



Vigilada Mineducación

AISLADORES DE TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

Triple Friction Pendulum Bearing

ANDREA CAMILA QUINTERO MANZANO

Tesis de grado

Asesor, docente

Juan Diego Jaramillo Fernández

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN

2023

Contenido

Introducción.....	3
Aisladores de triple péndulo de fricción.....	4
Principales ventajas de los aisladores de triple péndulo de fricción frente a otros sistemas de aislamiento	7
Evaluación del comportamiento de los aisladores de triple péndulo de fricción en software de análisis	8
Método simplificado propuesto por EPS (Earthquake protection systems).....	13
Modelo simplificado con varios grados de libertad.....	17
Aproximación lineal	25
Conclusiones.....	30
Referencias	31

Introducción

La filosofía actual de diseño sísmico de edificaciones busca que la estructura mantenga un nivel de desempeño ante la ocurrencia de un evento sísmico de cierta magnitud. Los niveles de desempeño más bajos permitidos por los diferentes códigos de diseño sísmico permiten grandes incursiones en el rango no lineal de los elementos estructurales, pero evitando siempre el colapso de la estructura. Estas incursiones en el rango no lineal se traducen en daños estructurales, que, aunque no generan el colapso, hacen que posterior a la ocurrencia de un evento sísmico de una intensidad importante sean necesarios grandes gastos económicos para la reparación de la estructura, o incluso la demolición total de esta. No obstante, una de las maneras más eficientes y que ha mostrado excelente comportamiento ante eventos sísmicos, evitando el daño de la estructura y sus elementos no estructurales, ha sido el empleo de aislamiento sísmico en la base de las estructuras.

El aislamiento sísmico busca desacoplar la super estructura del suelo, con el fin de que, ante un evento sísmico, los desplazamientos se concentren en los aisladores y la super estructura se vea sometida a los menores esfuerzos posibles, comportándose en gran medida como un cuerpo sin deformaciones.

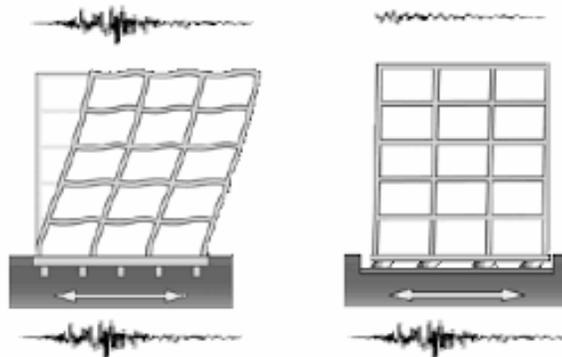


Ilustración 1. Diferencia de comportamiento entre una estructura empotrada en la base y una estructura aislada sísmicamente (Chacón Sierra, 2009)

Existen diferentes tipos de aisladores, sin embargo, como se detallará más adelante, este documento se basa en el estudio de los aisladores de triple péndulo de fricción por sus importantes ventajas frente a otros sistemas de aislamiento.

El objetivo principal de este estudio es comprender el funcionamiento y comportamiento de los aisladores de triple péndulo de fricción y evaluar su desempeño usando diferentes software de análisis. Adicionalmente, debido al alto nivel y tiempo de cómputo que demanda un análisis tiempo-historia considerando las no linealidades inherentes al sistema de aislamiento, en este documento se proponen algunos métodos simplificados que permiten tener un mayor control en el análisis y diseño de una estructura aislada sísmicamente, y que podrían disminuir el tiempo de análisis de una edificación con aisladores.

Aisladores de triple péndulo de fricción

Los aisladores de triple péndulo de fricción están compuestos por cinco elementos: un elemento rígido inamovible en el centro, alrededor del cual se deslizan cuatro placas ubicadas en la parte superior e inferior como se indica en la siguiente imagen.

En adelante, se hará referencia a los aisladores de triple péndulo de fricción como “Aisladores TPF”.

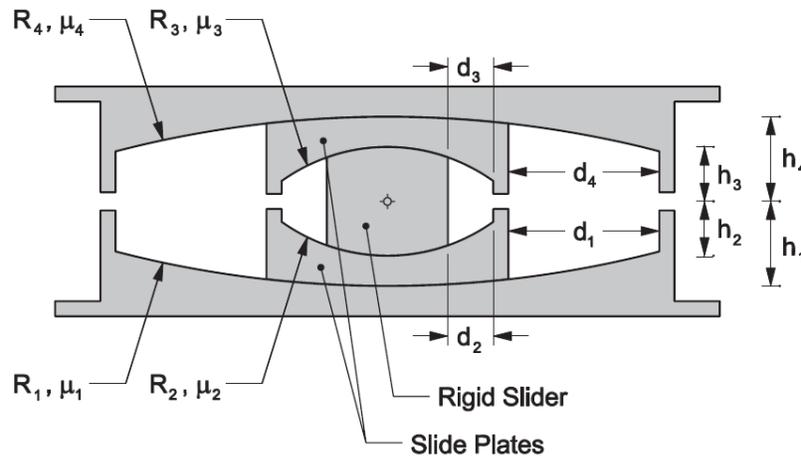


Ilustración 2. Elementos que conforman los aisladores TPF (Fenz & Constantinou, 2008)

Los aisladores TPF tienen dos propiedades principales:

- Los radios de curvatura (R_n), los cuales definen la rigidez del aislador,
- y el coeficiente de fricción de cada una de sus placas (μ_n), que determina el nivel de amortiguamiento del sistema y el instante de iniciación del deslizamiento de alguna de las superficies.

Adicionalmente, cada una de las superficies que componen el aislador tiene un tope de desplazamiento (d_n).

La fuerza lateral en el sistema de aislamiento está regida por la siguiente ecuación (Fenz & Constantinou, 2008):

$$F = \frac{W}{\sum R_{eff}} * u + F_f$$

Donde,

F: Fuerza lateral en el aislador

W: Carga vertical sobre el aislador

R_{eff} : Radio de curvatura efectivo (= radio de curvatura – altura de la superficie al punto de giro).

u: Desplazamiento del aislador.

F_f : Fuerza de fricción

El desplazamiento de cada una de las placas del aislador comienza en el instante en que la acción de alguna fuerza externa supera la fuerza de fricción estática existente entre estas superficies.

Gracias a la interacción de las diferentes superficies que conforman el aislador, existe una configuración estándar (Fenz & Constantinou, 2008) que permite que se presenten cinco fases de movimiento en el sistema:

$$R_2 = R_3 \ll R_1 = R_4$$

$$\mu_2 = \mu_3 \ll \mu_1 \ll \mu_4$$

$$F_{f1} < F_{dr2} \text{ y } F_{f4} < F_{dr3}$$

Donde,

μ_n : Coeficiente de fricción de la placa n.

R_n : Radio de curvatura de la placa n.

F_{dr} : Fuerza en el aislador en el momento que la superficie alcanza su máxima capacidad de deslizamiento (llega al tope del aislador).

Esta configuración estándar del aislador FPT implica que las superficies internas son las primeras en activarse debido a su menor coeficiente de fricción. La última condición permite que las placas externas (placas 1 y 4) del aislador lleguen primero al tope de desplazamiento antes que las placas internas (placas 2 y 3).

En este orden de ideas, esta configuración permite que existan las siguientes cinco fases de movimiento:

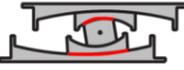
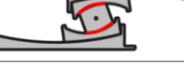
Gráfico	Fase	Superficies activadas	Rigidez
	I	Deslizamiento en las superficies 2 y 3	$\frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}}$
	II	Deslizamiento en las superficies 1 y 3	$\frac{W}{R_{ef1} + R_{ef3}}$
	III	Deslizamiento en las superficies 1 y 4	$\frac{W}{R_{ef1} + R_{ef4}}$
	IV	Deslizamiento en las superficies 2 y 4	$\frac{W}{R_{ef2} + R_{ef4}}$
	V	Deslizamiento en las superficies 2 y 3	$\frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}}$

Ilustración 3. Fases de movimiento de un aislador TPF (Cango, 2018)

Table 1. Summary of triple FP bearing's sliding regimes (nomenclature refers to Figure 1)

Regime	Description	Force-Displacement Relationship
	Sliding on surfaces 2 and 3 only	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f2} R_{eff2} + F_{f3} R_{eff3}}{R_{eff2} + R_{eff3}}$ <p>Valid until: $F = F_{f1} = \mu_1 W, \quad u = u^* = (\mu_1 - \mu_2) R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3) R_{eff3}$</p>
	Motion stops on surface 2; Sliding on surfaces 1 and 3	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2} R_{eff2} + F_{f3} R_{eff3}}{R_{eff1} + R_{eff3}}$ <p>Valid until: $F = F_{f4} = \mu_4 W, \quad u = u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff3})$</p>
	Motion is stopped on surfaces 2 and 3; Sliding on surfaces 1 and 4	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2} R_{eff2} + F_{f3} R_{eff3} + F_{f4}(R_{eff4} - R_{eff3})}{R_{eff1} + R_{eff4}}$ <p>Valid until:</p>
	Slider contacts restrainer on surface 1; Motion remains stopped on surface 3; Sliding on surface 2 and 4	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}$ <p>Valid until: $F = F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4}, \quad u = u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff2} + R_{eff4})$</p>
	Slider bears on restrainer of surface 1 and 4; Sliding on surfaces 2 and 3	$F = F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}, \quad u = u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4})$

Assumptions: (1) $R_{eff1} = R_{eff4} \gg R_{eff2} = R_{eff3}$, (2) $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$, (3) $d_1 > (\mu_4 - \mu_1) R_{eff1}$, (4), $d_2 > (\mu_1 - \mu_2) R_{eff2}$, (5) $d_3 > (\mu_4 - \mu_3) R_{eff3}$

Ilustración 4. Ecuaciones que definen las cinco etapas de movimiento de los aisladores TPF (Fenz & Constantinou, 2008)

A continuación, se presenta el ciclo histérico completo con la activación de las cuatro superficies que conforman el aislador TPF:

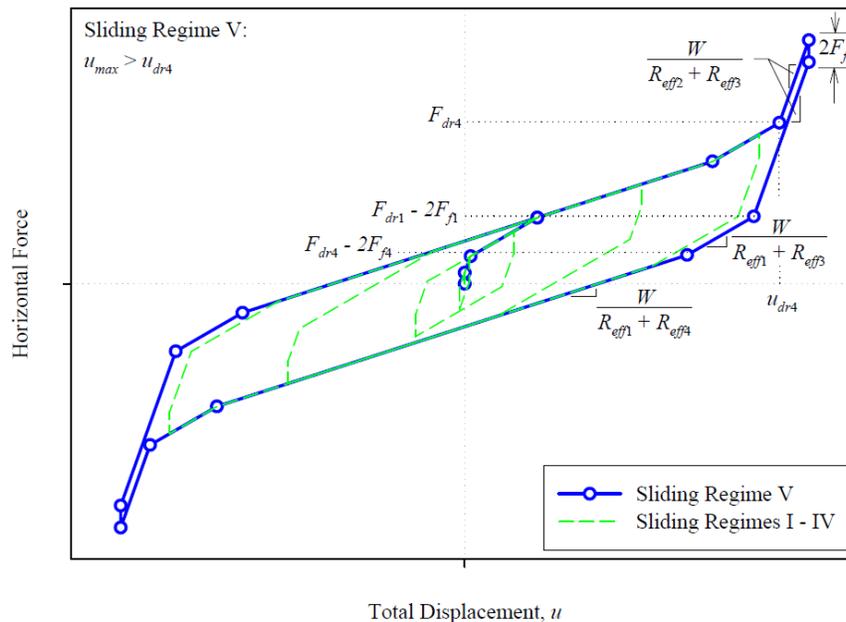


Ilustración 5. Curva de histéresis del aislador alcanzando la quinta fase de movimiento (Fenz & Constantinou, 2008)

En las primeras fases de movimiento (fases I y II, placas internas activas = radio de curvatura pequeño) el sistema tiene muy alta rigidez, lo cual le impide activarse ante fuerzas externas muy bajas. Asimismo, la activación de estas placas internas en las últimas fases de movimiento (fase IV y V), brinda un factor de seguridad adicional al sistema, frenándolo en caso de que se presente un desplazamiento mayor al desplazamiento de diseño.

El diseño de los aisladores de triple péndulo de fricción busca que este dispositivo funcione principalmente en la tercera fase de movimiento, en el cual las placas más externas están activas (placas 1 y 4) y el sistema tiene la menor rigidez posible (radios de curvatura más altos), lo que implica un alto rango de movimiento que permite que se concentren altos niveles de desplazamiento en el sistema de aislamiento y no en la super estructura.

Principales ventajas de los aisladores de triple péndulo de fricción frente a otros sistemas de aislamiento

- Gracias a que el aislador de triple péndulo de fricción está conformado por cuatro superficies de deslizamiento que interactúan entre sí, se pueden alcanzar altos niveles de desplazamiento en el aislador con una dimensión en planta pequeña. Contrario a lo que sucede en un aislador de fricción simple, en el que existe solo una placa de deslizamiento y, por ende, para alcanzar el mismo nivel de desplazamiento que un aislador FPT se requeriría una mayor dimensión del aislador en planta.

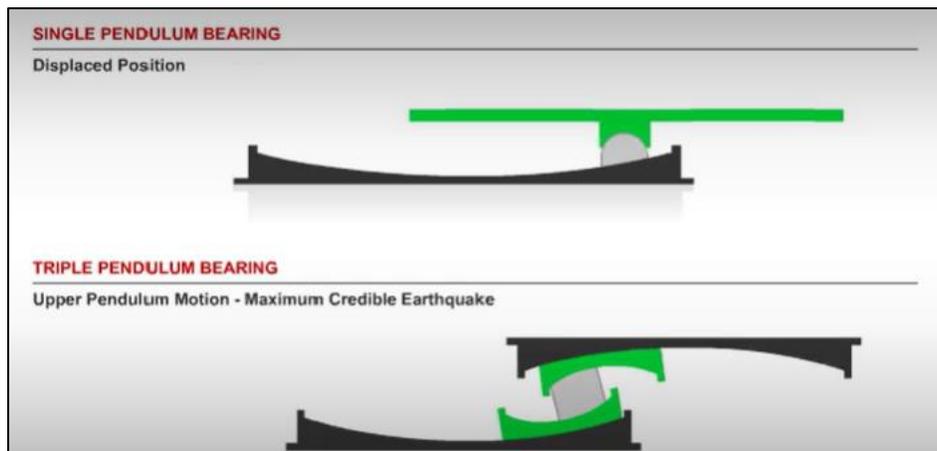


Ilustración 6. Diferencia de rango de desplazamiento de un aislador de péndulo de fricción frente a un aislador de triple péndulo de fricción (Earthquake Protection Systems, 2022)

- Una de las principales y particulares ventajas de los aisladores de péndulo de fricción es que la rigidez del sistema es proporcional a la carga axial sobre este ($Rigidez = \frac{W}{\sum R_{eff}}$). Esto hace que el centro de masa coincida con el centro de rigidez de la estructura a nivel de los aisladores, y anule las rotaciones torsionales a este nivel de los aisladores. Esta característica impide que se generen mayores desplazamientos en los dispositivos que se encuentran en la periferia del edificio, y, por ende, no es necesario que estos tengan una configuración diferente para tener mayor capacidad de desplazamiento.

Evaluación del comportamiento de los aisladores de triple péndulo de fricción en software de análisis

La validación y verificación del comportamiento de los aisladores en los software comerciales es de vital importancia antes de emplearlos en el diseño de una estructura. En primera instancia, se realizó el análisis de un sistema de un grado de libertad, en el cual se modeló un aislador de triple péndulo de fricción con las siguientes propiedades:

Parámetros del aislador			
Parámetro	Superficie externa superior	Superficie externa inferior	Superficies internas
Coefficiente de fricción	0.03	0.015	0.01
Radio de curvatura	61"	61"	12"
Distancia de tope	6.5"	6.5"	100"

Nota: El valor de 100" especificado para la distancia al tope de las superficies internas busca garantizar las cinco fases de movimiento descritas anteriormente, permitiendo que se alcance el desplazamiento máximo de las superficies externas antes del desplazamiento máximo de las superficies internas.

Sobre el aislador se aplicó una masa y una carga horizontal gradual monotónica con el fin de llevar al aislador a desplazarse en las diferentes fases de movimiento y validar su comportamiento frente a la curva teórica del aislador. A continuación, se presentan los resultados de este primer análisis:

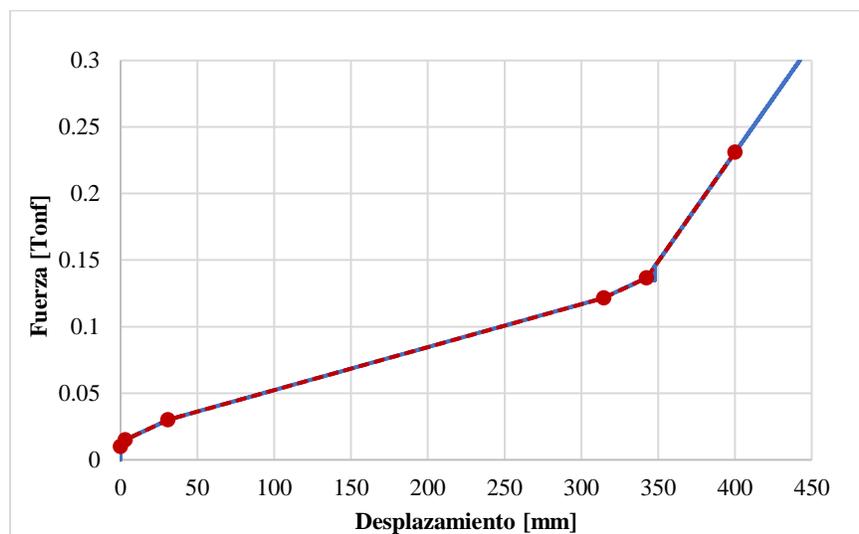
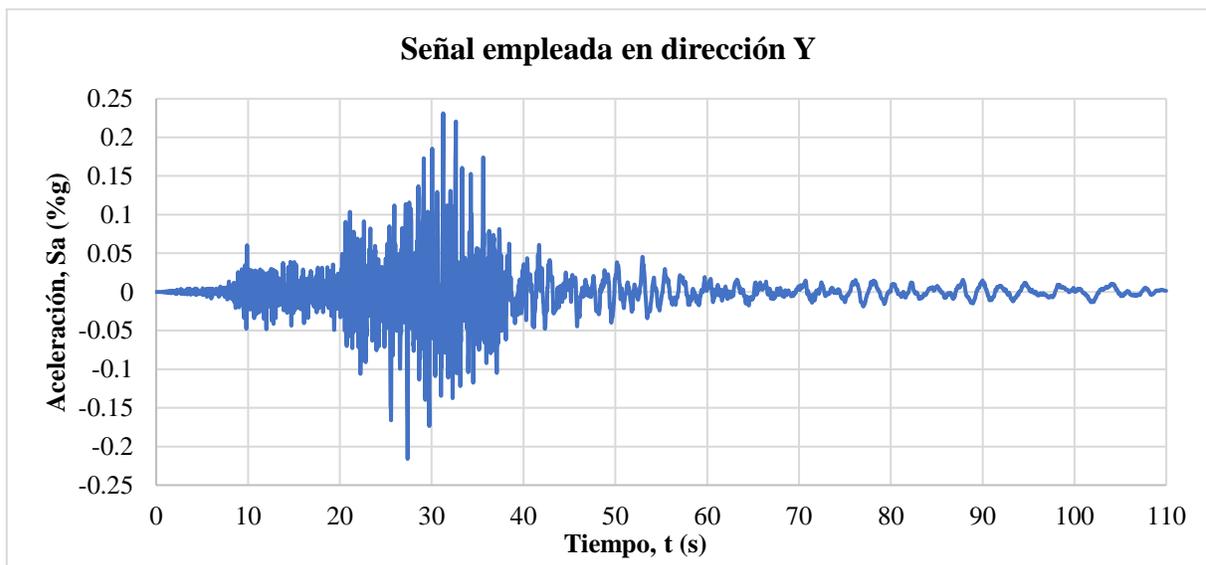
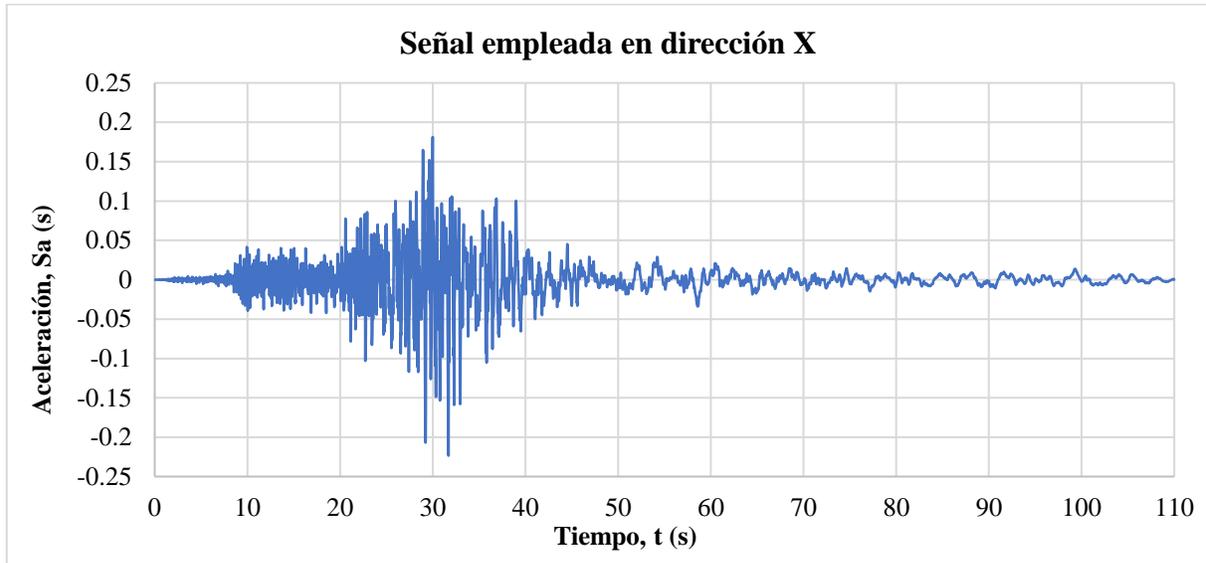


Ilustración 7. Comparación de la curva teórica del aislador con la curva arrojada por el software de análisis

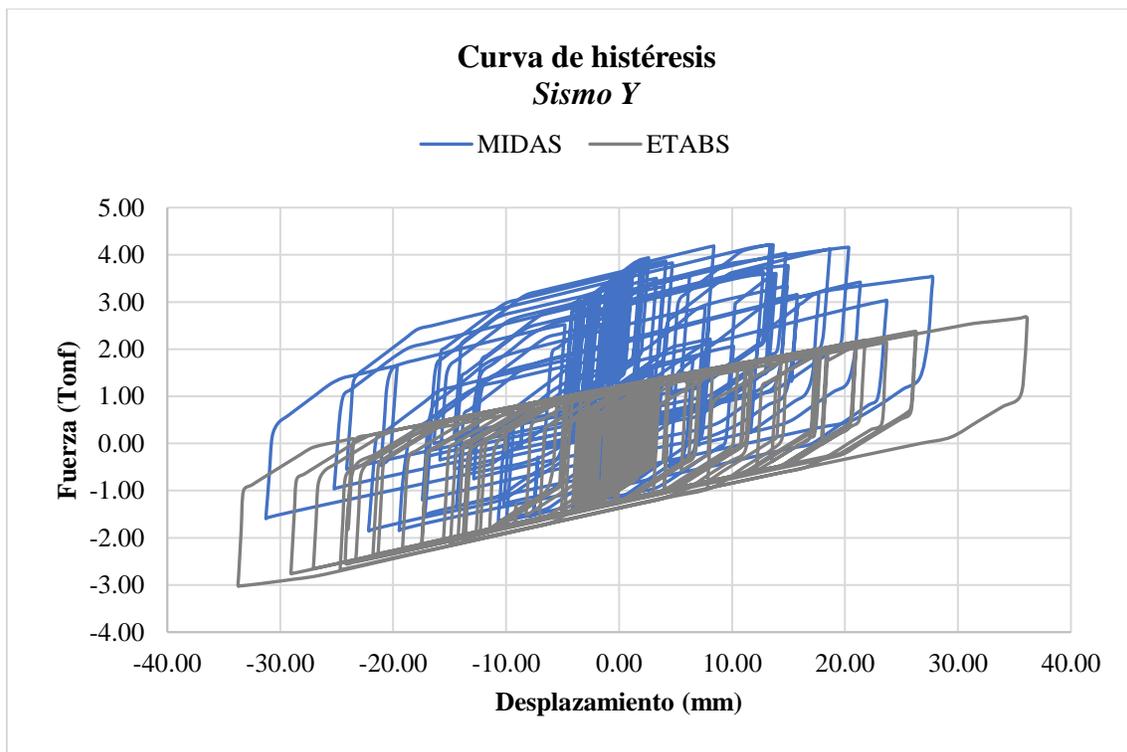
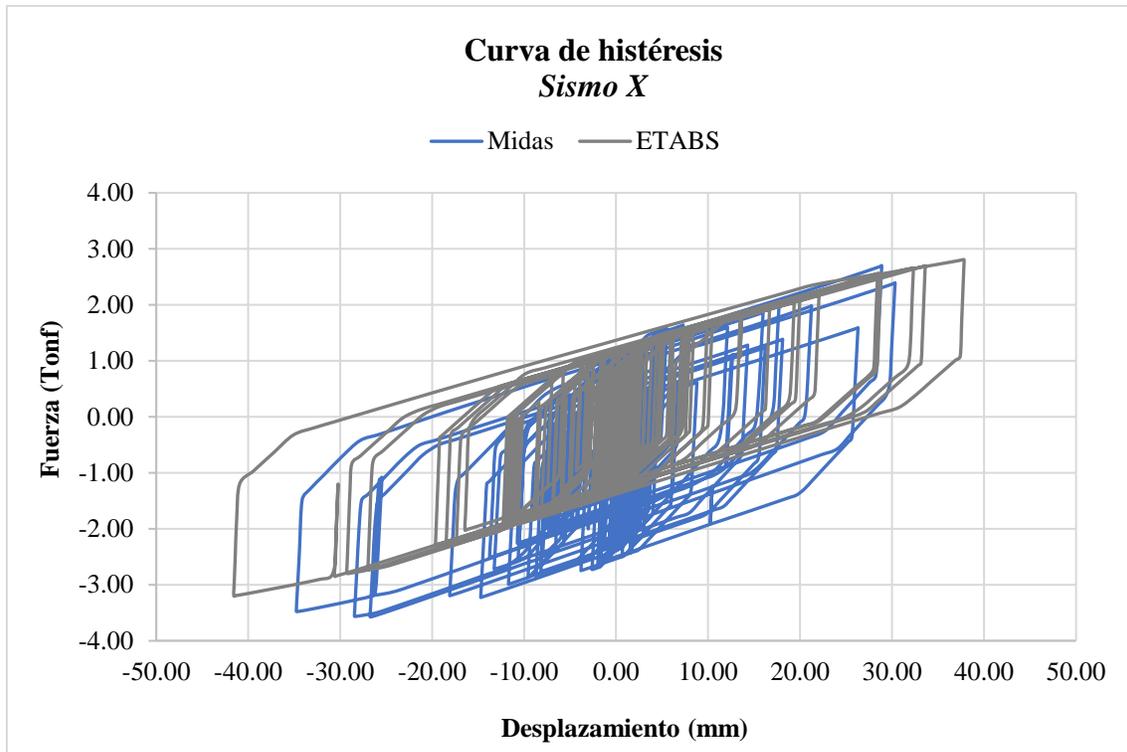
*En azul: curva arrojada por el software
En rojo: curva teórica del aislador*

Como se observa en la imagen anterior, la curva de carga progresiva monotónica producida por el software coincide con la curva teórica del aislador.

En una siguiente etapa, se analizó un pórtico al cual se le aplicaron las señales presentadas a continuación:



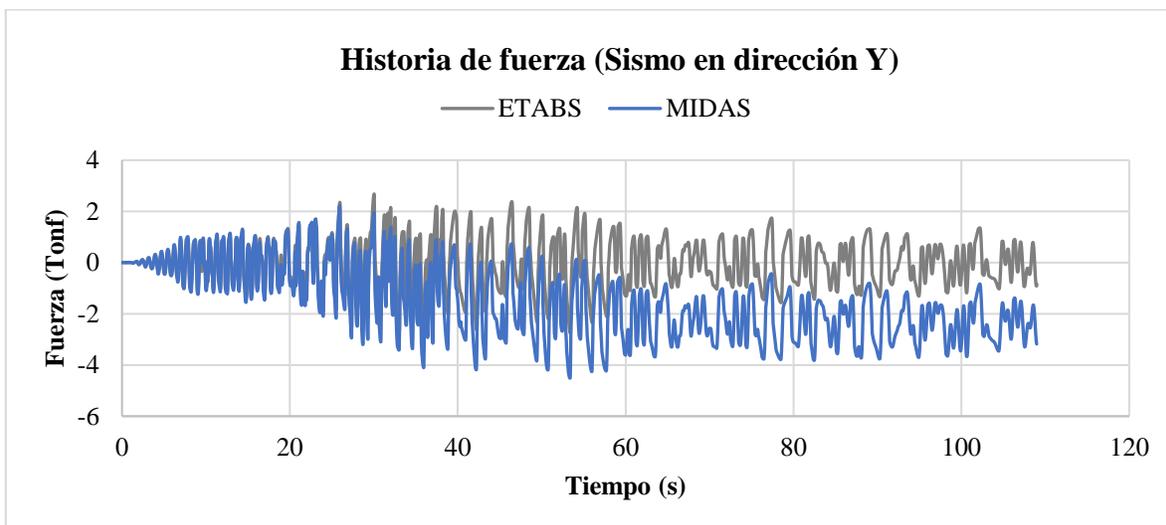
El primer análisis tiempo-historia se realizó con las señales aplicadas en cada dirección de manera independiente. En los siguientes gráficos se presentan las curvas de histéresis encontradas con el empleo de dos software de análisis diferentes:



Puede observarse la evidente diferencia en los resultados obtenidos entre los software de análisis empleados. Además, con base en el funcionamiento y en los fundamentos teóricos del aislador, es posible observar un comportamiento anómalo en la curva de histéresis obtenida del software Midas Gen cuando se obtienen los resultados para el sismo en dirección

Y. En este caso, el aislador se está desplazando alrededor de un punto que no coincide con el cero de fuerza y desplazamiento, sino que se está acumulando una fuerza a medida que avanza el movimiento.

En la siguiente gráfica se muestra la historia de fuerza en el aislador para el sismo analizado en dirección Y. En esta gráfica puede observarse que a medida que el aislador se desplaza, se incrementa la fuerza en el resultado obtenido con el software Midas Gen. Lo anterior parece provenir de una acumulación de error en el software, ya que la fuerza acumulada es incluso mayor a la que estará sometido el aislador en toda su historia si este se mantuviera centrado en un mismo punto como se observa en el resultado del software de análisis ETABS. El nivel de fuerza en el que termina el movimiento del sistema en el software Midas Gen solo podría ser vencido con un nuevo evento sísmico del mismo nivel de magnitud.



Finalmente, se evalúa el comportamiento de los aisladores en el pórtico descrito anteriormente en el software ETABS, pero con la acción del sismo aplicado en dirección X y en dirección Y de manera simultánea. En las siguientes gráficas se presentan las curvas de histéresis del aislador resultado de este análisis (presentadas en color azul), comparado con la curva de histéresis presentada anteriormente en el cual se aplican las señales en cada dirección de manera independiente (presentadas en color gris). En estas gráficas puede observarse la semejanza en el comportamiento del aislador cuando se le aplican dos señales ortogonales de manera simultánea.

En adelante, se describen propuestas simplificadas que buscan validar los resultados obtenidos en este capítulo, además de tener un mayor control en los resultados, y reducir el tiempo de análisis de una estructura con aislamiento sísmico.

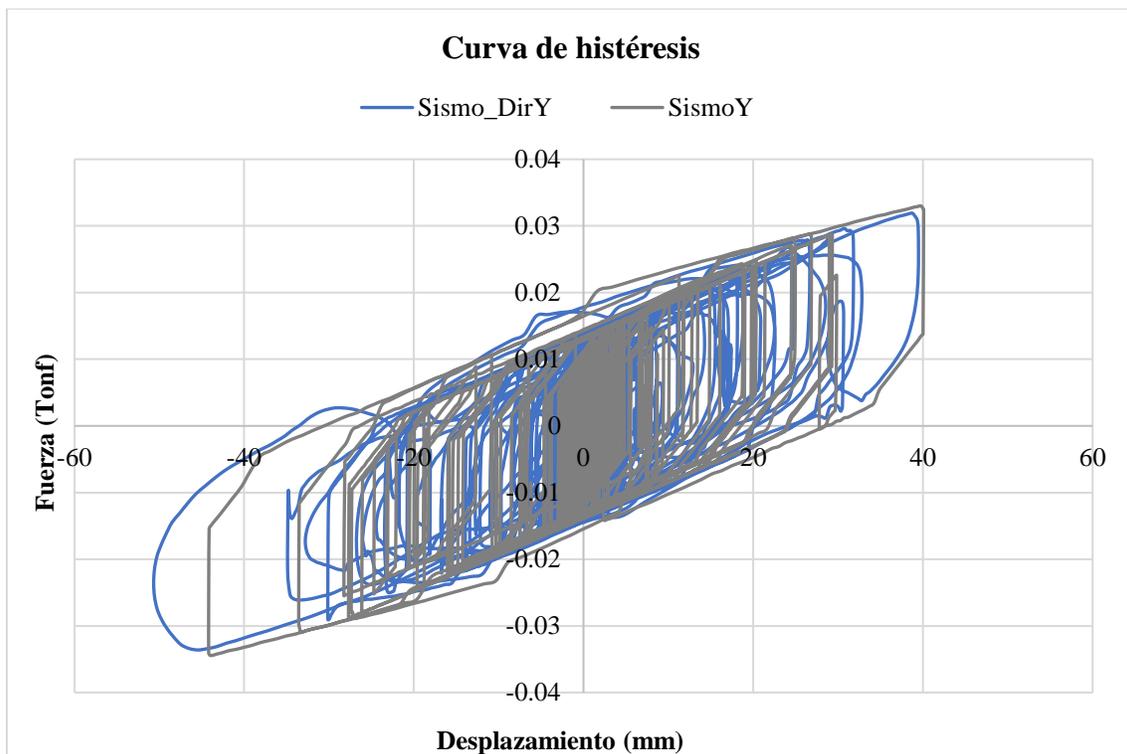
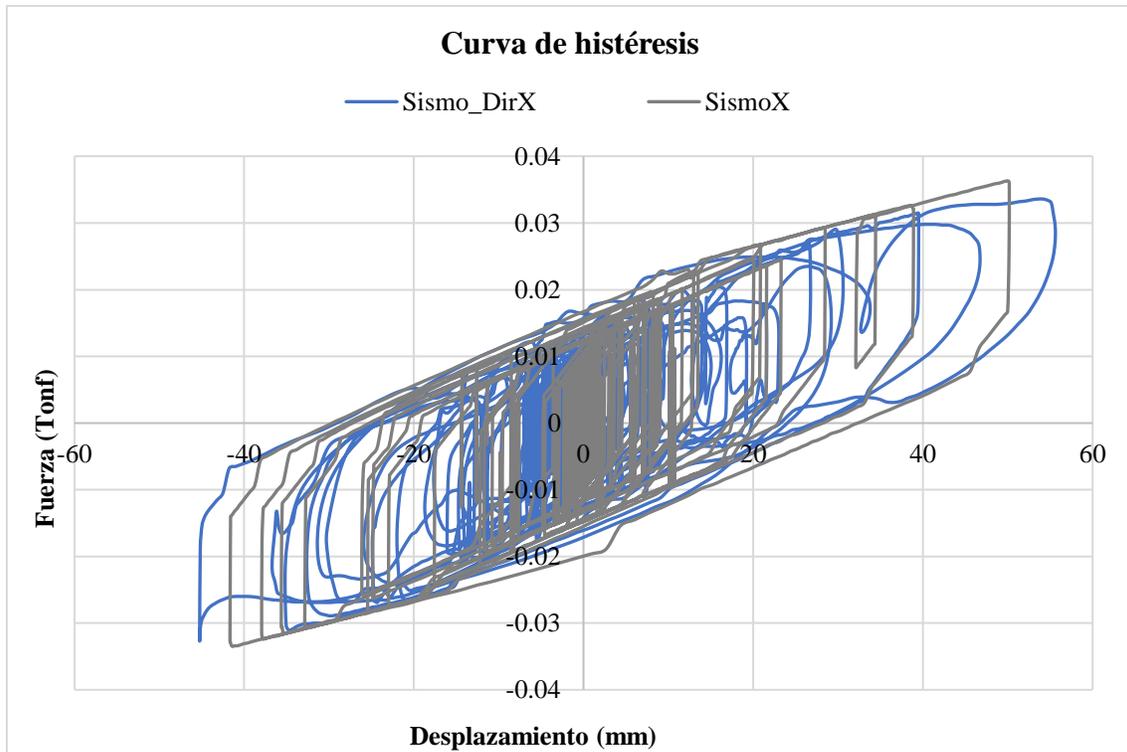


Ilustración 8. Curvas de histéresis del aislador: Se compara el sismo aplicado simultáneamente en ambas direcciones (Sismo_DirX, Sismo_DirY) frente al sismo aplicado en cada dirección de forma independiente (SismoX, SismoY)

Método simplificado propuesto por EPS (Earthquake protection systems)

Con el fin de validar y verificar los resultados obtenidos empleando software de análisis, se decidió abordar el problema de manera simplificada utilizando el método propuesto por EPS para el cálculo del desplazamiento máximo y el cortante máximo al que se verá sometido un aislador.

A continuación, se presenta una descripción de la metodología empleada:

1. Se supone un desplazamiento máximo objetivo.
2. Se conforma la curva de histéresis del aislador de acuerdo con las propiedades de este.
3. Se calcula la fuerza asociada a este desplazamiento dependiendo de la fase de movimiento en la que se encuentra el aislador.
4. A partir de la fuerza (S_a) y el desplazamiento (S_d), se calcula el periodo equivalente del sistema y su rigidez efectiva.

$$\text{Frecuencia: } w^2 = \frac{S_a}{S_d}$$

$$\text{Periodo: } T = \frac{2\pi}{w}$$

$$\text{Rigidez efectiva: } K = \frac{S_a}{S_d}$$

5. Empleando la curva de histéresis del aislador, es posible encontrar la razón de amortiguamiento viscoso equivalente del sistema (Clough & Penzien, 1995), ξ_{eq} , con la siguiente ecuación:

$$\xi_{eq} = \frac{A}{2 * \pi * K * S_d^2}$$

Donde,

A: Área de la curva de histéresis.

K: Rigidez efectiva.

S_d : Desplazamiento.

6. Conociendo los valores del periodo y amortiguamiento del sistema de un grado de libertad y adicionalmente, la señal a la que estará sometida la estructura, o el espectro de esta señal para diferentes amortiguamientos, se calcula el desplazamiento máximo del sistema.
7. Se compara el valor del desplazamiento máximo inicial supuesto (paso 1) con el desplazamiento máximo encontrado en el paso 6 y en caso de que estos valores sean iguales, se establece este valor como el desplazamiento máximo al que se verá sometido el aislador con su respectiva fuerza. En caso contrario, se realizan más iteraciones hasta encontrar el valor final del desplazamiento máximo.

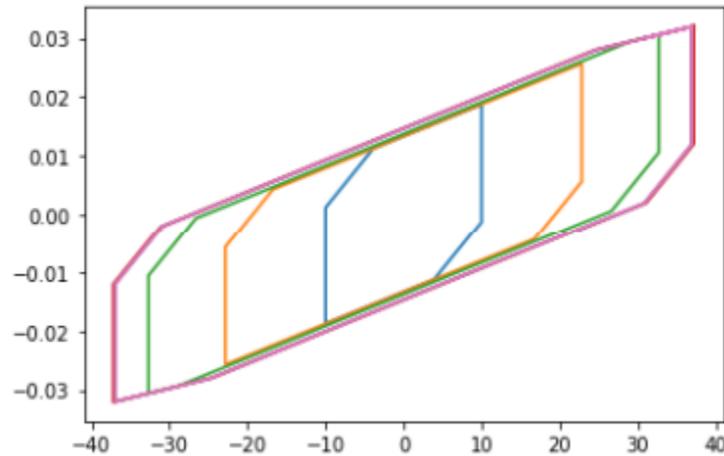


Ilustración 9. Proceso iterativo para encontrar el desplazamiento del aislador (desplazamiento vs fuerza).

Buscando verificar la precisión y el nivel de simplificación del método propuesto por EPS, a continuación, se presenta una comparación entre la curva de histéresis obtenida con este método y las curvas de histéresis obtenidas con la ayuda del software de análisis para dos modelos realizados: un primer modelo de una masa concentrada encima de los aisladores (sistema de un grado de libertad) y un segundo modelo de una edificación con múltiples grados de libertad. Después de las siguientes imágenes se presenta la justificación de este análisis.

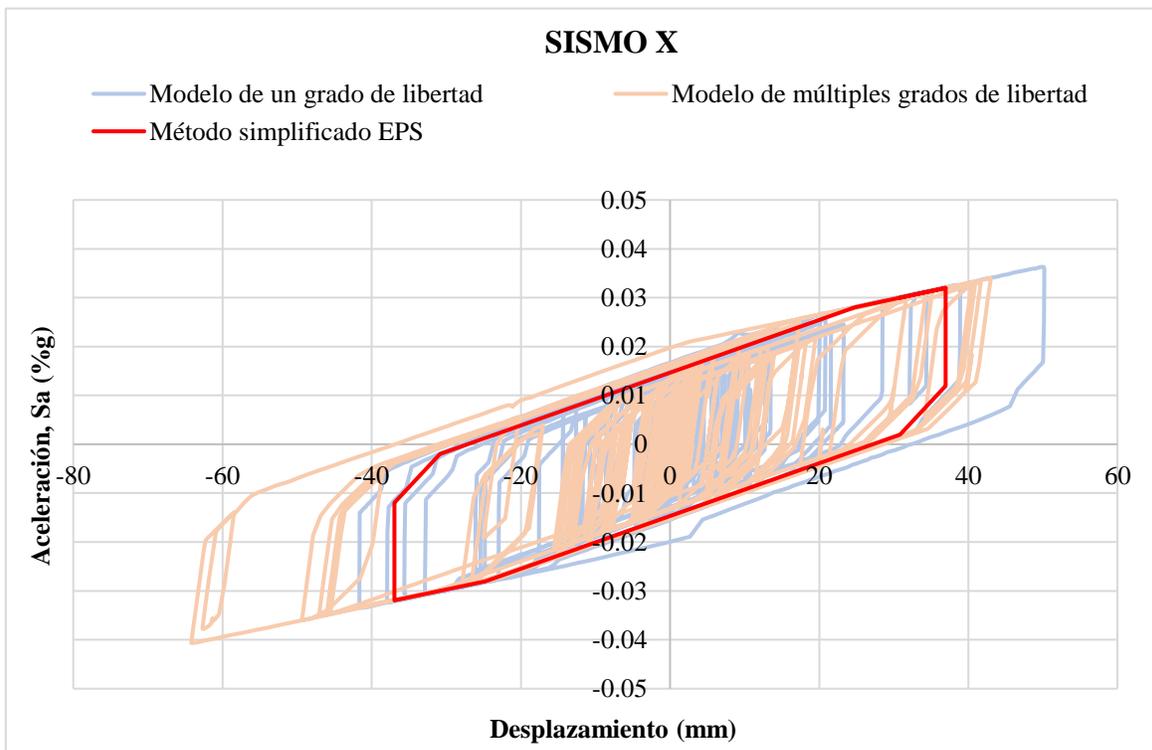


Ilustración 10. Comparación de la curva de histéresis para un sismo en dirección "X"

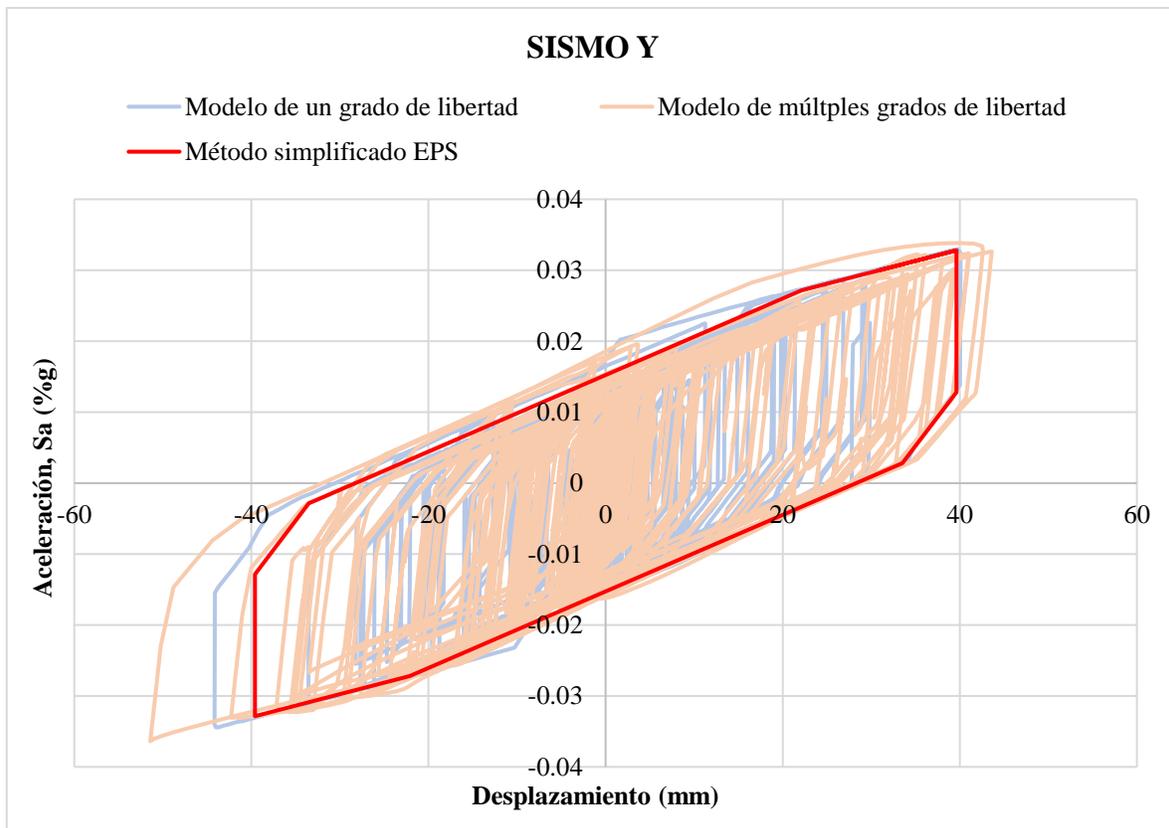


Ilustración 11. Comparación de la curva de histéresis para un sismo en dirección "Y"

Se puede observar que la curva de histéresis obtenida a partir del método simplificado propuesto por EPS dista de las curvas obtenidas con los software de análisis. A continuación, se detallan estos porcentajes de diferencia en términos del desplazamiento máximo.

- Para el caso del modelo de un sistema de un grado de libertad se obtiene un desplazamiento mayor, en un 35% en dirección X y en un 11% en dirección Y, con respecto al desplazamiento máximo obtenido con el método simplificado.
- Asimismo, para el caso del modelo del sistema de múltiples grados de libertad se obtiene un desplazamiento mayor, en un 73% en dirección X y en un 30% en dirección Y, con respecto al desplazamiento máximo obtenido con el método simplificado.

Esta diferencia pareciera ser muy significativa para poder emplear el método simplificado propuesto por EPS en el análisis y diseño de una estructura que se pretende aislar. No obstante, los anteriores resultados podrían tener en cierta medida una justificación en los siguientes aspectos que desconoce el método simplificado:

- Este método simplificado supone que la super estructura es infinitamente rígida y que su masa se encuentra concentrada encima del aislador.

Aunque la idea principal del aislamiento sísmico es suponer que la super estructura se comportará infinitamente rígida y los desplazamientos se concentrarán a nivel de los aisladores, la flexibilidad de la super estructura podría influenciar y en cierta medida, podría aumentar los desplazamientos a los que se verá sometido el aislador.

- En un sistema de múltiples grados de libertad, la participación de los diferentes modos que puede tener la super estructura podrían influenciar la respuesta del aislador. El método simplificado al suponer a la super estructura como infinitamente rígida, desconoce la participación e influencia que este aspecto pueda tener en la respuesta del aislador.

Los dos aspectos antes mencionados parecen ser una posible justificación para la diferencia encontrada entre la curva de histéresis formada a partir del método simplificado y la curva de histéresis encontrada como resultado del análisis de una estructura completa con múltiples grados de libertad. Sin embargo, ¿A qué se debe la gran diferencia encontrada entre los resultados del método simplificado propuesto por EPS y los resultados obtenidos con los software de análisis considerando un modelo de un grado de libertad?

Con el fin de validar las consideraciones anteriormente mencionadas y debido a la alta demanda de tiempo y cómputo que implica analizar una estructura con múltiples grados de libertad y ante diferentes señales en el tiempo, en el siguiente capítulo se describe una propuesta de metodología simplificada para el análisis de estructuras con múltiples grados de libertad que podría tener grandes ventajas frente a los resultados encontrados con el método simplificado de EPS.

Modelo simplificado con varios grados de libertad

La incertidumbre en los resultados obtenidos con el empleo de los aisladores de triple péndulo de fricción en el análisis de una estructura, y el tiempo que implica la realización de un análisis tiempo-historia con las no linealidades de los aisladores, llevan a plantearse los siguientes interrogantes:

- *¿Cómo disminuir el tiempo de análisis y, por ende, el diseño de una estructura aislada sísmicamente?*
- *¿Es posible simplificar el problema manteniendo una alta certeza en los resultados obtenidos?*
- *¿Es posible analizar y diseñar una estructura aislada sísmicamente empleando los métodos tradicionales de análisis (análisis lineal modal espectral)?*

El análisis elástico de una estructura de múltiples grados de libertad puede realizarse empleando el método de superposición modal, en el cual se calcula la respuesta de cada modo de vibración como un sistema de un grado de libertad (con la frecuencia y amortiguamiento asociados al modo de vibración analizado), y posteriormente la respuesta total se obtiene combinando la respuesta de los diferentes modos.

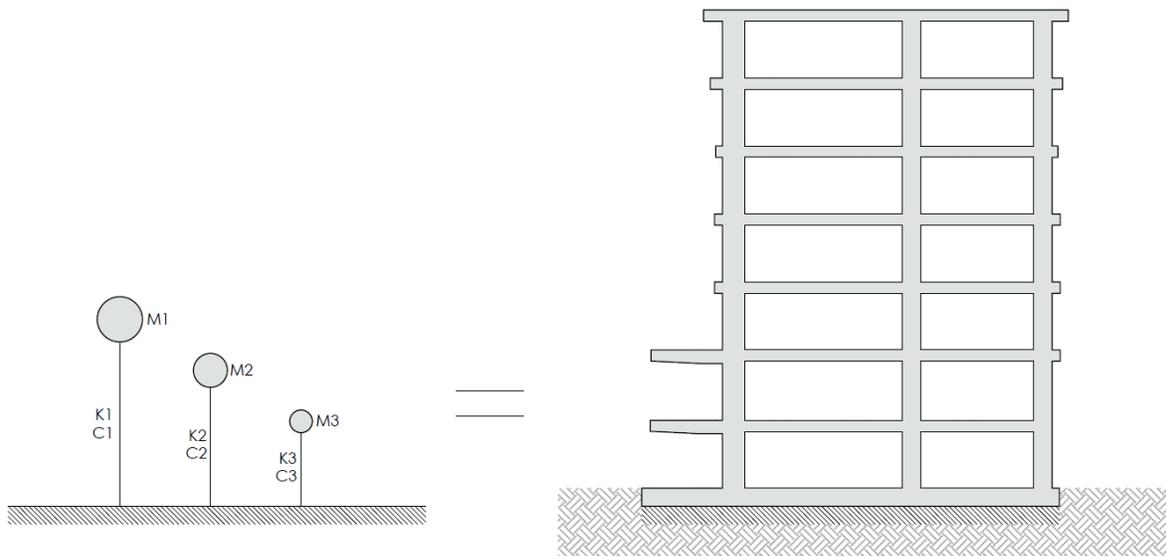


Ilustración 12. Representación de una estructura de varios grados de libertad en varios modelos de un grado de libertad

Por tal motivo, para la propuesta de análisis presentada en este capítulo, la estructura que será aislada sísmicamente se representará por tres sistemas de un grado de libertad con las propiedades de masa (M), periodo (T), rigidez (K) y amortiguamiento (C) de los tres primeros modos de la estructura.

Un aislador puede entenderse como un filtro de una señal sísmica que proviene del suelo, generando una nueva señal reducida en la parte superior del aislador, la cual excita dinámicamente a la estructura.

El objetivo de esta propuesta es conocer el espectro de respuesta que resulta de pasar una señal sísmica a través de los aisladores de triple péndulo de fricción considerando la influencia (interacción) que la super estructura puede tener en el comportamiento de este.

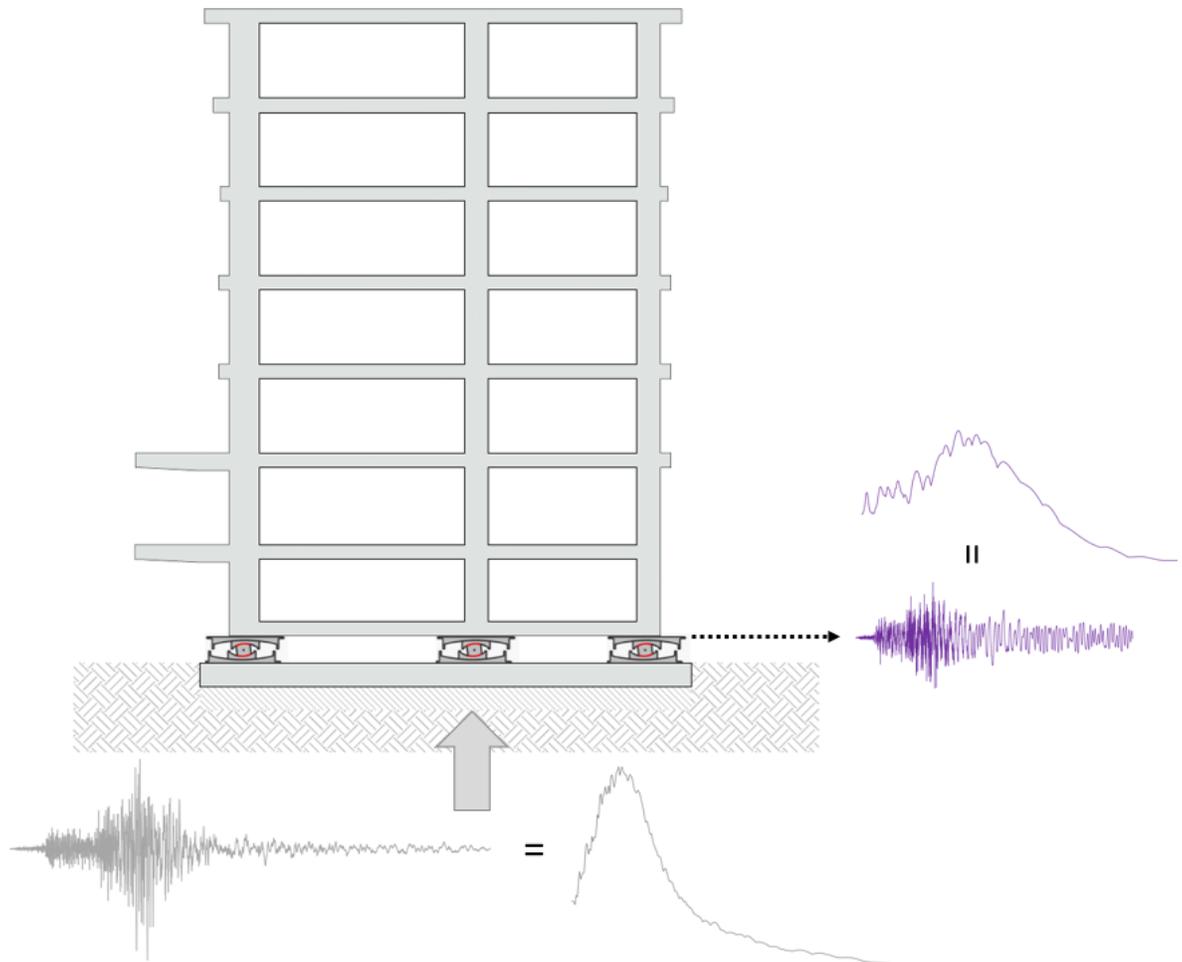


Ilustración 13. Planteamiento del problema: Encontrar la señal que resulta de pasar a través de los aisladores

Señal objetivo: En color morado

Señal sísmica proveniente del suelo: En color gris.

Si conociéramos el espectro de respuesta que resulta de una señal que pasa a través de los aisladores TPF considerando la interacción con la super estructura, podríamos emplear este espectro para el diseño de la super estructura de manera independiente y utilizando la metodología tradicional de análisis y diseño: *Análisis lineal modal espectral*.

A continuación, se presenta la secuencia de análisis realizados que permitieron encontrar el espectro de respuesta bajo la super estructura luego de haber pasado la señal sísmica por los aisladores de triple péndulo de fricción.

- Modelo N°1 – Masa concentrada, estructura infinitamente rígida: En primera instancia, se analizó el modelo en el cual se tiene un aislador con la masa concentrada

encima de este (modelo equivalente a la propuesta dada por EPS presentada anteriormente), es decir, que se considera la super estructura infinitamente rígida.

- Modelo N°2 – Super estructura representada por el modo fundamental: Se idealiza la super estructura de varios grados de libertad con un modelo simplificado de un solo grado de libertad con las propiedades de masa y rigidez del primer modo fundamental del edificio. En este modelo se desconoce la interacción de los diferentes modos de la super estructura, pero se considera la flexibilidad de esta.
- Modelo N°3 y Modelo N°4 – Super estructura representada por los dos y tres primeros modos: La super estructura se representa con las propiedades de masa y rigidez de los dos y tres primeros modos. En este modelo se espera encontrar el espectro de respuesta más preciso y cercano al que resultaría de pasar una señal sísmica a través de los aisladores considerando la influencia de la super estructura (con todos sus grados de libertad).

En los modelos analizados en los cuales se consideró la flexibilidad de la super estructura (modelos 2 a 4), se modelaron dos aisladores con el fin de recuperar con fuerzas axiales el momento de volcamiento que resulta de tener la masa concentrada a cierta distancia (altura equivalente modal) del nivel de los aisladores.

A continuación, se presenta la secuencia de los modelos descritos anteriormente:

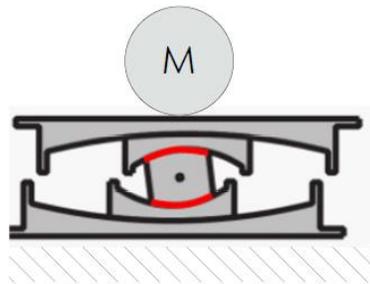


Ilustración 14. Modelo N°1: Masa concentrada, estructura infinitamente rígida



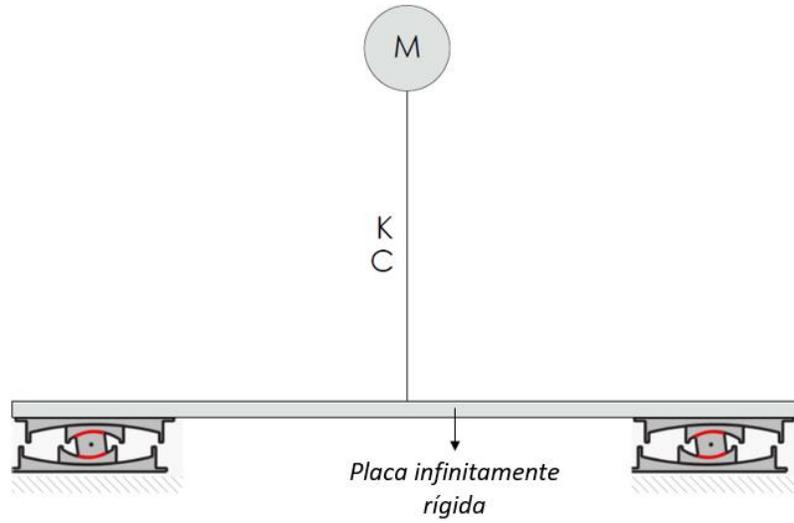


Ilustración 15. Modelo N°2: Super estructura representada por el modo fundamental

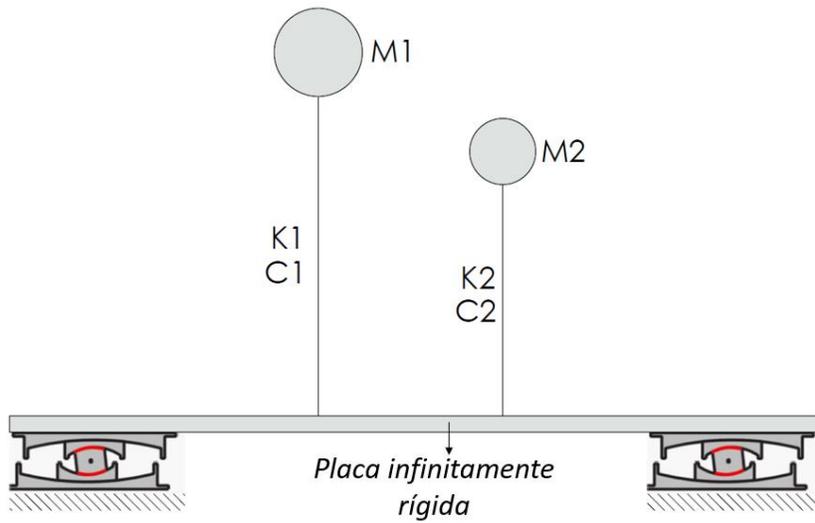


Ilustración 16. Modelo N°3: Superestructura representada por los dos primeros modos



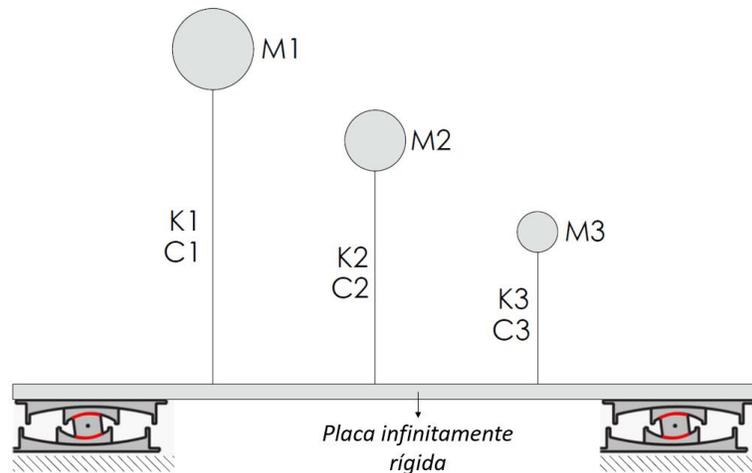


Ilustración 17. Modelo N°4: Superestructura representada por los tres primeros modos

En las siguientes tablas se presentan los valores empleados en los diferentes modelos realizados. Las propiedades de los aisladores corresponden a las presentadas en capítulos anteriores.

Modelo N°2	
Parámetro	Modo 1
% de amortiguamiento	2.00
Periodo [s]	0.91
Frecuencia [rad/s]	6.93
Masa [kgf. s ² /m]	10.20
Amortiguamiento [kgf.s/m]	2.83

Modelo N°3		
Parámetro	Modo 1	Modo 2
% de amortiguamiento	2.00	2.00
Periodo [s]	0.91	0.27
Frecuencia [rad/s]	6.93	23.27
Masa [kgf. s ² /m]	7.90	2.30
Amortiguamiento [kgf.s/m]	2.19	2.14

Modelo N°4			
Parámetro	Modo 1	Modo 2	Modo 3
% de amortiguamiento	2.00	2.00	2.00
Periodo [s]	0.91	0.27	0.15
Frecuencia [rad/s]	6.93	23.27	41.89
Masa [kgf. s ² /m]	7.90	1.55	0.75
Amortiguamiento [kgf.s/m]	2.19	1.45	1.25

En las siguientes imágenes, se presentan los espectros de respuesta encontrados con cada uno de los modelos descritos anteriormente. Cada uno de estos espectros se compara con el espectro de respuesta para el cual se diseñaría una estructura que no tuviera aislamiento sísmico, este espectro se llama “Señal”.

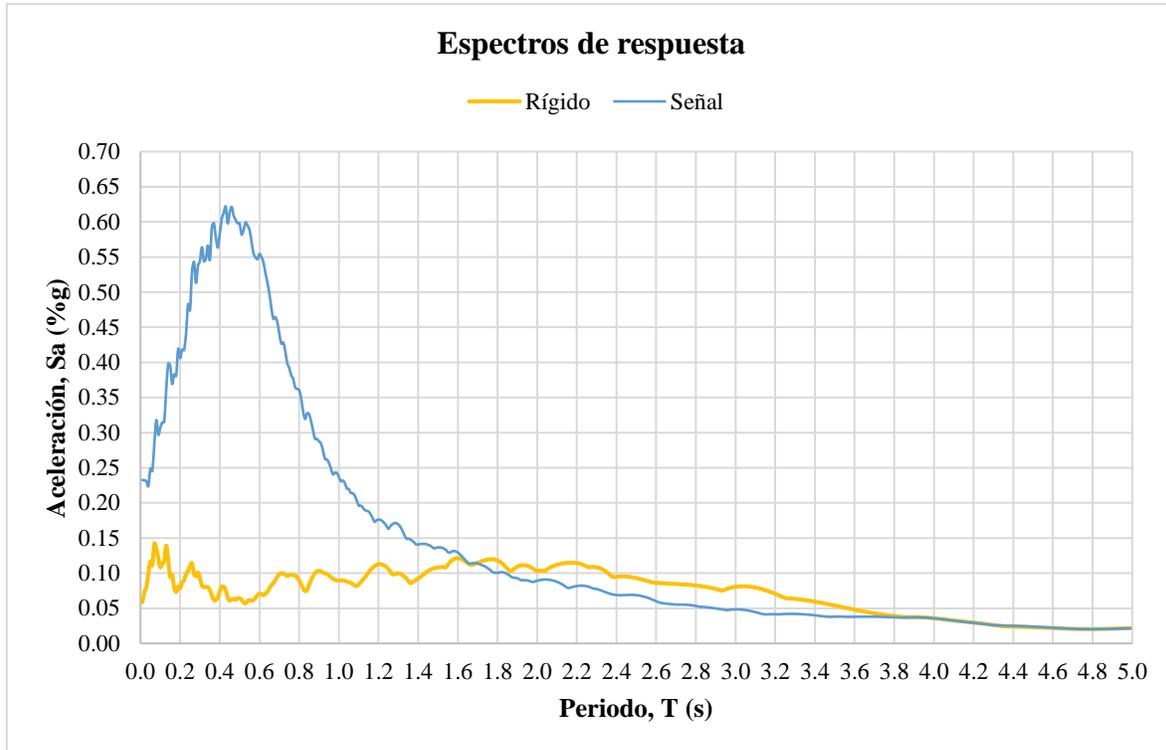


Ilustración 18. Espectro de respuesta encontrado con el modelo N°1 (en amarillo): Masa concentrada infinitamente rígida.

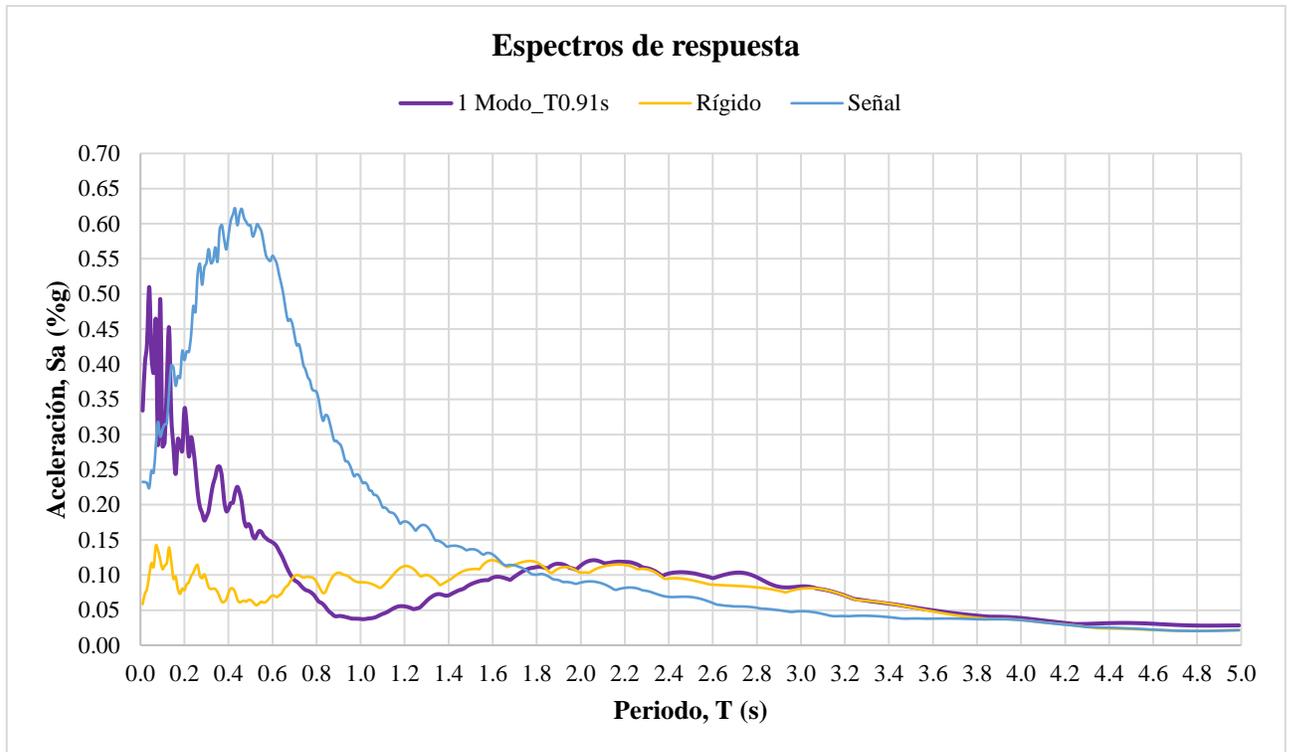


Ilustración 19. Espectro de respuesta encontrado con el modelo N°2 (en morado): Super estructura representada por el modo fundamental

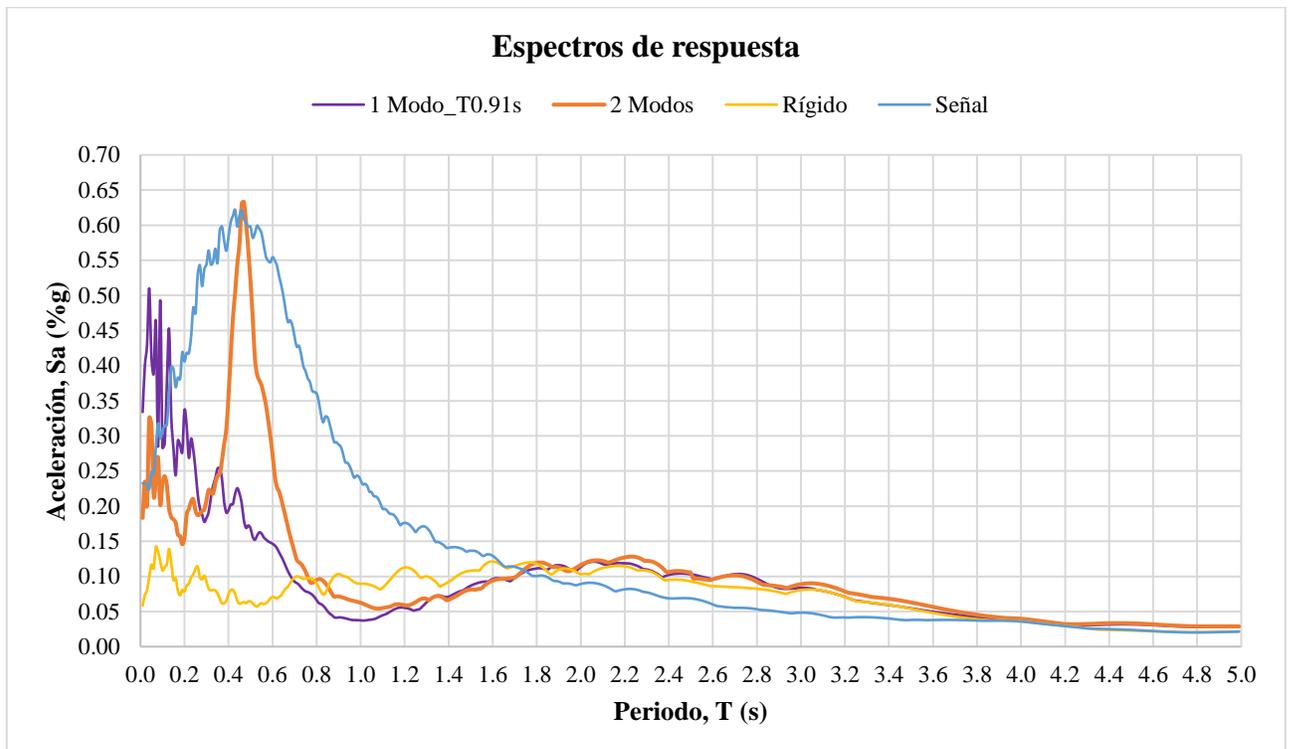


Ilustración 20. Espectro de respuesta encontrado con el modelo N°3 (en naranja): Super estructura representada por los dos primeros modos.

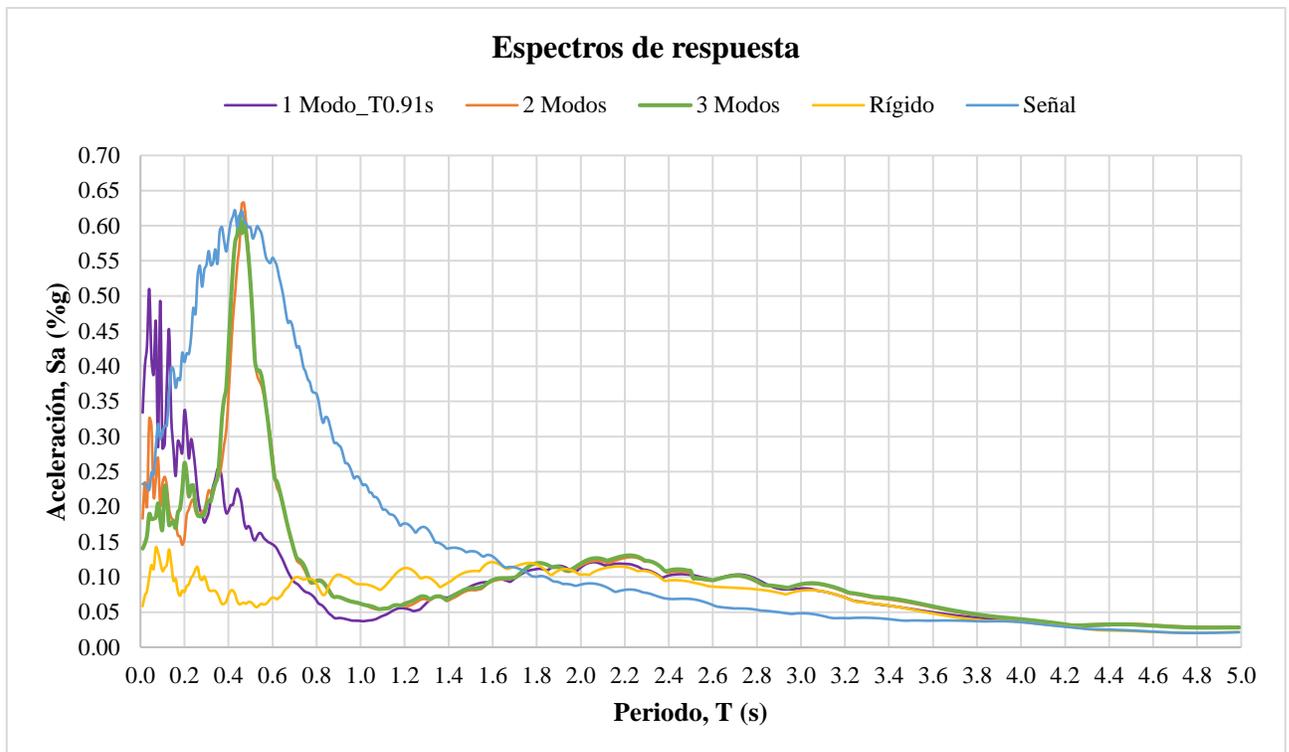


Ilustración 21. Espectro de respuesta encontrado con el modelo N°4 (en verde): Super estructura representada por los tres primeros modos.

En la gráfica del modelo N°1 se evidencia que, al tener una masa concentrada infinitamente rígida encima de los aisladores, las aceleraciones espectrales se disminuyen hasta en un 75% en periodos menores a 1.5 s. Para periodos más largos, el efecto de los aisladores no sería ventajoso para la estructura, ya que pueden observarse que se tienen aceleraciones, aunque de niveles muy bajos, mayores a las que se tendrían sin el empleo del aislamiento sísmico. Esta primera conclusión, confirma lo que normalmente es asumido: el aislamiento sísmico es eficiente en edificaciones con periodos bajos, ya que el resultado inmediato del aislamiento es alargar el periodo de vibración de la estructura.

En la totalidad de espectros encontrados con los diferentes modelos analizados se presenta un pico hacia los 2.3 s de periodo, este pico coincide con el periodo equivalente del aislador para las señales que resultan encima de los aisladores. En todos los modelos analizados, el aislador se encuentra trabajando en la tercera etapa de movimiento (placas 1 y 4 activas).

Por otro lado, los espectros de respuesta encontrados con los modelos 2 a 4 muestran la importancia de considerar la influencia de la super estructura. La idea de que la estructura encima de los aisladores se mantendrá infinitamente rígida en caso de una eventualidad sísmica, se aleja de la realidad cuando se analiza cómo la flexibilidad y los modos de la superestructura pueden variar en gran escala el comportamiento del sistema de aislamiento.

El espectro de respuesta encontrado con el modelo N°2 podría indicar que es posible aislar una estructura con un periodo igual al modo fundamental ($T: 0.91$ s), sin embargo, todos los demás modos superiores (con periodos menores al fundamental) tendrían un nivel de

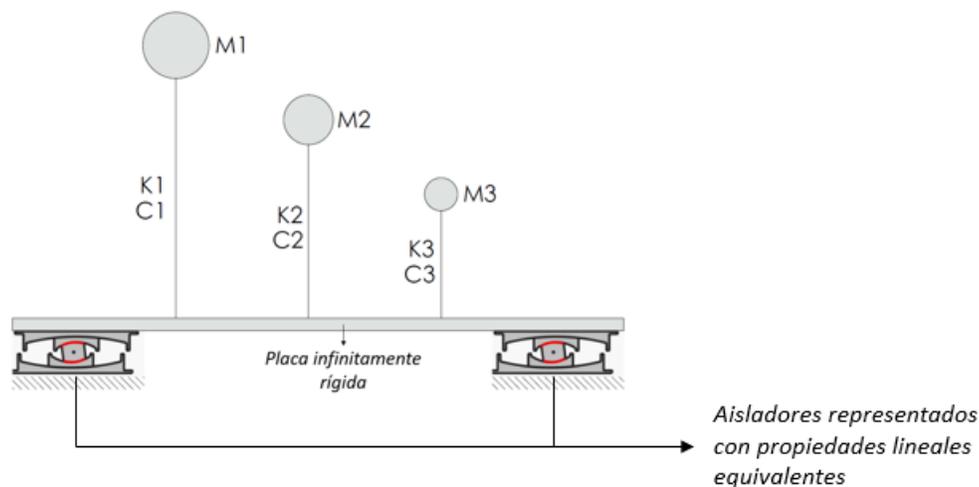
aislamiento significativamente menor, con aceleraciones espectrales mayores a aquella que se obtuvo en el modo fundamental. Por supuesto, en este caso, se deberían haber considerado los modos superiores interactuando con el aislador, que es lo que se hace en los casos 3 y 4.

En los modelos N°3 y N°4 se obtienen espectros de respuesta completamente diferentes a lo esperado. En las gráficas puede observarse un pico importante hacia los 0.42 s, con aceleraciones incluso mayores a las obtenidas del espectro de respuesta de la señal empleada en el análisis. No obstante, para los periodos de la super estructura de 0.91 s, 0.27 s y 0.15 s, el empleo de los aisladores es beneficioso y se logran disminuciones importantes de las aceleraciones espectrales para las cuales será analizada y diseñada la estructura.

El objetivo principal de este capítulo era encontrar el espectro que resulta de pasar una señal por el filtro de los aisladores TPF con el fin de usarlo en el análisis de la super estructura de manera independiente. Sin embargo, no es posible realizar un análisis lineal modal espectral a partir de los espectros obtenidos debido a que las metodologías actuales de combinación modal (CQC, SRSS, etc.) consideran espectros uniformes en el rango de los modos que se combinan. Usar estas metodologías para espectros de respuesta con variaciones tan fuertes en las ordenadas espectrales como las que se ven en las figuras 19-21 no es para nada apropiado.

Aproximación lineal

Debido a que los espectros obtenidos luego de pasar la señal por los aisladores TPF eliminan la posibilidad de realizar un análisis modal espectral de la estructura por encima del aislador, se realizó un nuevo análisis lineal, en el cual se consideran las propiedades de los aisladores con valores equivalentes a partir de los resultados obtenidos con el método simplificado propuesto por EPS, además de péndulos invertidos asociados a los modos de vibración de la estructura encima de los aisladores.



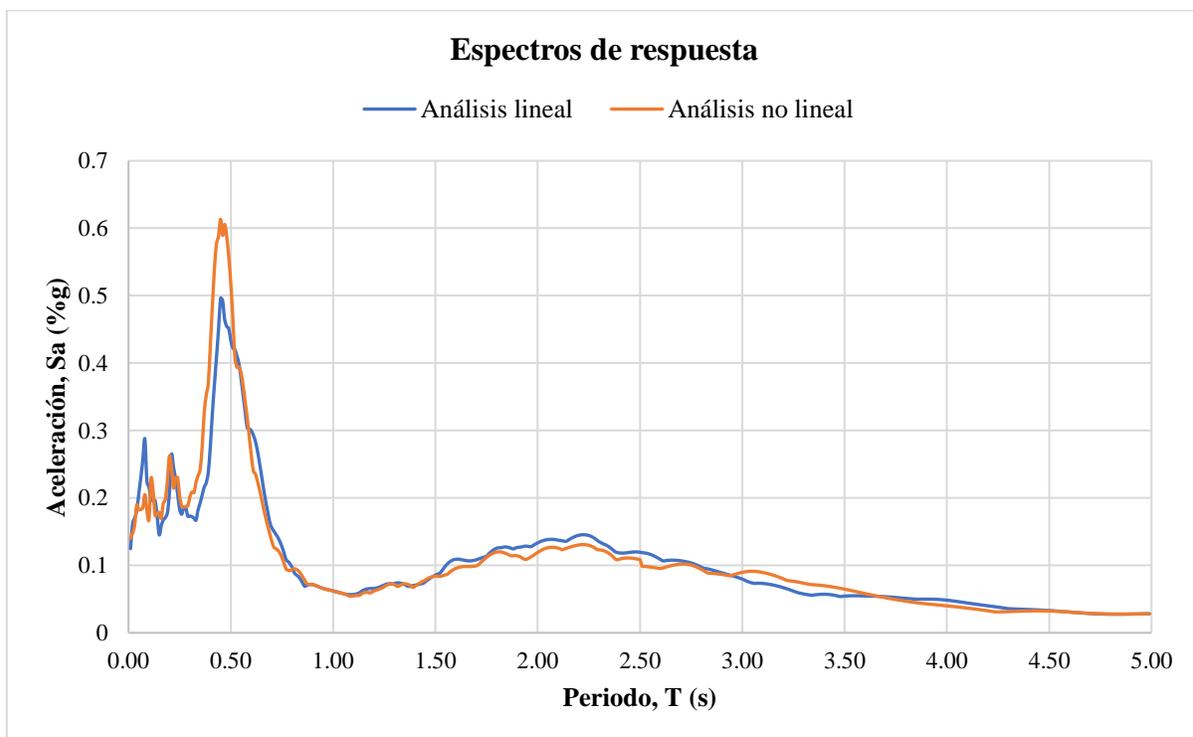
Para los aisladores y la señal empleada en este estudio se obtienen los siguientes parámetros:

- Periodo equivalente del sistema de aisladores: 2.16 s.

- Amortiguamiento equivalente del sistema de aisladores: 29 %
- Rigidez efectiva del sistema de aisladores: 43.3 Tonf/m (la rigidez se reduce a la mitad por la presencia de dos aisladores).

A continuación, se ilustra la comparación entre el espectro que resulta de realizar un análisis no lineal tiempo – historia (Modelo N°4) con el que resulta de realizar un análisis cronológico empleando las propiedades lineales equivalentes del sistema de aisladores, encontradas a partir del método simplificado de EPS.

A partir del análisis cronológico no lineal se obtiene un cortante basal de 3.61 Tonf, mientras que para el análisis lineal se obtiene un cortante de 3.48 Tonf. Esta diferencia puede deberse a la aproximación que se está realizando sobre el sistema de aislamiento, en el cual todo el comportamiento histerético de este se resume en propiedades equivalentes cuando el sistema se encuentra en una única fase de movimiento (fase III para este caso). Además, de la diferencia que puede existir entre el amortiguamiento natural histerético de los aisladores TPF y el empleo de un amortiguamiento viscoso equivalente.



El empleo de múltiples señales en el análisis de un edificio puede resultar en una demanda de tiempo y cómputo alto. Por esta razón, se revisa la posibilidad de realizar un análisis lineal con los parámetros equivalentes que resultan del método simplificado de EPS, pero realizando un análisis modal espectral, aplicando el espectro que resulta de la señal empleada en los análisis descritos en este documento en la base de los aisladores.

En este análisis lineal modal espectral se obtiene un cortante basal de 4.75 Tonf, un 31.6% mayor al que resulta del análisis cronológico no lineal y un 36% mayor al análisis cronológico lineal. Estas diferencias pueden deberse a que cuando se realiza un análisis cronológico no existe ninguna aproximación, ni en los amortiguamientos, ya que el software calcula la respuesta exacta de cada modo, ni en la combinación de las respuestas modales, porque el programa combina las respuestas en el dominio del tiempo. Mientras que, si se realiza un análisis modal espectral, el software convierte los amortiguamientos viscosos explícitos especificados para cada componente del sistema (aisladores y modos que representan la super estructura) en amortiguamientos para cada modo con el fin de resolver el sistema con modos reales, además de que en este método se realiza la combinación de las respuestas modales máximas y no en el dominio del tiempo.

En definitiva, el análisis y diseño de una estructura aislada sísmicamente puede realizarse a partir de un análisis lineal modal espectral empleando las propiedades equivalentes para los aisladores como se detalló anteriormente, y usando un espectro por debajo de estos (este espectro sería el mismo que se le aplicaría a una estructura ubicada en el mismo sitio que no tiene aislamiento sísmico). Esta metodología propuesta ayuda a reducir exponencialmente el tiempo de análisis de una estructura aislada sísmicamente, además de que su empleo permite tener un mayor control sobre el comportamiento de la edificación y el análisis de resultados. Sin embargo, como se detalló anteriormente, se debe tener presente la diferencia que puede existir en los resultados debido a la aproximación que realiza este método con respecto al análisis cronológico no lineal, en el cual se consideran todas las no linealidades inherentes al sistema de aislamiento y se realiza su análisis en el dominio del tiempo.

Por último, este análisis abre un nuevo interrogante: ¿Es posible aislar una estructura cuyo periodo fundamental se ubica alrededor de los 5 segundos, pero sus modos superiores tienen periodos mucho menores con participaciones de masa muy importantes?

Este problema resulta interesante y existe en la mayoría de los casos en que la edificación está compuesta por una torre y una plataforma, como se ilustra en la siguiente imagen:

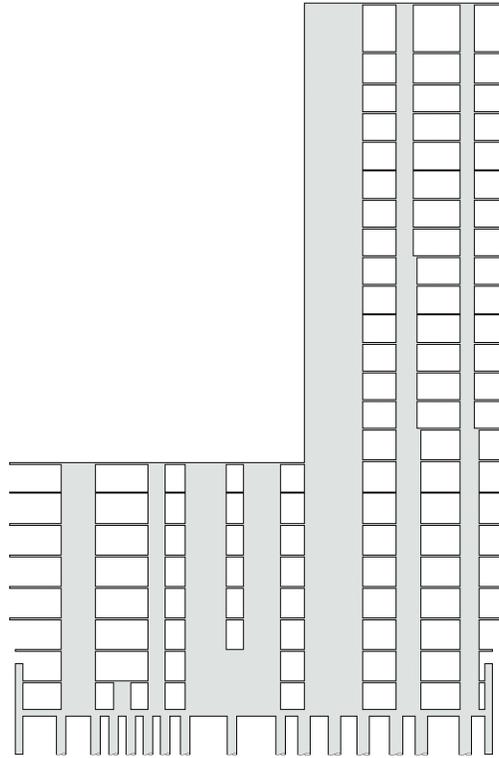


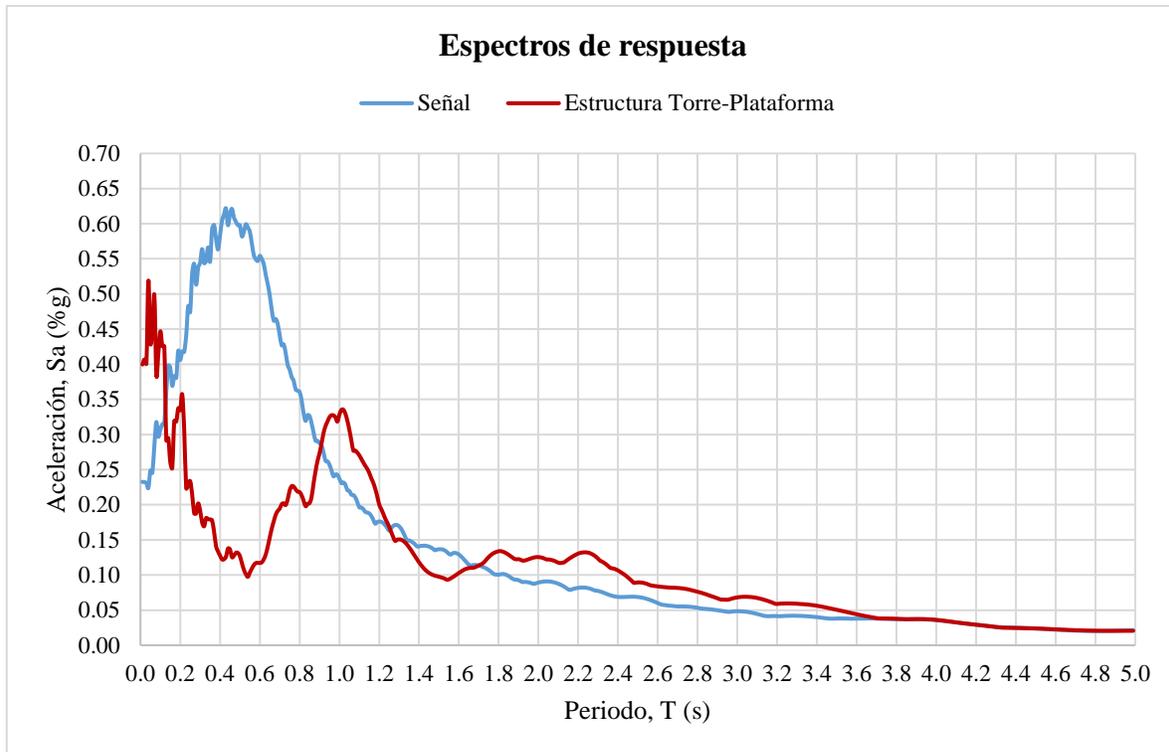
Ilustración 22. Edificación conformada por una torre y una plataforma

Con el fin de resolver este interrogante, se realiza el mismo análisis presentado en este capítulo, pero considerando los siguientes parámetros de la super estructura a aislar:

Parámetro	Modo 1	Modo 2	Modo 3
%Amortiguamiento	0.02	0.02	0.02
Periodo [s]	5.00	1.47	0.50
Frecuencia [rad/s]	1.26	4.27	12.57
Masa [kgf. s²/m]	4.08	2.04	4.08
Amortiguamiento [kgf/m]	0.21	0.35	2.05

Adicionalmente, se emplean las mismas propiedades del aislador presentados en este estudio, el cual tiene un periodo de 3.53 s en la fase III de movimiento (superficies externas activas con radio de curvatura igual a $61'' = 1.55$ m). El periodo del aislador es menor al periodo fundamental de la estructura que se desea evaluar, pero mayor al periodo de los modos superiores los cuales se pretenden aislar.

A continuación, se presenta el espectro de respuesta encontrado comparado con el espectro que se emplearía en el diseño tradicional de esta estructura sin aislamiento sísmico:



El espectro de respuesta obtenido muestra que sí es posible aislar una estructura cuyo periodo fundamental se encuentra alrededor de los 5 s, pero, este aislamiento se concentrará en los modos superiores de la estructura, en este caso en periodos de 1.47 s y 0.5 s. En la gráfica puede verse cómo las aceleraciones se disminuyen hasta 6 veces para el tercer modo con periodo 0.5 s y hasta aproximadamente en 1.5 veces para el periodo de 1.47 s.

Esta posibilidad resulta muy interesante para el caso de edificaciones con alta demanda sísmica que tienen modos superiores con alta participación de masa y cuya influencia impacta en gran medida los resultados del diseño de la edificación.

Conclusiones

El estudio presentado en este documento permitió entender el comportamiento de los aisladores de triple péndulo de fricción y evidenciar sus principales ventajas frente a otros sistemas de aislamiento. Los aisladores TPF están conformados por cuatro superficies de deslizamiento que interactúan entre sí, esto permite que se alcancen altos niveles de desplazamiento en el aislador con una dimensión en planta pequeña. Adicionalmente, debido a que la rigidez del aislador TPF es proporcional a su carga axial, se pueden eliminar las rotaciones a nivel de los aisladores, lo cual permite tener una misma configuración de aisladores en la totalidad de la edificación.

Además, se pudo concluir que es importante validar el funcionamiento de los aisladores TPF en los diferentes softwares de análisis comerciales, debido a que estos demostraron posibles problemas cuando se realizaron modelos complejos con múltiples grados de libertad empleando señales en el tiempo. Sin embargo, se resalta el buen comportamiento de los aisladores TPF en los modelos pequeños evaluados ante una carga horizontal monotónica.

Con el fin de buscar tener un mayor control sobre los resultados encontrados con los software de análisis y disminuir la alta demanda de tiempo y cómputo que implica analizar una estructura de múltiples grados de libertad con las no linealidades de los aisladores TPF, se abordó el problema empleando el método simplificado propuesto por EPS para encontrar el desplazamiento máximo y, por ende, el cortante máximo al que se verá sometido un aislador. Sin embargo, los resultados obtenidos en este análisis parecen estar alejados de la realidad debido a que se asume que la estructura es infinitamente rígida y que no hay influencia de los diferentes modos de la super estructura.

Por lo tanto, en este documento se propuso un análisis simplificado que busca encontrar el espectro de respuesta de una señal que pasa a través de los aisladores TPF, pero que considera la influencia de la super estructura en la respuesta del aislador. La idea de que la estructura encima de los aisladores se mantendrá infinitamente rígida en caso de una eventualidad sísmica, se aleja de la realidad cuando se analiza cómo la flexibilidad y los modos de la superestructura pueden variar en gran escala el comportamiento del sistema de aislamiento. Sin embargo, no es posible realizar un análisis lineal modal espectral a partir de los espectros obtenidos debido a que las metodologías actuales de combinación modal consideran espectros uniformes en el rango de los modos que se combinan. En consecuencia, se evaluó la posibilidad de emplear el análisis lineal modal espectral con las propiedades lineales equivalentes de los aisladores, pero aplicando el espectro en la base de estos, y se encontraron resultados satisfactorios considerando las aproximaciones que realiza esta metodología.

En definitiva, esta investigación propone el empleo de la metodología de análisis lineal modal espectral para el análisis y diseño de una estructura con aislamiento sísmico empleando las propiedades lineales equivalentes para los aisladores, y usando un espectro por debajo de estos. Esta metodología propuesta ayuda a reducir exponencialmente el tiempo de análisis de una estructura aislada sísmicamente, además de que su empleo permite tener un mayor control sobre el comportamiento de la edificación y el análisis de resultados. Sin embargo,

se debe tener presente la diferencia que puede existir en los resultados debido a la aproximación que realiza este método con respecto al análisis cronológico no lineal, en el cual se consideran todas las no linealidades inherentes al sistema de aislamiento y se realiza su análisis en el dominio del tiempo.

Finalmente, aunque se conoce que el aislamiento sísmico es eficiente en edificaciones con periodos bajos, ya que el resultado inmediato del aislamiento es alargar el periodo de vibración del conjunto aislador-estructura, se demostró en esta investigación que es posible aislar una estructura cuyo periodo fundamental se encuentra alrededor de los 5 s, pero, este aislamiento se concentrará en los modos superiores de la estructura. Este resultado es muy relevante para el caso de edificaciones con alta demanda sísmica que tienen modos superiores con alta participación de masa como es el caso de estructuras compuestas por una torre y una plataforma.

Referencias

Chacón Sierra, W. D. (2009). *Torsion accidental en estructuras con aislamiento de base*. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2043>

Clough, R., & Penzien, J. (1995). *Dynamic of Structures*. Mc Graw Hill.

Earthquake Protection Systems. (2022). *Earthquake Protection Systems*. Retrieved from EPS: <https://www.earthquakeprotection.com/learn-how-a-bearing-works>

Fenz, D., & Constantinou, M. (2008). Modeling Triple Friction Pendulum Bearings for Response-History Analysis. *Earthquake Spectra*, 18.

Fenz, D., & Constantinou, M. (2008). Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory. *InterScience*, 21.

Puchaicela, A. D. (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT*. Cuenca.