

## DISEÑO DE SISTEMAS SISMORRESISTENTES DE CONTROL PASIVO UTILIZANDO ESTRATEGIA DE CONTROL ACTIVO PREDICTIVO

**Juan Pablo Ascheri, Marcelo Rubinstein, Oscar Möller**

*Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, (2000) Ciudad de Rosario, Argentina. jascheri@fceia.unr.edu.ar*

**Palabras Claves:** control de estructuras, dinámica estructural, control activo, control pasivo, control predictivo.

**Resumen.** La aplicación de técnicas de control activo de estructuras sismorresistente al diseño de dispositivos de control pasivo, resulta una metodología atractiva que en cierta medida trata de adicionar a las ventajas relativas del control pasivo (confiabilidad, economía inicial y de mantenimiento) los beneficios de poder ajustar los parámetros de los dispositivos de control pasivo a través de la optimización de las fuerzas de control generadas en el modelo de control activo.

En dicho marco conceptual en este trabajo se ha desarrollado un procedimiento para optimizar el diseño de dispositivos de control pasivo, en este caso de fluencia de acero y de fricción, basándose en modelos diseñados a través de la aplicación de técnicas de control activo. El procedimiento utiliza un conjunto de acelerogramas, generados aleatoriamente, enmarcados dentro de las particularidades de los acelerogramas esperables en una zona caracterizada por un estudio de microzonificación sísmica. Los resultados del modelo de control activo son utilizados para determinar las características de los dispositivos de control pasivo mediante la utilización de criterios de igualación de energía disipada entre ambos sistemas.

Como ejemplo, se muestra el diseño de control pasivo para un pórtico de hormigón armado de cinco pisos y dos vanos, ubicado dentro de la zona perteneciente al estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Mendoza. Se analiza la influencia del número de acelerogramas utilizados para el diseño, y se verifica el comportamiento de la estructura comparando las respuestas sin control, con dispositivos de fluencia de aceros y con dispositivos de fricción.

## 1 INTRODUCCIÓN

La tendencia actual de diseño sísmico es lograr sistemas estructurales que localicen la demanda sísmica de ductilidad en zonas con capacidad de deformación inelástica, en las que se concentra el daño de la estructura. Los disipadores de energía se pueden considerar como una continuación de esta tendencia. Los puntos donde se localiza la demanda sísmica corresponden en estos casos a las piezas mecánicas que disipan energía en forma estable y son fácilmente reemplazables.

En general, la reducción significativa de la respuesta estructural frente a los sismos severos empleando disipadores de energía depende de su número, disposición en el edificio, del tipo de disipador y de su correcto diseño. Es posible alcanzar reducciones de las fuerzas sísmicas similares a las de un diseño convencional evitando o minimizando el daño estructural y el de los elementos no estructurales.

Por otro lado, los sistemas de control activo han desarrollado procedimientos de reducción de vibraciones estructurales a través de la incorporación a la estructura de mecanismos alimentados por una fuente de energía exterior, lo que los hace capaces de ejercer un conjunto de fuerzas de control. Dichos mecanismos se incluyen dentro de un sistema que calcula, en tiempo real, las fuerzas de control, en función de los valores de la respuesta medida, utilizando un cierto algoritmo.

Un concepto interesante (Reinhorn et al. 1998; Ribakov et al. 1999; Hsiung et al. 2000; Dowdell et al. 2004), que se utiliza en este trabajo, consiste en aplicar la teoría de control activo de estructuras a modelos matemáticos, con el fin de obtener las fuerzas de control más adecuadas para dichas estructuras sometidas a una acción sísmica de diseño. Luego a través de estas fuerzas de control, optimizar y diseñar los elementos de control pasivo, los cuales, teniendo en cuenta sus ventajas, podrían ser materializados en la estructura real.

En este trabajo se plantea un camino para dimensionar dispositivos de control pasivo a través de una metodología que utiliza control activo establecida anteriormente para un acelerograma dado (Ascheri et al., 2007, Ascheri et al., 2006, Ascheri et al., 2005). Se propone un método, como variante a la utilización de espectros de diseño (Dowdell et al. 2004), que emplea acelerogramas artificiales generados aleatoriamente, enmarcados en un estudio de microzonificación sísmica para distintos niveles de recurrencia. Para cada período de recurrencia de los sismos de diseño se establecen criterios de performance de los modelos que implementan control activo, a través de los cuales se dimensionan los dispositivos de control pasivo tratando de igualar la energía disipada en ambos sistemas. El objetivo de esta metodología es acercar el comportamiento de la estructura diseñada con los dispositivos de control pasivo al del modelo numérico que utiliza control activo. A tal fin se dimensionan los dispositivos de control pasivo.

En un ejemplo se muestra el diseño de dos pórticos, uno diseñado con dispositivos de fricción y otro con dispositivos de fluencia de acero, de cinco pisos y tres columnas. La demanda sísmica se encuadra en el Estudio de Microzonificación Sísmica del Gran Mendoza con dos niveles de terremotos. El primero de ocurrencia ocasional con un período de recurrencia de 72 años y una probabilidad de excedencia de un 50% en 50 años y el segundo de ocurrencia rara, con un período de recurrencia de 475 años y una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años.

Se comparan los resultados obtenidos para la simulación de 100 acelerogramas generados aleatoriamente para cada nivel, para la estructura sin control, controlada con dispositivos de fricción y con dispositivos de fluencia de acero.

## 2 CONTROL ACTIVO PREDICTIVO

### 2.1 Principios

En un modelo en tiempo discreto, con intervalo  $\Delta t$ , se define para cada instante  $k \Delta t$ , por simplicidad en adelante  $k$ , un número finito de pasos  $\lambda$ , el cual determina un horizonte de predicción  $[k; k+\lambda]$ , sobre el que se predice la respuesta como función de una secuencia de control  $u(k+j)$  con  $j=0, \dots, \lambda$ , la cual se calcula en el instante  $k$  imponiendo el criterio que la respuesta predicha en el instante  $k+\lambda$  sea igual a una deseada.

El control  $u(k)$ , se aplica al sistema en el instante  $k$ , el resto de la secuencia de control correspondiente a los instantes  $[k+1; k+\lambda]$ , no se aplican al sistema, dado que el procedimiento se redefine en cada instante de muestreo  $k$ .

### 2.2 Algoritmo

Para representar el comportamiento lineal de una estructura, sometida a una excitación sísmica y en presencia de fuerzas de control activo se define el siguiente modelo de primer orden en tiempo discreto en el espacio de estado.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k - nr) + w(k) \quad (1)$$

Siendo  $k$ , el número de instantes de tiempo  $\Delta t$  del modelo discreto,  $A$  es la matriz del sistema en tiempo discreto,  $B$  la matriz de control en tiempo discreto,  $x(k)$  el vector de estado y  $w(k)$  el vector de excitación.  $u(k-nr)$ , es el vector de fuerzas de control generado en el instante  $k-nr$ , donde  $nr$  es el número de períodos de retardo del sistema.

El retardo del sistema corresponde al número de instantes de muestreo que transcurren desde que se ordena a los actuadores que ejerzan una acción sobre la estructura hasta que esta acción es efectivamente aplicada, por lo tanto el tiempo de retardo, está definido por la relación

$$\tau_r = nr \Delta t \quad (2)$$

El modelo predictivo, predice el comportamiento de la estructura sobre un horizonte de predicción  $[k ; k+\lambda+nr]$ . Dicho comportamiento se puede expresar de la siguiente forma (Barbat et al., 1994):

$$\hat{x}(k+j|k) = \hat{A}\hat{x}(k+j-1|k) + \hat{B}\hat{u}(k+j-1-nr|k) \quad (3)$$

$$\hat{y}(k+j|k) = \hat{H}\hat{x}(k+j|k) \quad j = 1, \dots, \lambda + nr \quad (4)$$

$\hat{x}(k+j|k)$  y  $\hat{y}(k+j|k)$  son, respectivamente, los vectores de estado y salida predichos en el instante  $k$ , para el instante futuro  $k+j$  con  $j=1, \dots, \lambda+nr$ , a partir del vector de estado  $x(k)$  del sistema, medido en el instante  $k$ . El símbolo  $\hat{\phantom{x}}$ , distingue las matrices y vectores predichos.

La excitación exterior no se incluye en la predicción debido a que sus valores en los instantes futuros no pueden ser predichos.

La secuencia de control  $\hat{u}$  en el instante  $k$ , está compuesta por los vectores  $u$  predichos en los instantes previos a  $k$  que serán aplicados sobre la estructura a partir de dicho instante hasta  $k+nr-1$ , y los vectores  $\hat{u}$  que serán aplicados desde  $k+nr$  hasta  $k+\lambda+nr$ , que intervienen en la predicción del vector de estado y son calculados imponiendo la condición que verifique un

criterio de rendimiento adecuado:

$$\hat{u}(k+j-1-nr|k) = \begin{cases} u(k+j-1-nr) & j=1, \dots, nr \\ \hat{u}(k+j-1-nr|k) & j=nr+1, \dots, nr+\lambda \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3 Criterio de rendimiento

Un posible criterio de rendimiento a utilizar en el cálculo de la secuencia de vectores de control  $\hat{u}(k|k), \dots, \hat{u}(k+\lambda-1|k)$ , puede consistir en la minimización de la función de coste lineal cuadrática:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\lambda+nr} [\hat{y}(k+j|k) - y_r(k+j|k)]^T Q_j [\hat{y}(k+j|k) - y_r(k+j|k)] + \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{\lambda-1} \hat{u}(k+j|k)^T R_j \hat{u}(k+j|k) \quad (6)$$

$y_r(k)$  define una trayectoria de referencia generada en el instante  $k$  a partir de la respuesta real del sistema en dicho instante y que evoluciona en los instantes futuros hacia una consigna, la cual en estos casos es generalmente nula.  $Q_j$  ( $j=1, \dots, \lambda+nr$ ) y  $R_j$  ( $j=0, \dots, \lambda-1$ ), son matrices de peso simétricas.

Minimizando  $J$ , se impone que los valores de salida predichos, estén próximos a los de la trayectoria de referencia en el intervalo de predicción, limitando también los valores de los vectores  $\hat{u}$ .

Se puede tender a ajustar  $\hat{y}$  a  $y_r$  únicamente en el instante  $k+\lambda+nr$ , en cuyo caso las matrices  $Q_j$  correspondientes a los instantes anteriores al mismo, pueden elegirse nulas.

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_{\lambda+nr-1} = 0 \\ Q_{\lambda+nr} = Q \quad (7)$$

Además se suele considerar una secuencia de vectores de control  $\hat{u}(k)$  constante en el intervalo  $[k; k+\lambda-1]$

$$u(k) = \hat{u}(k|k) = \hat{u}(k+1|k) = \dots = \hat{u}(k+\lambda-1|k) \quad (8)$$

En resumen el algoritmo calcula, minimizando  $J$ , un valor del vector de control que debe ser generado en el instante  $k$  para aproximar en el instante  $k+\lambda+nr$  la salida predicha a la salida de referencia, la cual habitualmente es nula.

En el instante siguiente  $k+1$ , se realiza nuevamente la operación y se obtiene un valor de  $u(k+1)$  y así en cada instante del muestreo.

De esta forma y teniendo en cuenta (6), (7) y (8), se obtiene la siguiente expresión de  $J$ .

$$J = \frac{1}{2} [\hat{y}(k+\lambda+nr|k) - y_r(k+\lambda+nr|k)]^T Q [\hat{y}(k+\lambda+nr|k) - y_r(k+\lambda+nr|k)] + \frac{1}{2} u(k)^T R u(k) \quad (9)$$

$$\text{con } R = \sum_{j=0}^{\lambda-1} R_j$$

A través de la ponderación de las matrices de peso Q y R, se logra limitar tanto la fuerza de control aplicada como la respuesta de la estructura, de esta forma, una matriz Q de valores elevados relativos a los de la matriz de peso R, implica una disminución importante en la diferencia entre  $\hat{y}$  e  $y_r$ , en este caso la respuesta de la estructura, y valores de fuerzas de control elevados. Por el contrario, valores de R elevados limitan el valor de la señal de control.

En el caso del horizonte de predicción  $\lambda$ , un valor pequeño, supone pretender la aproximación de la respuesta al valor de referencia en poco tiempo, por lo tanto, implica una acción enérgica de la respuesta de la estructura, por el contrario, un valor elevado corresponde a un control más suave.

### 3 CONTROL PASIVO

Este tipo de sistema de control de estructuras, se ha desarrollado a tal punto que hoy en día se encuentran en el mercado una amplia gama de dispositivos con distintas características en cuanto a diseño, funcionamiento, tecnología de aplicación y performance, que hacen difícil elegir el más eficaz y conveniente en cada caso particular.

Siguiendo criterios descritos en trabajos anteriores (Ascheri et al., 2006 y Ascheri et al., 2007) se propone la utilización de dispositivos de fluencia de aceros y dispositivos de fricción utilizando los modelos de comportamiento fuerza - desplazamiento graficados en la figura 1.

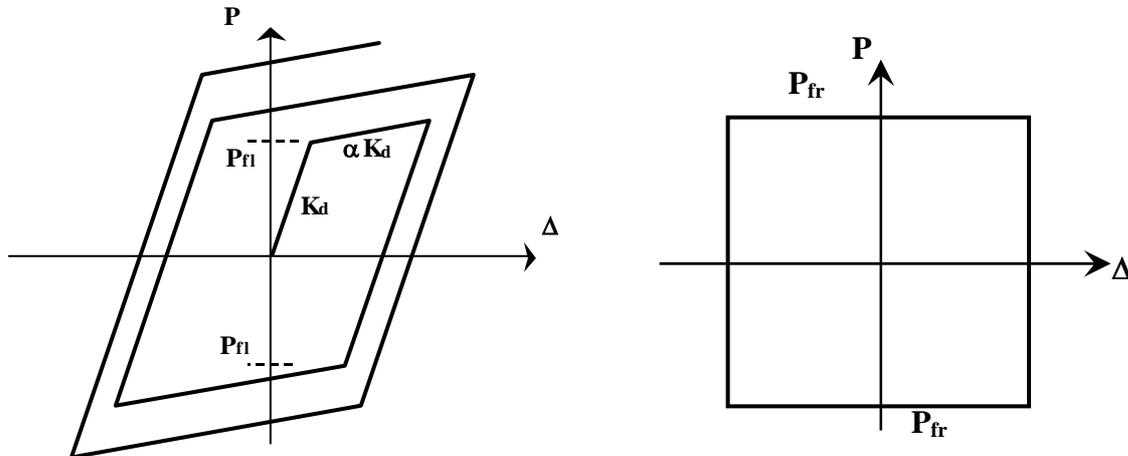


Figura 1 - Modelos de comportamiento fuerza - desplazamiento para disipadores de fluencia de acero y para disipadores de fricción.

Planteando como objetivo dimensionar los actuadores de control pasivo, de modo tal de conseguir un comportamiento similar al obtenido con el modelo de control activo, se puede considerar que en cada paso de tiempo, la historia de desplazamientos y velocidades obtenidas en el modelo de control activo, generan fuerzas de control proporcionales a ambas como:

$$u_{pas}(k) = Cx(k) \quad (10)$$

donde C, es una matriz que esta compuesto por un vector de coeficientes sobre los

desplazamientos (coeficientes de rigidez de los resortes) y un vector de coeficientes sobre las velocidades (coeficientes de amortiguación de los amortiguadores), los cuales comprenden los parámetros de los actuadores del control pasivo.

$$C = \{K_r; C_a\} \quad (11)$$

$x(k)$  es el vector de estado.

$$x(k) = \begin{Bmatrix} z(k) \\ \dot{z}(k) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

La diferencia en cada paso de las fuerzas de control obtenidas con control pasivo y las obtenidas con control activo, se define como

$$\Delta u(k) = u_{pas}(k) - u(k) \quad (13)$$

La solución consiste en encontrar la matriz de coeficientes  $C$ , constante en el tiempo, que minimice la relación  $L$

$$L = \sum_{k=ki}^{k=kf} \Delta u(k)^2 \quad (14)$$

donde  $ki$  y  $kf$  indican los extremos del intervalo de tiempo en que se ejerce el control.

La matriz de coeficientes  $C$  así obtenida, contiene los valores de los coeficiente de rigidez y amortiguamiento para cada dispositivo ideal, denominado así debido a que este dispositivo nunca va a ser implementado en la estructura, formado por un resorte y un amortiguador. A partir de dichos coeficientes se dimensionan los parámetros correspondientes a los dispositivos de control pasivo reales a implementar.

El dimensionamiento de los dispositivos de control pasivo se realiza tratando de igualar la energía que es capaz de disipar el amortiguador ideal (Ascheri et al., 2007, Ascheri et al., 2006), obtenido a través del procesamiento con el modelo de control activo, con la energía disipada en un ciclo por el dispositivo de control pasivo, ya sea de fluencia de aceros o de fricción, igualando los desplazamientos a los desplazamientos máximos obtenidos con control activo.

Utilizando ese criterio se igualan las áreas encerradas por las curvas  $P - \Delta$  de ambos dispositivos y se despejan los parámetros característicos de los dispositivos de control pasivo necesarios para su dimensionamiento.

#### 4 CARACTERIZACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA

El movimiento del terreno se representa como un proceso estocástico tipo ruido blanco filtrado con función de densidad espectral de potencia, Clough (1975) dado por:

$$S_{xx}(f) = S_0 \frac{1 + 4\xi_g^2 (f/f_g)^2}{\left[1 - (f/f_g)^2\right]^2 + 4\xi_g^2 (f/f_g)^2} \frac{(f/f_f)^4}{\left[1 - (f/f_f)^2\right]^2 + 4\xi_f^2 (f/f_f)^2} \quad (15)$$

donde  $S_0$  es la densidad espectral de potencia del ruido blanco,  $f_g$ ,  $\xi_g$  son la frecuencia característica del suelo y su relación de amortiguamiento, y  $f_f$ ,  $\xi_f$  son los parámetros del filtro pasa alta que atenúa las componentes de muy baja frecuencia.

A partir de la ec. (15), un miembro del proceso, es decir un acelerograma artificial, se

obtiene con:

$$x(t) = I(t) \sum_{n=1}^{NFR} \{4 S_{XX}(n \Delta f) [1 + \delta_S R_N] \Delta f\}^{1/2} \text{sen}(2\pi n \Delta f t + \theta_n) \quad (16)$$

donde  $NFR$  es el número de frecuencias entre 0 y  $f_{max}$ , y debe ser  $NFR \geq f_{max} T_0$ , siendo  $T_0$  la duración del registro a generar;  $\delta_S$  es un coeficiente de variación que tiene en cuenta la incertidumbre en las ordenadas de  $S_{XX}$  y  $R_N$  es una variable normal standard;  $\theta_n$  son los ángulos de fase aleatorios con distribución uniforme entre 0 y  $2\pi$ ;  $I(t)$  es una función de modulación que considera la no estacionariedad en amplitudes.

Al acelerograma así generado se le corrige la línea de base para minimizar el valor cuadrático medio de la velocidad, y se escala para ajustar la aceleración máxima  $a_G$ .

La figura 2 muestra una función  $S_{XX}(f)$  para  $f_g = 2 \text{ Hz}$  y un acelerograma generado para  $a_G = 600 \text{ cm/s}^2$ .

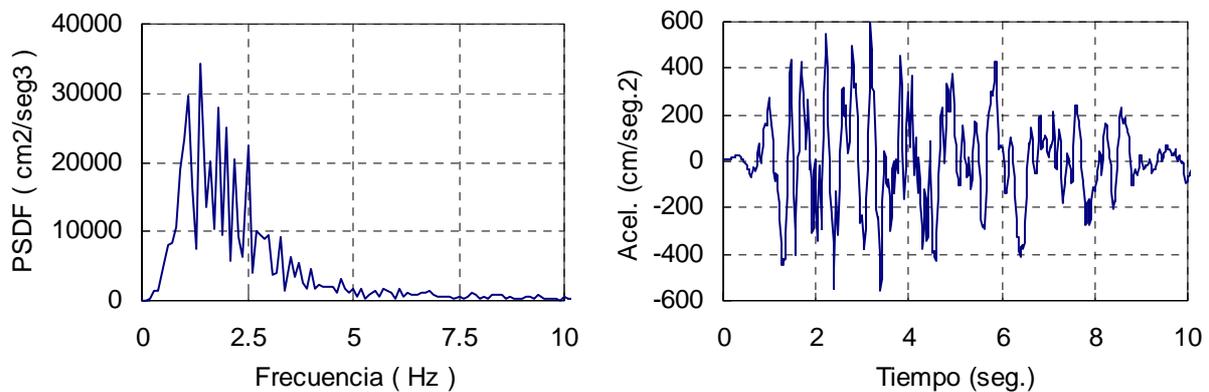


Figura 2 - (a) Función de densidad espectral de potencia para  $f_g = 2 \text{ Hz}$ ., (b) Muestra de acelerograma generado para  $a_G = 600 \text{ cm/s}^2$ .

## 5 METODOLOGÍA

En este trabajo se propone una metodología para el diseño y la optimización de los dispositivos de control pasivo. La misma consiste en:

- La elaboración de un modelo matemático de la estructura al cual se la somete a través de un software de control activo, a un acelerograma de diseño generado artificialmente. Este acelerograma se genera aleatoriamente utilizando la información de un estudio de microzonificación sísmica y un nivel de aceleración máxima caracterizada por la probabilidad de excedencia anual. De esta forma se pueden clasificar en acelerogramas de tipo ocasional, raro, muy raros etc.
- Para cada nivel de acelerograma, se definen límites para los parámetros de diseño, por ejemplo, distorsiones de piso, desplazamientos en la cima, aceleraciones máximas, etc.
- El procesamiento de la estructura con control activo se realiza variando las matrices de peso  $Q$  y  $R$ , definidas en la ecuación (9), de forma tal de cumplir eficientemente con los límites de los parámetros de diseño especificados.
- Utilizando las ecuaciones (10) a (14) se obtienen los parámetros de rigidez y amortiguamiento, para cada dispositivo que formará parte de la estructura, que minimicen la diferencia de comportamiento entre la estructura con control activo y la estructura que

utiliza dispositivos de control pasivo idealizados como un resorte y un amortiguador. Para ello se utiliza las historias de fuerzas de control, desplazamientos y velocidades generadas con el modelo de control activo.

- Este procedimiento se repite, de forma encadenada, un número de veces apropiado para realizar un estudio estadístico sobre los parámetros C y K de cada dispositivo. Finalmente se obtienen los correspondientes valores medios para, a través de ellos, dimensionar los dispositivos de control pasivo.

## 6 APLICACIÓN

### 6.1 Introducción

Como ejemplo numérico se utiliza un pórtico de cinco pisos y tres columnas, que fue diseñado con cargas gravitatorias de 270KN en pisos 1 a 4 y 306KN en el piso 5. El dimensionamiento de dicho pórtico fue desarrollado siguiendo las prescripciones del antiguo reglamento INPRES-CIRSOC 103 para zona 2 (sismicidad moderada), resultando las siguientes dimensiones: columnas pisos 1 y 2: 20x50cm, pisos 3 a 5: 25x40cm, vigas pisos 1 y 2: 20/50cm, pisos 3 a 5: 20/40cm. Las armaduras fueron diseñadas cumpliendo con los requisitos del código.

Este pórtico fue elegido con el fin de poder observar la posibilidad de utilizar esta metodología para adaptar una estructura diseñada con un código anterior y con déficit debido a que fue dimensionado en una zona sísmica 2, para ser utilizado en una zona sísmica 4 a través de la implementación de dispositivos de control pasivo.

Para modelizar el comportamiento de la estructura con control pasivo, se le agregó en el tramo central de uno de los vanos de cada piso un dispositivo de control pasivo dimensionado siguiendo la metodología planteada en el punto 5, vinculándolo a través de dos brazos rigidizadores con las columnas. Se plantearon dos casos uno con dispositivos de fluencia de aceros y otro con dispositivos de fricción. Un esquema de la estructura descrita se observa en la figura 3.

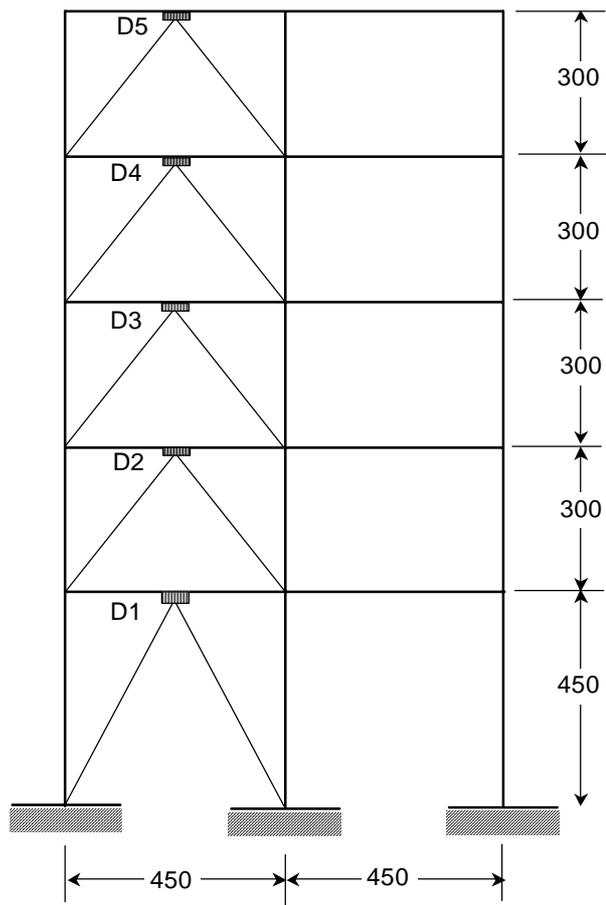


Figura 3 - Modelo matemático de la estructura analizada

## 6.2 Caracterización de la acción sísmica

La aplicación del algoritmo descrito en las ecuaciones (15) y (16), para generar acelerogramas artificiales, dentro del marco del proceso de simulación en la evaluación de los parámetros necesarios para el dimensionamiento de dispositivos de control pasivo, requiere del conocimiento del peligro sísmico del lugar de emplazamiento de la construcción.

Se utiliza la información disponible en el estudio de Microzonificación Sísmica del Gran Mendoza (INPRES, 1995).

En este trabajo se analizaron dos casos, en el primero se generaron aleatoriamente 30 acelerogramas artificiales para cada nivel y en el segundo caso se generaron 100 acelerogramas para cada nivel de terremoto analizado. De esta forma se intenta analizar la influencia de la cantidad de acelerogramas sobre los parámetros buscados para el dimensionamiento de los dispositivos.

## 6.3 Parámetros a controlar

Adoptando un criterio comúnmente aceptado que bajo un sismo de ocurrencia rara la estructura con control permanezca en el rango lineal elástico, se fijó como objetivo el control de la distorsión de piso máxima, para cada nivel de diseño. Se utilizaron los valores límites propuestos en la tabla 1 para cada nivel de diseño analizado.

	Distorsión máxima de piso
Terremoto Ocasional	0,30 %
Terremoto Raro	0,70 %

Tabla 1 – Parámetro a controlar

Se adoptaron las matrices de peso Q y R definidas en la ecuación (9) de forma tal que la distorsión de piso máximo del modelo con control activo cumpla con la distorsión máxima de diseño, para cada acelerograma generado en cada nivel analizado. Con dichos valores Q y R, se obtienen las historias de desplazamientos, velocidades y fuerzas de control generadas en el procesamiento del modelo en cada acelerograma y a través de la minimización de L en la ecuación (14), se obtienen los valores de rigidez (K) y amortiguamiento (C) óptimos de los disipadores ideales en cada elemento disipador y para cada acelerograma generado.

## 6.4 Dimensionamiento de los dispositivos

En la tabla 2 y 3 se resumen los valores obtenidos de rigidez y amortiguamiento de los dispositivos ideales que minimizan el valor L de la ecuación (14) analizando 30 acelerogramas en la tabla 2 y 100 acelerogramas para cada nivel de diseño en la tabla 3.

Sismo	Dispositivo	K			C		
		Promedio KN/cm	D. Est. KN/cm	C. Var. %	Promedio KNs/cm	D. Est. KNs/cm	C. Var. %
Ocasional	D1	60.83	20.16	33%	13.29	4.99	38%
	D2	15.33	14.28	93%	31.20	15.05	48%
	D3	62.37	42.99	69%	18.25	7.73	42%
	D4	67.16	40.22	60%	8.03	2.83	35%
	D5	32.68	12.01	37%	12.13	14.29	118%
Raro	D1	64.47	21.39	33%	14.67	6.37	43%
	D2	20.42	22.73	111%	35.75	19.83	55%
	D3	73.77	53.11	72%	20.57	10.00	49%
	D4	77.61	47.92	62%	8.94	3.66	41%
	D5	33.96	12.06	36%	15.84	17.67	112%

Tabla 2 – Valores medios, desvíos estándar y coeficientes de variación de coeficientes de rigidez y amortiguamiento para cada dispositivo obtenidos a través de 30 acelerogramas generados aleatoriamente para cada nivel de terremoto.

Sismo	Dispositivo	K			C		
		Promedio KN/cm	D. Est. KN/cm	C. Var. %	Promedio KNs/cm	D. Est. KNs/cm	C. Var. %
Ocasional	D1	61.88	18.20	29%	13.84	5.34	39%
	D2	16.82	17.55	104%	32.97	16.67	51%
	D3	64.15	43.83	68%	19.02	8.57	45%
	D4	70.20	40.39	58%	8.81	3.56	40%
	D5	34.19	12.23	36%	13.61	14.68	108%
Raro	D1	65.29	17.03	26%	14.32	5.12	36%
	D2	15.74	22.45	143%	34.35	17.03	50%
	D3	70.17	44.40	63%	19.99	7.93	40%
	D4	75.72	40.22	53%	8.91	2.66	30%
	D5	37.36	12.26	33%	13.92	14.35	103%

Tabla 3 – Valores medios, desvíos estándar y coeficientes de variación de coeficientes de rigidez y amortiguamiento para cada dispositivo obtenidos a través de 100 acelerogramas generados aleatoriamente para cada nivel de terremoto.

Como puede observarse los valores medios y los desvíos estándar de los parámetros de diseño C y K de cada dispositivo, no presentaron una fuerte variación al incrementar el número de acelerogramas analizados de 30 casos a 100 casos.

A partir de los valores de la tabla 3, se dimensionan los dispositivos igualando la energía disipada por el dispositivo resorte – amortiguador ideal y el dispositivo de control pasivo en un ciclo. Los parámetros de dimensionamiento de los dispositivos de control pasivo necesarios para el modelo de comportamiento  $P - \Delta$  que se muestra en la figura 1, se pueden ver en la tabla 4.

Disp	Disp. ideal de control pasivo		Disp. de fricción	Disp. de fluencia de acero		
	K KN/cm	C KNs/cm	F <sub>fr</sub> KN	K KN/cm	F <sub>n</sub> KN	Δfl cm
D1	65.29	14.32	202.51	489.74	257.80	0.53
D2	16.82	34.35	41.43	772.43	227.90	0.30
D3	70.17	19.99	29.33	546.30	183.00	0.33
D4	75.72	8.91	18.45	343.89	104.60	0.30
D5	37.36	13.92	20.48	381.63	73.30	0.19

Tabla 4 – Parámetros de dimensionamiento de los dispositivos de fricción y de fluencia de acero

Con los parámetros dimensionados de los dispositivos de control activo se realiza la verificación de la estructura para todos los acelerogramas analizados con un modelo no lineal que incorpora los dispositivos de control pasivo.

### 6.5 Análisis de los resultados numéricos

Se analizaron los casos sin control, con dispositivos de fluencia de aceros y dispositivos de fricción, obteniendo parámetros de distorsiones máximas de piso, desplazamientos, velocidades y aceleraciones en la cima para todos los acelerogramas que sirvieron para el proceso de dimensionamiento de los dispositivos, obteniéndose los siguientes resultados:

#### Distorsiones máximas de piso.

En la tabla 5 se observa un resumen de los resultados obtenidos en la verificación del comportamiento de la estructura con dispositivos de control pasivo y sin control.

		FLUENCIA	FRICCIÓN	SIN CONTROL
Ocasional	Máxima	0.79%	1.04%	1.45%
	Promedio	0.53%	0.62%	1.02%
	D. estándar	0.10%	0.16%	0.19%
	C. Variación	19%	26%	19%
Raro	Máxima	1.88%	3.86%	3.79%
	Promedio	1.05%	1.65%	2.08%
	D. estándar	0.46%	0.56%	0.47%
	C. Variación	44%	34%	23%

Tabla 5 – Resumen de los valores medios, máximos, desvíos estándar y coeficientes de variación de las distorsiones de piso para los 100 casos de acelerogramas de diseño analizados en cada nivel de terremoto

Las figuras 4 y 5 muestran las distorsiones máximas de pisos en todos los casos analizados.

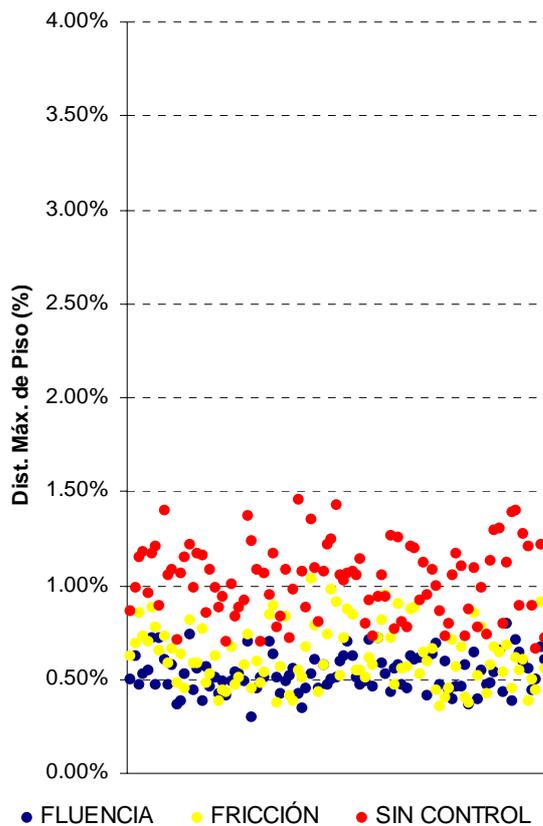


Figura 4 - Distorsiones máximas de piso para los 100 acelerogramas generados para el nivel de terremoto ocasional analizados con dispositivos de fluencia de acero, de fricción y sin control.

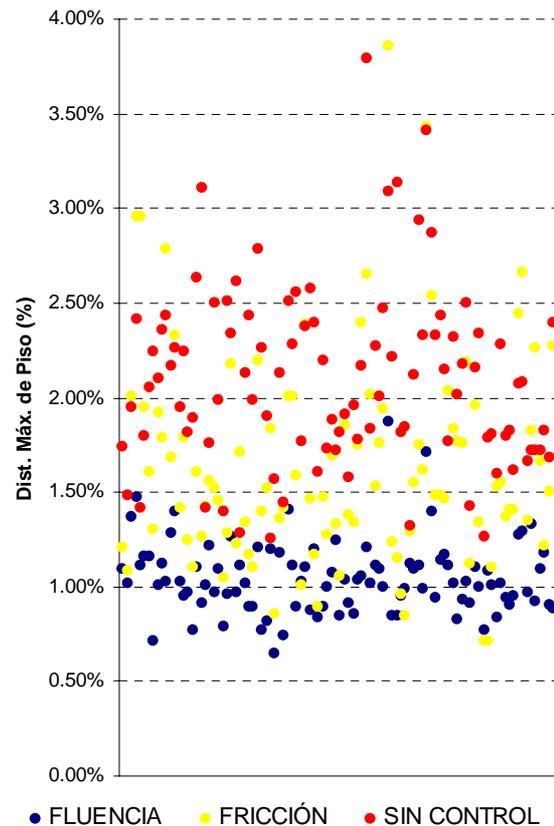


Figura 5 - Distorsiones máximas de piso para los 100 acelerogramas generados para el nivel de terremoto raro analizados con dispositivos de fluencia de acero, de fricción y sin control.

Se puede observar que a pesar de fijar como objetivos distorsiones máximas de piso del orden del 0,3% para terremotos ocasionales y 0,7% para terremotos raros se obtuvieron valores medios próximos al 0,5% y 1% respectivamente en el caso de los disipadores de fluencia de acero y del orden del 0,6% y 1,65% en el caso de los disipadores de fricción. Vemos un mejor comportamiento de los disipadores de fluencia de aceros, reflejado también en los menores valores picos.

Esta diferencia obtenida entre las distorsiones objetivo definidas con control activo y los resultados obtenidos con control pasivo pueden atribuirse a las diferencias de efectividad de los distintos sistemas de control. Queda como posible mejora a la metodología el estudio de la efectividad para cada sistema de control pasivo, pudiéndose implementar las correcciones necesarias en el momento de la elección de los valores de los parámetros a controlar para lograr luego en el sistema de control pasivo el comportamiento deseado.

A pesar de ello se obtiene una reducción importante en las distorsiones de piso sobre todo con dispositivos de fluencia de acero, donde se logran distorsiones máximas y medias del orden del 50% de las obtenidas sin control, sobre todo con bajos coeficientes de variación en los terremotos de ocurrencia ocasional.

No es tan significativo el beneficio en el comportamiento obtenido con los disipadores de fricción. Se obtienen resultados aceptables en los terremotos ocasionales pero en los terremotos de rara ocurrencia solo se logra una reducción del orden del 25% con picos próximos y hasta superiores a los sistemas sin control.

### Desplazamientos máximos en la cima

En la tabla 6 se observa un resumen de los resultados obtenidos en la verificación del comportamiento de la estructura con dispositivos de control pasivo y sin control.

		FLUENCIA	FRICCIÓN	SIN CONTROL
Ocasional	Máxima	8.64	11.46	17.17
	Promedio	5.77	6.14	11.68
	D. estándar	1.19	1.85	2.59
	C. Variación	0.21	0.30	0.22
Raro	Máxima	22.98	32.63	47.80
	Promedio	12.48	16.32	24.60
	D. estándar	3.79	6.34	5.90
	C. Variación	0.30	0.39	0.24

Tabla 6 – Resumen de los valores medios, máximos, desviaciones estándar y coeficientes de variación de los desplazamientos máximos en la cima en cm para los 100 casos de acelerogramas de diseño analizados en cada nivel de terremoto

Las figuras 6 y 7 muestran los desplazamientos máximos en la cima en todos los casos analizados.

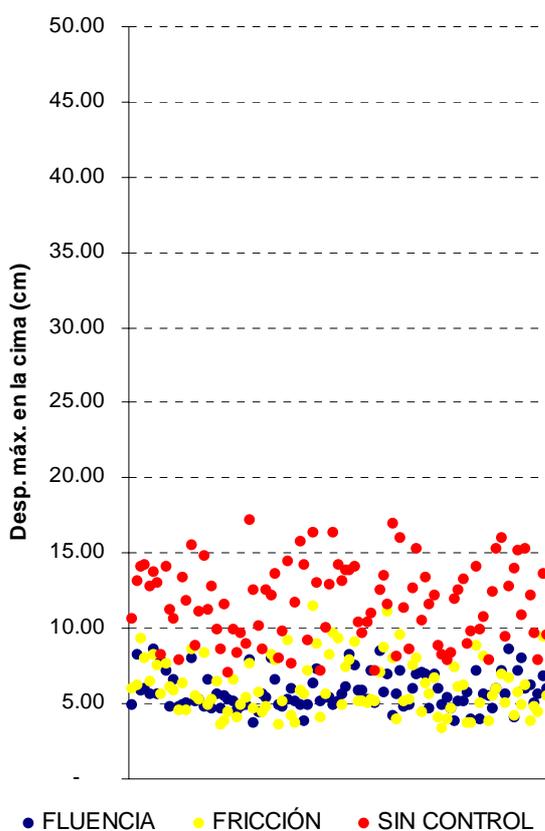


Figura 6 - Desplazamientos máximos en la cima para los 100 acelerogramas generados para el nivel de terremoto ocasional analizados con dispositivos de fluencia de acero, de fricción y sin control.

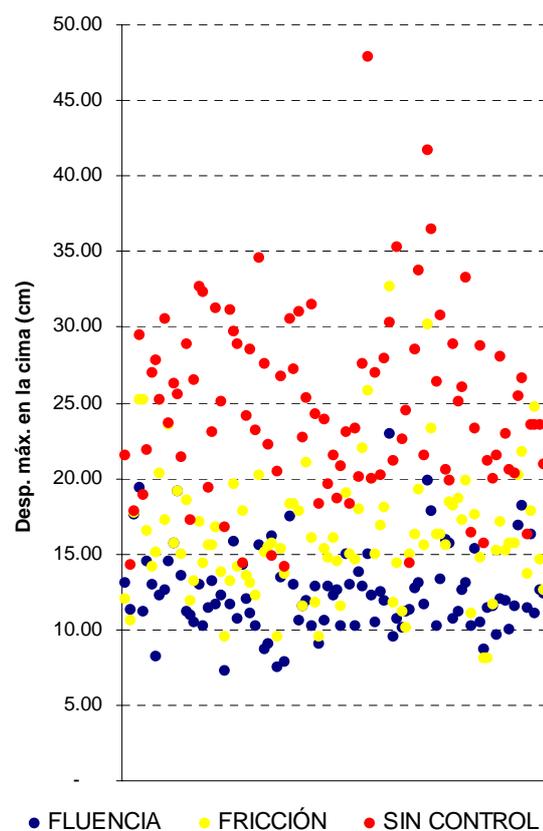


Figura 7 - Desplazamientos máximos en la cima para los 100 acelerogramas generados para el nivel de terremoto raro analizados con dispositivos de fluencia de acero, de fricción y sin control.

Los desplazamientos máximos en la cima siguen un comportamiento similar a los obtenidos con las distorsiones de piso.

El sistema de control pasivo con dispositivos de fluencia de acero logra valores tanto en promedios como en los picos del orden del 50 % de los obtenidos en los sistemas sin control, para ambos niveles de terremotos.

El sistema de control pasivo con dispositivos de fricción logra controlar los desplazamientos en la cima aproximadamente en un 50% para los casos de terremotos ocasionales pero con valores del 67% de los del sistema sin control en los casos de terremotos de ocurrencia rara. A pesar de ello los valores picos obtenidos en las distorsiones de pisos que estaban próximas a los sistemas sin control, en el caso de los desplazamientos en la cima están bastante lejanos.

### Velocidades máximas en la cima

En la tabla 7 se observa un resumen de los resultados obtenidos en la verificación del comportamiento de la estructura con dispositivos de control pasivo y sin control.

		FLUENCIA	FRICCIÓN	SIN CONTROL
Ocasional	Máxima	57.38	72.23	84.19
	Promedio	22.65	22.09	36.90
	D. estándar	13.71	12.16	15.25
	C. Variación	0.61	0.55	0.41
Raro	Máxima	134.51	101.31	118.99
	Promedio	41.58	50.20	57.08
	D. estándar	20.24	22.25	22.41
	C. Variación	0.49	0.44	0.39

Tabla 7 – Resumen de los valores medios, máximos, desvíos estándar y coeficientes de variación de las velocidades máximas en la cima en cm/s para los 100 casos de acelerogramas de diseño analizados en cada nivel de terremoto

Las figuras 8 y 9 muestran las velocidades máximas en la cima en todos los casos analizados.

En el análisis de las velocidades máximas en la cima, cuando se lo compara con los resultados obtenidos en las distorsiones de piso y en los desplazamientos máximos en la cima, se observan menores beneficios.

A pesar de no utilizarse como objetivo la reducción de las velocidades máximas en los parámetros a controlar en el modelo de control activo existe una tendencia a la disminución de dicho valores.

También puede observarse tanto en la tabla como en los gráficos el aumento importante en la dispersión de los resultados y consecuentemente en los coeficientes de variación.

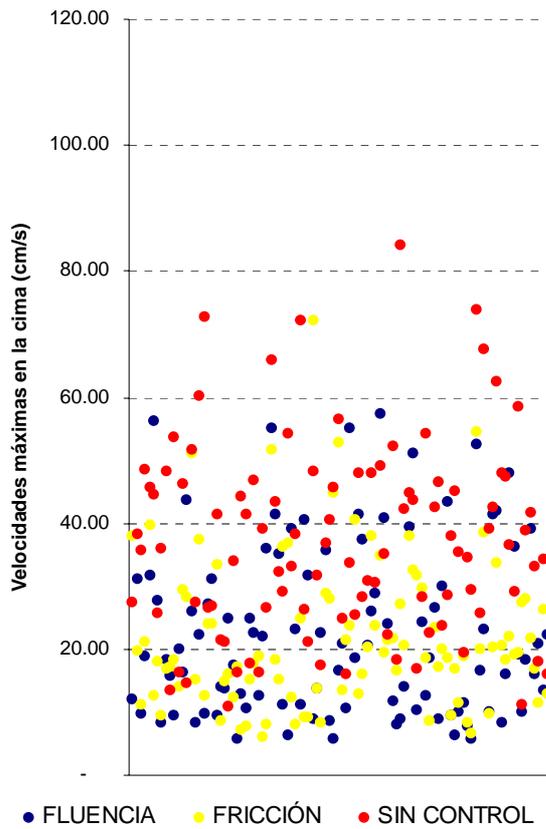


Figura 8 - Velocidades máximas en la cima para los 100 acelerogramas generados para el nivel de terremoto ocasional analizados con dispositivos de fluencia de acero, de fricción y sin control.

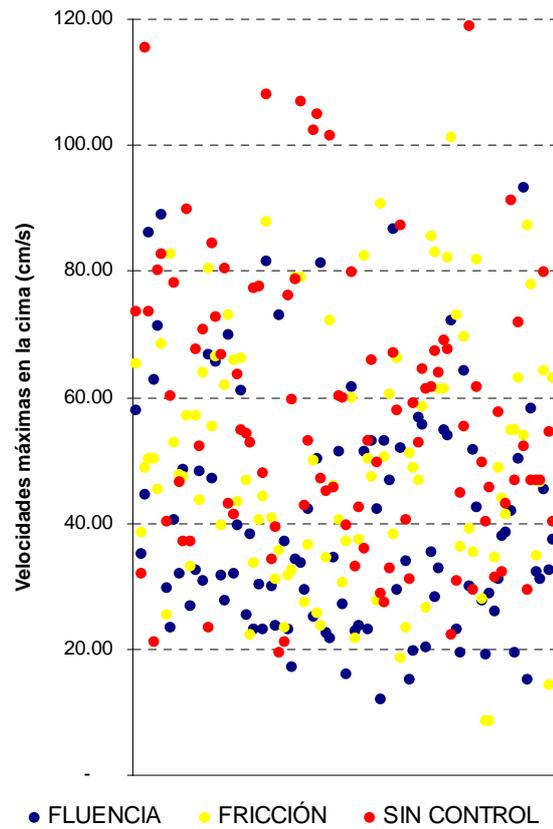


Figura 9 - Velocidades máximas en la cima para los 100 acelerogramas generados para el nivel de terremoto raro analizados con dispositivos de fluencia de acero, de fricción y sin control.

### Aceleraciones máximas en la cima

En la tabla 8 se observa un resumen de los resultados obtenidos en la verificación del comportamiento de la estructura con dispositivos de control pasivo y sin control.

		FLUENCIA	FRICCIÓN	SIN CONTROL
Ocasional	Máxima	220.69	297.12	202.71
	Promedio	64.56	64.55	61.57
	D. estándar	43.39	46.29	36.11
	C. Variación	0.67	0.72	0.59
Raro	Máxima	625.88	605.93	297.82
	Promedio	113.24	102.20	106.95
	D. estándar	98.70	87.31	63.68
	C. Variación	0.87	0.85	0.60

Tabla 8 – Resumen de los valores medios, máximos, desvíos estándar y coeficientes de variación de las aceleraciones máximas en la cima en  $\text{cm/s}^2$  para los 100 casos de acelerogramas de diseño analizados en cada nivel de terremoto

Las figuras 10 y 11 muestran las aceleraciones máximas en la cima en todos los casos analizados.

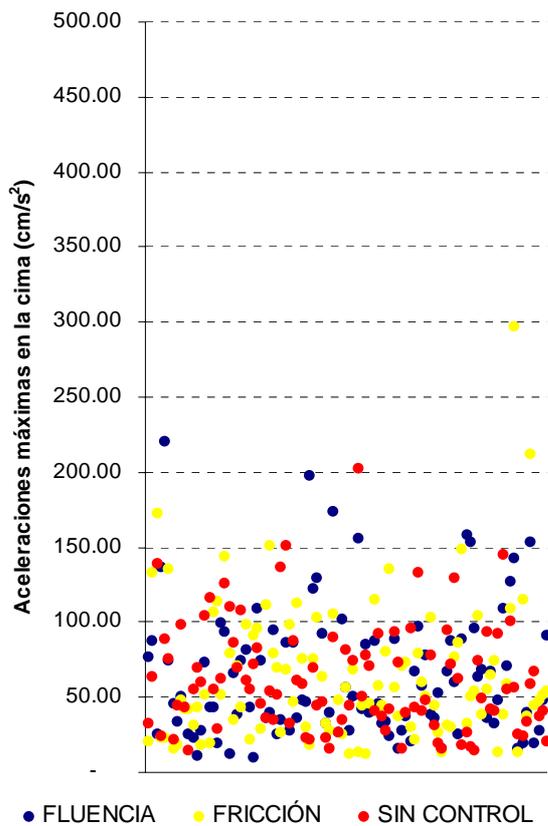


Figura 10 - Desplazamientos máximos en la cima para los 100 acelerogramas generados para el nivel de terremoto ocasional analizados con dispositivos de fluencia de acero, de fricción y sin control.

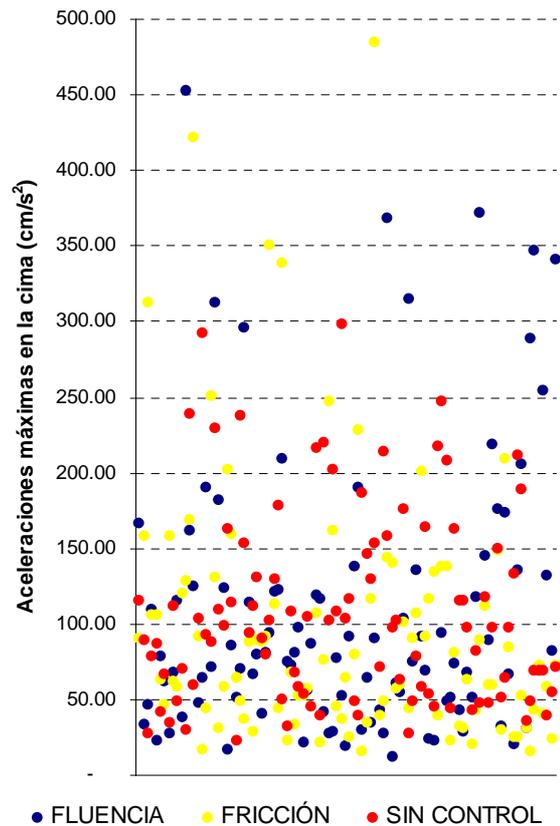


Figura 11 - Desplazamientos máximos en la cima para los 100 acelerogramas generados para el nivel de terremoto raro analizados con dispositivos de fluencia de acero, de fricción y sin control.

Analizando las aceleraciones máximas en la cima, vemos que el aumento de dicho parámetro no es importante, obteniendo valores medios próximos entre ambos sistemas de control pasivo y el sistema sin control.

A pesar de ello existen picos importantes para ambos sistemas de control pasivo sobre todo en los terremotos de rara ocurrencia.

### Comportamiento en el tiempo

En la figura 12 se observa la historia del desplazamiento en la cima para un acelerograma de diseño para un nivel de terremoto de ocurrencia rara con aceleración máxima del suelo de  $600 \text{ cm/s}^2$ .

Se puede observar que el comportamiento de ambos sistemas de control pasivo es similar pero el sistema con dispositivo de fricción sufre un pico de desplazamiento mucho mayor al del sistema con fluencia de acero. Esto se lo puede atribuir a la mayor rigidez que aportan estos dispositivos al sistema lo que trae a consecuencia un aumento de las sollicitaciones.

Este fenómeno se vio reflejado en los resultados anteriormente vistos dando, en general, menor capacidad de control de las distorsiones de piso y desplazamientos en la cima máximos para los sistemas de control pasivo mediante dispositivos de fricción.

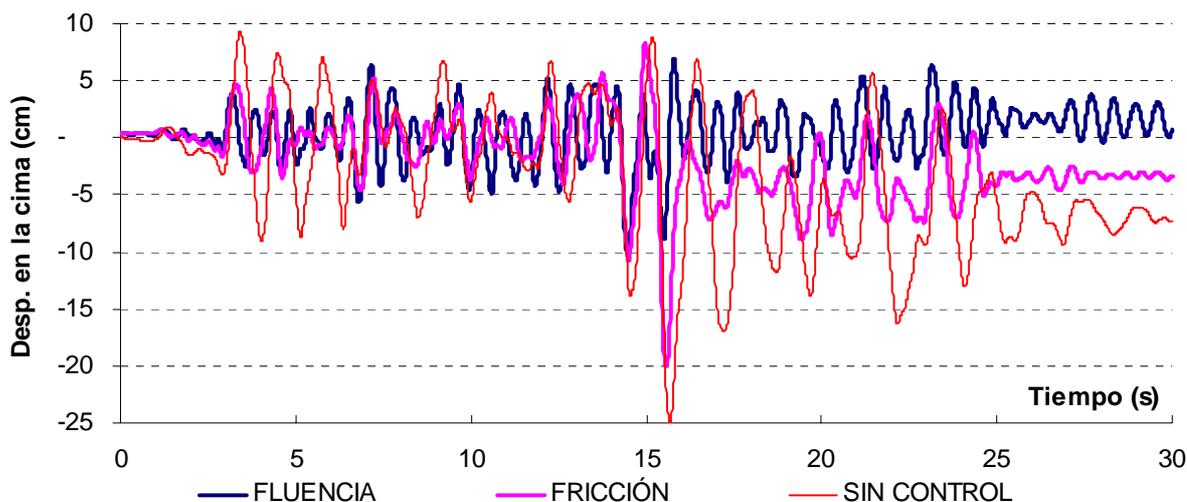


Figura 12 – Historia del desplazamiento en la cima para un acelerograma de diseño de ocurrencia rara para el sistema los sistemas de control pasivo de fluencia de acero, fricción y el sistema sin control

## 7 CONCLUSIONES

En este trabajo se plantea una metodología de diseño de dispositivos de control para estructuras sismorresistente a través de la utilización de modelos de control activo. La metodología propone la generación de acelerogramas, utilizando la información de un estudio de microzonificación, y el estudio estadístico de los valores obtenidos a través de la simulación de los mismos en un modelo de control activo.

Los resultados numéricos muestran en principio muy poca diferencia entre los resultados obtenidos con 30 simulaciones y con 100 simulaciones.

Se obtiene buenos resultados en el control de la estructura tanto de las distorsiones de piso como de desplazamientos en la cima a pesar de que no se logran alcanzar los objetivos planteados en el modelo de control activo. Se puede atribuir esto a la diferencia de efectividad de los distintos sistemas de control, quedando para trabajos próximos, las posible mejoras a la metodología pudiéndose implementar las correcciones necesarias en el momento de la elección de los valores de los parámetros a controlar teniendo en cuenta la diferencia de efectividad entre los sistemas de control activo y pasivos evaluados.

Se observó un mejor comportamiento de los sistemas de control pasivo de fluencia de aceros por sobre los sistemas de fricción en los valores picos de distorsiones y desplazamientos en la cima. Se puede explicar este fenómeno a través de la importante rigidez que aportan estos últimos al sistema, llevando esto a un aumento importante de las acciones.

Por último se puede rescatar que a pesar de lograr buenos resultados en el control de los parámetros de desplazamientos y distorsiones de piso, las velocidades y aceleraciones máximas no sufrieron aumento.

## REFERENCIAS

- Ascheri, J. P., Rubinstein M. y Möller, O., Diseño de Dispositivos de Fricción en Pórticos Sismorresistentes de Varios Pisos Aplicando Resultados de Control Activo Predictivo. *Memorias del VII Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la construcción. Salta. Argentina. 2007.*
- Ascheri, J. P., Rubinstein M. y Möller, O., Diseño Matemático de Disipadores de Energía Sísmica Utilizando Estrategia de Control Activo Predictivo. *Memorias del XV Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. Santa Fe. Argentina. 2006.*
- Ascheri, J. P., Rubinstein, M. y Möller O., Diseño de Control Pasivo de Pórticos Sismorresistentes de Varios Pisos Aplicando Resultados de Control Activo Predictivo. *Memorias del XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Mar del Plata. Argentina. 2006.*
- Ascheri, J. P., Rubinstein, M. y Möller, O., Utilización de Técnicas de Control Activo Orientadas al Diseño de Dispositivos de Control Pasivo. *Memorias del VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional. Buenos Aires. Argentina. 2005.*
- Barbat, A. H. and Canet J. M., *Estructuras Sometidas a Acciones Sísmicas*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2ª Edición. 1994.
- Chin-Hsiung Loh, Pei-Yang-LinK and Nan-Hau Chung., Design of Dampers for Structures Based on Optimal Control Theory. *Earthquake Engng. Strct. Dyn*, 29,1307-1323. 2000.
- Dowdell, D. J. and Ventura, C. E., Application of Control Theory for optimal Design of Added Viscous and Friction Dampers. *Proceedings 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver. Canada. Paper No 2481. 2004.*
- INPRES. *Microzonificación Sísmica del Gran Mendoza*. Publicación Técnica N° 19. 1995.
- Kasai, K. and Kibayashi, M., JSSI Manual for building passive control technology Part-1 Manual contents and Design/Analysis Methods. *Proceedings 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver. Canada. Paper No 2989. 2004.*
- Reinhorn, A. M., Gluck, N., Gluck, J. and Levy R., Optimal Design of Supplemental Dampers for Control of Structures. *Proceedings 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Paris. France. Paper No 0998. 1998.*
- Ribakov, Y. and Gluck, J., Active Control Of MDOF Structures with Supplemental Electrorheological Fluid Dampers. *Earthquake Engng. Strct. Dyn*, 28,143-156. 1999.
- Soong, T. T. and Dargush, G. F., *Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering*. John Wiley & Sons Ltd. 1997.
- Soong, T. T., *Active Structural Control: Theory and Practice*. Longman Scientific & Technical. 1990.