

## Respuesta sísmica de estructuras adyacentes conectadas por amortiguadores viscosos lineales

### *Seismic Response of Adjacent Structures Connected by Linear Viscous Dampers*

Pulido-Delgado J.L.

Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí,  
San Luis Potosí, México  
Correo: [jpulido@uaslp.mx](mailto:jpulido@uaslp.mx)

Rodríguez-Cuevas C.

Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí,  
San Luis Potosí, México  
Correo: [clemente.rodriguez@uaslp.mx](mailto:clemente.rodriguez@uaslp.mx)

Martín Duran-García H.

Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí,  
San Luis Potosí, México  
Correo: [hduran@uaslp.mx](mailto:hduran@uaslp.mx)

Información del artículo: recibido: diciembre de 2010, aceptado: febrero de 2011

#### Resumen

Este estudio muestra la respuesta sísmica de dos estructuras adyacentes conectadas por amortiguadores lineales (con 5% de amortiguamiento), se tratan dos sistemas de un grado de libertad (SDOF) unidos el uno al otro por un amortiguador viscoso pasivo, los cuales fueron sometidos a un análisis de historias de tiempo. La excitación sísmica fue modelada como un proceso arbitrario no estacionario y la respuesta sísmica fue obtenida por simulaciones de Monte Carlo. En el caso de las estructuras conectadas por un amortiguador viscoso lineal, se encontró que las expresiones aproximadas existentes para evaluar la respuesta sísmica son cualitativamente correctas en sentido de que indican de manera correcta en qué casos el control de conexión es conveniente.

#### Abstract

*This study shows the seismic response of two adjacent structures connected by linear viscous dampers (5% damped) SDOF systems linked to one another by a passive viscous damper was comprehensively evaluated through time history analysis. The seismic excitation was modelled as a non stationary random process, and the response of the structures was obtained by Monte Carlo simulations. It was found that existing approximate expressions to evaluate the seismic response are qualitatively correct in the sense that they rightly indicate in which cases the coupling control approach is indeed convenient.*

#### Descriptorios

- estructuras adyacentes
- respuesta sísmica
- estructuras
- amortiguador viscoso lineal

#### Keywords

- adjacent structures
- seismic response
- structures
- linear viscous dampers

## Introducción

Un enfoque creativo para el control de la respuesta sísmica de las estructuras adyacentes de un edificio de varios pisos, consiste en vincular los niveles con dispositivos de enlace. Al hacerlo, es posible en principio, controlar la respuesta de ambas estructuras al mismo tiempo que es precisamente el atractivo del estudio. La idea de vincular estructuras adyacentes una a otra con dispositivos pasivos ha sido considerada también como una estrategia para prevenir o mitigar los efectos de golpeteo (Westemo, 1989) y, más recientemente, como un medio para aplicar el llamado “*mass proportional*” complementario a un sistema de amortiguamiento (Trombetti y Silvestre, 2004).

Las investigaciones antes mencionadas, también han demostrado que la eficacia de la propuesta de control de conexión depende en gran medida de las propiedades de los edificios adyacentes (por ejemplo, periodos naturales y número de pisos) y en las propiedades de los conectores (por ejemplo, la relación fuerza-desplazamiento y la altura la distribución del mismo). El número de combinaciones posibles de la construcción y propiedades del conector es prácticamente ilimitado, pero sólo un número relativamente pequeño de casos fueron considerados en investigaciones anteriores (Zhu y Iemura, 2000; Luco y De Barros, 1988; Trombetti y Silvestre, 2004). En consecuencia, todavía existe la necesidad de caracterizar exhaustivamente la eficacia de la propuesta de control de conexión en función de las propiedades antes mencionadas, una necesidad que se ha abordado en un número limitado de estudios (Luco y De Barros, 1988). El sistema estructural de particular interés en este trabajo (es decir, el sistema se compone de dos estructuras adyacentes, o sistemas de un grado de libertad SDOF lineales conectados por un amortiguador viscoso) aparentemente fue investigado por Zhu y Lemura (2000). En esos estudios, las condiciones para minimizar la respuesta de una sola de las estructuras adyacentes (la estructura primaria) fueron analizadas y la estructura fue considerada como una simple estructura auxiliar. Más tarde, Hwang *et al.* (2007) investigaron las propiedades de amortiguación del sistema, Bhaskararao y Jangid (2007) obtuvieron expresiones aproximadas para la respuesta de la media cuadrada fija teniendo en cuenta que:

- a) la excitación es un ruido blanco estacionario y
- b) los sistemas SDOF adyacentes son amortiguados.

El objetivo de este estudio es proporcionar información sobre la eficacia de la propuesta de control de conexión,

a veces conocido como el “método de control conectado” (Makita *et. al.*, 2007), para controlar la respuesta sísmica de estructuras adyacentes conectadas por amortiguadores lineales.

## Desarrollo

La excitación sísmica se modela como un proceso de Gauss, que es un proceso aleatorio no estacionario de media cero  $\ddot{U}_g(t)$ , cuya función de densidad espectral de potencia  $S_{\ddot{U}_g}(t, \omega)$  viene dada por:

$$S_{\ddot{U}_g}(t, \omega) = |f_e(t)|^2 S_g(\omega) \quad (1)$$

donde:

- $t$  denota el tiempo,
- $\omega$  indica la frecuencia circular,
- $f_e(t)$  es un modulador (también conocido como “ventana”) de la función del tiempo y
- $S_g(\omega)$  es una función de densidad espectral de potencia estacionaria.

La función de la modulación  $f_e(t)$ , se supone que es igual a la inicialmente propuesta por Saragoni y Hart (1974) y más tarde calibrado por Boore (1983).

En este estudio, las constantes  $\eta$  y  $\xi$  son iguales a 0.05 y 0.20, respectivamente,  $T_D$  es la duración igual a 30 segundos. La función de densidad de potencia espectral (PSD) se supone igual a la definida por la función de Kanai-Tajimi (también conocida como función Clough-Penzien, (2003).

$$S_g(\omega) = \left[ \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \right] \left[ \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \right] S_o \quad (2)$$

en este estudio, las constantes  $\omega_g$ ,  $\xi_g$ ,  $\omega_f$ ,  $\xi_f$  y  $S_o$ ; son igual a 12.50 rad/s, 0.60, 2.00 rad/s, 0.70 y  $S_o = 200 \text{ cm}^2/\text{seg}^3$ , respectivamente. La frecuencia principal  $\omega_m$  (es decir, la frecuencia con que  $S_g(\omega)$  toma su valor máximo) es igual a 10.26 rad/s, y los periodos principales  $T_m$  asociados con la frecuencia principal de 0.60s; considerando las aceleraciones sísmicas registradas para un suelo firme. El sistema estructural considerado en este estudio está representado esquemáticamente en la figura 1, en donde las dos estructuras adyacentes y los sistemas lineales SDOF “1” y “2” están conectados entre sí

por un amortiguador viscoso. Cada sistema SDOF se caracteriza por sus periodos naturales  $T$  y el coeficiente de amortiguamiento  $\xi$ . La relación de los periodos naturales está dada por:

$$\beta = \frac{T_1}{T_2} \tag{3}$$

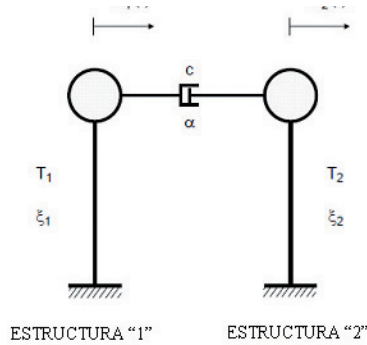


Figura 1. Sistema lineal de edificios conectados por amortiguamiento viscoso

Se supone que la estructura "1" siempre es la más flexible, por lo tanto,  $T_1 > T_2$  y  $\beta > 1$ . Del mismo modo,  $m_1$  es la masa de la estructura "1" y  $m_2$  es la masa de la estructura "2", la relación de masa está dada por:

$$\mu = \frac{m_1}{m_2} \tag{4}$$

Las dos cantidades de respuesta consideradas son: el desplazamiento (con relación al suelo) y la aceleración absoluta. El primero puede asociarse con el nivel de daño en la estructura principal y la otra puede estar asociada con la demanda sísmica en los componentes estructurales, unidos a la estructura principal. Dadas las variables en el tiempo de respuesta del sistema acoplado a cada realización del proceso de excitación, se obtiene numéricamente una solución del problema (integración directa, algoritmo modificado tipo Newmark) y la ecuación correspondiente de movimiento, que se ha presentado en estudios anteriores (Zu y Iemura, 2000). Para una realización dada del proceso de excitación, la demanda del tiempo relacionada con la fuerza del conector viene dada por:

$$f(t) = c \operatorname{sign}(v_2(t) - v_1(t)) |v_2(t) - v_1(t)|^\alpha \tag{5}$$

dada la función  $\operatorname{sign}$ ,  $v_1(t)$  y  $v_2(t)$  son las variables de las respuestas de velocidad en el tiempo de las estructuras de "1" y "2" (con referencia al suelo),  $c$  y  $\alpha$ , son el coeficiente de amortiguamiento y un exponente de la veloci-

dad del conector del amortiguamiento, respectivamente; el correspondiente valor medio de la respuesta de  $F_d$ . En el caso particular de que el amortiguador de la conexión sea lineal (es decir,  $\alpha = 1$ ), la ecuación anterior se reduce a:

$$f(t) = c(v_2(t) - v_1(t)) \tag{6}$$

Se realizaron un total de 1200 procesos de excitación y los valores de los factores de amortiguamiento  $\xi_1$  y  $\xi_2$  fueron en todos los casos iguales a 5%.

### Evaluación preliminar de la eficacia de control de conexión

Como se mencionó antes, Bhaskararao y Jangid (2007) obtuvieron expresiones cercanas para la respuesta media cuadrática estacionaria del sistema acoplado, como se ilustra en la figura 1; en donde se considera que:

- a) la excitación es un ruido blanco estacionario,
- b) los sistemas SDOF adyacentes no son amortiguados (es decir,  $\xi_1 = \xi_2 = 0$ ) y
- c) el conector de amortiguamiento es lineal.

Con base en estas expresiones, Bhaskararao y Jangid (2007) obtuvieron las ecuaciones que dan el valor óptimo de  $c_{Bf}$  (en otras palabras,  $c_{Bf}$  es el valor de  $c$  que minimiza la respuesta). El valor óptimo  $c_{Bf}$  dependerá de la cantidad de respuesta (por ejemplo, el valor de  $c$  que minimiza el desplazamiento de respuesta no es igual al valor de  $c$  que minimiza la respuesta de aceleración absoluta) en el sistema SDOF considerado (es decir, el valor de  $c$  que minimiza la respuesta del sistema "1" no es igual al valor de  $c$  que minimiza la respuesta del sistema "2").

Curiosamente, basándose en la observación de los resultados numéricos, Bhaskararao y Jangid (2007) señalan que cuando el coeficiente de amortiguamiento de los dos sistemas SDOF es relativamente pequeño ( $\xi_1, \xi_2 \leq 0.05$ ), la respuesta de la media cuadrada correspondiente es esencialmente igual a la que corresponde al caso en  $\xi_1 = \xi_2 = 0$ , siempre que el valor del coeficiente de amortiguamiento  $c$  del conector se encuentra cerca del valor óptimo de  $c_{Bf}$ . Suponiendo entonces que la respuesta de la media cuadrada es ligeramente amortiguada junto al sistema SDOF que viene dada por las expresiones obtenidas por Bhaskararao y Jangid (2007), y suponiendo que la relación de la respuesta media de los picos (durante un tiempo limitado) a la raíz media cuadrada (RMS) la respuesta es una constante (un supuesto importante de la conocida y ampliamente utili-

zada *regla combinación modal* (CQC) (Wilson *et al.*, 1981). Expresiones aproximadas para evaluar preliminarmente la eficacia del control de conexión se pueden obtener de la siguiente manera: cuando un amortiguador, desacoplado en el sistema SDOF, está sometido a la excitación estacionaria de ruido blanco, la respuesta de RMS (media cuadrada) correspondiente al desplazamiento viene dada por Clough y Pienzen (2003) como:

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{T^3 S_o}{16 \xi \pi^2}} \quad (7)$$

y se puede demostrar que la RMS correspondiente de la respuesta de aceleración absoluta es igual a:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\pi^2 S_o (1 + 4 \xi^2)}{\xi T}} \quad (8)$$

usando las ecuaciones (7) y (8) y las expresiones aproximadas para la respuesta de la media cuadrada acoplado obtenidas por Bhaskararao y Jangid (2007):

$$\sigma_{x1opt}^2 = \frac{2\pi S_o}{\omega_1^3 (\beta^2 - 1)} \sqrt{\frac{(1 + \mu)^3}{\mu}} \quad (9)$$

$$\sigma_{x2opt}^2 = \frac{2\pi S_o}{\omega_2^3 (\beta^2 - 1)} \frac{\beta^2 \sqrt{(1 + \mu)^3}}{\bar{\omega}}$$

las relaciones aproximadas de la RMS junto a la respuesta de RMS desacoplados se dan por:

$$C_{D-1} = \sqrt{\frac{4 \xi_1}{\beta^2 - 1} \sqrt{\frac{(1 + \mu)^3}{\mu}}} \quad (10)$$

(respuesta de desplazamiento del sistema "1")

$$C_{D-2} = \sqrt{\frac{4 \xi_2}{\beta^2 - 1} \frac{\beta^2 \sqrt{(1 + \mu)^3}}{\mu}} \quad (11)$$

(respuesta de desplazamiento del sistema "2")

$$C_{A-1} = \sqrt{\frac{4 \xi_1 (\beta^2 - \mu)}{(4 \xi_1^2 + 1)(\beta^2 - 1)} \sqrt{\frac{1 + \mu}{\mu}}} \quad (12)$$

(respuesta de la aceleración absoluta del sistema "1")

$$C_{A-2} = \sqrt{\frac{4 \xi_2 (\beta^2 + \mu)}{(4 \xi_2^2 + 1)(\beta^2 - 1)} \sqrt{\frac{1 + \mu}{\mu}}} \quad (13)$$

(respuesta de la aceleración absoluta del sistema "2")

Las cantidades  $C$  en las ecuaciones anteriores se pueden considerar como "factores de modificación de respuesta", en el sentido de que indican directamente el efecto de la conexión del amortiguador en la respuesta sísmica de un sistema adyacente de SDOF. Los valores de  $C$  menores que la unidad indican que la adición de la respuesta del conector de amortiguamiento se reduce; mientras que se indique lo contrario los valores de  $C$  son mayores que la unidad. Además, el valor menor de  $C$  es el más beneficioso por el efecto del conector de amortiguamiento (es decir, mayor nivel de reducción de la respuesta). Hay que tener en cuenta que:

- Las ecuaciones 10-13 se obtienen tomando en cuenta el caso particular de que el valor del coeficiente de amortiguamiento  $C$  (figura 1) es igual a la  $c_{Bj}$ , el valor óptimo de  $C$  en las condiciones consideradas por Bhaskararao y Jangid (2007) (excitación de ruido blanco estacionario,  $\xi_1 = \xi_2 = 0$ ) y
- Los valores de  $C$  dados por las ecuaciones 10-13 deben considerarse como una aproximación, ya que se obtuvieron por medio de la respuesta de RMS no amortiguada (es decir,  $\xi_1 = \xi_2 = 0$ ), junto al sistema SDOF para la respuesta de RMS del sistema amortiguado desacoplado SDOF ( $\xi_1 = \xi_2 = 0$ ).

Un gran conjunto de valores de  $C$  se calculó con las ecuaciones 10-13 teniendo en cuenta la amplia gama de valores de los parámetros pertinentes (relación de períodos  $\beta$  y la relación de masas  $\mu$ ) (tabla 1). Los factores de amortiguamiento  $\xi_1, \xi_2$  se hacen iguales a 0.05. Los resultados se resumen en las regiones de la banda sombreada que se muestra en la figura 2.

En la figura 2, las bandas más oscuras (rojas o  $C > 1.00$ ) indican las combinaciones de valores de  $\beta$  y  $\mu$  cuando el control de conexión no es conveniente. Las bandas que siguen menos oscuras (verdes o  $0.80 \leq C \leq 1.00$ ), por su parte, indican las combinaciones de valores de  $\beta$  y  $\mu$  cuando el control de conexión es realmente eficaz, los otros tres sombreados menos oscuros indican mayor reducción de los niveles de respuesta. En el caso de la estructura más flexible (es decir, la estructura "1"), se puede observar que el enfoque de control de conexión siempre reduce la respuesta, excepto cuando el valor de la relación del periodo  $\beta$  es cercana a la unidad. El nivel de reducción de la respuesta depende principalmente del valor de  $\beta$  (en un sentido general, cuanto mayor sea el valor de  $\beta$ , mayor es el nivel de reducción de respuesta de  $\mu$ ) y sólo marginalmente depende de la masa (para un valor dado de  $\beta$ , el nivel de reducción de la respuesta generalmente aumenta con la disminución de los valores de  $\mu$ ). En el caso de la estructura rígida

Periodos Naturales	Caso "A" $\beta = 4, \mu = 2$	Caso "B" $\beta = 4, \mu = 0.15$	Caso "C" $\beta = 1.2, \mu = 8$
Largo	$T_1 = 3.60$ seg $T_2 = 0.90$ seg	$T_1 = 3.60$ seg $T_2 = 0.90$ seg	$T_1 = 2.40$ seg $T_2 = 2.00$ seg
Intermedio	$T_1 = 0.96$ seg $T_2 = 0.24$ seg	$T_1 = 0.96$ seg $T_2 = 0.24$ seg	$T_1 = 0.66$ seg $T_2 = 0.55$ seg
Corto	$T_1 = 0.48$ seg $T_2 = 0.12$ seg	$T_1 = 0.48$ seg $T_2 = 0.12$ seg	$T_1 = 0.24$ seg $T_2 = 0.20$ seg

Tabla1. Resumen de las combinaciones de  $\beta, \mu, T_1$  y  $T_2$

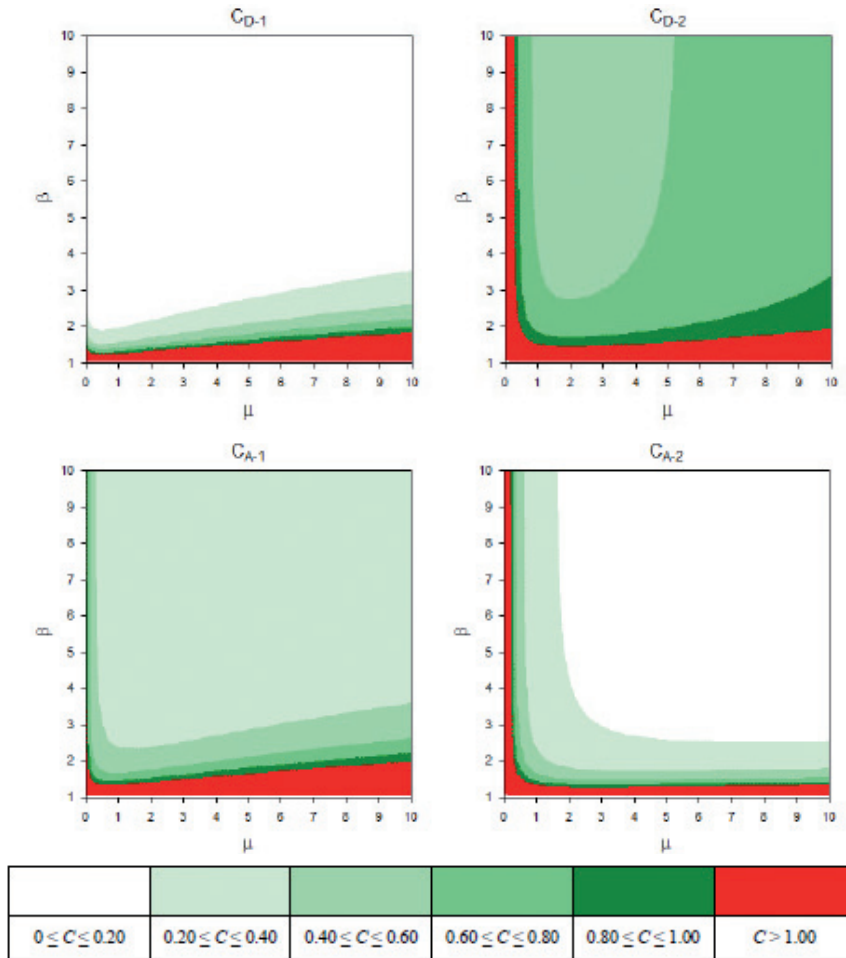


Figura 2. Regiones de valores del factor de modificación de la respuesta aproximada C

(es decir, la estructura "2") se observa que el control de conexión reduce la respuesta, excepto cuando: a) el valor de la relación del periodo  $\beta$  es cercana a la unidad y b) el valor de la proporción de la masa  $\mu$  es relativamente baja. Esta última observación significa que el enfoque de control de conexión no reduce la respuesta de la estructura más rígida cuando su masa es mayor que la masa de la estructura más flexible, independientemente del valor de la relación del periodo. El nivel de reducción de respuesta en la estructura "2" no sólo depende

del valor de  $\beta$ , sino también del valor de  $\mu$ . En el caso de la respuesta de la aceleración absoluta, la eficacia de la propuesta de control de conexión aumenta generalmente con valores crecientes de los  $\beta$  y  $\mu$ . En el caso de la respuesta de desplazamiento, el nivel de reducción de la respuesta más general aumenta con el incremento de los valores de  $\beta$ , pero no parece ser ahora un valor óptimo de  $\mu$ , aproximadamente igual a 2.

Para concluir, es quizás oportuno mencionar que la ineficacia de la propuesta de control de conexión ocurre



cuando el valor de la relación del periodo es cercana a la unidad (es decir, cuando los periodos naturales de las estructuras adyacentes están cerca uno del otro como fue señalado por Christenson., *et al* (2006).

## Resultados y discusión

Por las observaciones realizadas, es de interés investigar la respuesta a la excitación sísmica real, que no es estacionaria ni tiene las características de ruido blanco. Lamentablemente no fue posible considerar todas las posibles combinaciones de todos los valores posibles de los parámetros pertinentes ( $\beta$  y  $\mu$ ). Sin embargo, basándose en los resultados descritos, tres casos de interés particular ("A", "B" y "C") fueron seleccionados y examinados exhaustivamente. En el primer caso ( $\beta = 4$ ,  $\mu = 2$ ) la propuesta de control de conexión fue reducir significativamente la respuesta de ambas estructuras. En el segundo caso ( $\beta = 4$ ,  $\mu = 0.15$ ), la propuesta de control de conexión fue reducir significativamente la respuesta de la estructura "1", pero no la respuesta de la estructura "2" (de hecho, la evaluación preliminar realizada en la sección anterior indica que la respuesta de la estructura "2" en realidad aumenta en este caso). Por último, en el tercer caso, ( $\beta = 1.2$ ,  $\mu = 8$ ) la propuesta de control de conexión no espera reducir significativamente la respuesta de ninguna estructura (de nuevo, la evaluación preliminar realizada en la sección anterior indica que la respuesta de ambas estructuras realmente aumenta en este caso). En el primer caso,  $T_1$  y  $T_2$  son "largos" en el sentido de que sus valores son mayores que el valor de  $T_m$ . En el segundo caso,  $T_1$  y  $T_2$  se consideran como "intermedios" en el sentido de que  $T_1 > T_m$  pero  $T_2 < T_m$ . Por último, en el tercer caso,  $T_1$  y  $T_2$  son "cortos" en el sentido de que sus valores son inferiores a  $T_m$ . Las combinaciones resultantes de los valores de  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $T_1$  y  $T_2$  se resumen en la tabla 1. Conviene recordar que el periodo principal de la excitación sísmica considerado en este estudio es  $T_m = 0.60$  s.

La respuesta de los sistemas adyacentes SDOF lineales ( $\xi_1 = \xi_2 = 0.05$ ) conectados por un amortiguador viscoso *lineal*, sometido a la excitación sísmica y considerados en este estudio, se obtiene con simulaciones de Monte Carlo, considerando los valores de  $C$  que van desde 0 (para un sistemas SDOF desacoplado) hasta un valor aproximado de tres veces el valor óptimo de  $c_{BJ}$  propuesto por Bhaskararao y Jangid (2007). En todos los casos, el valor de la masa de la estructura rígida fue igual a la unidad y los valores de las propiedades estructurales restantes se calcularon teniendo en cuenta los valores correspondientes de  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $T_1$  y  $T_2$ ,  $\xi_1$  y  $\xi_2$  y los valores de los factores de respuesta de modificación  $C$

se obtuvieron numéricamente, dividiendo la media de los picos junto a la respuesta de la media de los picos desacoplada. Los resultados se resumen en la figuras 3, 4 y 5, donde los valores de  $C$  están normalizados por el valor correspondiente de  $c_{BJ}$ . Para propósitos de comparación, los valores aproximados de  $C$ , se calcularon dividiendo el RMS junto a la respuesta obtenida por Bhaskararao y Jangid (2007) por el RMS desacoplado (ecuaciones 7 y 8), también incluidos. Cabe señalar que los valores aproximados de  $C$  se calculan para todos los valores de  $C$ , no sólo para  $c_{BJ}$ . Por lo tanto, las expresiones derivadas de Bhaskararao y Jangid (2007), son válidos para  $\xi_1 = \xi_2 = 0$ , se puede suponer también que es válida para  $\xi_1 = \xi_2 > 0$  cuando  $C = c_{BJ}$ . Cabe señalar que los valores aproximados de  $C$  dependen del valor de la relación de periodos  $\beta$ , pero son independientes de los valores reales de  $T_1$  y  $T_2$ , (es por eso que sólo hay una serie de valores aproximados de  $C$  en cada uno de las regiones muestra (figuras 3-5).

Los resultados correspondientes al caso "A" (figura 3) indican que la respuesta de ambas estructuras es realmente reducida. Los resultados correspondientes al caso "B" (figura 4) muestran que la propuesta de control de conexión reduce la respuesta de la estructura "1", pero no (al menos no significativamente) la respuesta de la estructura "2". Por último, los resultados correspondientes al caso "C" (figura 5) indican que, según lo previsto, la propuesta de control de conexión no reduce la respuesta de ninguna estructura. Los resultados de la muestra en las figuras 3-5; sin embargo, también indican que el nivel de reducción de la respuesta estimada por las ecuaciones 10 a 13 puede ser cuantitativamente incorrecto.

Las ecuaciones 10 a 13 predicen que el control de conexión aumenta la respuesta (la estructura "2" en el caso de "B", ambas estructuras en el caso de "C"), las simulaciones de Monte Carlo, en cambio, indican una muy pequeña (casi imperceptible) reducción de respuesta alcanzada. En las regiones correspondientes a estas situaciones, los valores aproximados de  $C$  están a veces fuera de la escala de las regiones. Los resultados se muestran en las figuras 3-5, también revelan que el nivel de reducción de respuesta no depende de la relación entre los periodos naturales  $T_1$ ,  $T_2$  y el periodo principal de la excitación  $T_m$ , en particular, para situaciones en las que se consiguen reducciones de respuesta significativa. El enfoque de control de conexión resultó ser más eficaz para reducir la respuesta de la estructura más flexible (es decir, la estructura de "1"), cuando ambos  $T_1$ ,  $T_2$  son "cortos", y más eficaz para reducir la respuesta de la estructura rígida (es decir, la estructura "2"), cuando ambos  $T_1$ ,  $T_2$  son "largos".

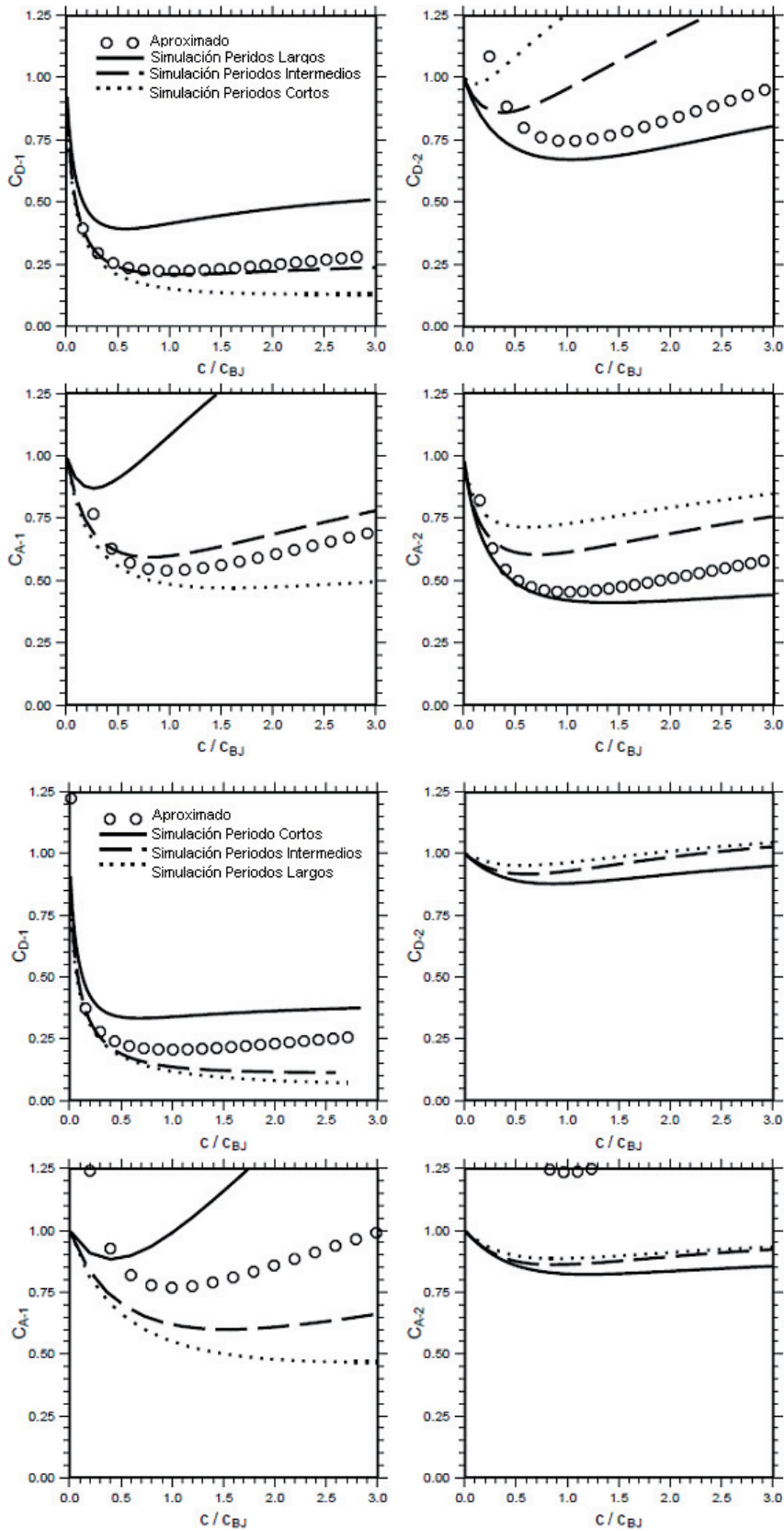


Figura 3. Comparación entre la respuesta de factores modificados C: caso "A" ( $\beta=4, \mu=2$ ) para valores aproximados (Bhaskararao y Jangid, 2007), periodos largos, intermedios y cortos

Figura 4. Comparación entre la respuesta de factores modificados C: caso "B" ( $\beta=4, \mu=0.15$ ) para valores aproximados (Bhaskararao y Jangid, 2007), periodos largos, intermedios y cortos

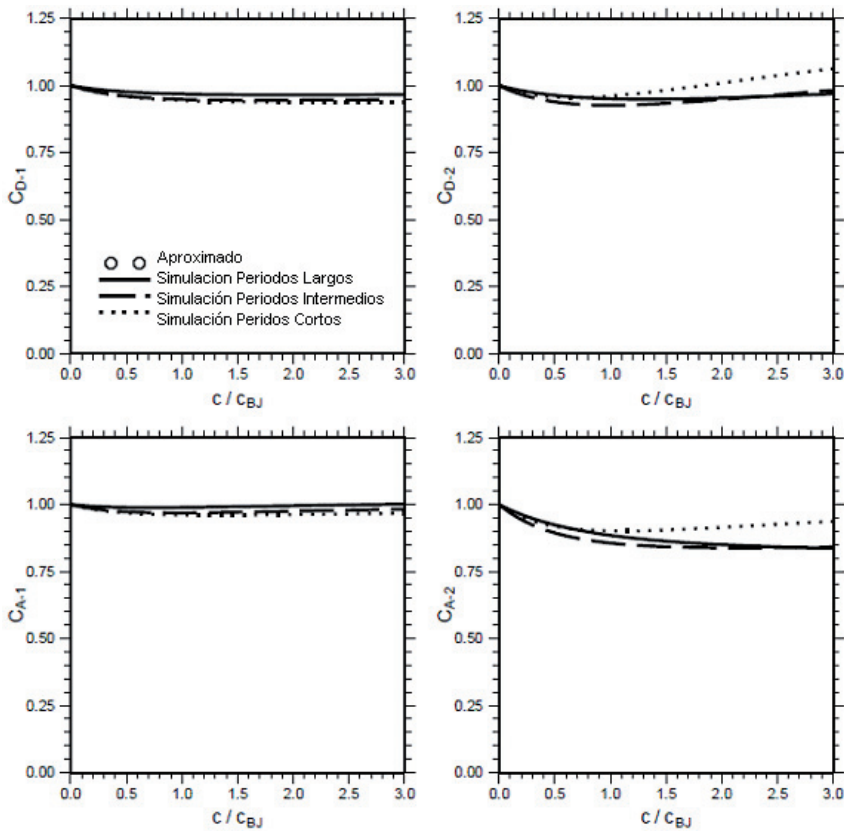


Figura 5. Comparación entre la respuesta de factores modificados C: caso “C” ( $\beta=1.2, \mu=8$ ) para valores aproximados (Bhaskararao y Jangid, 2007), periodos largos, intermedios y cortos

Los resultados mostrados en la figura 3 son alentadores en el sentido de que muestran cuándo los valores de  $\beta$  y  $\mu$  son adecuados, entonces es realmente posible controlar la cantidad de respuesta en ambas estructuras al mismo tiempo. No hay que olvidar; sin embargo, que los valores de  $C$  se normalizaron por el valor de  $C_{Bj}$ , que es diferente para cada cantidad de respuesta en cada estructura. Por lo tanto, las regiones mostradas en la figura 3 no proporcionan información sobre la gama de valores de  $C$ , ya que las cantidades de respuesta en am-

bas estructuras al mismo tiempo se reducen. Con el fin de abordar esta cuestión, los resultados de la figura 3 se representan de nuevo en un formato diferente en la figura 6. Se puede observar que efectivamente existe un rango de valores de  $C$  para que las reducciones se logran en las cantidades de respuesta de ambas estructuras (es decir, los valores de todos los factores  $C$  son menores que la unidad), o sea que resultó ser un rango relativamente pequeño de valores relativamente pequeños de  $C$ .

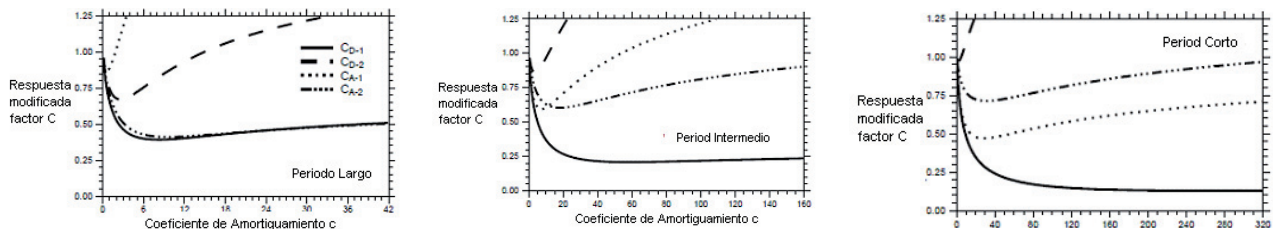


Figura 6. Comparación entre la respuesta de factores modificados C: caso “A” ( $\beta=4, \mu=2$ )



## Conclusiones

En este estudio, la respuesta sísmica de dos sistemas SDOF adyacentes, lineales (con 5% de amortiguamiento) para un suelo firme, conectado entre sí por un amortiguador viscoso pasivo fue ampliamente evaluado a través del análisis de la historia-tiempo. La excitación sísmica se modeló como un proceso aleatorio no estacionario y la respuesta de las estructuras se obtuvo mediante simulaciones Monte-Carlo. El amortiguador de conexión se caracteriza por su coeficiente de amortiguamiento  $C$  y su exponente velocidad  $\alpha=1$ . Si los periodos naturales de las estructuras adyacentes "1" y "2" son  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente, y  $T_1 > T_2$ , la eficacia de la propuesta de control de conexión puede caracterizarse en términos generales como sigue:

- Es posible reducir significativamente la respuesta de la estructura más flexible cuando  $T_1$  y  $T_2$  no están cerca uno de otro, sobre todo cuando ambos  $T_1$  y  $T_2$  son "cortos" respecto al periodo principal de la excitación.
- También es posible reducir significativamente la respuesta de la estructura más rígida, cuando  $T_1$ ,  $T_2$  no están cerca uno del otro y la masa de la rígida estructura no es significativamente mayor que la de la estructura más flexible, sobre todo cuando ambos  $T_1$  y  $T_2$  son "largos" respecto al periodo principal de la excitación.

## Referencias

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

- Boore D.M. Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra. *Bulletin of Seismological Society of America*, 73(6A):1865-1894, 1983.
- Christenson R., Spencer B., Johnson E., Seto K. Coupled Building Control Considering the Effects of Building/Connector Configuration. *Journal of Structural Engineering*, 132(6):853-863, 2006.
- Clough R., Penzien J. *Dynamics of structures*, Berkeley, USA, 2003, 260 p.
- Hwang J., Wang S., Huang Y. A Seismic Retrofit Method by Connecting Viscous Dampers for Microelectronics Factories. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(11):1461-1480, 2007.
- Luco J., De Barros F. Optimal Damping Between Two Adjacent Elastic Structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27(7):649-659, 1998.
- Makita K., Christenson R., Seto K., Watanabe T. Optimal Design Strategy of Connected Control Method for Two Dynamically Similar Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(12):1247-1257, 2007.
- Saragoni G.R., Hart G.C. Simulation of Artificial Earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2(3):249-267, 1974.
- Trombetti T., Silvestri S. Added Viscous Dampers in Shear-Type Structures: The Effectiveness of Mass Proportional Damping. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(2):275-313, 2004.
- Westemo B. The Dynamics of Inter Structural Connection to Prevent Pounding. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 18(5):687-699, 1989.
- Wilson E., Der-Kiureghian A., Bayo E. A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 9(2):187-194, 1981.
- Zhu H., Iemura H. A Study of Response Control on the Passive Coupling Element Between two Parallel Structures. *Structural Engineering & Mechanics*, 9(4):383-396, 2000.

## Semblanza de los autores

*José Luis Pulido-Delgado:* Ingeniero civil por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (1993). Obtuvo su maestría en ingeniería por la misma Universidad (1997), se doctoró por la Universidad Estatal de Construcción de Rostov, Rusia en 2001. Actualmente es profesor investigador de la UASLP.

*Clemente Rodríguez-Cuevas:* Ingeniero civil por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (2000). Obtuvo la maestría en ingeniería por el Departamento de Estudios de Posgrado de Facultad de Ingeniería de la UNAM en 2003. Es doctor por la Universidad Aix-Marseille III (2007). Actualmente es profesor investigador de la UASLP.

*Héctor Martín Durán-García:* Es ingeniero agrónomo especialista en maquinaria agrícola por la Universidad Autónoma Chapingo. Maestro en ingeniería mecánica por la Universidad de Guanajuato y doctor por la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente es profesor investigador de la UASLP.