

ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE ESTRUCTURAS EQUIPADAS CON SISTEMAS VISCOSOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA Y BASE PARA ANÁLISIS EXPERIMENTAL

R. Segovia^{1,3}, W. Fleming², P. Tapia²

¹ FCA Ingeniería Limitada, Edificio Las Empresas, General Borgoño N° 934, Oficina 503, Antofagasta, Chile.

² Department of Civil Engineering, Universidad Católica del Norte, Avda. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.

³ rod.segovia@gmail.com

Received 01 April 2015, Accepted 05 May 2015.

RESUMEN

Se investigan los sistemas de disipación de energía sísmica, su clasificación, y funcionamiento estructural con especial atención al sistema pasivo de amortiguación viscosa. Se realiza un estudio computacional del comportamiento de deformaciones en estructuras equipadas con dispositivos de disipación de energía viscosa y se dan las bases para realizar un modelo a escala para análisis experimental. Para la modelación y análisis se utiliza el software SAP2000.

Además del estudio de deformaciones, se establecen los parámetros que se deben conocer para aplicar este sistema en ingeniería estructural, comparando parámetros con los modelos actuales de diseño de estructuras y la normativa extranjera aplicable a cada caso FEMA 273 y FEMA 356. Se analizan los cambios en la distribución de energía al incluir este elemento en la estructura.

Palabras clave: amortiguamiento viscoso, disipación de energía, modelo de laboratorio

ABSTRACT

Seismic energy dissipation systems, their classification, and structural performance with special attention to the passive viscous damping systems are investigated. A computational study of the deformation behavior in structures equipped with viscous energy dissipation devices is performed and the basis for a scale model for experimental analysis are provided. For modeling and analysis the SAP2000 software was used.

Beside the study of deformations, the parameters that should be known to apply this system in structural engineering are established by comparing parameters with current models for structure design and foreign regulations applicable to each case, such as FEMA273 and FEMA356. Changes in the energy distribution as a result of including these elements in the structure are analyzed.

Keywords: viscous damping, energy dissipation, laboratory model

1. Introducción

Debido a la gran vulnerabilidad sísmica que presenta nuestro país, uno de los principales retos que debe solucionar un Ingeniero Civil en su proceso profesional consiste en el desarrollo de conceptos tecnológicos e innovadores que protejan de mejor manera a las estructuras, sus ocupantes y también el contenido de las mismas, antes los daños producidos por los perjudiciales efectos generados durante los movimientos sísmicos.

Para el caso de diseño con disipación de energía, se le provee a la estructura de dispositivos externos, de manera que la demanda de energía sísmica se reduzca por debajo de la resistencia que presenta la edificación, evitando de esta manera la generación de daños estructurales provocados por las deformaciones plásticas que sufre la estructura como respuesta característica de disipación ante niveles elevados de energía de entrada durante un evento sísmico.

Respecto a la normativa nacional referente a sistemas disipadores de energía, las normas de diseño sísmico NCh. 433 Of. 1996 Mod. 2009 “Diseño Sísmico de Edificios” y la norma NCh. 2369 Of. 2003: “Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales”, sólo entregan consideraciones generales sin especificaciones de ningún tipo, es por esto que se originó la norma NCh. 2745 Of. 2003: “Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica”, la cual incorpora consideraciones y especificaciones para edificios con sistemas de aislación basal, pero en ésta no se incluyen otros tipos de disipación de energía.

2. Clasificación de las Técnicas de Control de Respuesta Sísmica.

- Dispositivos de Control Activo: Se requiere un suplemento externo de poder para lograr aplicar una fuerza a la estructura de forma predeterminada en el orden de decenas de kW para estructuras pequeñas y varios mW para grandes estructuras.
- Dispositivos de Control Semiactivos: Combinación de un sistema activo y pasivo, su principal ventaja reside en caso de falla, sigue ofreciendo protección a la estructura.
- Dispositivos de Control Pasivo: Requiere nulo suplemento externo de energía, disipan energía a través de la respuesta estructural o en forma de calor.

3. Dispositivos Pasivos Disipadores de Energía.

Una primera clasificación de éstos hace distinción entre sistemas viscoelásticos e hysteréticos, los primeros se basan en fluidos conducidos a través de orificios, mientras que los otros consisten en la plastificación de metales por fricción, torsión, corte o extrusión.

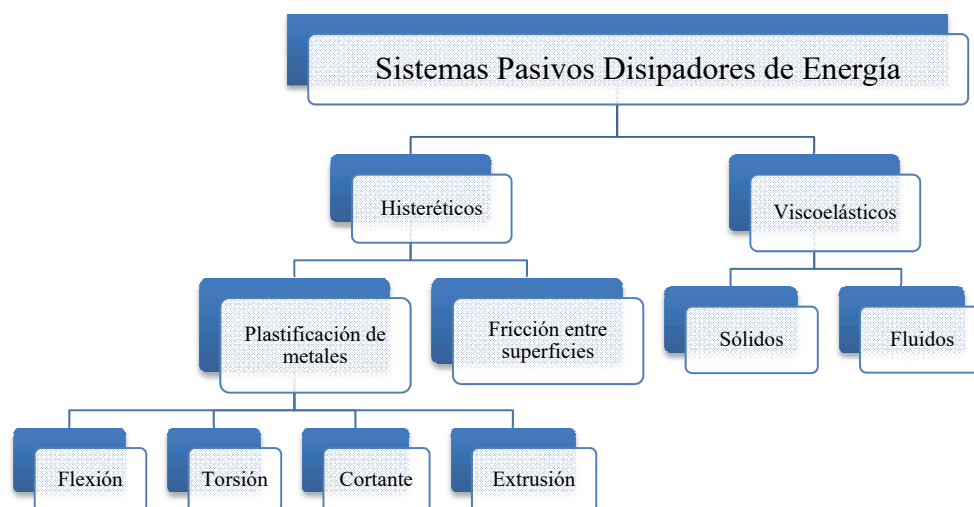


Figura 1. Sistemas pasivos de disipación de energía

3.1 Clasificación de los Dispositivos Pasivos Viscosos de Energía.

La diferencia entre los diversos dispositivos viscosos de disipación de energía, está dada por el exponente de la siguiente ecuación:

$$F = C V^r,$$

dónde:

- C: Coeficiente de Amortiguamiento.
- V: Velocidad del movimiento del dispositivo.
- r: Exponente que indica la linealidad o no linealidad del dispositivo.

3.2 Modelos de Configuración.

- a) Amortiguador Diagonal: Conectan de manera diagonal los extremos de las uniones viga-columna o viga-muro.
- b) Amortiguador V-Invertido: Conectan desde ambos extremos inferiores de las columnas o muros con la sección central de la viga del piso superior.
- c) Amortiguador Brazo Basculante Inferior: Conectan dos brazos dirigidos en diagonales opuestas a un brazo puesto desde la esquina inferior con la sección central de los brazos anteriormente expuestos.
- d) Amortiguador Brazo Basculante Superior: Conectan dos brazos dirigidos en diagonales opuestas a un brazo puesto desde la esquina superior con la sección central de los brazos anteriormente expuestos.

3.3 Dimensionamiento de Amortiguadores.

- a) Amortiguadores Viscosos Lineales: La ecuación para poder estimar la relación de amortiguamiento contribuida por la inserción del dispositivo disipador provista por FEMA273/274 y FEMA356, corresponde a:

$$\xi_d = \frac{T \sum_j C_j \cos^2 \theta \phi_{rj}^2}{4\pi \sum_i m_i \phi_i^2},$$

dónde:

- T: Período Fundamental de la Estructura.
- C_j: Coeficiente de amortiguamiento asociado al amortiguador j.
- θ_j: Ángulo de inclinación del amortiguador en el piso j.
- φ_{rj}: Desplazamiento modal relativo horizontal.
- m_i: Masa desplazada por el *i*-ésimo modo de vibrar.

- b) Amortiguadores Viscosos No Lineales:

$$\xi_d = \frac{T^{2-r} \sum_j \eta_j C_j \lambda \cos^{1+r} \theta_j (\phi_j - \phi_{j-1})^{1+r}}{(2\pi)^{3-r} A^{1-r} \sum_i m_i \phi_i^2},$$

dónde:

- r: Exponente del amortiguador
- η_j: Número de amortiguadores idénticos con el mismo C_j en cada piso.
- A: Respuesta de amplitud a nivel de techo correspondiente al desplazamiento modal φ_j normalizada al valor de una unidad en techo.

$$\lambda = 2^{2+r} \frac{\Gamma^2(1 + r/2)}{\Gamma(2 + r)}$$

3.4 Fórmulas desarrolladas incluyendo la Deformación Vertical

Las fórmulas establecidas por FEMA se basan sólo en relacionar disipación de energía con la deformación horizontal de cada uno de los pisos, dejando de lado la deformación vertical, entonces la deformación vertical y horizontal deben ser usadas para calcular la deformación axial del amortiguador y por consiguiente la fuerza axial disipada.

a) Brazo Amortiguador Diagonal.

$$\xi_d = \frac{T \sum_j C_j [(\phi_h)_{rj} \cos\theta_j - (\phi_v)_{rj} \sin(\theta_j)]^2}{4\pi \sum_i m_i (\phi_h)_i^2},$$

dónde:

- m_i : Masa correspondiente al piso i .
- $(\phi_h)_i$: Desplazamiento del primer modo de vibrar en dirección horizontal al nivel de piso i .
- $(\phi_h)_{rj}$ y $(\phi_v)_{rj}$: Desplazamientos relativos horizontal y vertical entre los extremos del amortiguador j correspondiente al primer modo de vibrar.

b) Amortiguador V-Invertido.

$$\xi_d = \frac{T \sum_j C_j \left[(\phi_h)_{rj} - (\phi_v)_{rj} \frac{H_j}{D_j} \right]^2}{4\pi \sum_i m_i (\phi_h)_i^2},$$

dónde:

- D_j : Longitud horizontal mayor entre los extremos de ambos amortiguadores del piso j para el primer modo de vibrar.
- H_j : Altura entre pisos el dispositivo j .

c) Brazo Basculante Superior.

$$\xi_d = \frac{T \sum_j C_j \left[(f_{h,U})_j (\phi_h)_{rj} - (f_{v,U})_j (\phi_v)_{rj} \right]^2}{4\pi \sum_i m_i (\phi_h)_i^2},$$

dónde:

- $(f_{h,U})_j$ y $(f_{v,U})_j$: Factores de magnificación en las direcciones horizontal y vertical correspondiente al piso j .

d) Brazo Basculante Superior.

$$\xi_d = \frac{T \sum_j C_j \left[(f_{h,L})_j (\phi_h)_{rj} - (f_{v,L})_j (\phi_v)_{rj} \right]^2}{4\pi \sum_i m_i (\phi_h)_i^2},$$

dónde:

- $(f_{h,L})_j$ y $(f_{v,L})_j$: Factores de Magnificación en las direcciones vertical y horizontal para el primer modo de vibrar correspondiente al dispositivo j .

3.5 Fórmulas desarrolladas para configuraciones de tipo No Lineal.

Se desarrollan los mismos conceptos establecidos para el caso lineal.

$$\xi_d = \frac{T^{2-\alpha} \sum_j C_j \lambda_j |(f_h)_j(\phi_h)_{rj} - (f_v)_j(\phi_v)_{rj}|^{1+\alpha}}{(2\pi)^{3-\alpha} A^{1-\alpha} \sum_i m_i (\phi_h)_i^2},$$

dónde:

- $(f_h)_j$ y $(f_v)_j$: Factores de Magnificación en dirección vertical y horizontal para el dispositivo j.

3.6 Factores de Magnificación.

Resumen todas las variaciones de deformación en dirección vertical y horizontal para cada uno de los esquemas de instalación del dispositivo amortiguador.

	Dirección Horizontal f_h	Dirección Vertical f_v
Diagonal	$\cos(\theta)$	$\text{sen}(\theta)$
V Invertido	1	H/D
Brazo Basculante Superior	$\frac{\text{sen}\theta_2 \cos(\theta_4 - \theta_1)}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} + \text{sen}(\theta_4)$	$\frac{\cos(\theta_2) \cos(\theta_4 - \theta_1)}{\cos(\theta_1 + \theta_2)}$
Brazo Basculante Inferior	$\frac{\text{sen}(\theta_2) \text{sen}(\theta_1 + \theta_3)}{\cos(\theta_1 + \theta_2)}$	$\frac{\cos(\theta_2) \text{sen}(\theta_1 + \theta_3)}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} - \text{sen}(\theta_3)$

4. Modelación Estructural.

El modelo a ensayar está constituido en base a una estructura de marco rígido tridimensional de dos niveles, simétrico en su geometría. Este modelo cuenta con dos sistemas amortiguadores ubicados en el primer nivel localizados en ejes paralelos horizontales para poder realizar un análisis unidimensional conforme a los objetivos planteados.

El establecer una estructura de marco rígido, prácticamente elimina los grados de libertad de giro en los nodos de contacto entre la placa de diafragma y las columnas, con la consecuente minimización en la deformación vertical al presentar una matriz de rigidez desacoplada en sus grados de libertad, lo que implica una mayor exactitud en la deformación horizontal sobre la cual se basa principalmente la parte experimental de este estudio.

4.1 Geometría.

El modelo consta de dos ejes en cada dirección horizontal, cada uno de éstos ubicados a 600mm uno de otro, mientras que en sentido vertical el modelo presenta 3 ejes espaciados 300mm uno de otro, cada uno de los cuales representa un nivel (ver figura siguiente).

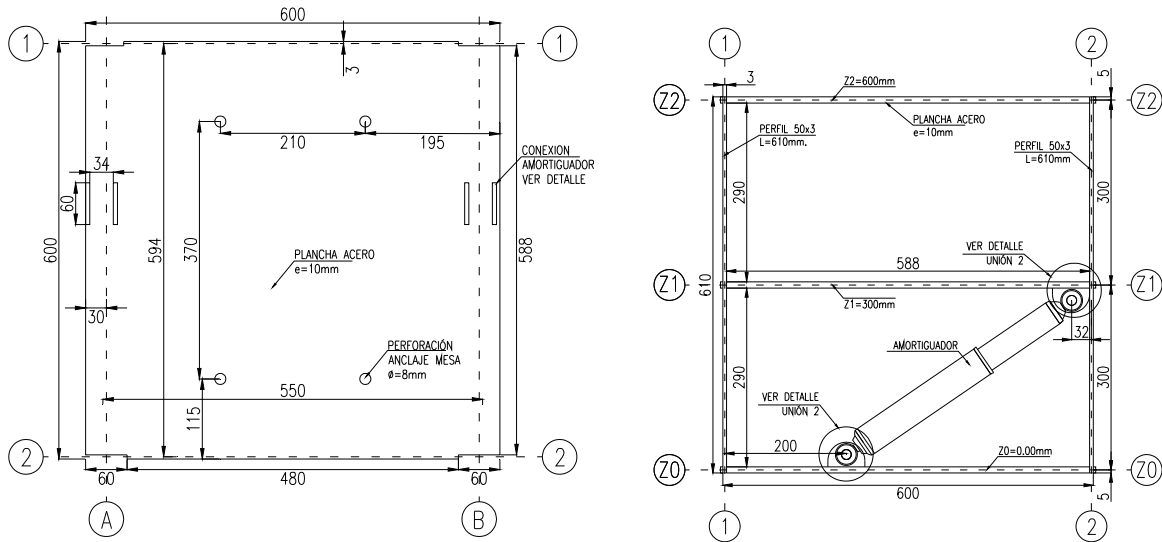


Figura 2. Modelos de laboratorio

Uniones en diafragma rígido: Tal como la estructura fue modelada, las uniones deben ser consecuentes para lograr el efecto de marco rígido, esto es logrado en parte por la gran inercia del diafragma en consideración a la inercia de las barras de las columnas. Para lograr esta condición, se realizan dos sistemas de conexiones en cada uno de los nodos, el primero consta en un corte en la placa para que pueda confinar a la barra de columna, para que ésta no sufra una fractura al intentar desprenderse, mientras que la segunda conexión consiste en la colocación de una pletina de acero que une la columna con el resto de la placa, para lograr estas dos conexiones se colocan tres pernos en la longitud de la pletina, dos de éstos unen la columna al diafragma en la zona de corte de la placa, mientras que el último lo hace en el resto de la placa. De esta forma, se asegura el correcto funcionamiento de la unión columna-placa.

La unión diafragma-amortiguador se realiza mediante el mismo sistema de conexión de arandelas que posee el amortiguador, que a través de un agujero y dos placas que se ajustan al cabezal permiten pasar un perno de dimensión 5/8”.

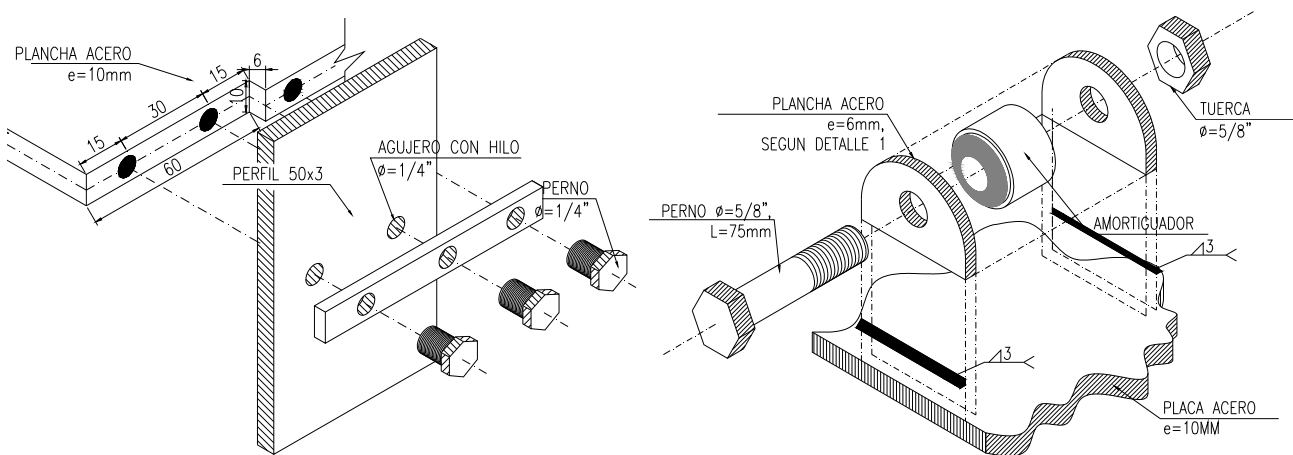


Figura 3. Detalle de uniones

4.2 Funciones de Excitación

Uno de los mayores problemas que se presentó fue el maximizar la fuerza de excitación variando los diversos factores, tales como frecuencia y amplitud, si bien este análisis inicial fue realizado a través de un modelo simplista del problema, luego fue mejorado en base a desplazamientos que pudiesen medirse en la etapa de experimentación.

Determinar la respuesta estructural frente a excitaciones de corta duración (Pulso) y excitaciones de mayor duración (MOV), ambas de tipo sinusoidal. La excitación Pulso tiene una amplitud de 80mm y un período de 1,33 segundos, mientras que la excitación MOV considera 7 períodos de la excitación PULSO. Ambas excitaciones se muestran a nivel de aceleraciones en las figuras 4 y 5.

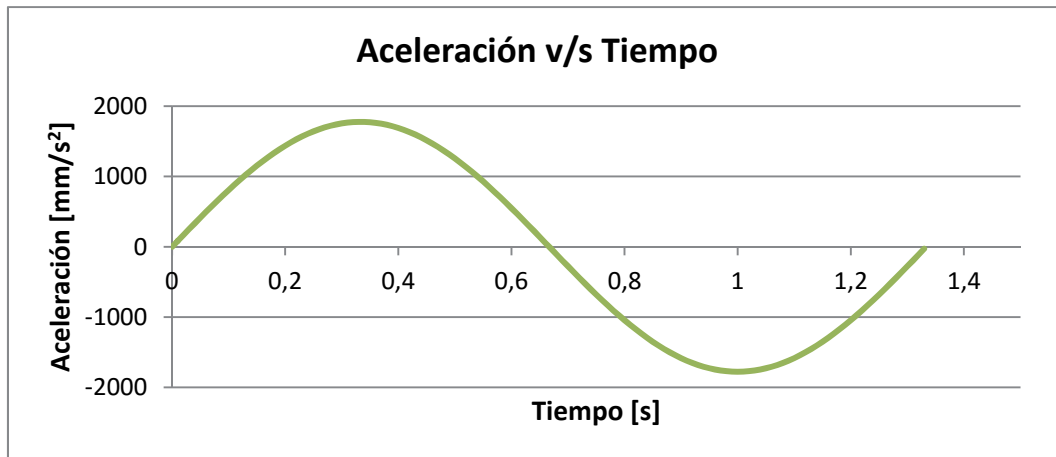


Figura 4. Excitación Pulso.

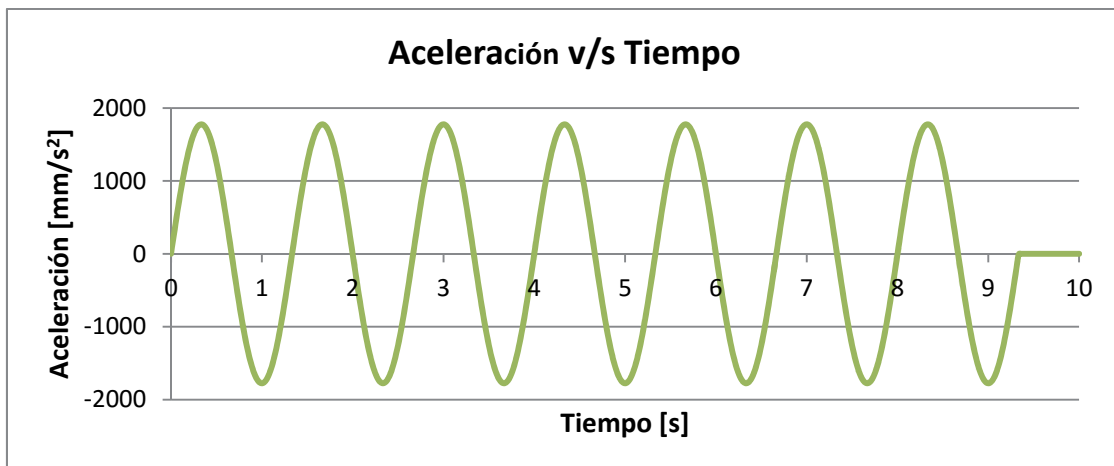


Figura 5. Excitación MOV.

4.3 Datos Amortiguador.

Para establecer las constantes C y r , se realizan ensayos de laboratorio midiendo la velocidad de deformación del amortiguador para distintas fuerzas aplicadas. La Figura 6 muestra los resultados de laboratorio y la regresión para $r=1$, de donde se obtiene $C=0,458$ Kg-s/mm. Dado el alto coeficiente de correlación, se descartaron correlaciones con valores de r distintos de 1.

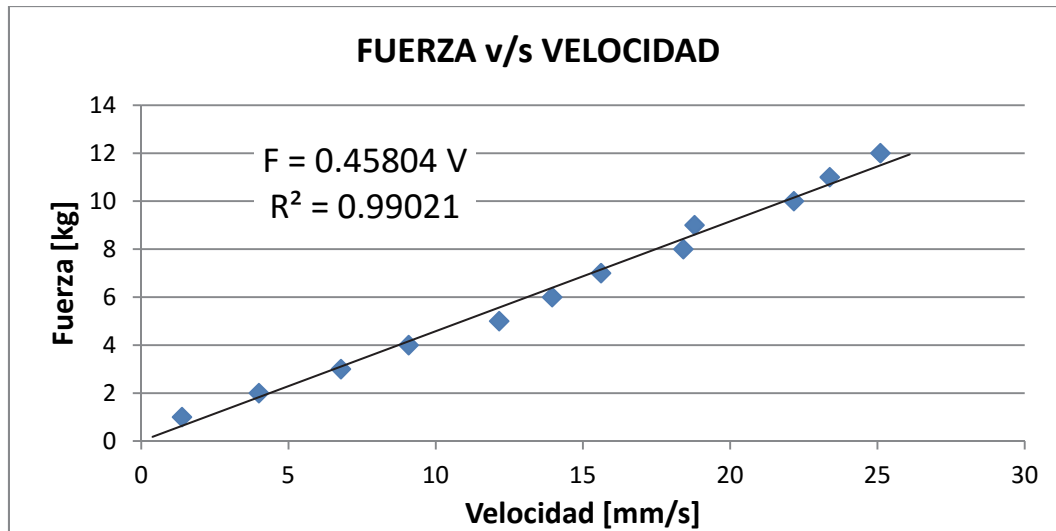


Figura 6. Resultados de Laboratorio para amortiguador utilizado.

4.4 Análisis.

Debido a que el objetivo del estudio reside en comprobar las deformaciones horizontales de la estructura a nivel de los diafragmas rígidos, se debe controlar el comportamiento de cualquier punto de ambas placas, ya que la teoría e idealización de la estructura responde a un nulo comportamiento de giro del diafragma, lo cual implica que todos los vértices de la placa tienen idéntico comportamiento en el sentido de deformación y además no existe desplazamiento relativo entre los vértices de la placa.

El dispositivo amortiguador puesto en el nivel inferior no será instrumentalizado para medir desplazamientos, velocidades y/o fuerzas, debido a que sólo se analizarán los resultados de deformación a nivel de diafragma y no a nivel de cada uno de los elementos estructurales del modelo presentado.

4.5 Resultados

Los resultados de los análisis realizados a la estructura, se refieren a los siguientes nodos:

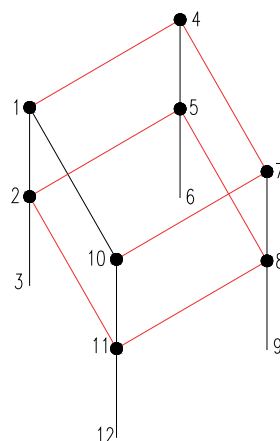


Figura 7. Definición de nodos.

4.5.1 Principales Modos de Vibrar

Dirección	Período
X	0.3843 seg
Y	0.0421 seg

4.5.2 Reacciones Eje X

- a) Carga Pulso: Se presentan las reacciones de momento y fuerza en relación al eje X, con y sin el dispositivo amortiguador para los nodos 3, 12, 6 y 9.

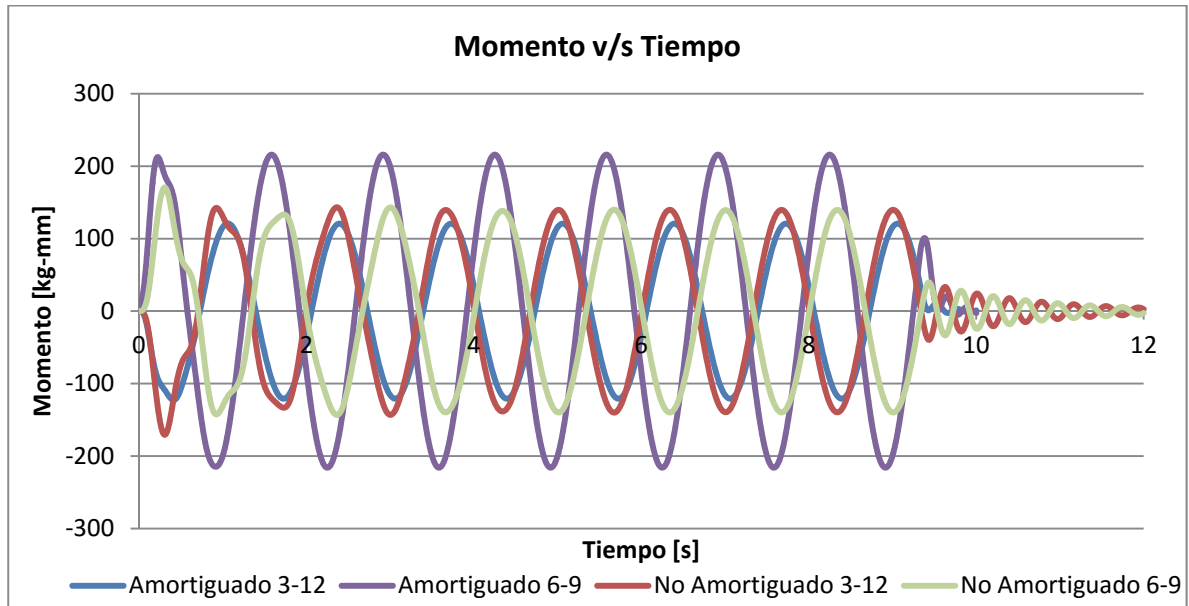


Figura 8. Momento v/s tiempo.

- b) Carga MOV: Se presentan las reacciones de momento y fuerza en relación al eje X, con y sin el dispositivo amortiguador para los nodos 3, 12, 6 y 9.

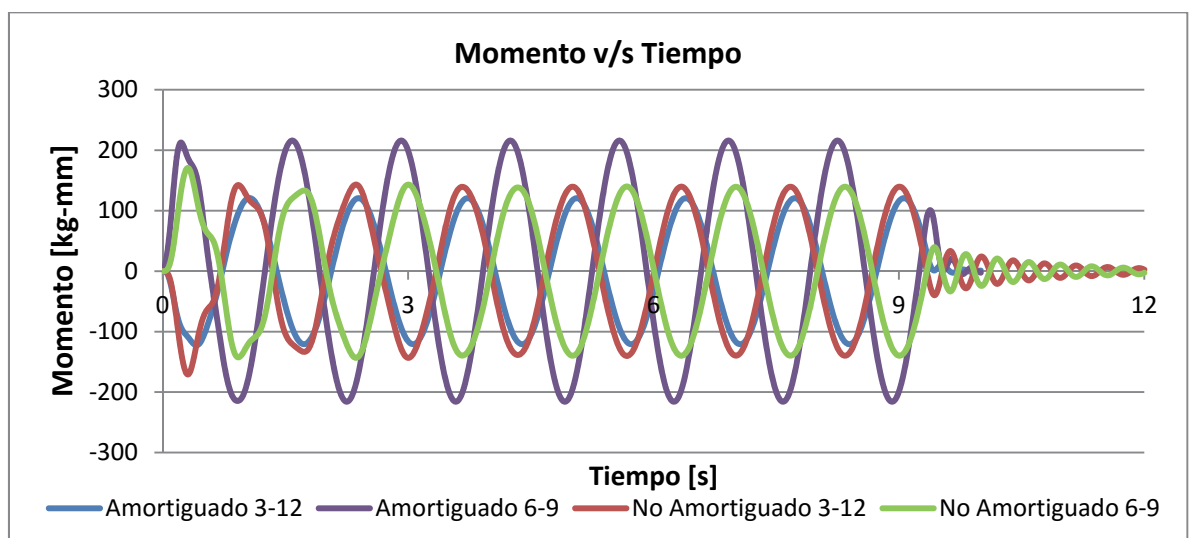


Figura 9. Momento v/s tiempo.

4.5.3 Deformaciones a Nivel de Diafragmas.

Dada la idealización y estructuración, hecha en base a un diafragma rígido, todos los puntos que conforman este elemento estructural tienen idéntico comportamiento.

a) Carga Pulso

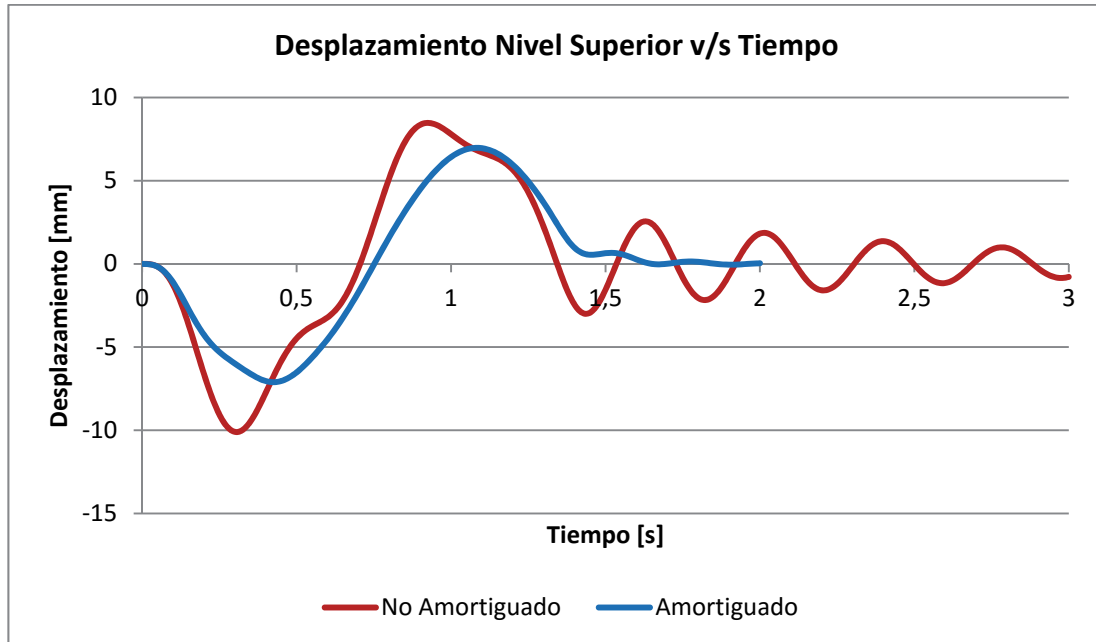


Figura 10. Desplazamiento dirección X v/s tiempo, carga Pulso.

b) Carga MOV

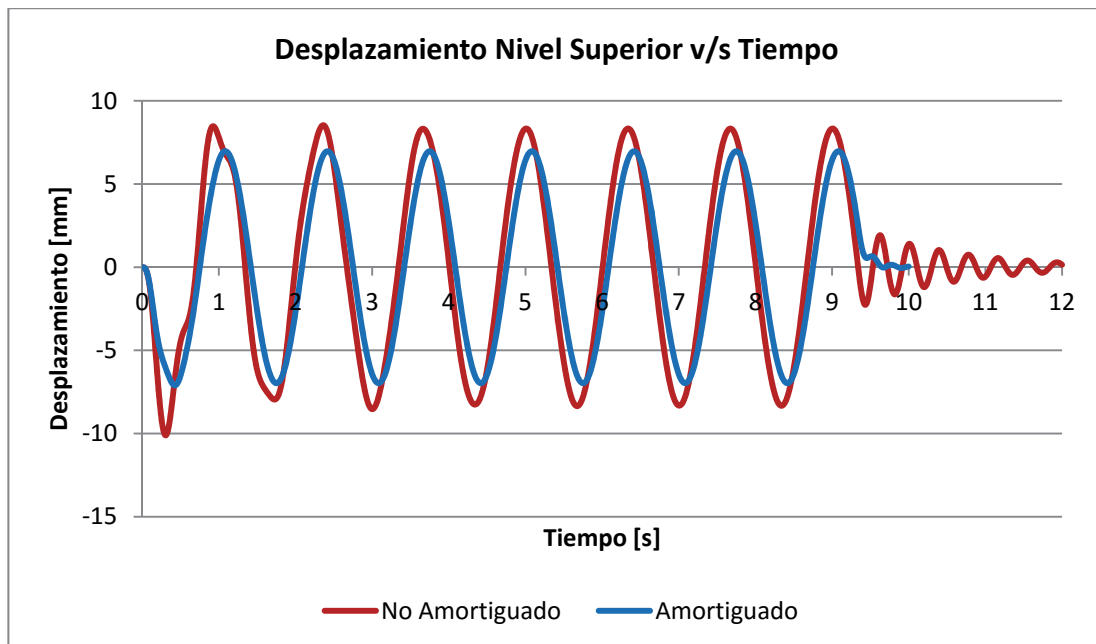


Figura 11. Desplazamiento dirección X v/s tiempo, carga MOV.

4.5.4 Esfuerzos en Elementos Estructurales

La correcta determinación de los esfuerzos soportados por cada uno de los elementos estructurales y así poder observar si estos elementos sobrepasan el límite elástico del material, lo cual es una premisa en la investigación, no alcanzar la plastificación del material.

a) Carga Pulso

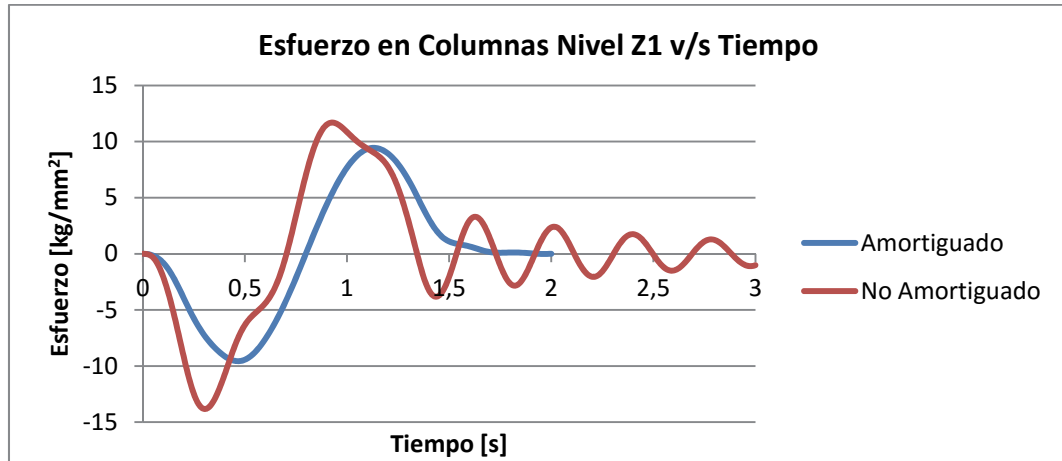


Figura 12. Esfuerzo en columnas v/s tiempo, carga Pulso.

b) Carga MOV



Figura 13. Esfuerzo en columnas v/s tiempo, carga MOV.

4.5.5 Niveles de Energía de la Estructura.

La estructura al momento de ser excitada, debe redistribuir la energía de entrada en otras formas de energía, cada una en diferentes porcentajes. Dada la inclusión de un amortiguador viscoso, se debe incluir el efecto que produce este elemento dentro del total de energía, que principalmente se ve afectado por la deformación que presenta la estructura a través del movimiento.

a) Carga Pulso

a. Caso Amortiguamiento viscoso

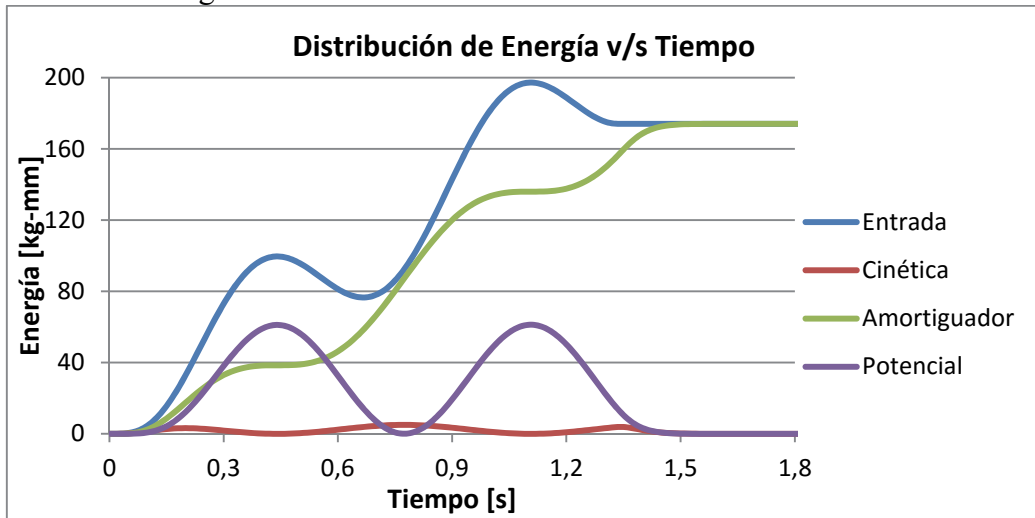


Figura 14. Distribución de energía v/s tiempo, carga pulso y amortiguamiento viscoso.

b. Caso No Amortiguado

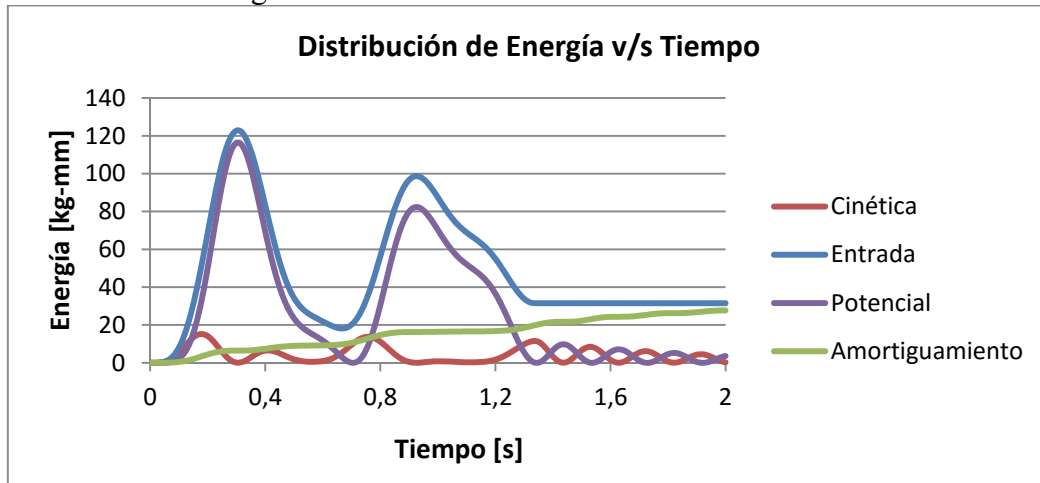


Figura 15. Distribución de energía v/s tiempo, carga pulso sin amortiguamiento viscoso.

b) Carga MOV

a. Caso Amortiguado

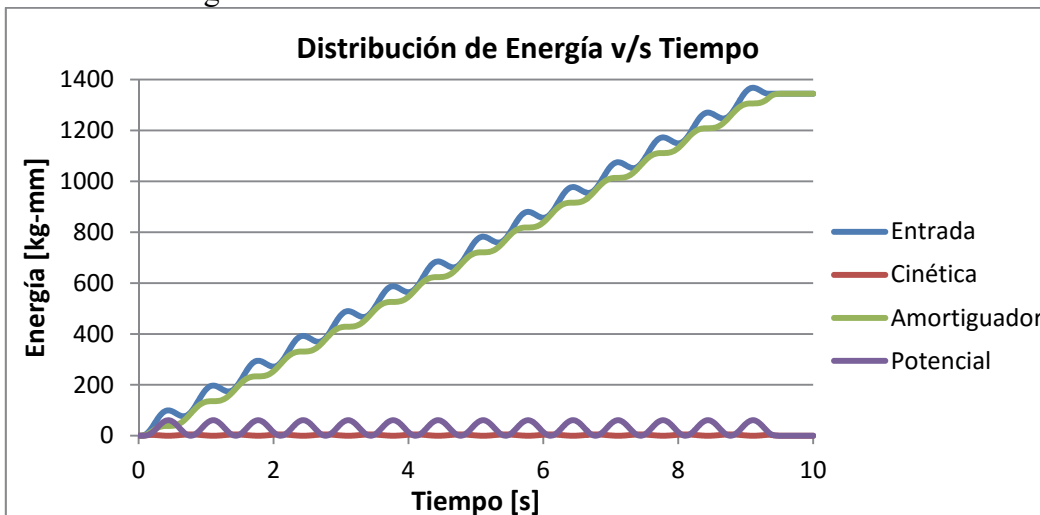


Figura 16. Distribución de energía v/s tiempo, carga MOV y amortiguamiento viscoso.

b. Caso No Amortiguado

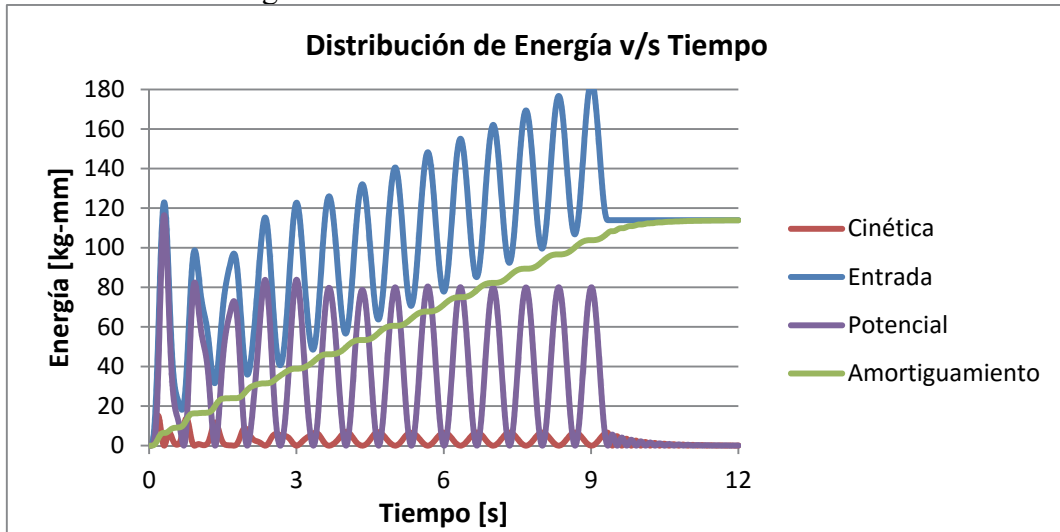


Figura 17. Distribución de energía v/s tiempo, carga MOV sin amortiguamiento viscoso.

4.5.6 Niveles de Amortiguamiento

Se deben revisar los niveles de amortiguamiento señalados según las normas FEMA y las investigaciones extranjeras, señaladas en este artículo.

- a) FEMA 273: $\xi_d = 1,6936$
- b) Incluyendo Deformación Vertical: $\xi_d = 1,6933$

4.5.7 Análisis de Sobreamortiguación

Se realiza un análisis sin incluir el amortiguador, pero realizando cambios en la relación de amortiguamiento, usando los valores calculados en el punto anterior, debido a las configuraciones del software, el límite en la relación del amortiguamiento alcanza solamente el 100%.

a) Carga Pulso

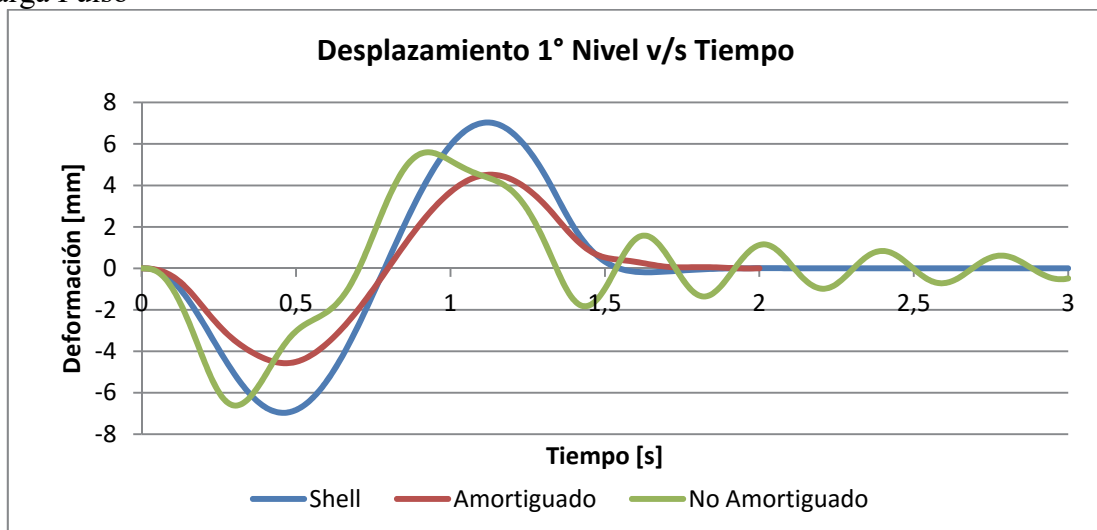


Figura 18. Desplazamiento v/s tiempo, carga pulso.

b) Carga MOV

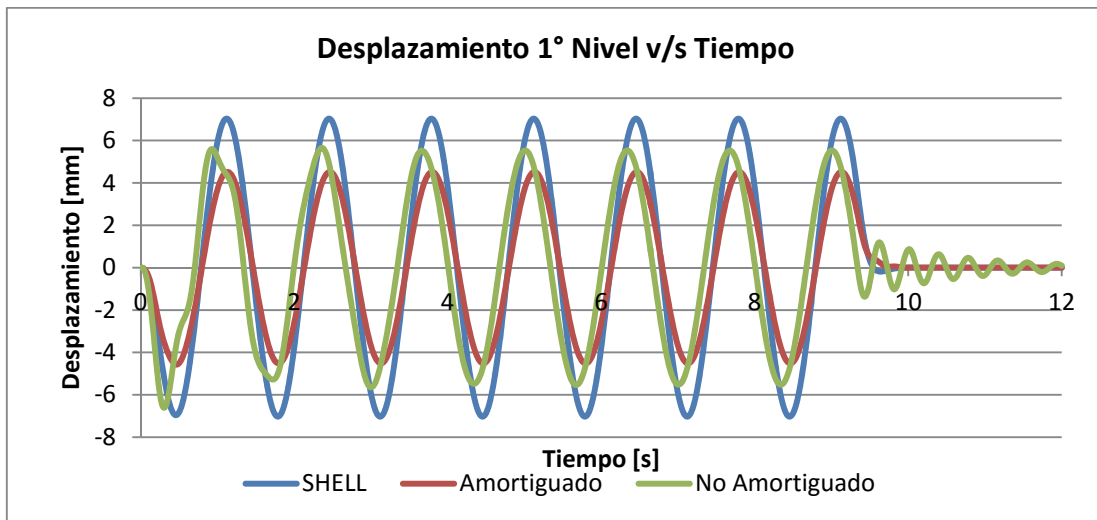


Figura 19. Desplazamiento v/s tiempo, carga MOV.

5. Conclusiones

La inclusión de un amortiguador reduce un 30% la reacción horizontal en el sentido de la excitación, lo cual en la práctica repercute en una dimensión menor de fundaciones, mientras que para el caso del momento, disminuye en el nodo más cercano al dispositivo. En los apoyos más lejanos se evidencia un aumento en el valor de las reacciones, respecto de los resultados mostrados por la estructura sin la inclusión del dispositivo externo.

Se denota una gran energía de amortiguamiento, la cual prácticamente en algunos puntos corresponde a casi la totalidad de Energía total de entrada. Mientras que las energías potencial elástica y cinética son recíprocas en cuanto al comportamiento. Otra consecuencia de la gran amortiguación de la estructura corresponde a la baja velocidad y consiguiente baja energía cinética que presenta la estructura modelada computacionalmente.

Las diferencias de desplazamiento entre un $\xi=100\%$ y un $\xi=5\%$ son máximo de un 35%, lo cual es un valor razonable de disminución de la respuesta sísmica de deformación. Para el caso de la carga Pulso y MOV en el primer período de excitación se puede apreciar una irregularidad en la onda, lo que se atribuye a la respuesta transiente que se amortigua rápidamente.

Con el presente estudio se han sentado las bases para la construcción de un modelo de laboratorio y posterior comparación con un modelo computacional, que incluya el efecto de amortiguación en la respuesta estructural.

6. Referencias

1. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2001): "International Standard Based for Design of Structures-Seismic Actions on Structures".
2. HWANG, J; HUANG, Y; S, Yi; HO, S. (2008): "Design Formulations for Supplemental Viscous Dampers to Buildings Structures", Journal of Structural Engineering 134.
3. MAKRIS, N.; CONSTANTINOU, M. (1991): "Fractional-Derivative Maxwell Model for Viscous Dampers", Journal of Structural Engineering 117.

4. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (1997): “*NEHRP Guidelines for the Seismic Response Rehabilitation of Buildings*”, FEMA 273.
5. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (2000): “*Prestandar and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*”, FEMA 356.
6. SYMANS, M.; CONSTANTINOU, M. (1998): “*Passive Fluid Viscous Damping Systems for the Seismic Energy Dissipation*”, ISE T Journal of Earthquake Technology, Vol. 385 N°35.
7. MAKRIS, N.; CONSTANTINOU, M. (1990): “*Viscous Dampers; Testing, Modeling and Application in Vibration and Seismic Isolation*”, National Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report NCEER-90-0028.
8. CONSTANTINOU, M.; SYMANS, M. (1992): “*Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structure with Supplemental Fluid Viscous Dampers*”, National Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report NCEER-92-0032.