Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Comportamiento de dos estructuras adyacentes continuas conectadas con un elemento viga bajo los efectos sísmicos

Behavior of two adjacent continuous structures connected with a beam element under seismic effects

Durán-García, H.[1], Pulido-Delgado, J.L.[1], Cervantes-Amaya, D.[1], Vladimirovna-Krasotina, L.[2], Vasilevich-Krasnoschekova, Y.[2]

[1] Universidad Autónoma de San Luis Potosí, avenida Niño Artillero 183, Zona Universitaria, San Luis, S.L.P. México,78240.
[2] Universidad del Automóvil y Caminos de Siberia, Prospekt Mira, 5, Omsk, Omskaya oblast, Rusia, 644080.
jpulido@uaslp.mx; david.cervantes@tidesa.mx; hduran@uaslp.mx; krasotina.larisa@gmail.com; kafck@mail.ru

Innovación tecnológica. Se presenta el análisis de un elemento viga que se podría aplicar a las estructuras continuas (edificios) para mitigar los efectos que se tendría bajo el efecto de un sismo.

Área de aplicación industrial: La investigación está enfocada en el área de la ingeniería civil, en especial a la ingeniería sísmica.

Enviado: 27 junio 2019
Aceptado: 23 abril 2021

Abstract

This work evaluates the analytical behavior of two adjacent structures of one degree of freedom (SDOF), joined by an innovative device called beam-element (structural profile) that allows to control the displacements and reduces the damage in them during a seismic event due to the pounding that exists in the separation of structures. The acceleration was modeled as an excitation by a random white noise process under firm soil conditions.

The results show that, when incorporating the connector to adjacent structures, the displacements are lower than the response generated in the structures than without the use of these devices, in addition to improving the performance of buildings and reducing damage to them during a seismic event due to the pounding of the structures, in addition, identifying in which case studies the use of the joining element is appropriate.

Key words: Beam element, adjacent structures, harmonic excitation and white noise.

Resumen

En este trabajo se evalúo el comportamiento analítico de dos estructuras adyacentes de un grado de libertad (S1GL), unido por un innovador dispositivo denominado elemento-viga (perfil estructural) que permite controlar los desplazamientos y reduce el daño en los mismos durante un evento sísmico debido al golpeteo que existe en la separación de las estructuras. La aceleración se modelo como una excitación mediante un proceso aleatorio de ruido blanco en condiciones de suelo firme.

Los resultados muestran que, al incorporar el conector a las estructuras adyacentes, los desplazamientos son menores a la respuesta generada en las estructuras que sin el uso de estos dispositivos, además de que mejora el desempeño de los edificios y reducen el daño en los mismos durante un evento sísmico debido al golpeteo de las estructuras, además, identificando en cuales casos de estudio resulta ser adecuado el uso del elemento de unión.

Palabras Clave: Elemento viga, estructuras adyacentes, excitación armónica y ruido blanco.

I. Introducción

De acuerdo a la literatura, existen una gran variedad de dispositivos de control para la respuesta sísmica de estructuras adyacentes siendo los más usados: amortiguadores viscosos y resortes que conectan las estructuras (Armouti, 2015, Dzhinchvelashvili *et al.* 2009, Pulido-Delgado *et al.* 2012). Así también, se encuentran un gran número de investigaciones con conector de amortiguamiento viscosos, los cuales tienen resultados eficientes bajo la respuesta sísmica, estos conectores requieren de un mantenimiento frecuente (Barmo, A. et al. 2015, Miyamoto, 2014).

Bhaskararao y Jangid (2007) mencionan las propiedades de un sistema de conector de amortiguamiento de tipo viscoso, en dicha investigación se presentan expresiones aproximadas para la respuesta de una excitación sísmica para consideraciones de un suelo firme.

El proponer un *elemento viga* como conector resulta ser innovador dado que no existen antecedentes de estos elementos, por lo que se requiere que el dispositivo tenga cierta propiedades de rigidez (K), se propone un perfil OR (tubular cuadrado), el cual estará apoyado con articulaciones en sus extremos para evitar momento flectores, se considera también que solo trabaje en el rango elástico (Gere 2003), se pueda sustituir por otro elemento de igual características, siendo esto lo que en cierta manera lo hace ser económico en comparación con otros dispositivos (amortiguadores).

El objetivo de este estudio es identificar la eficacia del comportamiento de un elemento de conexión entre dos estructuras que permita controlar los desplazamientos de las mismas bajo los efectos de una excitación sísmica en el mismo instante de tiempo. Esto permitiría que dicho *elemento viga* prevenga o mitigue los efectos del golpeteo que existiría entre las estructuras, considerando la distancia entre ellas la del elemento “viga”.

II. Desarrollo

Conectar las estructuras adyacentes con un elemento viga se consideraría adecuado para

una respuesta dinámica donde se pretende minimizar la respuesta de las estructuras. Primeramente, se consideran las dos estructuras con un grado de libertad (S1GL), conectadas con un elemento viga como se muestra en la figura 1, donde cada estructura tiene las siguientes características: siendo la masa (m), coeficiente de rigidez (k), coeficiente de amortiguamiento (c) y los radios de amortiguamiento (ξ =c/2m) de las estructuras 1 y 2, respectivamente, así también se considera una rigidez del elemento viga K (posteriormente será descrita, la elección del mismo). Cabe hacer notar que los factores de amortiguamiento $\xi 1$ y $\xi 2$ fueron en todos los casos iguales a 5% considerándolas como estructuras de acero (Clough R. y Penzien J. 2003, Makita K. *et al* 2007).

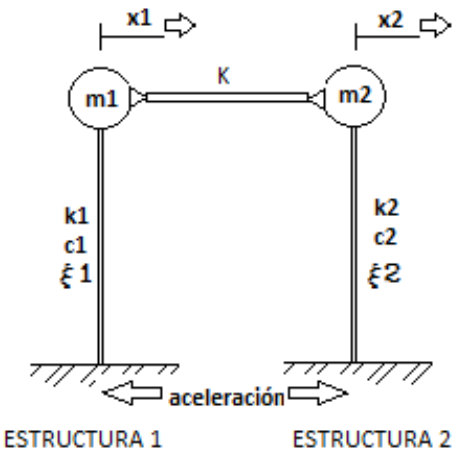


Figura 1. Estructuras con un grado de libertad (S1GL) conectadas con elemento viga.

La ecuación general de movimiento para los sistemas acoplados considerada se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} m1 & 0 \\ 0 & m2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{x}1 \\ \ddot{x}2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c1 & 0 \\ 0 & c2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{x}1 \\ \dot{x}2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k1+K & 0 \\ 0 & k2+K \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} x1 \\ x2 \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} m1 & 0 \\ 0 & m2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}\ddot{x}_g \quad \textbf{(Ec. 1)}$$

Donde se representan: los desplazamientos (x), las velocidades ($\dot{x}$), las aceleraciones ($\ddot{x}$) de las estructuras 1 y 2, y la aceleración ($\ddot{x}_g$).

Las dos cantidades de respuesta consideradas son: el desplazamiento con relación al suelo y la aceleración. El desplazamiento se puede asociar con las estructuras y la aceleración con la demanda sísmica. Las variables del tiempo en la respuesta sísmica acopladas a cada proceso del sismo, se obtienen numéricamente mediante la solución de la ecuación de movimiento por medio de integración directa (algoritmo modificado del tipo de Newmark) y la ecuación del movimiento dada anteriormente (según Zhu y Lemura, 2000).

La acción del movimiento del suelo se representó mediante un ruido blanco que se modela como un proceso de Gauss, que consiste en un desarrollo aleatorio no estacionario $S_{\ddot{U}g}$, cuya función de densidad espectral de potencia es:

$$S_{\ddot{U}g}(t,\omega) = |f_e(t)^2|S_g(\omega) \quad \textbf{(Ec. 2)}$$

En donde:
$S_{\ddot{U}g}(t,\omega)$; Es la función de densidad espectral estacionaria
$f_e(t)$; Es una función modulador conocido simplemente como modulador
t; tiempo
ω; frecuencia

La función de modelación $f_e(t)$ es la propuesta por Saragoni y Hart (1974) y calibrada por Boore (1983) y la expresión de densidad espectral (PSD) se considera la definida por Kanai-Tajimi que en algunas ocasiones se denomina como función Clough-Pensien (2003).

$$S_g(\omega) = \left[\frac{\omega_g^4 + 4\,\xi_g^2\omega_g^2\omega^2}{\left(\omega_g^2-\omega^2\right)^2 + 4\,\xi_g^2\omega_g^2\omega^2}\right] * \left[\frac{\omega^4}{\left(\omega_f^2-\omega^2\right)^2 + 4\,\xi_f^2\omega_g^2\omega^2}\right] S_O \quad \textbf{(Ec. 3)}$$

Para este trabajo se estimaron los siguientes valores considerados para un suelo firme; $\omega_g = 12.50$ rad/s, $\xi_g = 0.60$, $\omega_f = 2.00$ rad/s, $\xi_f = 0.70$ y So=200 cm^2/s^3. La frecuencia principal ω_m toma su valor máximo 10.26 rad/s y los periodos principales están asociados con las frecuencias principales de 0.6 s (Chopra A. 2001).

Con base a las expresiones de Bhaskararaoo y Jangid (2007) se obtuvieron expresiones cercanas para la respuesta media cuadrática estacionaria del sistema (ver figura 1) en donde se considera una amplia gama de valores en relación a las masas m, y a los periodos ω ($\omega = \sqrt{k/m}$), obteniéndose los periodos de la estructuras T1 y T2. En la tabla 1 se muestran las relaciones.

Para el análisis se considera las relaciones α y β; las cuales están dadas por:

$$\alpha = \frac{m1}{m2} \quad \textbf{(Ec. 4)}$$

$$\beta = \frac{\omega 1}{\omega 2} \quad \textbf{(Ec. 5)}$$

Tabla1. Combinación de las características del análisis.

	Tipo de sismo		
	Corto	Intermedio	Largo
Caso 1 α=4 β=2	T1=0.48 seg. T2=0.12 seg.	T1=0.96 seg. T2=0.24 seg.	T1=3.60 seg. T2=0.90 seg.
Caso2 α=4 β=0.15	T1=0.48 seg. T2=0.12 seg.	T1=0.96 seg. T2=0.24 seg.	T1=3.60 seg. T2=0.90 seg.
Caso 3 α=1.2 β=8	T1=0.24 seg. T2=0.20 seg.	T1=0.66 seg. T2=0.55 seg.	T1=2.40 seg. T2=2.00 seg.

Cada conjunto de las estructuras fueron sometidas a una acción sísmica (acelerogramas sintéticos), con lo que se obtiene las respuestas de los sistemas bajo diferentes señales, con característica para sismos cortos, intermedios y largos (ver tabla 1). En la figura 2 se muestra un ejemplo de un sismo sintético de acuerdo a la función de densidad espectral de potencia (ecuación 4).

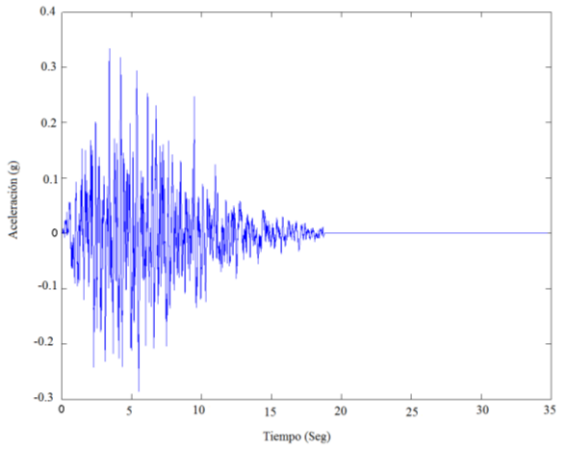


Figura 2. Ejemplo de un sismo sintético (tipo intermedio).

Para representar una cantidad que refleje de manera general la respuesta de cada sistema, se seleccionó el valor máximo de todos los resultados extraídos de la historia del sismo durante el análisis de respuesta, dicho valor reflejará la respuesta máxima del sistema en cuestión ya sea de desplazamiento o de aceleración según sea el caso para cada estructura para la señal a la que fue sometida.

Para el caso del *elemento viga* se consideró una barra de sección denominada OR (Perfil tubular cuadrado) que conecta ambas estructuras, por lo que se desarrolló un algoritmo capaz de seleccionar dentro de una base de datos por el manual de estructuras acero (IMCA; 2014).

Se considera un modelo analítico de conexión bi-articulada en los extremos con el fin de que solamente transmita fuerzas sobre su eje

longitudinal (fuerza normal), donde se evita llegar al límite elástico del acero produciendo únicamente las deformaciones axiales.

La selección del perfil se eligió valorando que la carga de fluencia del elemento (fy) siempre será menor a la carga por pandeo (Carga crítica de Euler) y a su vez, evitando la plastificación del elemento (Gere J. M.; 2003).

La rigidez a deformación axial del elemento se considera como:

$$K = \frac{E \cdot A}{L} \qquad \textbf{(Ec. 6)}$$

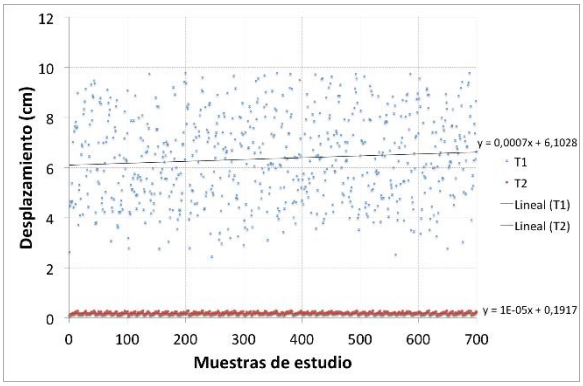
Para todos los casos de estudio en esté trabajo se consideró la sección del perfil OR (178 mm * 4.8 mm), cuyas características fueron K=1.14*10^5 kg/cm, área =32.39 cm^2, módulo de elasticidad E=2.1*10^6 kg/cm^2 y longitud L=6 m. (IMCA; 2014).

III. Resultados y discusión

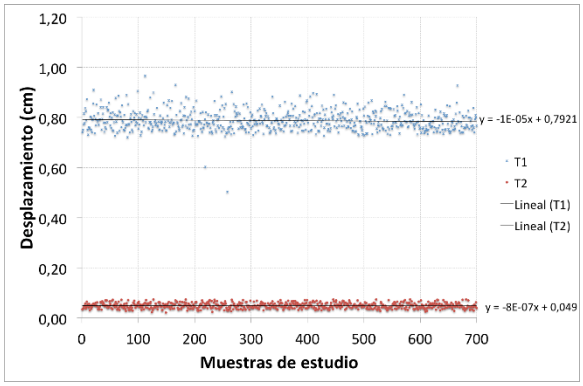
Para determinar la ventaja del uso del conector a las respuestas de los sistemas se incorpora un nuevo parámetro denominado factor de normalización (n) dado por:

$$n = \frac{Respuesta\ del\ Sistema\ \text{sin}\ conector}{Respuesta\ del\ Sistema\ \text{con}\ conector} \qquad \textbf{(Ec. 7)}$$

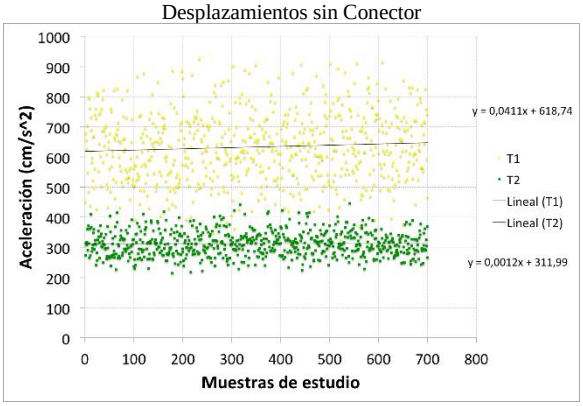
El análisis consiste en revisar el comportamiento del sistema sin el elemento viga e incorporando el uso del conector entre las estructuras. De manera análoga se hicieron para los valores máximos de las aceleraciones.



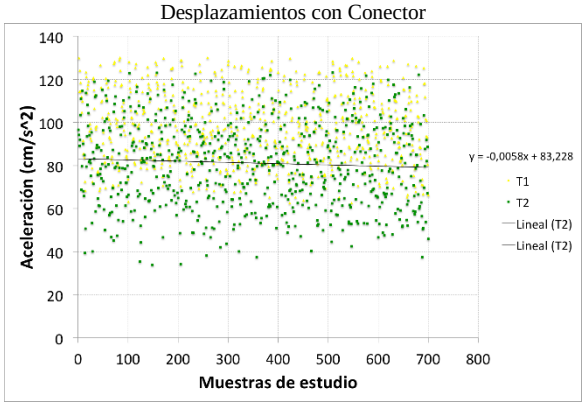
Desplazamientos sin Conector



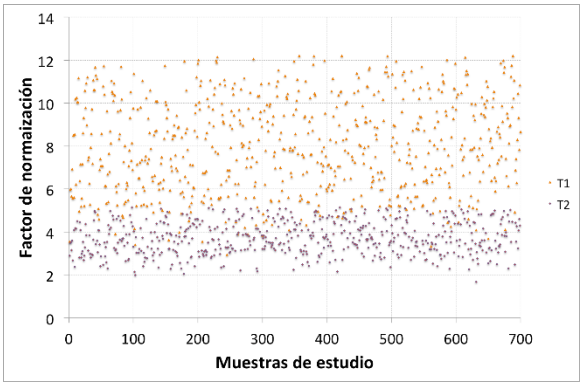
Desplazamientos con Conector



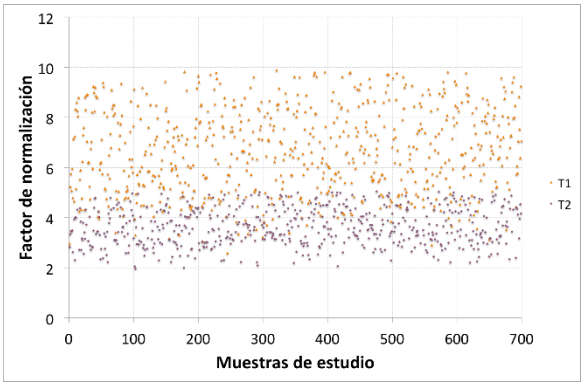
Aceleración sin Conector



Aceleración con Conector

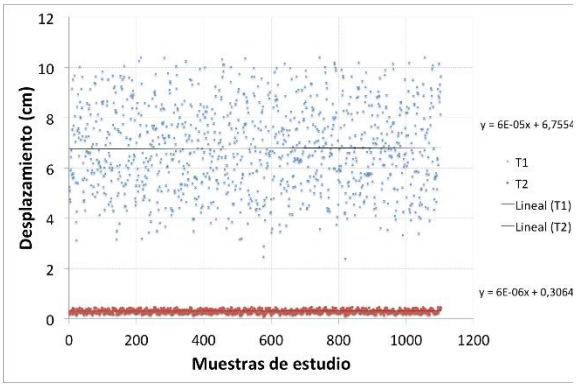


Desplazamientos normalizado

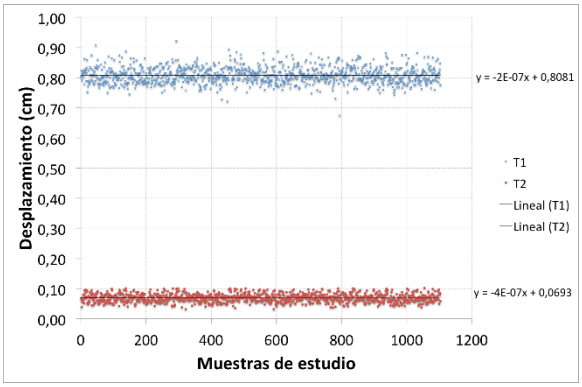


Aceleración Normalizado

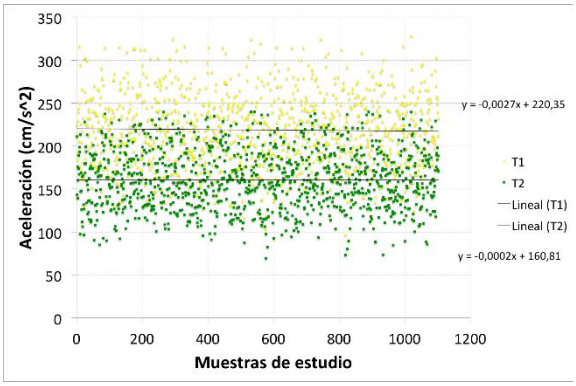
Figura 3. Respuesta de sistemas bajo sismos cortos (cuando α= 2, β =4).



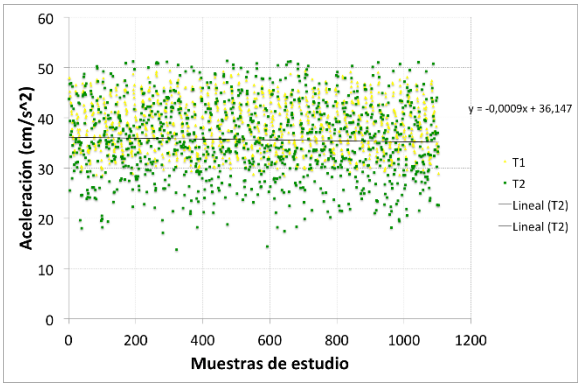
Desplazamientos sin conector



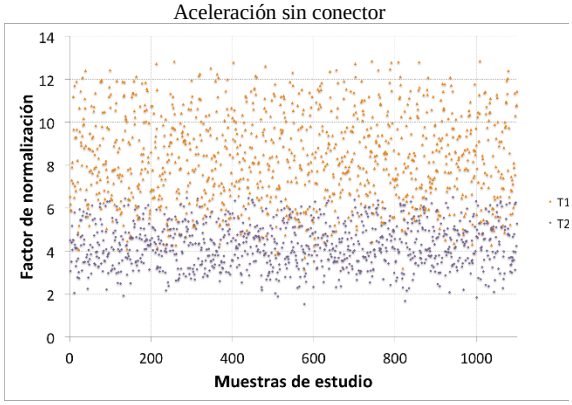
Desplazamientos con conector



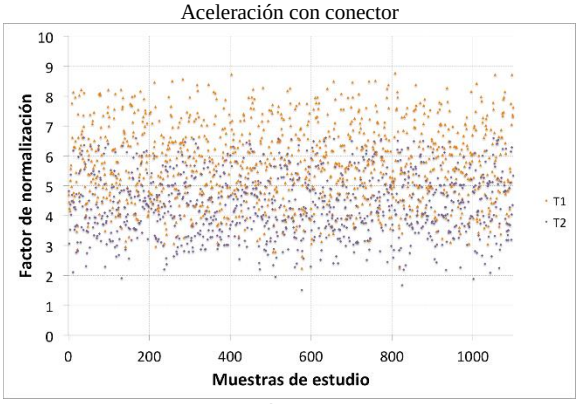
Aceleración sin conector



Aceleración con conector

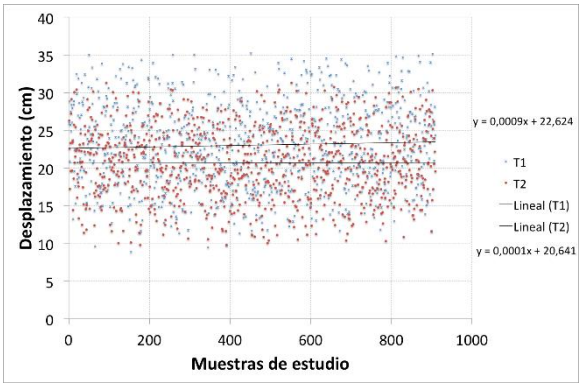


Desplazamientos Normalizado

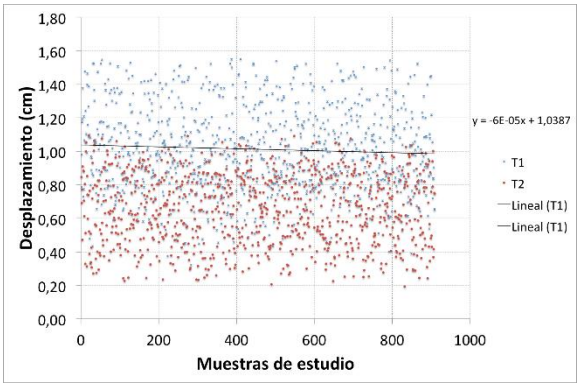


Aceleración normalizado

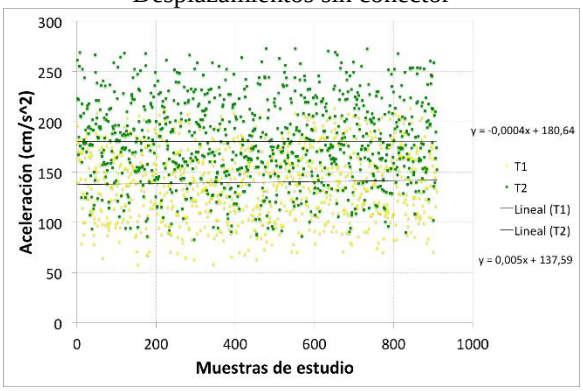
Figura 4. Respuesta de sistemas bajo sismos intermedios (caso cuando α = 4 β =0,15).



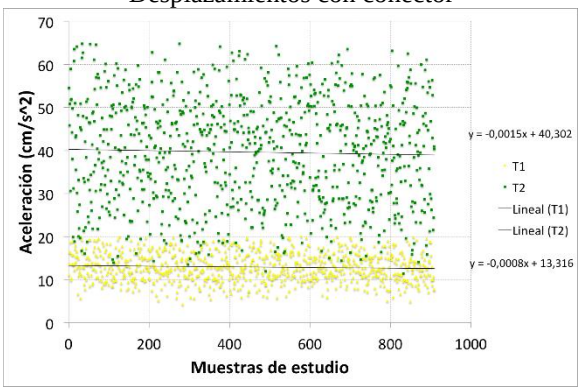
Desplazamientos sin conector



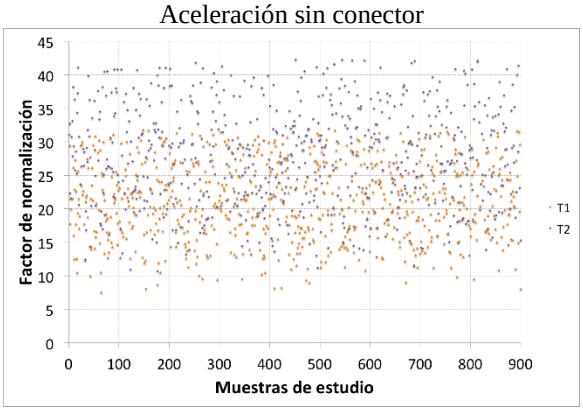
Desplazamientos con conector



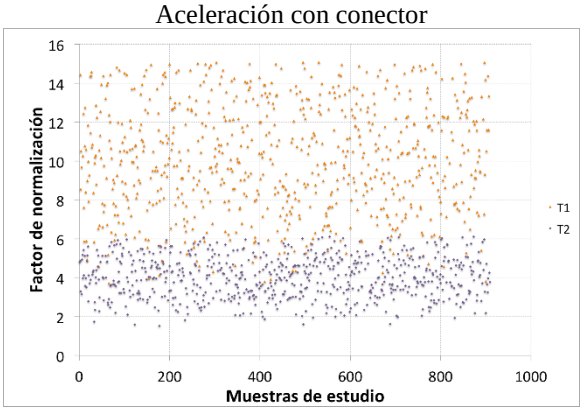
Aceleración sin conector



Aceleración con conector



Desplazamientos normalizado



Aceleración Normalizado

Figura 5. Respuesta de sistemas bajo sismos largos (caso cuando $\alpha = 1{,}2$, $\beta = 8$).

Se muestran algunos resultados más relevantes, en donde las figuras 3, 4 y 5 indican que las respuestas de ambas estructuras son realmente reducidas al utilizar este tipo de conector viga. Los resultados correspondientes al caso 3 muestran que la respuesta del conector disminuye considerablemente los desplazamientos y la aceleración (ver figura 5). Para el caso de la estructura más flexible (la 1), se puede observar que siempre reduce la respuesta. El nivel de reducción de la respuesta depende del valor de la relación de β, es decir, entre mayor sea el valor, es mayor la reducción de los desplazamientos.

Para describir de manera aproximada la tendencia de resultados la muestra de datos se ajusta por medio de una regresión lineal con el fin de encontrar una regla que determine de

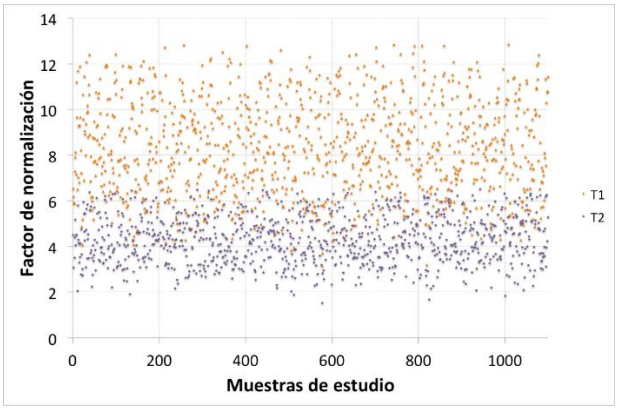
forma general el comportamiento de todos los casos de estudio.

Dadas las características de las combinaciones del cálculo anteriormente descritas según la tabla 1, se hizo el análisis de cada una de ellas obteniendo los desplazamiento y las aceleraciones sin contar con el elemento conector y posteriormente se calculó con él, en donde se muestra la tabla 2, los resultados de los desplazamientos, y la aceleración de ambas estructuras con las condiciones antes descritas.

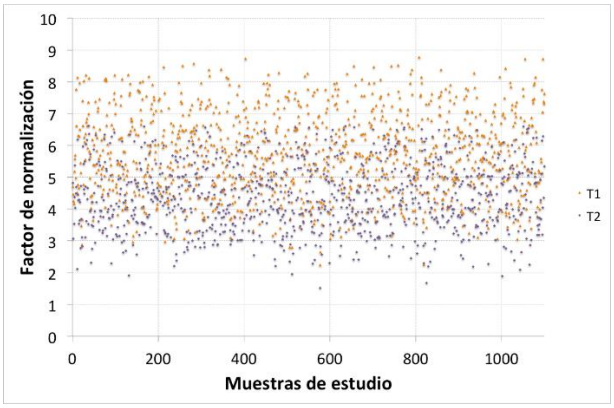
Tabla 2. Resumen del comportamiento de las estructuras.

Caso	Sismos	Sin conector				Con conector			
		Desp 1 (cm)	Desp 2 (cm)	Aceleración 1 (cm/s^2)	Aceleración 2 (cm/s^2)	Desp 1 (cm)	Desp 2 (cm)	Aceleración 1 (cm/s^2)	Aceleración 2 (cm/s^2)
C1	*Largos*	27.35	10.77	77.07	482.98	1.10	0.70	8.30	37.65
	Intermedios	7.40	0.34	234.77	169.87	0.81	0.07	37.25	35.85
	Cortos	6.99	0.21	664.36	319.01	0.79	0.05	93.05	88.15
C2	*Largos*	27.78	10.86	78.94	487.88	1.17	0.78	8.75	35.23
	Intermedios	7.44	0.34	235.23	171.62	0.81	0.07	37.49	36.70
	Cortos	6.80	0.21	652.39	321.00	0.79	0.05	93.40	89.02
C3	*Largos*	25.16	22.53	153.32	195.52	1.11	0.78	14.38	46.44
	Intermedios	3.38	2.25	200.65	190.95	1.03	0.31	81.03	77.93
	Cortos	1.81	1.12	451.33	404.63	0.88	0.32	261.72	250.27

En las figuras 6 y 7, se aprecia los desplazamientos y la aceleración normalizados para los casos; de sismos intermedio y largos siendo los más representativos del muestreo.

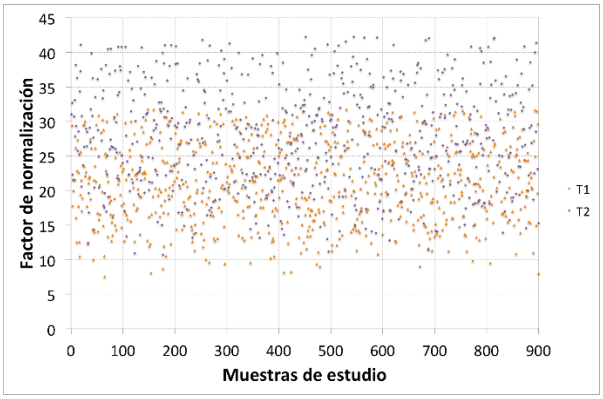


Desplazamiento normalizado

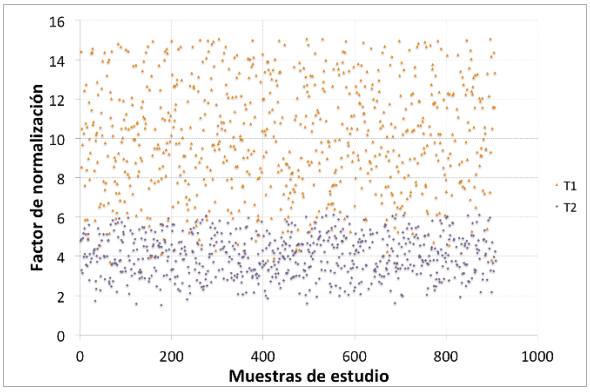


Aceleración normalizado

Figura 6. Respuesta de sistemas bajo sismos intermedios (caso cuando $\alpha = 4$, $\beta = 0{,}15$).



Desplazamiento normalizado



Aceleración normalizado

Figura 7. Respuesta de sistemas bajo sismos largos (caso cuando $\alpha = 1{,}2$, $\beta = 8$).

IV. Conclusiones

El comportamiento de dos estructuras adyacentes de un grado de libertad (S1GL) conectada con un elemento viga (ver figura 1) para un suelo firme (características antes descritas) y con diferentes consideraciones de tipo de sismo (ver tabla 1) fueron investigadas.

Como se puede observar en los resultados, es evidente que, al incorporar el conector a las estructuras adyacentes, los desplazamientos son menores a la respuesta generada en las mismas estructuras sin el uso de estos dispositivos.

El algoritmo de selección óptima para el conector, considera que no existen efectos de segundo orden si la carga crítica de pandeo es mayor que la resistencia de fluencia, de tal manera que la falla solamente ocurre bajo carga axial esto debido al tipo de apoyo en sus extremos (articulaciones).

A pesar de no evaluar los efectos no lineales de ambas estructuras (1, 2) se espera que el uso de conectores externos mejore el desempeño de los edificios y reduzcan el daño en los mismos durante un evento sísmico debido al golpeteo de las estructuras.

V. Agradecimientos

La investigación se realizó dentro de un convenio de intercambio y cooperación académica existente entre la Universidad Autónoma de San Luis Potosí UASLP (México) y la Universidad Estatal de Automóviles y Carreteras de Siberia SIBADI (Omsk, Rusia).

VI. Referencias

Armouti, (2015) “Earthquake Engineering, Theory and implementations with the 2015 International Building Code, 3rd.

Barmo, A. Mualla, I., Hsan, H. (2015), “The Behavior of MultiStory Buildings Seismically Isolated. (Hybrid Isolation: Friction, Rubber and Rotational Friction Dampers)” *Open Journal of Earthquake Research*, Vol.04 No.01 (2015), Article ID:52406,12.

Bhaskararaoo A., Jangid R. (2007) “Optimum Viscous Damper for Connecting Adjacent S1GL Structures for Harmonic and Stationary White-Noise Random Excitations”. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(4), pp. 563-571, 2007.

Boore D.M. (1983) “Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra”. *Bulletin of Seismological Society of America,* 73(6A): pp1865-1894.

Chopra A. (2001), “Dynamics of structures; Theory and applications to earthquakes engineering” Second edition, Prentice Hall, USA, pp. 197.

Clough R., Penzien J. (2003) “Dynamics of structures*”,* Berkeley, USA, pp. 260.

Dzhinchvelashvili G. A., Kolesnikov A. V., Dzerzhinsky R. (2009) *Análisis crítico y perspectivas de desarrollo de la teoría moderna de resistencia sísmica de estructuras* // Construcción sismorresistente y seguridad de estructuras N. 3 M. VNIINTPNB, 21-24) (en Ruso).

Gere J. M.; (2003). “Mecánica de materiales”. Sexta edición. Thomson, México. pp. 46-48, 350-363.

IMCA, Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, AC (2014), “Manual de construcción en acero”, 5 edición, ed. LIMUSA.

Makita K., Christenson R., Seto K., Watanabe T. (2007). “Optimal Design Strategy of Connected Control Method for Two Dynamically Similar Structures”. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(12), pp. 1247-1257.

Miyamoto H.K., Gilani A.S.J. (2014), “Applications of Seismic Dampers to Special Moment Frames” Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering July 21-25, NCEE Anchorage, Alaska.

Pulido-Delgado J.L., Martín Duran-García H., Rodríguez-Cuevas C. (2012). “Respuesta sísmica de estructuras adyacentes conectadas por amortiguadores viscosos lineales” *Ingeniería Investigación y Tecnología*. Vol. XIII, No. 2, pp. 227-235.

Saragoni G.R., Hart G.C. (1974). “Simulation of Artificial Earthquakes”. *Earthquakes Engineering and Structural Dynamics,* 2(3):249-267.

Zhu H., Iemura H. (2000). “A Study of Response Control on the Passive Coupling Element Between two Parallel Structures”. *Structural Engineering & Mechanics*, 9(4), pp. 383-396.