ De qué tipo de elemento Link se trata.
- ✓ Cuál será el nombre que le daremos a los disipadores.
- ✓ Las propiedades que ingresamos a que dirección pertenecen (ejes locales del dispositivo).
- ✓ El dispositivo se comporta de manera lineal o no-lineal.
- ✓ Cuáles son las propiedades que tendrá el disipador.

4. Para este caso:

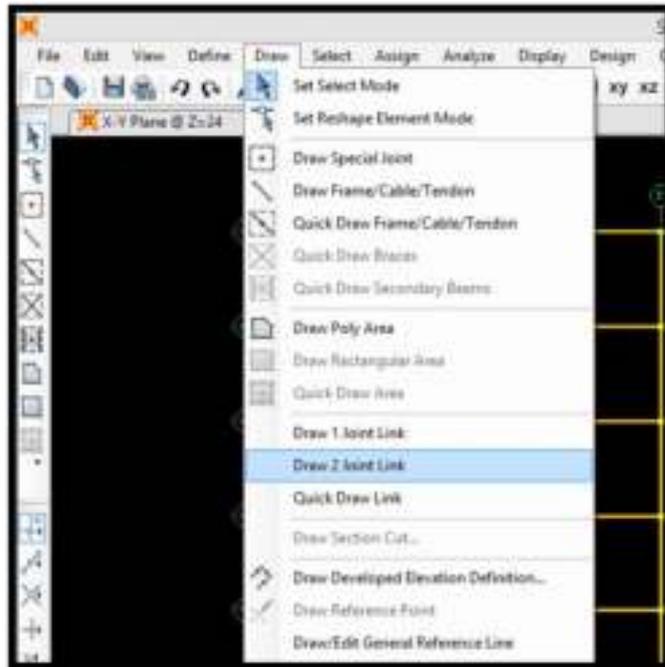
- ✓ El tipo de elemento Link con el que se modelan los disipadores viscosos es **Damper-Exponential** (en versiones anteriores al SAP2000 v.17 es simplemente **Damper**).
- ✓ Comenzaremos creando los disipadores del primer piso, a estos elementos los llamaremos **Dx-1er**.
- ✓ Las propiedades que se ingresan a los disipadores siempre son en la Dirección **U1** (axiales al disipador).
- ✓ Debido a que el exponente de amortiguamiento  $\alpha$  que se consideró en el cálculo de las propiedades fue igual a 0.5 se trata de un disipador **no-lineal**.
- ✓ Las propiedades para este dispositivo son Rigidez (K) = 25776.53 T/m<sup>2</sup>, Coeficiente de Amortiguamiento (C) = 85 Tn\*s/m y el exponente de amortiguamiento ( $\alpha$ ) es de 0.5



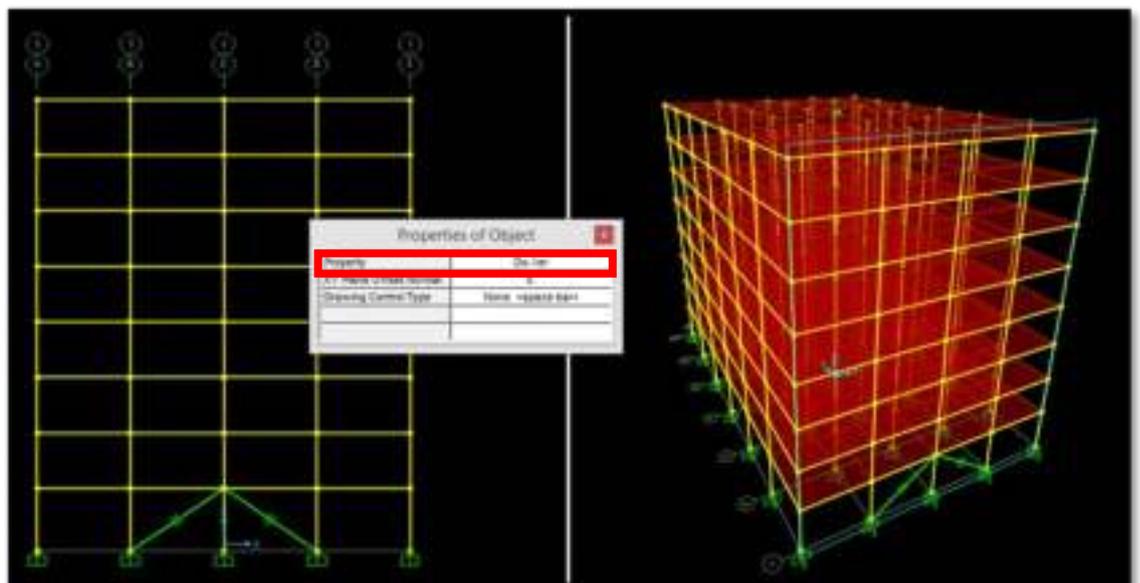
5. De la misma manera continuamos con las propiedades de los disipadores ubicados del 2do al 8vo nivel.



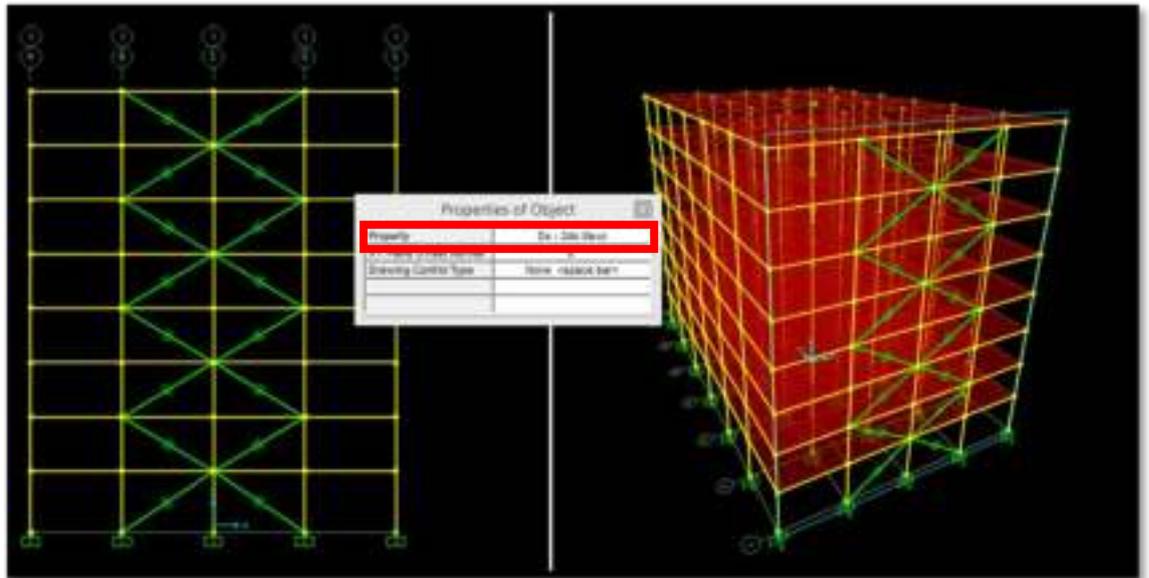
6. Cuando tengamos definidas las propiedades de todos nuestros disipadores podremos modelarlos en el software, para ello ir a **Draw**→**Draw 2 Joint Link**.



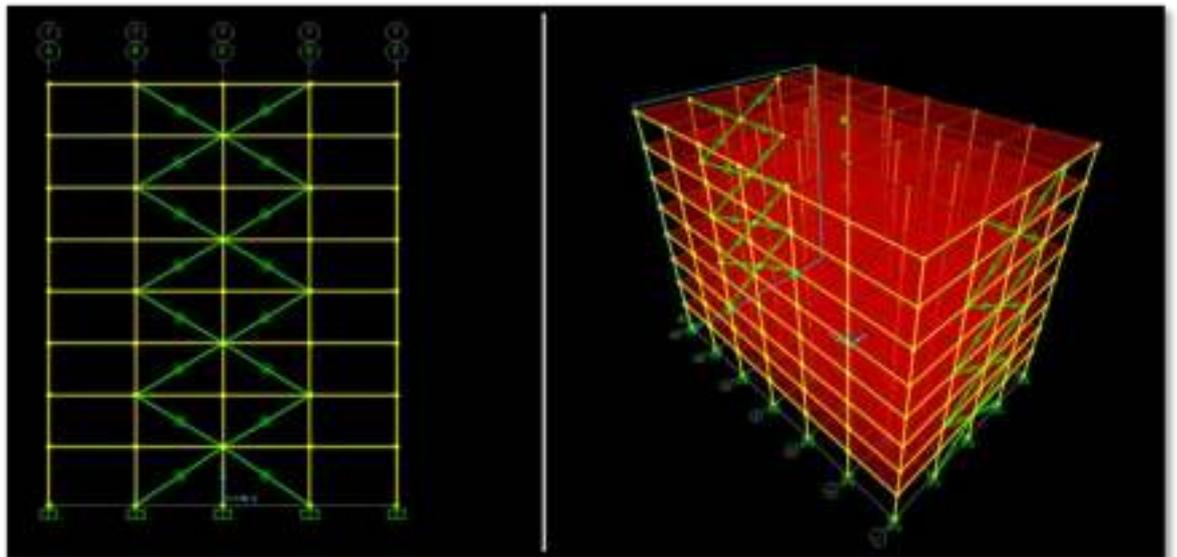
7. Dibujar los disipadores viscosos es sencillo, solo seleccione los nudos entre los cuales va a estar ubicado el dispositivo, todos los disipadores que vayamos a emplear estarán localizados en los pórticos extremos, ya que son los lugares donde se dan las mayores velocidades.
8. El arreglo que emplearemos es **Diagonal Alternada**.
9. Inicie con los disipadores del primer piso, importante verificar que en **Property** este seleccionado **Dx-1er**.



10. Para dibujar los disipadores ubicados en los pisos superiores seleccione en **Property Dx – 2do 8vo**



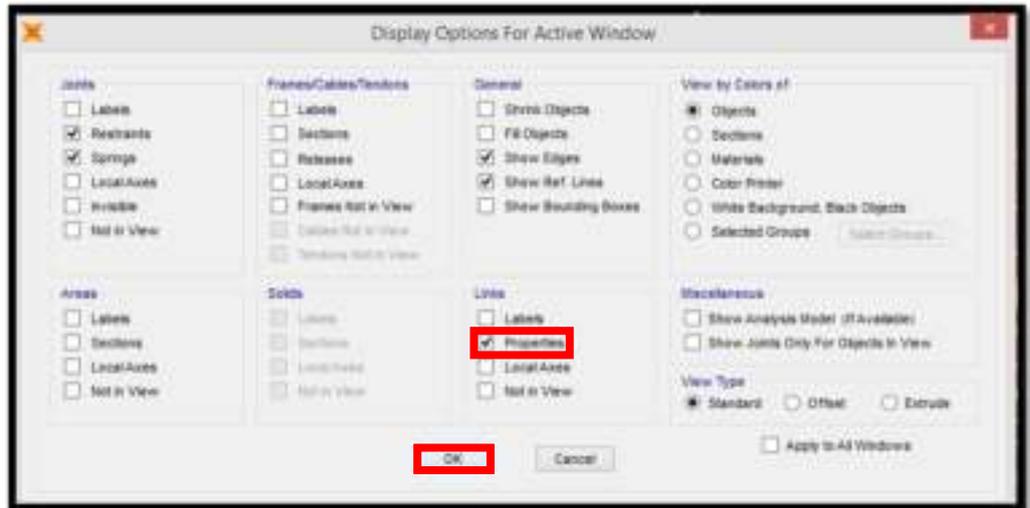
11. Ubíquese en la fachada opuesta y repita los pasos 9 y 10 para modelar los disipadores en este pórtico, al culminar este paso usted tendrá modelados todos los disipadores.



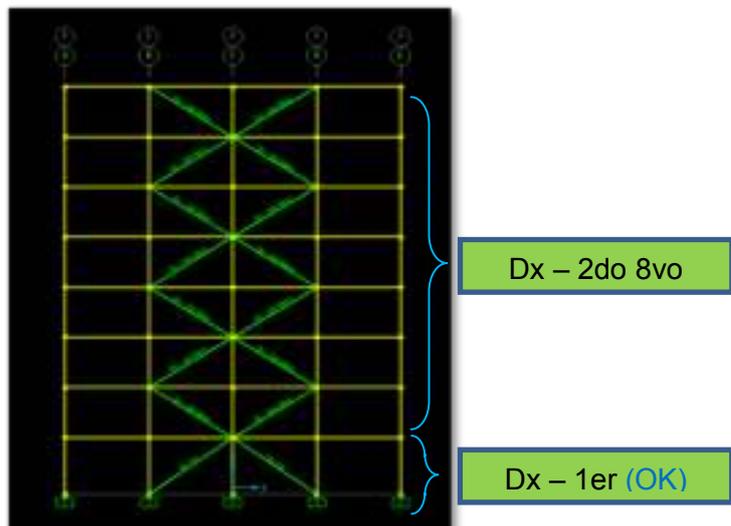
12. Para verificar que no haya cometido ningún error al dibujar los disipadores ingrese a **Set Display Options** 



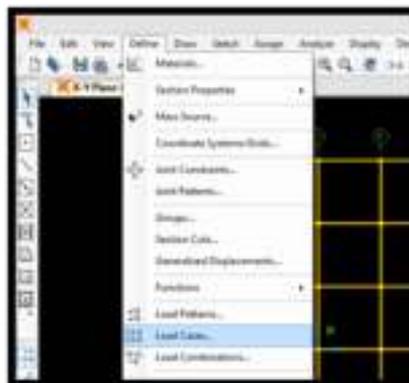
13. En la ventana **Display Options For Active Window** ubíquese en **Links** y active la casilla **Properties**



14. El programa le mostrará las propiedades de los disipadores que ha dibujado, verifique en ambos pórticos si todos estos están ubicados de manera correcta

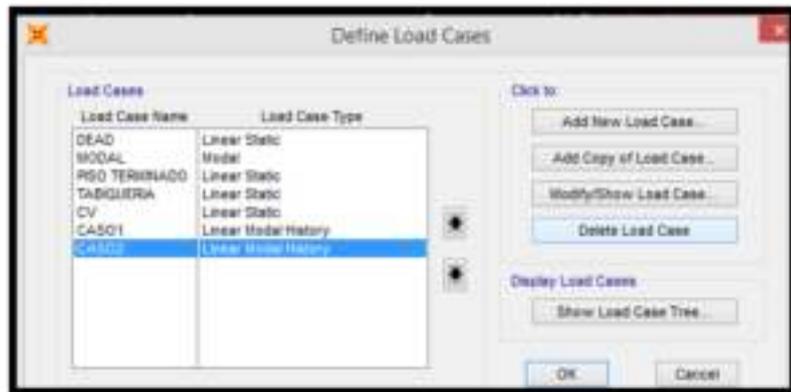


15. Antes de correr el modelo debemos realizar algunos ajustes en los casos de carga, por lo tanto dirijase a **Define**→**Load Cases**

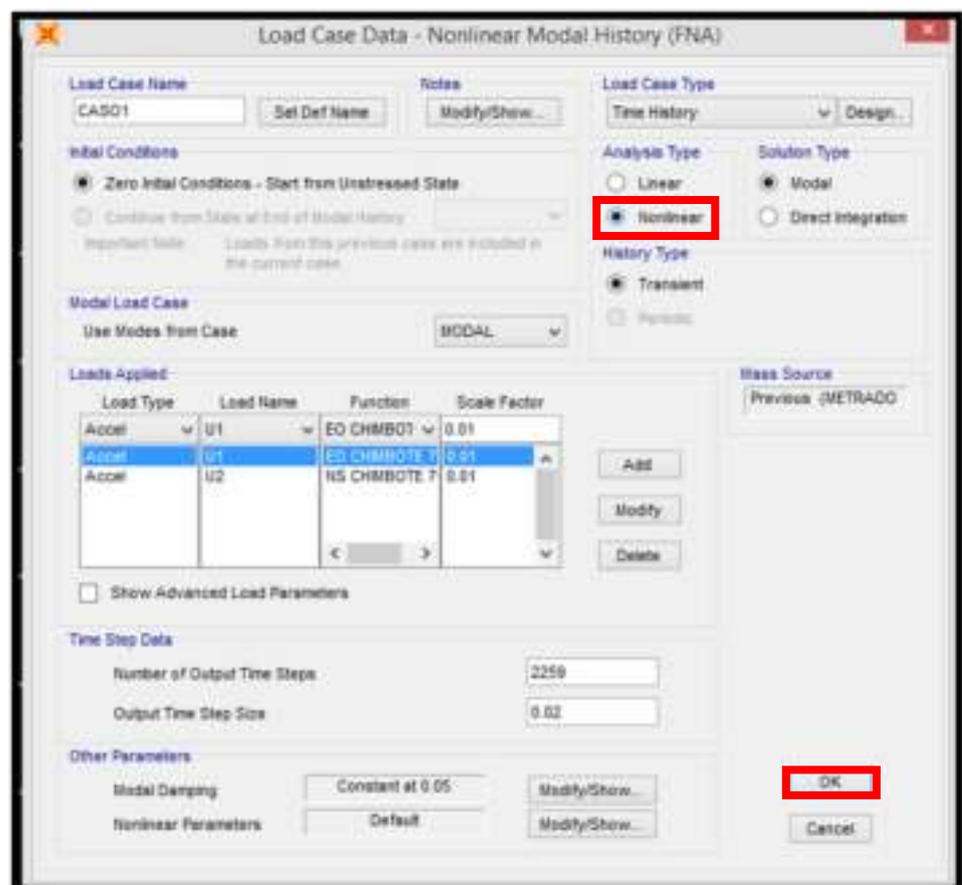


16. Recordemos que el sismo de diseño es el de CHIMBOTE – CASO1, en consecuencia el caso de análisis 2 no va a ser empleado por lo que lo

eliminaremos, por consiguiente seleccione en **Load Cases** CASO2 y haga Click en **Delete Load Case**



17. En la misma ventana (**Define Load Cases**) seleccione en **Load Cases** CASO1 y haga click en **Modify/Show Load Case**. Recordemos que el comportamiento de los disipadores es **no-lineal**, por lo que debemos señalarle al programa que el tipo de análisis debe ser **Tiempo Historia No-Lineal**.



18. Finalmente, guarde el archivo como EDIFICIO CON DISIPADORES, ahora correremos el modelo para ver los resultados obtenidos.

### 3.3.3 RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA CON LOS DISIPADORES DE ENERGÍA

#### A) DESPLAZAMIENTO EN LOS C.M. Y CONTROL DE DISTORSIONES

19. Los desplazamientos y las distorsiones obtenidas del **Análisis Dinámico Tiempo Historia No-Lineal** de nuestro edificio con disipadores de energía se muestran a continuación.

Tabla 3.9 Control de distorsiones en la dirección X – X (**Edificio Sin disipadores**)

PISO	Desplazamiento de C.M. (m)	Distorsión de entrepiso D/h	Norma E030 (Distorsión máxima)	Control Norma E030
8	0.1755	0.0023	0.007	SI
7	0.1686	0.0035	0.007	SI
6	0.1581	0.0052	0.007	SI
5	0.1425	0.0068	0.007	SI
4	0.1222	0.0082	0.007	NO
3	0.0977	0.0094	0.007	NO
2	0.0696	0.0104	0.007	NO
1	0.0385	0.0113	0.007	NO

Tabla 3.10 Control de distorsiones en la dirección X – X (**Edificio Con disipadores**)

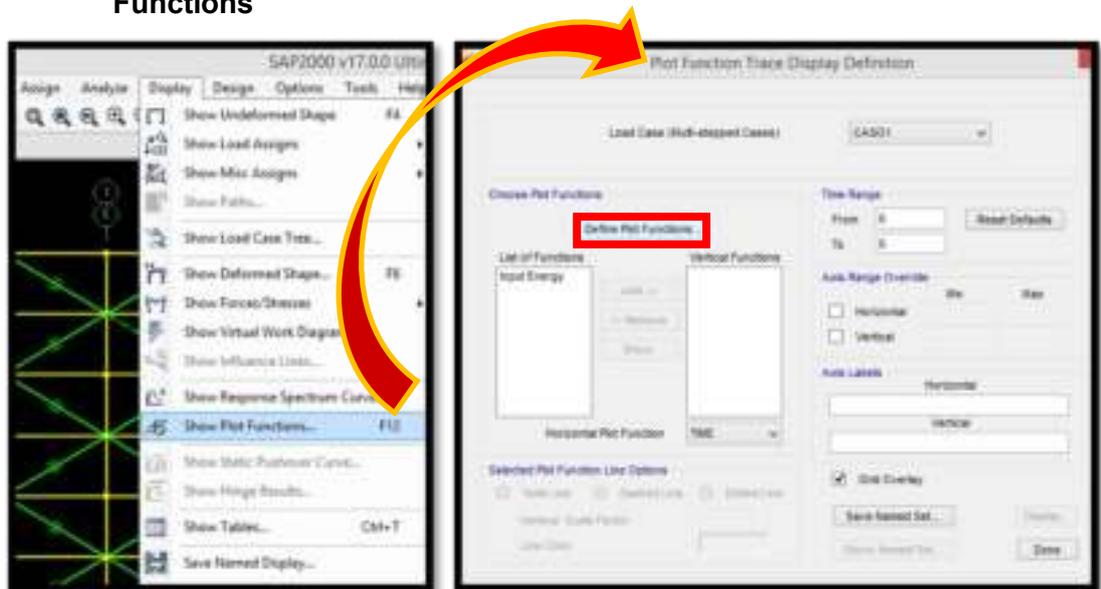
PISO	Desplazamiento de C.M. (m)	Distorsión de entrepiso D/h	Norma E030 (Distorsión máxima)	Control Norma E030
8	0.1028	0.0011	0.007	SI
7	0.0993	0.0023	0.007	SI
6	0.0926	0.0032	0.007	SI
5	0.0829	0.0041	0.007	SI
4	0.0706	0.0048	0.007	SI
3	0.0563	0.0054	0.007	SI
2	0.0402	0.0059	0.007	SI
1	0.0225	0.0066	0.007	SI

Como se puede observar la distorsión máxima en la Dirección X de 11.31‰ (Edificio sin disipadores) se redujo hasta 6.62 ‰, valor que es menor al máximo permitido (7‰), de esta manera se satisfacen las condiciones en cuanto al control de distorsiones que establece la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente.

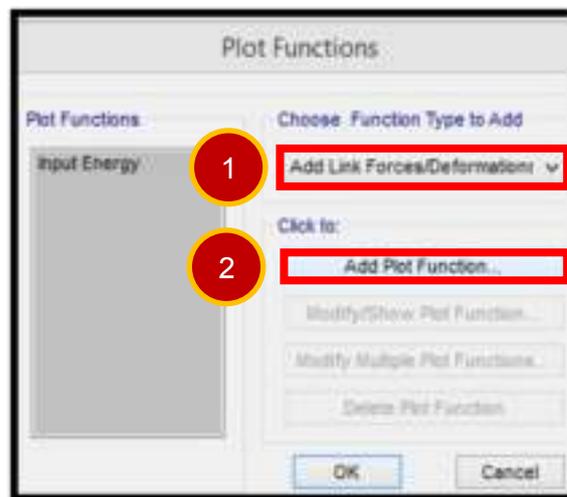
#### B) COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO DE LOS DISIPADORES

Ahora se mostrará cómo obtener la gráfica de Desplazamiento vs Fuerza (Curva de histéresis) de un disipador de energía.

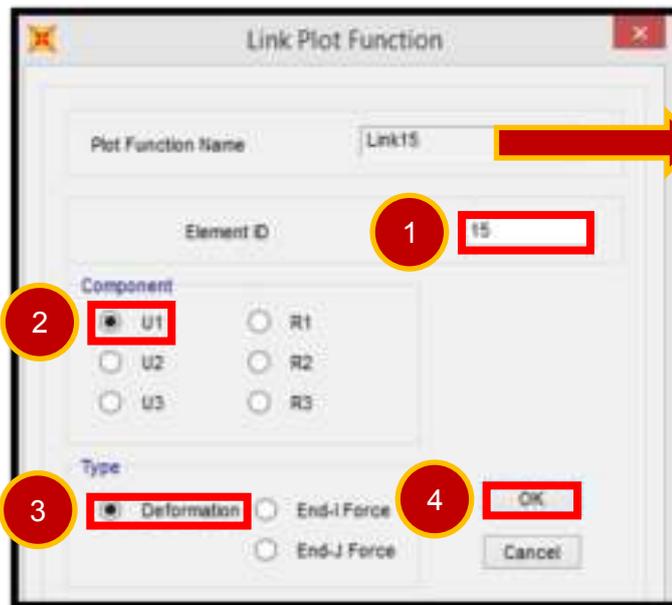
20. Nos dirigimos a **Display**→**Show Plot Functions**, y en la ventana **Plot Function Trace Display Definition** daremos un click en **Define Plot Functions**



21. Se abrirá la ventana **Plot Functions**, en ella le indicaremos al programa que queremos añadir una función tipo **Link Forces/Deformations**, para obtener las Curvas Histeréticas del disipador precisamos crear dos funciones una de deformaciones y otra de fuerzas (ambas del mismo disipador)

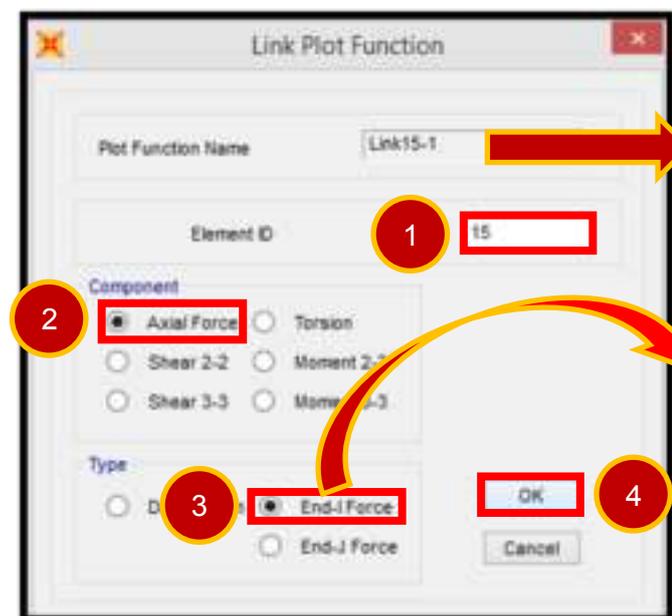


22. Como ejemplo trabajaremos obteniendo solo las Curvas Histeréticas del disipador número 15 de nuestro modelo estructural. Iniciamos creando la función de desplazamiento o deformaciones de dicho disipador, recuerde que se trata de las deformaciones axiales que experimenta el dispositivo durante el sismo - en consecuencia se trata de una deformación en la Dirección **U1** (ejes locales del disipador)



Es muy importante saber el nombre de la Función creada, en este caso es Link15

23. Realizamos nuevamente el paso número 21, es decir, añadimos otra función tipo **Link Forces/Deformations**, esta vez crearemos la función Fuerza, recuerde que se trata de la fuerza axial que experimenta el dissipador durante la acción sísmica.

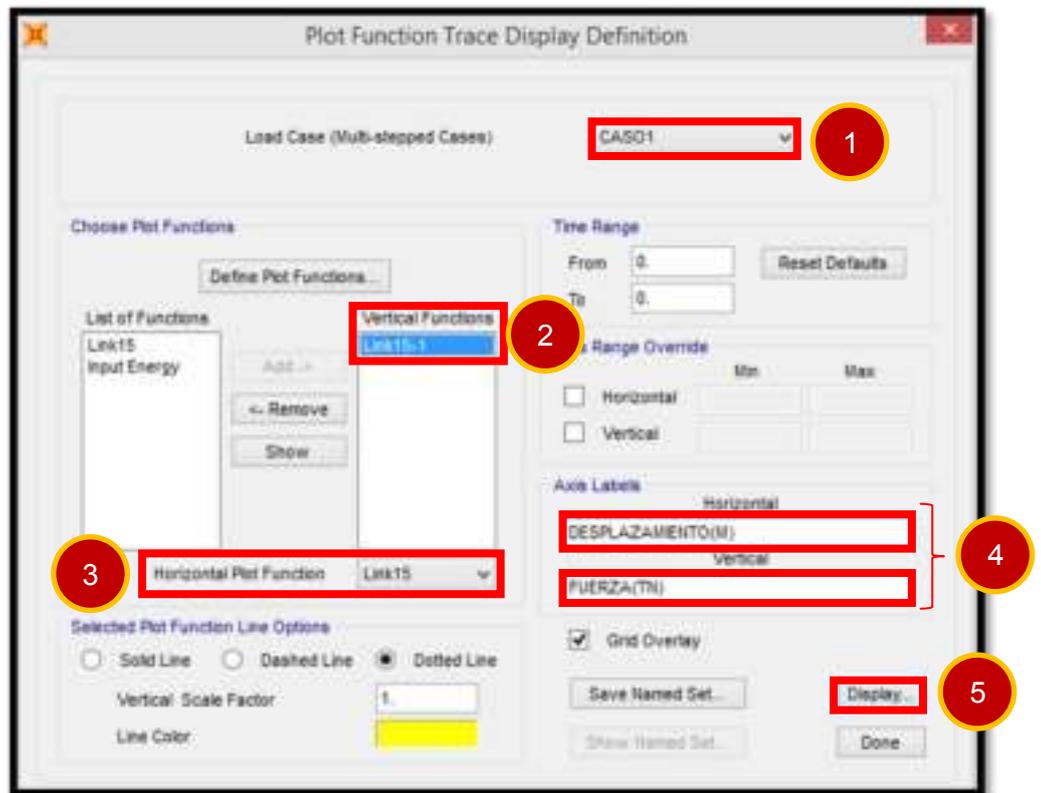


Es muy importante saber el nombre de la Función creada, en este caso es Link15-1

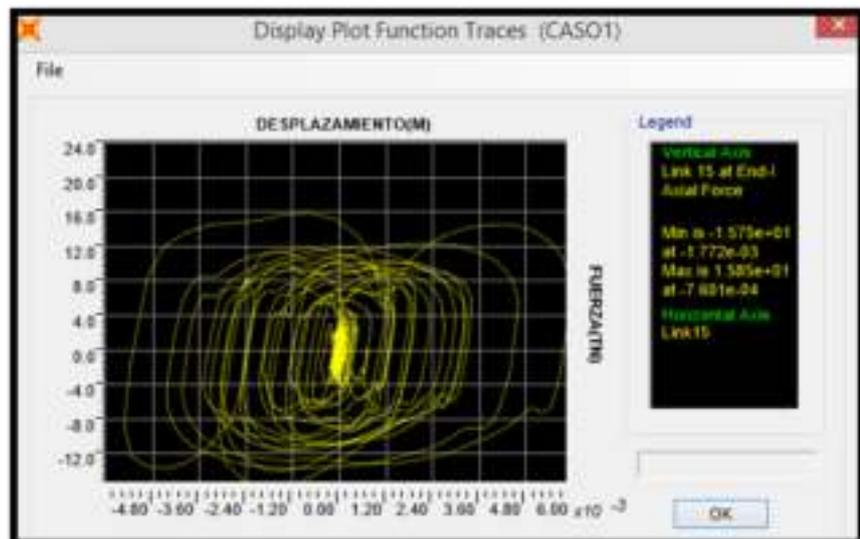
Elegir End-I Force o End-J Force es exactamente igual ya que el dispositivo experimenta la misma fuerza en ambos extremos.

24. Cuando tengamos nuestras dos funciones creadas, debemos regresar a la ventana **Plot Function Trace Display Definition**. Recuerde que el nombre con el que se crearon las funciones fue:

- ✓ Link15      Deformación      Eje Horizontal
- ✓ Link15-1    Fuerza                      Eje Vertical



25. Al dar un click en **Display** obtendremos las Curvas Histeréticas del disipador, tal como se muestra en la siguiente figura.



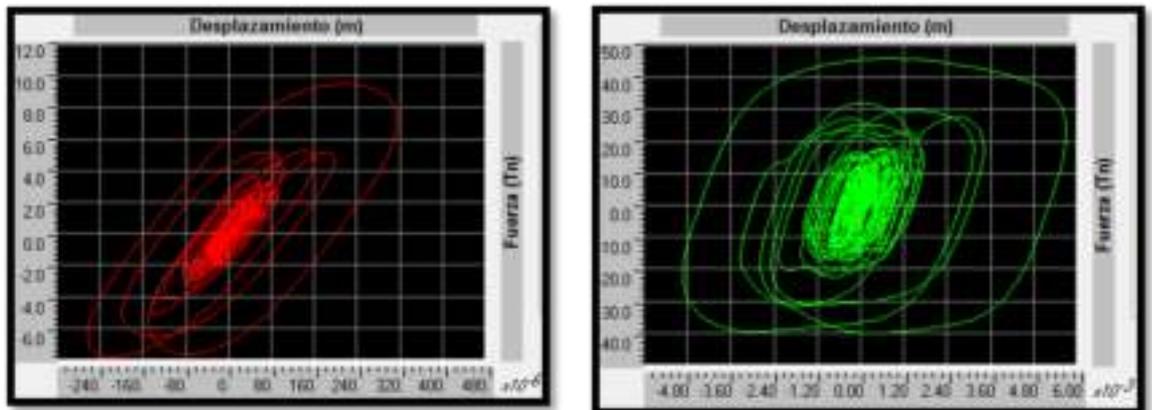
**OBSERVACION IMPORTANTE:**

Como ejemplo solo se empleó el disipador número 15, al momento de trabajar en un proyecto real es indispensable verificar el comportamiento histerético de todos los disipadores en el sistema.

A partir de las curvas histeréticas, se puede prever, que aquellos disipadores que no se ajustan a la forma elíptica, no trabajan correctamente, esto es, no aportan

significativamente en el incremento del amortiguamiento y en la reducción de las distorsiones.

Ejemplo: En la siguiente imagen (Izquierda) se puede ver que no se logró la forma elíptica propia del comportamiento histerético de los disipadores viscosos, en ese caso se optó por cambiar la disposición de los disipadores logrando mejores resultados (Derecha).

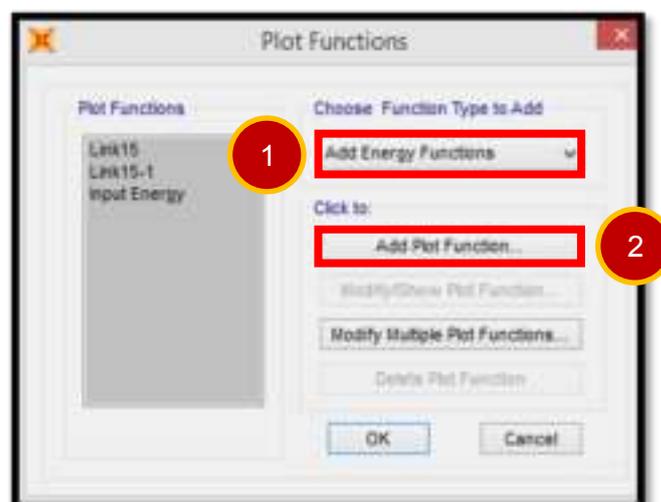


Fuente: Tesis “Evaluación del proyecto estructural y optimización del diseño con Disipadores de Energía Viscosos Taylor para una edificación esencial de 6 pisos”

### C) BALANCE DE ENERGÍA

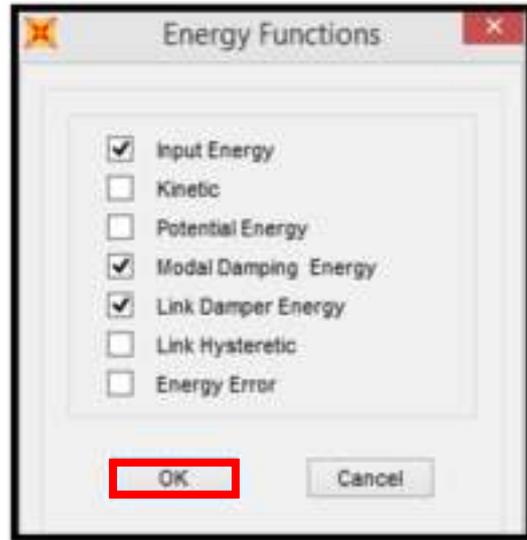
Ahora se le mostrará como ver de manera gráfica el balance de energía del edificio con los disipadores de energía.

26. Repita el paso 21, al hacerlo se abrirá la ventana **Plot Functions** en ella le indicaremos al programa que queremos añadir una función de energía.



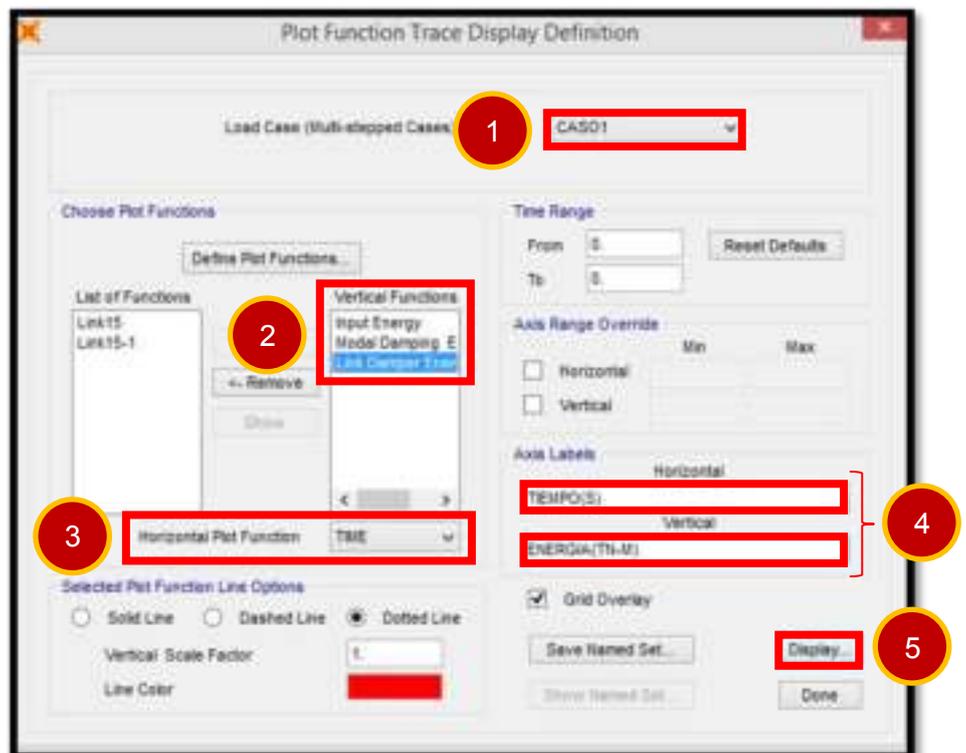
27. Tenemos que señalarle al programa que energías queremos que considere en nuestro diagrama de balance energético. En este caso emplearemos las más importantes – **Input Energy** (energía de entrada del sismo) – **Modal**

**Damping Energy** (energía que disipa el edificio por sí mismo) – **Link Damper Energy** (energía que es disipada por los disipadores de energía viscosos).

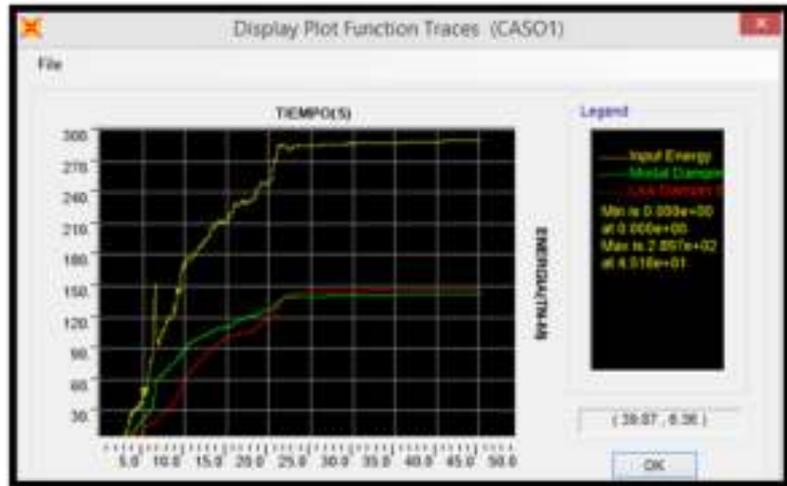


28. Cuando culminemos con el paso 27, debemos regresar a la ventana **Plot Function Trace Display Definition**. Recuerde que en el diagrama de balance de energía los ejes son:

- ✓ Eje Vertical      Energía (T.m)
- ✓ Eje Horizontal      Tiempo (s)

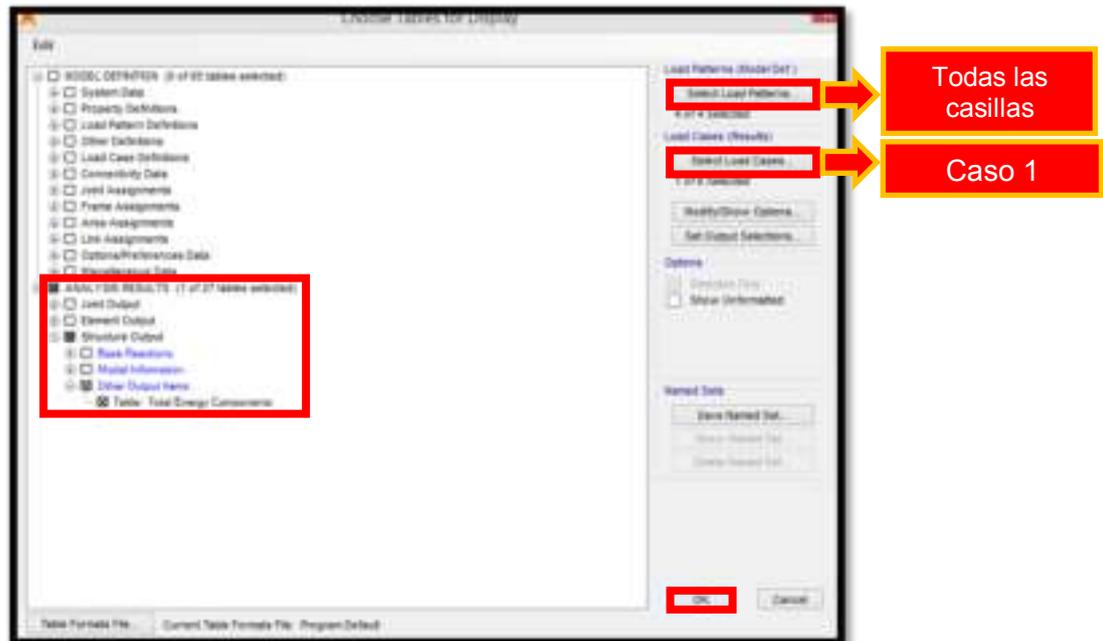


29. Daremos un click en **Display** y obtendremos el diagrama de balance de energía tal como se muestra en la siguiente figura.



La energía de entrada se muestra en color **amarillo**, la energía de amortiguamiento inherente a la estructura con color **verde** y la de los dispositivos viscosos con color **rojo**.

30. Si deseamos ver los valores de la energía de entrada, de amortiguamiento y la tomada por los disipadores de manera numérica, debemos dirigirnos a **Display**→**Show Tables** donde seguiremos la siguiente ruta.



El porcentaje de disipación de energía se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ disipación de energía} = \frac{\text{Energía del sistema de amortiguamiento}}{\text{Energía de entrada del sismo}}$$

Tabla 3.11 Porcentaje de disipación de energía en la edificación con disipadores

Energía(T.m)		
Entrada	Inherente de la estructura	Disipadores
289.72	142.78	146.94
100%	49.28%	50.72%

En el gráfico de balance energético se puede apreciar que gran parte de la energía es tomada por el sistema de disipación (50.72% de la energía de entrada). Este porcentaje es significativo y se debe principalmente a la numerosa cantidad de disipadores fluido-viscosos empleados (32 dispositivos).

Con este porcentaje de disipación podemos esperar la disminución de desplazamientos en los centros de masa de los pisos, así como la reducción de fuerzas y momentos en los diferentes elementos estructurales.

# CAPÍTULO 4

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y ELECCIÓN DEL DISIPADOR VISCOZO

### 4.1 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados comparativos en cuanto a desplazamientos, distorsiones, aceleraciones y otros del edificio en estudio (con y sin disipadores de energía) teniendo como sismo de diseño el de Chimbote 1970 (Caso 1).

Archivos empleados:

- ✓ A.T.H. CHIMBOTE 1970
- ✓ EDIFICIO CON DISIPADORES

#### 4.1.1 DESPLAZAMIENTOS EN LOS CENTROS DE MASA

Dirección X-X

La incorporación de disipadores de energía viscosos en la estructura reduce los desplazamientos de piso en la dirección X-X en un rango de entre 42 a 43% tal como se muestra en la figura 4.1 y tabla 4.1



Fig. 4.1 Desplazamientos máximos absolutos en los C.M. de cada piso (Dirección X-X)

Tabla 4.1 Porcentaje de reducción de los desplazamientos máximos en los C.M. de cada piso

Piso	Sin disipador	Con disipador	% Reducción
8	175.55	102.77	41.46%
7	168.64	99.33	41.10%
6	158.09	92.56	41.45%
5	142.51	82.85	41.86%
4	122.18	70.63	42.19%
3	97.67	56.33	42.33%
2	69.57	40.25	42.15%
1	38.47	22.51	41.50%

#### 4.1.2 DISTORSIONES DE ENTREPISO

##### Dirección X-X

Las distorsiones de entrepiso en la dirección X-X se redujeron en un rango entre el 36% y 51% tal como se aprecia en la figura 4.2 y tabla 4.2. Es importante mencionar que la distorsión máxima en la estructura con disipadores de energía viscosos se presenta en el primer piso y es igual a 6.62 ‰, valor que satisface la distorsión objetivo de 7.0 ‰ es decir la máxima distorsión permitida por la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E030



Fig. 4.2 Distorsiones de entrepiso (Dirección X-X)

Tabla 4.2 Porcentaje de reducción de las distorsiones de entrepiso

Piso	Sin disipador	Con disipador	% Reducción
8	2.30	1.15	50.25%
7	3.52	2.26	35.84%
6	5.19	3.24	37.68%
5	6.78	4.07	39.88%
4	8.17	4.77	41.64%
3	9.37	5.36	42.78%
2	10.37	5.91	42.95%
1	11.31	6.62	41.50%

#### 4.1.3 ESFUERZOS MÁXIMOS EN LOS ELEMENTOS DE CORTE

Las fuerzas cortantes y los momentos flectores de todas las columnas se redujeron. A manera de ejemplo se realizó una comparación de estas fuerzas (edificio con y sin disipadores) en la columna que se muestra en la siguiente imagen.

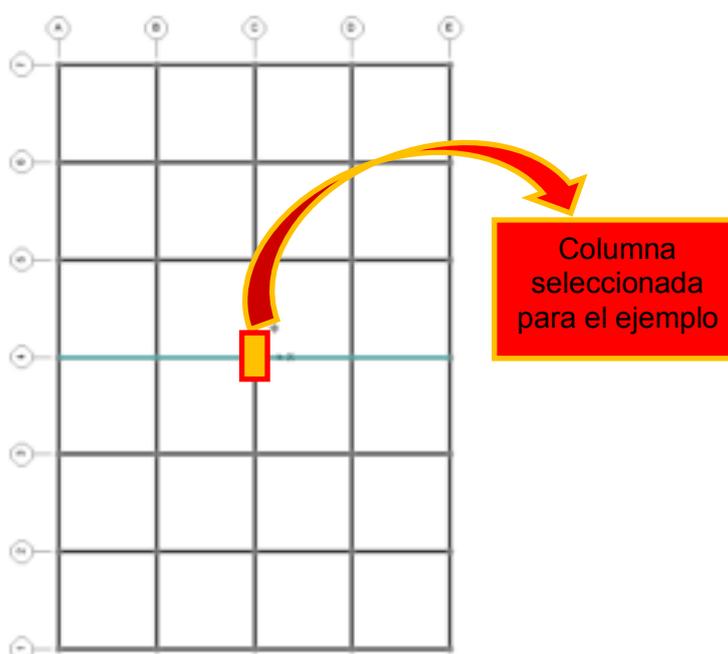


Fig. 4.3 Vista en planta de la estructura

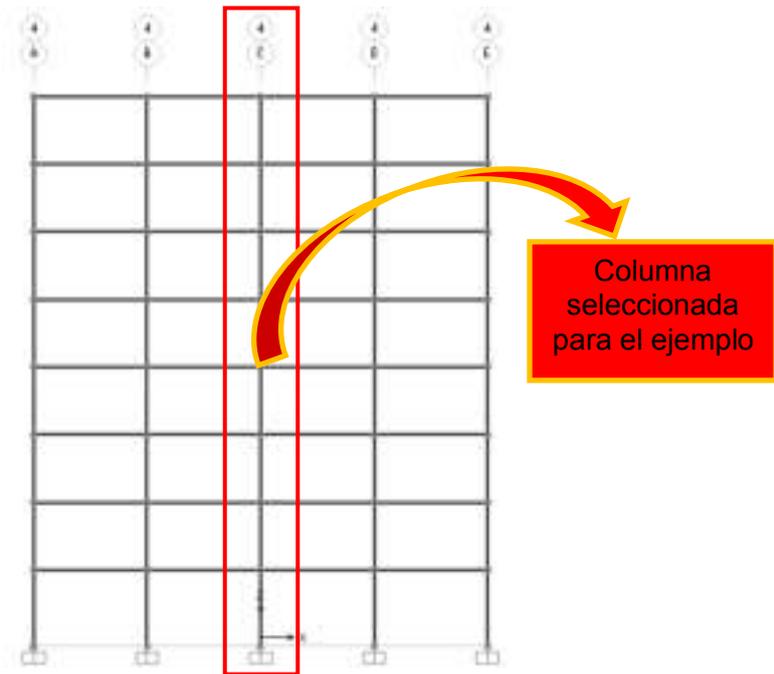


Fig. 4.4 Vista en elevación del Pórtico 4

Para verificar las fuerzas cortantes y momentos flectores de las columnas en el programa SAP2000, recordar la siguiente regla:

Acción sísmica en la Dirección X – Verificar V2 y M3

Acción sísmica en la Dirección Y – Verificar V3 y M2

**Considerando la acción del sismo en la Dirección X-X (V2-M3)**



Fig. 4.5 Fuerza cortante máxima en cada piso para la columna seleccionada

Tabla 4.3 Porcentaje de reducción de la fuerza cortante en la columna seleccionada

Piso	Sin disipador	Con disipador	% Reducción
8	29.99	17.57	41.43%
7	30.47	17.38	42.96%
6	27.80	15.87	42.89%
5	24.80	14.26	42.51%
4	21.93	12.47	43.14%
3	18.91	10.09	46.64%
2	15.93	7.09	55.52%
1	9.40	3.76	60.03%

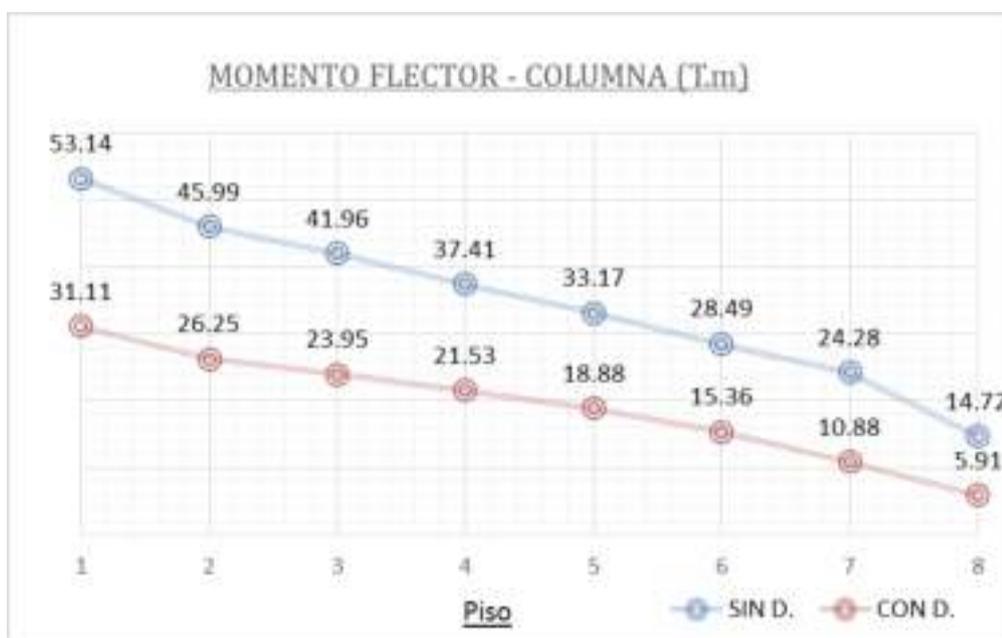


Fig. 4.6 Momento flector máximo en cada nivel para la columna seleccionada

Tabla 4.4 Porcentaje de reducción del momento flector en la columna seleccionada

Piso	Sin disipador	Con disipador	% Reducción
8	53.14	31.11	41.46%
7	45.99	26.25	42.92%
6	41.96	23.95	42.91%
5	37.41	21.53	42.44%
4	33.17	18.88	43.08%
3	28.49	15.36	46.10%
2	24.28	10.88	55.18%
1	14.72	5.91	59.81%

#### 4.1.4 ACELERACIÓN Y VELOCIDADES

A continuación en las tablas 4.5 y 4.6 se muestran los valores máximos y mínimos de las velocidades y aceleraciones de los centros de masas de cada piso, para el edificio sin y con disipadores respectivamente.

##### Aceleraciones y velocidades de los C.M. en la Dirección X-X

Tabla 4.5 Velocidades y aceleraciones en los C.M. de cada piso en la edificación sin disipadores

Piso	Valor	Velocidad	Aceleración
		(m/s)	(m/s <sup>2</sup> )
8	Máx.	0.850	5.013
	Mín.	-0.948	-6.265
7	Máx.	0.817	4.215
	Mín.	-0.914	-4.771
6	Máx.	0.764	3.770
	Mín.	-0.851	-3.532
5	Máx.	0.705	3.439
	Mín.	-0.765	-4.903
4	Máx.	0.634	3.417
	Mín.	-0.672	-5.042
3	Máx.	0.530	3.40
	Mín.	-0.573	-3.889
2	Máx.	0.397	3.013
	Mín.	-0.456	-3.355
1	Máx.	0.316	2.378
	Mín.	-0.333	-3.175

Tabla 4.6 Velocidades y aceleraciones en los C.M de cada nivel en la edificación con disipadores

Piso	Valor	Velocidad	Aceleración
		(m/s)	(m/s <sup>2</sup> )
8	Máx.	0.4862	2.86767
	Mín.	-0.6082	-2.71412
7	Máx.	0.4726	2.64862
	Mín.	-0.5897	-2.47951
6	Máx.	0.4457	2.2981
	Mín.	-0.5552	-2.39301
5	Máx.	0.4216	2.07802
	Mín.	-0.4966	-2.37932
4	Máx.	0.3967	2.10258
	Mín.	-0.4717	-2.60355
3	Máx.	0.3665	1.9353
	Mín.	-0.4333	-2.97662
2	Máx.	0.332	1.78959
	Mín.	-0.3858	-2.96409
1	Máx.	0.2919	2.11722
	Mín.	-0.3752	-2.88152

En las figuras 4.7 y 4.8 se puede ver la comparación entre las aceleraciones y velocidades del edificio sin y con disipadores; así mismo en las tablas 4.7 y 4.8 se muestra el porcentaje de reducción de estos valores con el uso de disipadores viscosos.



Fig. 4.7 Comparación de las aceleraciones máximas en los C.M.

Tabla 4.7 Porcentaje de reducción de las aceleraciones máximas en los C.M.

Piso	Sin disipador	Con disipador	% Reducción
8	5.013	2.868	42.79%
7	4.215	2.649	37.17%
6	3.770	2.298	39.05%
5	3.439	2.078	39.58%
4	3.417	2.103	38.46%
3	3.400	1.935	43.08%
2	3.013	1.790	40.61%
1	2.378	2.117	10.96%



Fig. 4.8 Comparación de las velocidades máximas en los C.M.

Tabla 4.8 Porcentaje de reducción de las velocidades máximas en los C.M.

Piso	Sin disipador	Con disipador	% Reducción
8	0.850	0.486	42.81%
7	0.817	0.473	42.13%
6	0.764	0.446	41.69%
5	0.705	0.422	40.16%
4	0.634	0.397	37.40%
3	0.530	0.367	30.86%
2	0.397	0.332	16.27%
1	0.316	0.292	7.74%

#### 4.1.5 MODOS Y PERÍODOS DE VIBRACIÓN

A continuación en la tabla 4.9 se muestran los periodos resultantes de la edificación con los disipadores viscosos incorporados en ella.

Tabla 4.9 Períodos de vibración de la edificación con disipadores de energía

Modo	Período T (s)	Masa Participativa	
		Masa X-X (%)	Masa Y-Y (%)
1	1.320295	86.59	0.00
2	0.968685	0.00	0.00
3	0.823678	0.00	84.76

4	0.43981	9.11	0.00
5	0.320761	0.00	0.00
6	0.271283	0.00	9.68
7	0.26165	2.61	0.00
8	0.189667	0.00	0.00
9	0.187784	1.01	0.00
10	0.157838	0.00	3.08
11	0.148014	0.43	0.00
12	0.134017	0.00	0.00
13	0.124529	0.18	0.00
14	0.118742	0.00	0.00
15	0.111995	0.00	0.17
16	0.110405	0.07	0.00
17	0.110126	0.00	1.19
18	0.10835	0.00	0.00
19	0.103681	0.00	0.00
20	0.102769	0.01	0.00
21	0.102434	0.00	0.00
22	0.101924	0.00	0.00
23	0.094546	0.00	0.00
24	0.094024	0.00	0.00
Sumatoria		100.00	98.89

Se puede apreciar que los períodos resultantes son los mismos a los de la estructura sin los disipadores de energía, esto se debe a que estos dispositivos no incrementan la rigidez de la estructura, lo que generaría que los periodos no varíen.

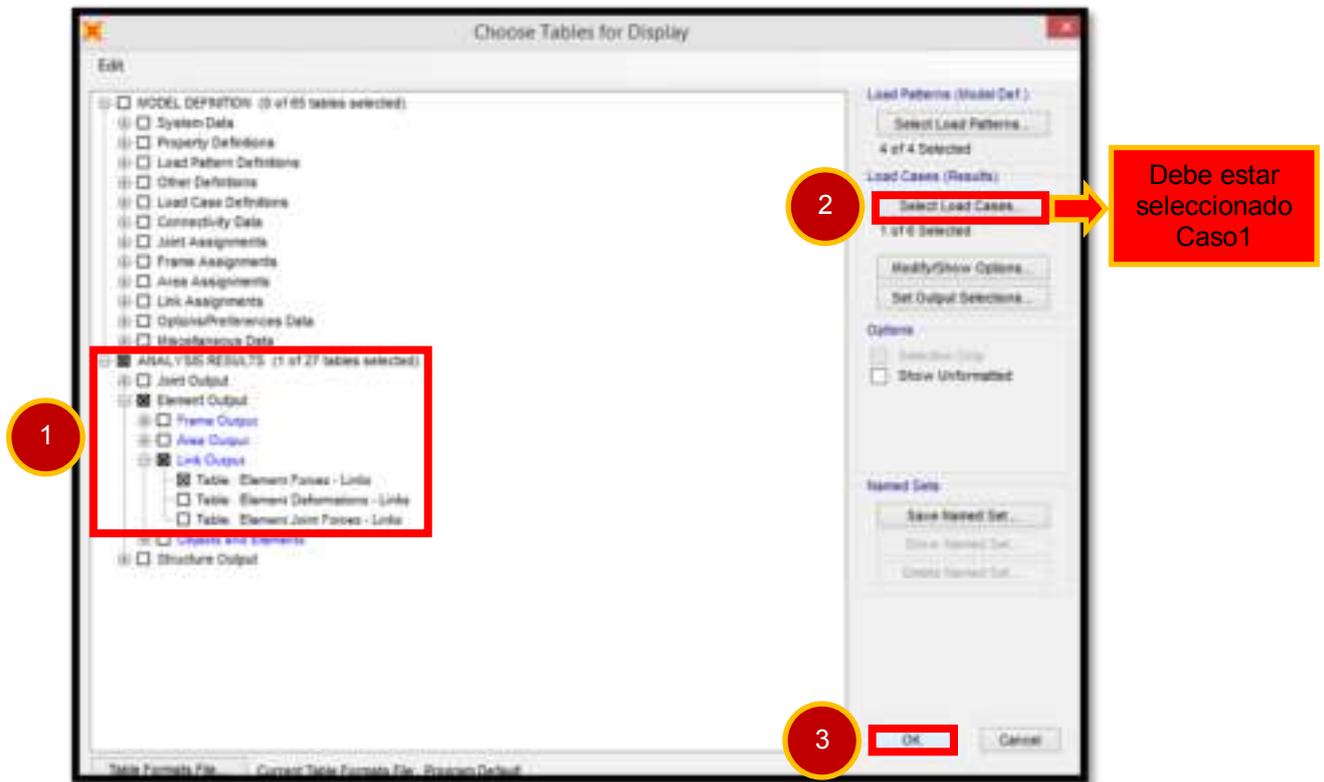
## 4.2 DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS DE AMORTIGUAMIENTO

### 4.2.1 AGRUPACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS POR NIVELES DE FUERZA

Cuando terminemos con nuestro modelo estructural y estemos satisfechos con los resultados obtenidos en cuanto a distorsiones, energía sísmica disipada y otros, podremos agrupar a los dispositivos por sus niveles de fuerza para así poder solicitar su pedido.

Para ello debemos saber cuáles son las fuerzas máximas (compresión o tracción) que experimentan nuestros dispositivos bajo la acción de nuestro sismo de diseño.

1. Para obtener estos valores abrimos el archivo EDIFICIO CON DISIPADORES y correr el modelo.
2. Luego nos dirigiremos a **Display**→**Show Tables**
3. En la ventana **Choose Tables for Display** seguiremos la siguiente ruta



4. Las fuerzas que obtengamos deben ser expresadas en kip y estandarizadas a los siguientes valores 55kip, 110kip, 165kip, etc.

**Fuerzas máximas en los disipadores ubicados en la Dirección X-X**

Tabla 4.10 Fuerzas máximas en los disipadores de energía

Disipador	Fuerza(T)	Fuerza(kN)	Disipador(kN)
1	28.68	63.22	110
2	28.54	62.92	110
3	25.42	56.04	110
4	22.54	49.68	55
5	21.73	47.91	55
6	21.55	47.51	55
7	19.67	43.37	55
8	15.88	35.00	55
9	11.52	25.39	55
10	25.50	56.22	110
11	22.94	50.58	55
12	21.72	47.88	55
13	21.49	47.38	55
14	19.71	43.46	55
15	15.85	34.95	55
16	11.52	25.40	55
17	25.50	56.22	110

18	22.94	50.58	55
19	21.72	47.88	55
20	21.49	47.38	55
21	19.71	43.46	55
22	15.85	34.95	55
23	11.52	25.40	55
24	25.42	56.04	110
25	23.00	50.72	55
26	21.73	47.91	55
27	21.55	47.51	55
28	18.27	40.27	55
29	15.88	35.00	55
30	11.52	25.39	55
31	28.54	62.92	110
32	28.68	63.22	110

Tabla 4.11 Agrupación de los dispositivos por niveles de fuerza

Fuerza (kip)	Número de dispositivos
55	24
110	8
Total	32

#### 4.2.2 ELECCIÓN DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA

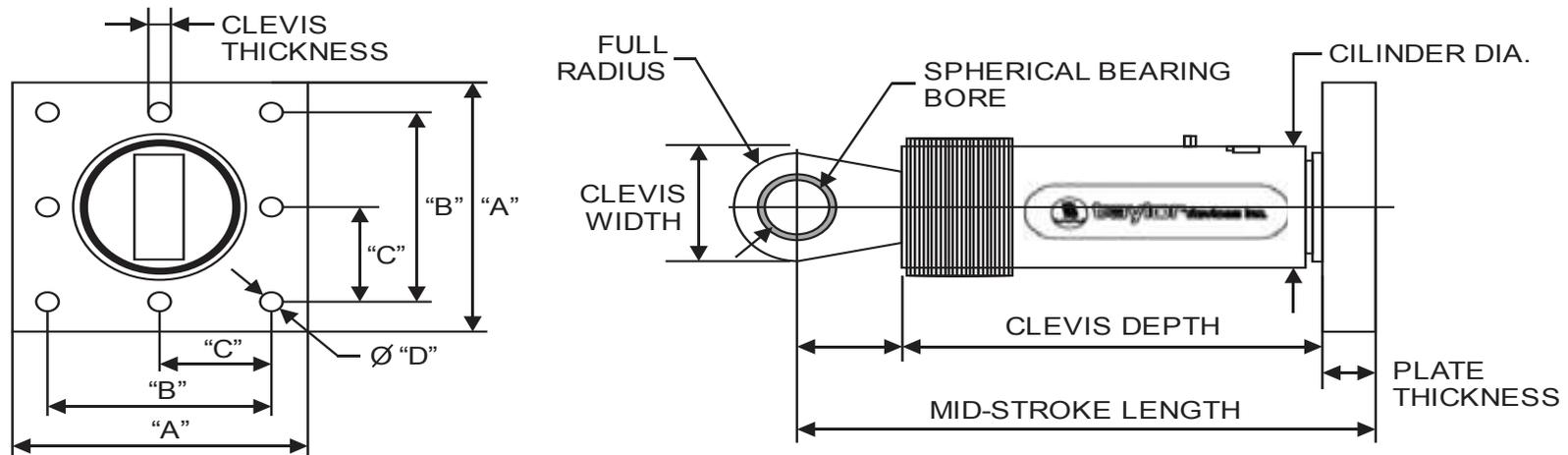
Tomando en cuenta los niveles de fuerza obtenidos, se procede a determinar los dispositivos a emplear dependiendo de su capacidad de carga.

Los disipadores que vamos a emplear son los manufacturados por la corporación **TAYLOR DEVICES INC.**, principal fabricante de los disipadores de fluido viscosos. En las figuras 4.9 y 4.10 se muestran las dimensiones provistas por este fabricante para los diferentes niveles de fuerza.



# taylor devices inc.

## FLUID VISCOUS DAMPERS & LOCK-UP DEVICES



FORCE	SPHERICAL BEARING BORE DIA. (INCHES)	MD-STROKE LENGTH (INCHES)	STROKE (INCHES)	CLEVIS THICKNESS (INCHES)	CLEVIS WIDTH (INCHES)	CLEVIS DEPTH (INCHES)	CYLINDER DIA. (INCHES)	WEIGHT (lbs.)
55 KIP	1.50	31.00	±3	1.63	4 MAX.	3.25	4-1/2 MAX.	98
110 KIP	2.00	39.25	±4	2.13	5 MAX.	4.00	5-3/4 MAX.	215
165 KIP	2.25	40.00	±4	2.25	6 MAX.	5.10	7-1/4 MAX.	400
220 KIP	2.75	41.25	±4	2.75	7-1/2 MAX.	5.88	8-1/4 MAX.	560
330 KIP	3.00	43.50	±4	3.00	8 MAX.	6.38	9-1/2 MAX.	675
440 KIP	3.50	53.00	±5	3.50	9 MAX.	7.50	11-1/4 MAX.	1000
675 KIP	4.00	56.75	±5	4.50	11-1/4 MAX.	8.00	13-3/4 MAX.	1750
900 KIP	5.00	64.00	±5	5.50	12-3/4 MAX.	10.75	16-3/4 MAX.	2400
1450 KIP	†	†	†	†	†	†	†	†
1800 KIP	†	†	†	†	†	†	†	†

55kip

110kip

Fig. 4.9 Propiedades de los dispositivos TAYLOR DEVICES INC.

FORCE	"A"	"B"	"C"	"D"	PLATE THICKNESS (INCHES)
55 KIP	7.00±.12	5.00±.01	*	0.81±.01	1.50±.03
110 KIP	11.12±.12	8.00±.01	*	1.25±.01	1.50±.03
165 KIP	13.50±.12	10.00±.01	5.00±.01	1.12±.01	2.40±.03
220 KIP	16.50±.12	12.50±.01	6.25±.01	1.25±.01	3.00±.06
330 KIP	17.00±.12	13.00±.01	6.50±.01	1.375±.010	3.00±.06
440 KIP	18.00±.12	13.50±.01	6.75±.01	1.500±.010	4.00±.06
675 KIP	20.00±.12	16.00±.01	8.00±.01	1.63±.01	4.00±.06
900 KIP	†	†	†	†	†
1450 KIP	†	†	†	†	†
1800 KIP	†	†	†	†	†

**NOTE:**

VARIOUS STROKES ARE AVAILABLE, FROM ±2 TO ±36 INCHES. 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 INCHES PER ±1 INCH OF STROKE.

**EXAMPLE: 220 KIP ±4 INCHES STROKE, MID-STROKE LENGTH IS 41.25 INCHES  
 220 KIP ±6 INCHES STROKE,  
 6-4 = 2 TIMES FIVE = 10  
 41.25+10 = 51.25 INCHES MID-STROKE LENGTH**

**BELLOWS MAY BE REPLACED WITH A STEEL SLEEVE AS DESIRED STROKE LENGTHS INCREASE. CONSULT TAYLOR DEVICES FOR STROKE OVER ± 12 INCHES AND/OR FOR FORCE CAPACITIES FOR STROKE LONGER THAN LISTED IN TABLE.**

**\* DENOTES 4-BOLT MOUNTING PATTERN  
 † DENOTES CUSTOM PATTERN. CONSULT FACTORY.**

Fig. 4.10 Dimensiones de la placa base TAYLOR DEVICES INC.

Los disipadores viscosos seleccionados son los de capacidades de **55kip** y **110kip**. En las figuras 4.11 – 4.14 se muestra el detalle de las dimensiones de cada uno de ellos.

Es importante señalar que cada dispositivo cuenta con su propio factor de seguridad, por lo que no se requiere de ninguna amplificación adicional a las fuerzas obtenidas del análisis tiempo historia.

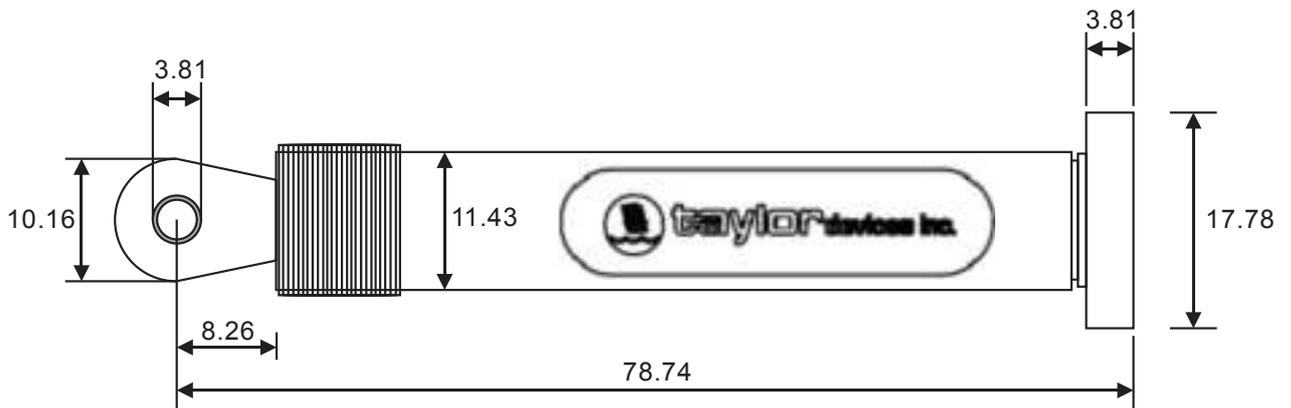


Fig. 4.11 Dimensiones del disipador de energía de 55kip (cm)

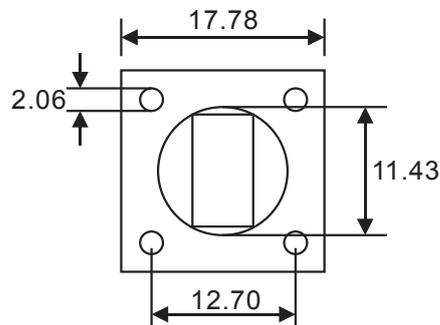


Fig. 4.12 Dimensiones de la placa base del disipador de 55kip (cm)

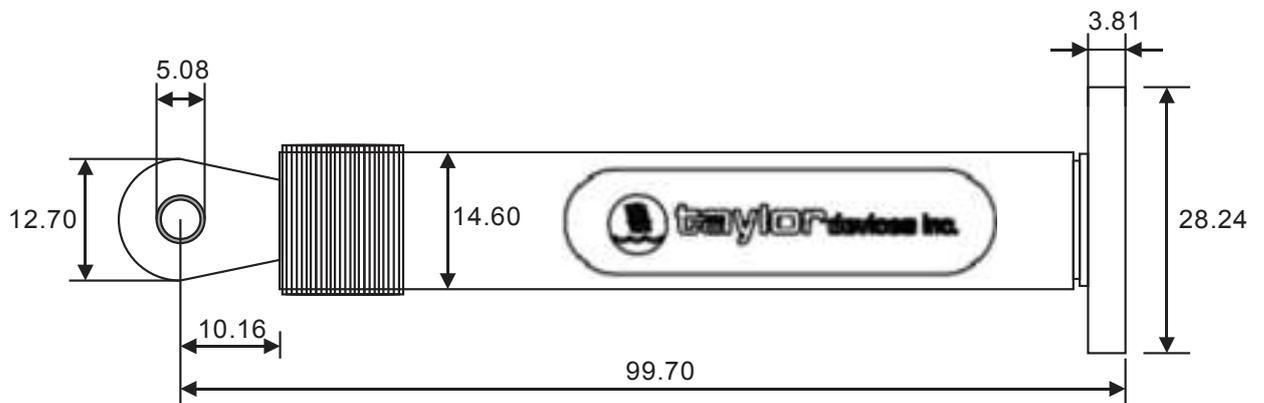


Fig. 4.13 Dimensiones del disipador de energía de 110kip (cm)

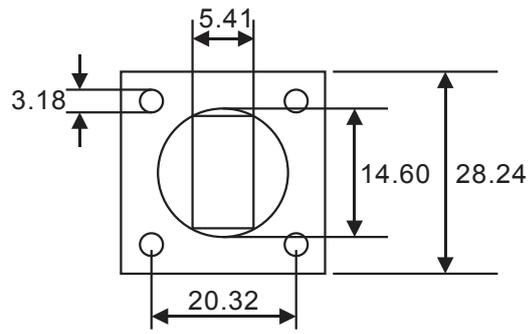


Fig. 4.14 Dimensiones de la placa base del dissipador de 110kip (cm)

## CONCLUSIONES

1. El **primer modo de vibración** (modo fundamental) de la edificación se mantiene igual al implementar en la estructura los disipadores de energía viscosos con lo que se comprueba que el uso de estos dispositivos no altera la rigidez de la estructura.
2. En edificaciones con un diseño tradicional, la estructura se encarga de tomar el 100% de la energía de entrada, pero al adicionar disipadores de energía dentro de la misma, la disipación de energía sísmica la realizan los disipadores y reducen la energía sísmica absorbida por la estructura, es decir, una reducción de la energía inelástica a través del incremento de la energía de amortiguamiento, ocasionando menos daños estructurales.
3. La implementación de estos disipadores en la estructura, ha generado una disminución de los **desplazamientos máximos** presentados en el octavo piso en un **41.46%**, así como la reducción de las **distorsiones de entrepiso** desde un **35.84%** hasta un **50.25%**.
4. Se pudo observar una reducción significativa en las **fuerzas internas** de las columnas. A manera de ejemplo, en la columna seleccionada se pudo observar que esta reducción fue desde un **41.43%** hasta un **60.03%** para la fuerza cortante y hasta **59.81%** para el momento flector.
5. La disipación de energía con los disipadores viscosos es del **50.72%**, demostrándose así que con el uso de estos dispositivos se incrementa la capacidad de disipación de energía ante la acción de un sismo.

## RECOMENDACIONES

1. Modelar la edificación empleando acelerogramas que hayan sido tomados en suelos que reflejen la realidad sobre la cual se proyecta la edificación. Estos registros sísmicos deberán ser provistos por el Instituto Geofísico del Perú o podrán obtenerse del REDACIS (Red Acelerográfica del CISMID).
2. Escalar los registros sísmicos a un espectro de pseudo-aceleraciones creado como lo establece la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E030, considerando para esto las condiciones de importancia, tipo de suelo, etc y fijando el coeficiente de reducción sísmica a la unidad, para considerar el comportamiento inelástico de los elementos estructurales.
3. Emplear un software especializado para obtener el mejor ajuste del registro sísmico al comportamiento esperado (espectro creado).

## LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

1. Diseñar el sistema de disipación de energía para una edificación no existente empleando para el análisis el efecto de las condiciones de suelo a través de la **interacción suelo-estructura** y comparar los resultados obtenidos, como desempeño del sistema, costos y otros, con el obtenido en la estructura considerando la **base empotrada**.
2. Diseñar el sistema de disipación de energía de una edificación empleando un **análisis del tipo no-lineal estático o pushover** evaluando el nivel de daño en la edificación sin disipadores y compararla con la edificación provista de estos dispositivos.
3. Evaluar la respuesta de una edificación provista de disipadores de energía viscosos realizando un **análisis lineal de respuesta espectral o fuerza lateral equivalente**.
4. Proponer mejoras en los lineamientos de las Normas Americanas **ASCE 7-10, FEMA 273, FEMA 274**, ajustándolo a la realidad y las condiciones que se presentan en nuestro país.

## BIBLIOGRAFIA

1. **American Society of Civil Engineers (ASCE). ASCE 7-10:** Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. EEUU, 2010.
2. **Avilés, Raúl.** Tesis: Dispositivos para el control de vibraciones. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile, 2001.
3. **Díaz La Rosa Sánchez Marco.** Tesis: Evaluación del proyecto estructural y optimización del diseño con disipadores de energía viscosos Taylor para una edificación esencial de 6 pisos. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo, 2014.
4. **Falk Peter.** Tesis: Análisis del comportamiento de estructuras de acero provistas de disipadores de energía tipo "Slotted Bolted Connection". Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile, 2010.
5. **Federal Emergency Management Agency (FEMA).** Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings – NEHRP. FEMA 273-274. Washington, D.C. EEUU, 1997.
6. **Hwang, Jenn-Shin.** Seismic Design of Structures with Viscous Dampers. Taiwan, China, 2002.
7. **M.D. Symans et al.** Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments. EEUU, 2008.
8. **Oviedo Sarmiento Ricardo.** Tesis: Dispositivos pasivos de disipación de energía para diseño sismorresistente de estructuras. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 2008.
9. **Pardo, Juan Pablo.** Tesis: Control de la respuesta dinámica de estructuras mediante el uso de disipadores de energía de fluido viscoso del tipo lineal. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile, 2007.
10. **T.T. Soong y M.C. Constantinou.** Passive and active structural vibration control in civil engineering. New York, EEUU, 1994.
11. **Villarreal Castro Genner.** Interacción sísmica suelo-estructura en edificaciones con zapatas aisladas. Asamblea Nacional de Rectores. Lima, 2006.
12. **Villarreal Castro Genner.** Análisis de estructuras con el programa LIRA 9.0. Lima, 2006.
13. **Villarreal Castro Genner.** Interacción suelo-estructura en edificios altos. Asamblea Nacional de Rectores. Lima, 2007.
14. **Villarreal Castro Genner.** Análisis estructural. Lima, 2008.
15. **Villarreal Castro Genner – Oviedo Sarmiento Ricardo.** Edificaciones con disipadores de energía. Asamblea Nacional de Rectores. Lima, 2009.
16. **Villarreal Castro Genner.** Resistencia de materiales. Lima, 2009.
17. **Villarreal Castro Genner.** Estática: Problemas resueltos. Lima, 2011.
18. **Villarreal Castro Genner.** Resistencia de materiales I: Prácticas y exámenes USMP. Lima, 2012.
19. **Villarreal Castro Genner.** Resistencia de materiales II: Prácticas y exámenes USMP. Lima, 2013.
20. **Villarreal Castro Genner.** Ingeniería sismo-resistente: Prácticas y exámenes UPC. Lima, 2013.
21. **Villarreal Castro Genner.** Mecánica de materiales: Prácticas y exámenes UPC. Lima, 2015.
22. **Villarreal Castro Genner.** Diseño sísmico de edificaciones: Problemas resueltos. Lima, 2015.
23. **Villarreal Castro Genner.** Estática: Prácticas y exámenes resueltos. Lima, 2016.
24. **Villarreal Castro Genner.** Ingeniería Sismorresistente: Prácticas y exámenes resueltos. Lima, 2016.
25. **Villarreal Castro Genner.** Dinámica Estructural: Curso breve. Lima, 2016.

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b> .....	03
<b>CAPITULO 1. ESTADO DEL ARTE</b>	
1.1. Sistemas de diseño sismorresistente.....	05
1.2. Balance energético.....	05
1.3. Sistemas modernos de protección sísmica.....	07
1.4. Disipadores de fluido viscoso.....	09
1.5. Ecuación general.....	12
1.6. Rigidez del dispositivo “K” (Rigidez del brazo metálico).....	15
1.7. Comportamiento desplazamiento vs fuerza.....	15
1.8. Criterios de ubicación.....	18
1.9. Recomendaciones para el diseño.....	21
1.9.1. Normas y requerimientos del código ASCE 7-10.....	21
1.9.2. Recomendaciones para el análisis tiempo-historia.....	21
1.9.3. Recomendaciones para el diseño de conexiones.....	22
1.9.4. Recomendaciones para la modelación.....	22
<b>CAPITULO 2. EDIFICIO SIN DISIPADORES DE ENERGÍA</b>	
2.1. Objeto de investigación.....	23
2.2. Consideraciones para la modelación.....	24
2.2.1. Propiedades de los materiales.....	24
2.2.2. Cargas consideradas para el análisis.....	24
2.3. Modelación estructural.....	24
2.3.1. Modelamiento geométrico.....	24
2.3.2. Asignación de propiedades del concreto.....	29
2.3.3. Asignación de las secciones de columnas y vigas.....	30
2.3.4. Definición de los elementos tipo área.....	33
2.3.5. Asignación de columnas, vigas y losas.....	34
2.3.6. Asignación de brazos rígidos (columna-viga).....	37
2.3.7. Creación de patrones de carga y fuente de masa.....	38
2.3.8. Asignación de carga viva y carga muerta.....	40
2.3.9. Empotramiento en la base, asignación de centro de masa y creación de diafragmas.....	41
2.4. Análisis sísmico.....	46
2.4.1. Recomendaciones y procedimientos para el análisis.....	46

2.4.2. Análisis dinámico espectral.....	49
2.4.3. Escalamiento de acelerogramas al espectro de diseño.....	61
2.4.4. Análisis lineal tiempo-historia.....	77
2.4.5. Determinación del sismo de diseño.....	84

### **CAPITULO 3. EDIFICIO CON DISIPADORES DE ENERGÍA**

3.1. Determinación de los objetivos de diseño.....	87
3.2. Cálculo de las propiedades del disipador.....	89
3.2.1. Cálculo de la rigidez.....	90
3.2.2. Cálculo del coeficiente de amortiguamiento (C).....	92
3.3. Modelación y análisis del edificio con disipadores de energía.....	98
3.3.1. Introducción.....	98
3.3.2. Modelación de los disipadores de energía viscosos.....	98
3.3.3. Respuesta de la estructura con los disipadores de energía.....	105

### **CAPITULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y ELECCIÓN DEL DISIPADOR VISCOSO**

4.1. Evaluación de resultados.....	113
4.1.1. Desplazamientos en los centros de masa.....	113
4.1.2. Distorsiones de entrepiso.....	114
4.1.3. Esfuerzos máximos en los elementos de corte.....	115
4.1.4. Aceleración y velocidades.....	118
4.1.5. Modos y períodos de vibración.....	120
4.2. Diseño de los dispositivos de amortiguamiento.....	121
4.2.1. Agrupación de los dispositivos por niveles de fuerza.....	121
4.2.2. Elección de los disipadores de energía.....	123

<b>Conclusiones.....</b>	<b>128</b>
--------------------------	------------

<b>Recomendaciones.....</b>	<b>129</b>
-----------------------------	------------

<b>Líneas futuras de investigación.....</b>	<b>130</b>
---	------------

<b>Bibliografía.....</b>	<b>131</b>
--------------------------	------------