

## OPTIMIZACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONTROL PASIVO A PARTIR DE UN MODELO 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.

**Resumen.** La tendencia de aumentar las exigencias sobre las construcciones en zonas sísmicas tratando de disminuir y hasta evitar el daño en los elementos estructurales ante la ocurrencia de un sismo ha llevado a la necesidad de utilización de sistemas de control pasivo, actualmente de gran difusión, los cuales permiten concentrar el daño en dispositivos reemplazables.

La necesidad de optimizar el dimensionamiento de estos dispositivos ya sea en cuanto a sus características mecánicas como a su cantidad y ubicación, exige el desarrollo de nuevas herramientas y metodologías que contemplen la diversidad de variables implicadas en el problema.

En trabajos anteriores se presentaron distintas metodologías para el dimensionamiento de dispositivos de control pasivo en pórticos y tabiques sismorresistentes utilizando criterios de equivalencia con resultados obtenidos a través de la modelización con técnicas de control activo predictivo.

Para el desarrollo de dichas metodologías, se utilizó un algoritmo de control activo predictivo de estructuras el cual se empleó en la elaboración de un módulo que calcula fuerzas de control en cada instante de muestreo, y forma parte de un software de análisis estático y dinámico no lineal que aplica el método de los elementos finitos con formulación en desplazamientos.

El módulo de control activo se aplica a modelos condensados de un grado de libertad por piso y obligaba a establecer criterios para la distribución de las fuerzas de control obtenidas, restringiendo su uso a estructuras que cumplieran ciertos requisitos.

En este trabajo se plantean avances sobre dicho módulo permitiendo eliminar las restricciones. El mismo permite analizar estructuras planas evaluando la eficiencia de colocar dispositivos en distintos lugares de la estructura variando su cantidad y ubicación teniendo en cuenta diferentes alternativas y restricciones arquitectónicas.

Como aplicación se analiza un plano sismorresistente comparando la performance de los distintos modelos, evidenciando la utilidad de la herramienta elaborada.

## 1 INTRODUCCIÓN

En la ingeniería sismorresistente una importante tendencia actual consiste en implementar dispositivos de control de la respuesta, que tienden a disminuir y controlar los desplazamientos, velocidades y aceleraciones que sufren las estructuras ante la acción de cargas dinámicas. En los últimos tiempos se han desarrollado una amplia gama de dispositivos, la mayoría de ellos patentados (Soong et al., 1997), los cuales abren un abanico de posibilidades para su implementación.

Estos sistemas de control pasivo resultan eficaces para concentrar el daño en dispositivos reemplazables y evitarlo en la estructura principal, logrando una solución económica, sencilla y con notables ventajas para ser aplicados tanto en proyectos nuevos como en proyectos de rehabilitación o de readaptación de estructuras existentes.

En este contexto se hace necesario desarrollar herramientas que permitan dimensionar y optimizar estos sistemas modelizando con fidelidad las características del problema.

Un concepto interesante (Reinhorn et al. 1998; Ribakov et al. 1999; Dowdell et al. 2004), 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.

Aplicando este concepto se ha evolucionado sobre trabajos anteriores (Ascheri et al. 2007, 2008) en los cuales se modelizaba la estructura con un solo grado de libertad por piso y obligaba a establecer criterios para la distribución de las fuerzas de control obtenidas.

Para el desarrollo de dichas metodologías, se utilizó un algoritmo de control activo predictivo de estructuras el cual se empleó en la elaboración de un módulo que calcula fuerzas de control en cada instante de muestreo, y forma parte de un software de análisis estático y dinámico no lineal que aplica el método de los elementos finitos con formulación en desplazamientos.

Este módulo permite retener los grados de libertad horizontales más importantes de la estructura y aquellos donde se aplican efectivamente las fuerzas de control, las cuales serán efectivizadas por los dispositivos de control pasivo. De esta forma se puede tener información sobre las deformaciones, velocidades y esfuerzos de diseño de los dispositivos para lograr la performance que se requiere en la estructura ante una serie de sismos de diseño, ejemplo distorsiones máximas de pisos, desplazamientos máximos en la cima etc.

En este trabajo se expone un ejemplo donde se dimensionan los dispositivos para cumplir con un conjunto de requerimientos bastante difundidos. Se fija como requisito tener un comportamiento elástico sobre la estructura principal y evitar el daño en elemento no estructurales ante un terremoto “raro” con períodos de retorno de 475 años (10% de excedencia en 50 años), esto último se logra limitando las distorsiones de piso en valores por debajo del 0,70 % (Bozzo et al., 2000; Kasai et al., 2004). Además, se exige que los dispositivos instalados no necesiten ser sustituidos o reparados ante la ocurrencia de eventos de menor magnitud pero mucho más frecuentes, para lo cual se utilizaron sismos “frecuentes” con períodos de retorno de 43 años (50% de excedencia en 30 años) de acuerdo a los objetivos básicos indicados en VISION 2000, denominado desempeño completamente operacional.

## 2 ALGORITMO DE CONTROL ACTIVO

### 2.1 Formulación en el espacio de estado

Usando la representación en el espacio de estado, la respuesta dinámica de un sistema estructural, puede ser escrita como (Barbat et al.1994):

$$\dot{x} = Fx + v_c + v \quad (1)$$

Siendo  $x$ , el vector de estado,  $F$  la matriz del sistema,  $v_c$  el vector de control y  $v$  el vector de excitación.

$$\begin{aligned} x &= \begin{pmatrix} z \\ \dot{z} \end{pmatrix} \\ F &= \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix} \\ v_c &= \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}f_c \end{pmatrix} \\ v &= \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}f \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

$M$ ,  $K$  y  $C$  son respectivamente las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento del sistema,  $f$  la excitación y  $f_c$  el vector de fuerzas de control.

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.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k-nr) + w(k) \quad (3)$$

Siendo  $k$ , el número de instantes de tiempo  $\Delta t$  del modelo discreto,  $A$  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 control generado en el instante  $k-nr$ , donde  $nr$  es el número de períodos de retardo del sistema, que en estos casos se toma cero. Estas matrices se definen en las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} A &= \exp(\Delta t F) \\ P_1 &= F^{-1}(A - I) \\ P_2 &= F^{-1} \left( \frac{1}{\Delta t} P_1 - A \right) \\ B &= P_1 \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1} J_c \end{pmatrix} \\ w(k) &= P_1(k+1) + P_2[v(k+1) - v(k)] \end{aligned} \quad (4)$$

donde  $J_c$  es una matriz con valores iguales a 0 ó 1, dependiendo de la presencia de actuadores en distintos grados de libertad.

La respuesta de la estructura se organiza en el vector de salida  $y(k)$ , expresado como

$$y(k) = H x(k) \quad (5)$$

donde  $H$  es una matriz constante de salida que relaciona los grados de libertad originales de la estructura con los grados de libertad que se desea controlar.

## 2.2 Criterio de rendimiento

Un posible criterio de rendimiento a utilizar en el cálculo de la secuencia de vectores de control  $u(k)$ , puede consistir en la minimización de la función de coste lineal cuadrática:

$$J = \frac{1}{2} [y(k+1) - y_r(k+1)]^T Q [y(k+1) - y_r(k+1)] + \frac{1}{2} u(k)^T R u(k) \quad (6)$$

$y_r(k)$  define una trayectoria de referencia generada en el instante  $k$  a partir de la salida real del sistema en dicho instante y que evoluciona en los instantes futuros hacia una consigna, la cual en estos casos es generalmente nula.  $Q$  y  $R$ , 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  $u$ .

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  $y$  y  $y_r$ , 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.

Por lo tanto, teniendo en cuenta (3) (4) y (5),  $y(k+1)$  queda definido como:

$$y(k+1) = HA x(k) + HB u(k) \quad (7)$$

e imponiendo la condición:

$$\frac{\partial J}{\partial u(k)} = 0 \quad (8)$$

Se puede deducir el vector de control  $u(k)$  que corresponde a un extremo relativo de  $J$ .

$$u(k) = -[(HB)^T Q (HB) + R]^{-1} (HB)^T Q HA x(k) \quad (9)$$

a partir de la cual, se puede escribir como:

$$u(k) = -G x(k) \quad (10)$$

donde  $G$  es la matriz de ganancia

$$G = [(HB)^T Q (HB) + R]^{-1} (HB)^T Q (HA) \quad (11)$$

Las ecuación (10) permite calcular el vector de control  $u(k)$  en cada instante de muestreo, y forma parte de un software de análisis estático y dinámico no lineal que aplica el método de los elementos finitos con formulación en desplazamientos. Los problemas dinámicos se resuelven con integración directa de las ecuaciones de movimiento paso a paso con el algoritmo de Newmark. Los problemas no lineales dentro de cada paso de tiempo, o escalón de carga, se resuelven en forma iterativa con una variante del esquema de Newton-Raphson.

## 2.3 Cálculo de la matriz del sistema

La mayor dificultad que presenta este problema es resolver con precisión el cálculo de la matriz del sistema denominada la matriz  $A$ . Como vemos en (1) y (4) la matriz  $A$  contiene

todos las característica dinámicas del sistema, masa, rigidez, amortiguamiento e intervalo de tiempo de análisis.

Existen dos grupos de procedimientos para la resolución de esta matriz como el exponencial de  $(\Delta t F)$  (Chen 1999):

- Determinar la forma reducida de Jordan y efectuar un cambio de base.
- Usando una aproximación en serie:

$$e^{At} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} t^k A^k \quad (12)$$

Este último envuelve sólo multiplicaciones y adiciones, lo cual lo hace sencillo de realizar en métodos computacionales, a pesar de ello se vuelve inestable en algunos casos. Matlab resuelve con las funciones `expm2` siguiendo la ecuación (12), con las funciones `expm` o `expm1` utiliza la aproximación de Padé, con la cual llega a resultados comparables con mucho menos esfuerzo computacional y con la función `expm3` la resuelve usando la forma de Jordan.

A pesar de estas complicaciones, vemos que esta operación se resuelve una sola vez en la simulación, a partir de ello el cálculo de la matriz de ganancia  $G$  depende de las matrices de peso  $Q$  y  $R$  las cuales podemos variar para lograr mayor control y por lo tanto mayores fuerzas de control o viceversa.

### 3 CONTROL PASIVO

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:

$$u_{pas}(k) = C_{pas} x(k) \quad (13)$$

donde  $C_{pas}$ , es una matriz que esta compuesta 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 dispositivos del control pasivo.

$$C_{pas} = \{K_r; C_a\} \quad (14)$$

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

$$x(k) = \begin{Bmatrix} z(k) \\ \dot{z}(k) \end{Bmatrix} \quad (15)$$

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

$$\Delta u(k) = u_{pas}(k) - u(k) \quad (16)$$

La solución consiste en encontrar la matriz de coeficientes  $C_{pas}$ , constante en el tiempo, que minimice la relación  $L$ ,

$$L = \sum_{k=ki}^{k=kf} \Delta u(k)^2 \quad (17)$$

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

La matriz de coeficientes  $C_{pas}$  así obtenida, contiene los valores de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento para cada dispositivo ideal, denominado así debido a que 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<sup>5</sup>, 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, figura 1, y se despejan los parámetros característicos de los dispositivos de control pasivo necesarios para su dimensionamiento.

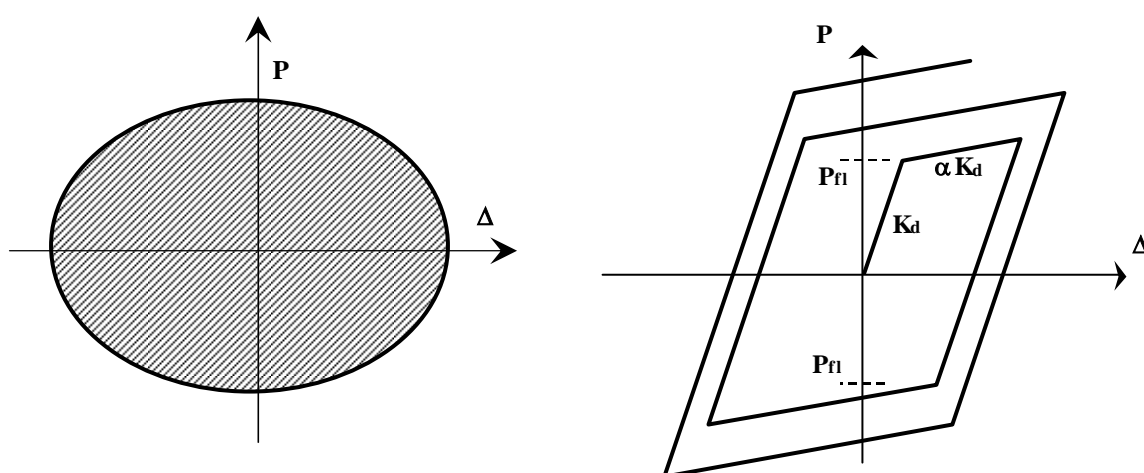


Figura 1 - Modelos de comportamiento fuerza - desplazamiento para un amortiguador ideal y un dispositivo disipadores de fluencia de acero.

#### 4 METODOLOGÍA

En este trabajo se utiliza una metodología para el diseño y la optimización de los dispositivos de control pasivo (Ascheri et al. 2007,2009). La misma consiste en:

- La elaboración de un modelo matemático de la estructura al cual se lo somete a través de un software de control activo, a una familia de acelerogramas de diseño generado artificialmente. En este trabajo se utilizaron 10 acelerogramas generados para el nivel de terremoto de ocurrencia “rara” con período medio de recurrencia  $T = 475$  años (probabilidad de excedencia 10% en 50 años), con aceleración máxima del suelo  $a_G = 0.6g$  y 10 acelerogramas generados para el nivel de terremoto de diseño: ocurrencia “frecuente” con período medio de recurrencia  $T=43$  años, con aceleración máxima del suelo  $a_G = 0.13g$ . Para la realización de estos acelerogramas se usó información del estudio de microzonificación sísmica del INPRES (1995) para la ciudad de Mendoza.
- Para cada nivel de sollicitación sísmica, se definen límites para los parámetros de diseño. Para los terremotos de ocurrencia rara, se exige comportamiento elástico de la estructura principal y distorsión máxima de piso 0,70 % (Bozzo et al., 2000; Kasai et al., 2004) para control de daño en elementos no estructurales. Para los terremotos de ocurrencia frecuente

se exige que los dispositivos no incursionen en el campo no lineal, evitando en estos casos reparación y recambio de los mismos.

- El procesamiento de la estructura con control activo para los terremotos de ocurrencia rara se realiza variando la matriz de peso  $Q$ , definidas en la ecuación (6), de forma tal de cumplir eficientemente con los límites de los parámetros de diseño especificados. En el caso de los terremotos de ocurrencia frecuente se simulan adoptando las matrices de peso  $Q$  igual al promedio de las utilizadas en los terremotos de ocurrencia rara. Se obtiene como resultado de cada simulación la historia de desplazamiento, velocidades y fuerzas de control.
- Utilizando las ecuaciones (13) a (17) se obtienen para cada simulación los parámetros de rigidez y amortiguamiento del resorte y amortiguador ideal, que minimicen la diferencia de comportamiento entre la estructura con control activo y la estructura que utiliza dichos dispositivos de control pasivo. De cada simulación también se retienen los valores de desplazamiento y velocidad relativa máxima entre los grados de libertad que vincula cada dispositivo. Con estos resultados se obtiene el promedio y la desviación estándar de cada una de las variables.
- A partir de estos parámetros se dimensionan los dispositivos de control pasivo. En el caso de los dispositivos de fluencia de acero, se fija como criterio igualar la energía disipada en un ciclo con la energía disipada en un ciclo por un amortiguador con un desplazamiento máximo igual al desplazamiento máximo obtenido en la simulación con control activo y con la fuerza máxima ejercida por el promedio de las fuerzas máximas realizadas por el resorte ideal y el amortiguador ideal, obtenidas a través del desplazamiento máximo por el coeficiente de rigidez y de la velocidad máxima alcanzada por el coeficiente de amortiguamiento respectivamente. Al mismo tiempo se impone la condición que el desplazamiento de fluencia sea mayor que el desplazamiento máximo obtenido con la simulación con control activo para sismos de ocurrencia frecuente.

## 5 ANÁLISIS NO LINEAL ESTÁTICO Y DINÁMICO

Con el objetivo de validar resultados obtenidos con la metodología presentada la estructura resultante, es sometida a análisis estáticos y dinámicos no lineales para verificar que los parámetros de respuesta se encuentren dentro de los límites establecidos para el diseño. Se utilizan los mismos acelerogramas que los empleados para la simulación con control activo, obteniéndose el valor medio para cada parámetro de respuesta.

Para modelar el sistema, la estructura es discretizada con elementos de barra para considerar los diferentes mecanismos que contribuyen al comportamiento histerético en las zonas críticas de las barras de hormigón armado (Möller et al. 2003). Cada elemento está compuesto por sub-elementos: (i) Sub-elemento elasto plástico, representa el comportamiento elástico de la barra y la respuesta no lineal en las regiones extremas con longitud variable de acuerdo con la historia de carga; (ii) Sub-elemento conexión, caracteriza la rotación en la interfaz barra-nudo debido a la degradación de la adherencia de la armadura anclada en el nudo. Extremos rígidos consideran nudos de dimensiones no despreciables. Recientemente (Ascheri et. al 2009), se ha incorporado un elemento de barra para representar la disipación de energía. Consiste en tres resortes no lineales, con adecuadas ecuaciones constitutivas fuerza - desplazamiento, ubicados en posición genérica dentro de una barra elástica que representa los brazos de instalación del dispositivo físico.

## 6 APLICACIÓN

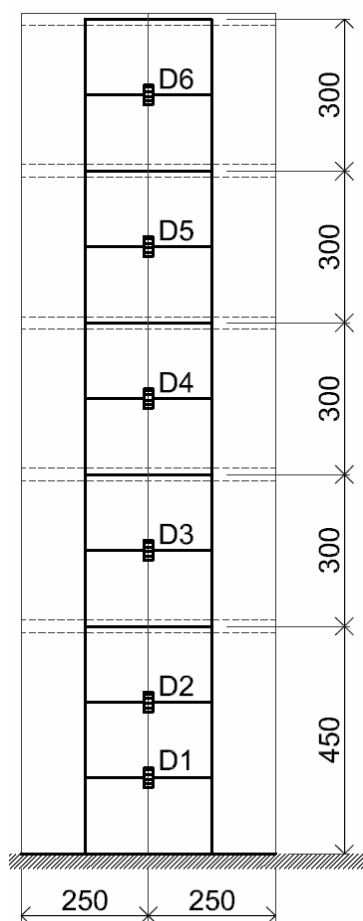
Se propone utilizar la metodología expuesta para dimensionar los dispositivos de un plano sismorresistente utilizado en un trabajo anterior (Rubinstein et. al 2009, 2010), el cual fue dimensionado con una metodología de diseño preliminar.

Se considera una construcción de cinco pisos y planta rectangular de 15 m x 9 m, supuestamente ubicada en la ciudad de Mendoza.

En la dirección de la menor dimensión en planta se disponen cuatro planos sismorresistentes iguales formados por tabiques adosados con disipadores de energía por fluencia de metal.

En la losa de cada piso se disponen orificios en correspondencia con la junta entre tabiques, que permiten desprestigiar la transmisión de esfuerzo rasante

En la Figura 2 se muestra el plano sismorresistente típico, datos de cargas, de masa y materiales.



### Notas

Espesor de los tabiques: 30cm

Carga gravitacional en cada nivel:

Permanente:  $8 \text{ KN/m}^2$

Sobrecarga:  $2 \text{ KN/m}^2$

Factor de mayoración de la sobrecarga:

$f_1 = 0,50$

Masa en cada nivel:

$m = 123,85 \text{ KN seg}^2/\text{m}$

Medidas en cm.

### Materiales:

Según CIRSOC 201

Hormigón: H-25.

Acero: ADN 420

Figura 2 – Modelo de la estructura analizada.

### 6.1 Sistema dimensionado con diseño preliminar

Como punto de comparación se utilizó un sistema dimensionado con una metodología de diseño preliminar aplicable a sistemas estructurales con disipadores de energía por fluencia de metal (Rubinstein et al. 2009, 2010), que resulta conceptualmente clara, sencilla y confiable para un anteproyecto. Resumiendo esta metodología, la cual puede verse con mayor amplitud



en los trabajos de referencia, se compone básicamente de tres pasos, en el primero se determina la capacidad del sistema, expresada por el diagrama push-over (desplazamiento en la cima vs. corte basal) del conjunto formado por la estructura principal y los disipadores. Luego, utilizando un espectro de diseño inelástico correspondiente a sismos raros (Período medio de recurrencia  $T = 475$  años) en el formato de punto de fluencia (YPS) y parámetros del diagrama push-over se calcula la demanda sísmica expresada por la ductilidad requerida al sistema de los disipadores, el correspondiente desplazamiento traslacional en la cima y el corte basal, calculado con dicho desplazamiento del diagrama push-over. Con estos desplazamientos se verifica el cumplimiento del desempeño establecido para el diseño.

Finalmente, a partir del corte basal requerido, asumiendo distribución de fuerzas horizontales linealmente crecientes en altura se obtienen las sollicitaciones para diseñar los dispositivos de control.

En la siguiente tabla podemos ver las características de los dispositivos dimensionados siguiendo esta metodología para cumplir con los mismos requerimiento de diseños que los propuestos para la metodología utilizando control activo.

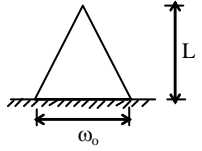
 <b>h:</b> espesor de chapa <b>N:</b> número de chapa en cada dispositivo  <b>Material</b> Acero F-24	Disp.	GEOMETRÍA DISPOSITIVO				CARACTERÍSTICAS DISPOSITIVO		
		N	$\omega_0$	L	h	$\Delta_n$	$K_d$	$P_n$
		u.	cm	cm	cm	cm	KN/cm	KN
	1	12	13.30	20.00	3.61	0.127	3284.98	415.98
	2	12	13.30	20.00	3.61	0.127	3284.98	415.98
	3	14	13.30	20.00	3.61	0.127	3832.48	485.32
	4	12	13.30	20.00	3.61	0.127	3284.98	415.98
	5	6	13.30	20.00	3.61	0.127	1642.49	207.99
	6	5	13.30	20.00	3.61	0.127	1368.74	173.33

Tabla 1: Características de los dispositivos dimensionados con metodología basada en diseño preliminar

N corresponde al número de chapa,  $\omega_0$ , L y h son respectivamente la base, la altura y el espesor de las chapas utilizadas. También se describe los parámetros característicos del diagrama fuerza desplazamiento de la figura 1 correspondiente a cada dispositivo.

En la figura 3 se observa el push over de la estructura comparado con el push over predicho utilizado para el dimensionamiento de los dispositivos.

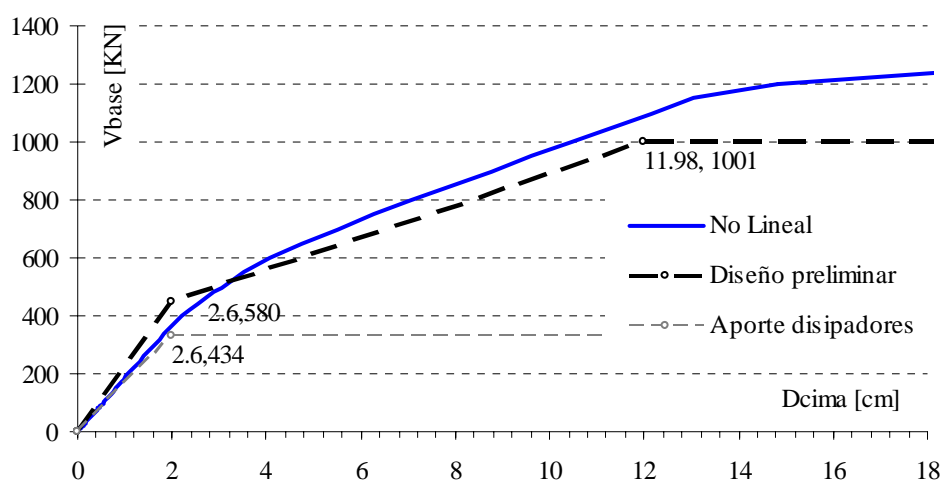


Figura 3 – Push over de la estructura diseñada con diseño preliminar.

## 6.2 Análisis con control activo

Para obtener la matriz de ganancia  $G$  de la ecuación (11), la cual multiplicada por el vector de estado  $x(k)$  en cada instante  $k$  da el vector de fuerzas de control que se debe aplicar en cada instante a la estructura para llegar al objetivo deseado, se debe representar el sistema en el espacio de estado.

Esta representación como se comentó en el punto 2.3, tiene su complejidad en el cálculo de la matriz del sistema  $A$ , para lo cual se propone hacer una condensación de los grados de libertad de la estructura reteniendo aquellos que interesan. De esta forma se disminuye notablemente las dimensiones de las matrices y la resolución de las mismas se torna relativamente sencilla.

En este caso se retuvo un grado de libertad por piso donde se concentró la masa correspondiente a ese piso.

La matriz de rigidez del sistema se calculó dando desplazamientos unitarios a cada grado de libertad retenido y colocando apoyos móviles respectivamente en el resto de los grados de libertad.

La matriz de masa termina siendo una matriz diagonal con los valores correspondientes a la masa de cada piso en el grado de libertad horizontal correspondiente y con una masa dos órdenes inferiores en los grados de libertad que vinculan a cada dispositivo. Se debe tener en cuenta que el sistema en espacio de estado se arma con la inversa de la matriz de masa, ver ecuación (2), por lo tanto todos los grados de libertad que participan deben tener masa asignada y dicha masa no debe ser despreciable, porque trae aparejado errores numéricos en el armado de las matrices del sistema.

La matriz de amortiguamiento, al igual que en el modelo utilizado en el software de análisis estático y dinámico no lineal, se calcula proporcional a las matrices de masa y rigidez.

Para poder relacionar los grados de libertad donde se aplican fuerzas de control, se utiliza una matriz  $H$  con el doble de filas que fuerzas de control a aplicar, en este caso doce filas. En cada fila con un valor 1 y -1 en los grados de libertad donde se ubicará cada dispositivo. De esta forma el vector  $y$  de la ecuación (5) estará conformado por los desplazamientos relativos y las velocidades relativas de los grados de libertad donde se colocarán los dispositivos. Dichos desplazamientos y velocidades relativas van a ser las deformaciones y velocidades que sufrirán los dispositivos de fluencia de acero una vez implementados.

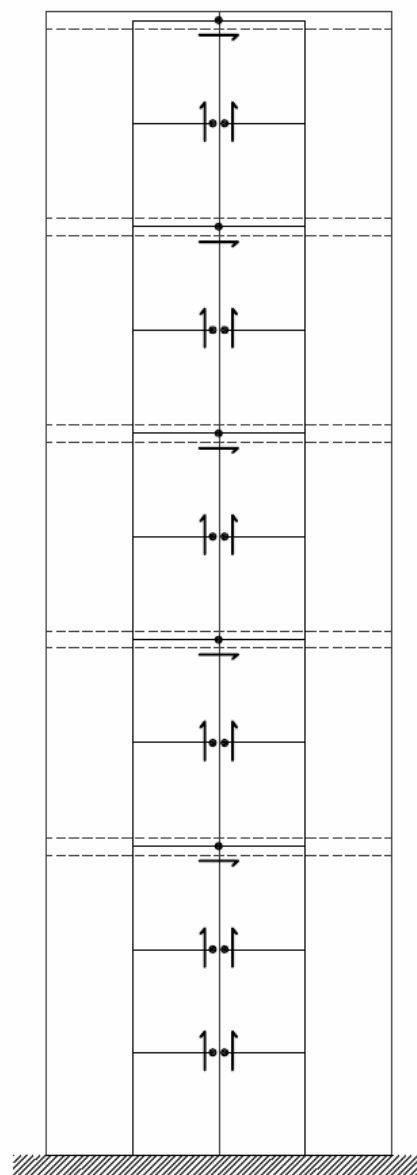


Figura 4 – Grados de libertad retenidos para el armado del sistema en el espacio de estado.

Así se logra obtener matrices de sistema de estado de  $34 \times 34$  ya que se analizan 17 grados

de libertad, mientras en el sistema original y con la discretización utilizada las dimensiones del sistema en el espacio de estado eran de  $234 \times 234$ .

La resolución de la matriz  $A$ , se realizó a través de un desarrollo en serie como se explicó en el punto 2.3, en el mismo software de análisis estático y dinámico no lineal, DINLI, escrito en base fortran, por lo tanto todo el armado del sistema en espacio de estado se incorporó en una subrutina que toma los datos del sistema original, calcula la matriz de rigidez como se comentó oportunamente, resuelve la matriz  $A$  y con los datos de la matrices de peso  $Q$  y  $R$  calcula la matriz de ganancia  $G$ .

Todo este procedimiento hasta lograr la matriz de ganancia se realiza una sola vez en cada simulación, luego en cada instante de tiempo se calcula el vector de fuerzas de control, ecuación (10), a partir del vector de estado  $x$  que esta formado por los desplazamientos y velocidades de los grados de libertad retenidos de la figura 4.

Dicho vector de fuerzas de control se aplica en los grados de libertad correspondientes para simular en el DINLI el paso siguiente.

- **Evaluación con acelerogramas de ocurrencia “rara”**

En este nivel de diseño, se impone la condición de evitar el daño en los elementos no estructurales. Para cumplir con dicha condición se exige limitar las distorsiones máximas de piso a 0,70 %.

Para lo cual se somete al modelo con control activo a 10 acelerogramas artificiales, miembros de un proceso estocástico tipo ruido blanco filtrado en función de parámetros del suelo, no estacionario en amplitudes, con corrección de línea de base, y escalados a la aceleración máxima  $a_G$ .

Se utiliza la información del INPRES (1995) para la ciudad de Mendoza, de donde se obtiene la aceleración máxima del suelo  $a_G = 0.6g$ , para una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años. La duración es de 30 seg.

Estos mismos acelerogramas fueron los utilizados (Rubinstein et al. 2009,2010) para los espectros inelásticos de diseño que se usaron en la metodología de diseño preliminar.

En cada evento analizado se modifica la matriz de peso  $Q$  para lograr alcanzar una distorsión máxima de piso de 0,70 %. Luego se obtienen las historias de desplazamientos, velocidades y fuerzas de control a las que va a estar sometido cada dispositivo.

Con dichos valores se calcula siguiendo las ecuaciones (14) a (17) los coeficientes de rigidez y amortiguamiento del sistema resorte amortiguador ideal que se aproxima con mayor exactitud a la performance obtenida con control activo.

En la tabla 2 se muestran los promedios y las desviaciones estándar de las fuerzas de control, velocidades relativas y desplazamientos relativos máximos alcanzados en cada dispositivo como así también los parámetros  $C$  y  $K$ , explicados.

Disp.	Fuerza de control máxima (KN)		Desplazamiento máximo (cm)		Velocidad máxima (cm/s)		Coeficiente de rigidez $K$ (KN/cm)		Coeficiente de amortiguamiento $C$ . (KNs/cm)	
	Prom	D. St.	Prom	D. St.	Prom	D. St.	Prom	D. St.	Prom	D. St.
1	59.36	21.96	0.37	0.02	3.56	0.40	28.27	18.80	12.82	3.80
2	123.01	46.82	0.66	0.03	6.22	0.73	35.23	25.08	16.91	5.72
3	251.65	105.16	1.09	0.03	10.09	1.10	33.78	27.57	24.37	9.87
4	336.86	138.88	1.34	0.05	12.42	1.75	26.20	24.32	27.62	12.24
5	397.33	159.61	1.47	0.09	14.12	2.43	16.61	17.70	29.62	14.36
6	434.11	170.95	1.51	0.12	15.13	2.87	8.15	10.43	31.12	15.94

Tabla 2: Variables obtenidas del procesamiento con control activo en sismos raros

- **Evaluación con acelerogramas de ocurrencia “frecuente”**

En este nivel de diseño, se impone la condición que los dispositivos no deben entrar en fluencia, evitando de esta forma la reparación o cambio de los mismos.

Con este fin, se somete al modelo con control activo a 10 acelerogramas artificiales generados con el mismo criterio que los anteriores, con aceleración máxima del suelo  $a_G = 0.13g$ , para una probabilidad de excedencia de 50% en 30 años, y con 12 segundos de duración.

En este caso la matriz de peso  $Q$  a utilizar viene definida por la condición de sismos raros, ya que nos interesa determinar cuales van a ser los desplazamientos máximos alcanzados por los dispositivos cuando la estructura tenga un nivel de control similar al aplicado bajo la condición anterior.

Por lo tanto los acelerogramas con sismos frecuentes se procesan con una matriz de peso  $Q$  igual al promedio de las utilizadas en el procesamiento con acelerogramas de ocurrencia rara. A partir de ello se obtienen los desplazamientos máximos alcanzados en cada dispositivo, de los cuales, sus valores medios, desvíos estándar, promedios mas desvío estándar y coeficiente de variación pueden verse en la tabla 3

Disp.	Prom. (cm)	D. St. (cm)	P+D (cm)	C. Var.
1	0.066	0.009	0.075	14%
2	0.119	0.017	0.136	14%
3	0.202	0.024	0.225	12%
4	0.254	0.029	0.283	11%
5	0.282	0.032	0.314	11%
6	0.293	0.033	0.326	11%

Tabla 3: Desplazamientos máximo de cada dispositivo bajo la acción de sismos frecuentes

- **Dimensionamiento de los dispositivos**

A partir de los datos obtenidos en los procesamientos anteriores y siguiendo los criterios que se explican en la metodología se calcula la energía que disipa en un ciclo un amortiguador ideal que llega a un desplazamiento máximo igual al desplazamiento máximo más un desvío estándar que en cada dispositivo alcanza el modelo de control activo y una fuerza máxima, cuando el desplazamiento es cero, figura 1, igual al promedio de las fuerzas máximas alcanzadas por el resorte ideal y el amortiguador ideal.

Estos parámetros como promedio más un desvío estándar de los resultados con los 10 acelerogramas utilizados se muestran en la tabla 4.

Disp	Dmax 0.13g cm	Fmax C. A. KN	K KN/cm	Dmax. C.A. cm	Fmax. resorte KN	C KNs/cm	Vmax C.A. cm/s	Fmax. amort. KN	Fm KN	Energía KNcm
1	0.0752	81.32	47.07	0.39	18.30	16.62	3.96	65.85	42.08	340.0
2	0.1359	169.83	60.31	0.70	42.07	22.63	6.95	157.19	99.63	448.8
3	0.2255	356.82	61.34	1.12	68.84	34.24	11.19	383.31	226.08	632.9
4	0.2830	475.74	50.52	1.39	70.09	39.86	14.17	564.76	317.42	718.8
5	0.3143	556.93	34.31	1.56	53.35	43.98	16.56	728.20	390.77	789.5
6	0.3260	605.06	18.58	1.63	30.29	47.06	17.99	846.75	438.52	844.8

Tabla 4: Parámetros obtenidos con el modelo de control activo

La energía obtenida en la tabla 4 se utiliza para dimensionar los dispositivos de fluencia de acero, buscando las características de rigidez  $K_d$  y fuerza de fluencia  $P_f$  de la figura 1 que igualen en un ciclo la energía calculada cumpliendo con la restricción que el desplazamiento de fluencia  $\Delta f_l$ , sea mayor que el promedio más un desvío estándar de los desplazamientos máximos para cada dispositivo obtenidos con la simulación para sismos frecuentes. Estos últimos se observan en la segunda columna de la tabla 4.

Al mismo tiempo se adoptan valores que sean fáciles de implementar redondeando las dimensiones de cantidad ( $N$ ), ancho de base ( $\omega_0$ ), altura ( $L$ ), y espesor ( $h$ ) de las chapas. Estas características pueden observarse en la tabla 5, junto con las características de la curva carga desplazamiento definitiva de cada dispositivo.

Disp	CARACTERÍSTICAS BUSCADAS			GEOMETRÍA DISPOSITIVO				CARACTERÍSTICAS DISPOSITIVO		
	$\Delta f_l$ cm	$K_d$ KN/cm	$P_f$ KN	$N$ u.	$\omega_0$ cm	$L$ cm	$h$ cm	$\Delta f_l$ cm	$K_d$ KN/cm	$P_f$ KN
1	0.075	547	41	4	10.00	20.00	2.54	0.180	287	52
2	0.136	717	97	10	10.00	20.00	2.54	0.180	717	129
3	0.226	985	222	8	15.00	30.00	3.64	0.283	750	212
4	0.282	1 108	313	12	15.00	30.00	3.64	0.283	1125	318
5	0.314	1 224	385	14	15.00	30.00	3.64	0.283	1313	371
6	0.326	1 321	430	14	15.00	30.00	3.64	0.283	1313	371

Tabla 5: Características de los dispositivos dimensionados con metodología basada en control activo

### 6.3 Verificación no lineal

Se realizaron las verificaciones estáticas, push over, y dinámicas no lineales sometiendo las tres estructuras, sin control, con dispositivos dimensionados con la metodología de diseño preliminar y con la metodología basada en control activo, a los mismos 10 acelerogramas utilizados para cada nivel diseño.

- **Verificación estática no lineal**

En la figura 5 se muestra el push over de los tres modelos planteados.

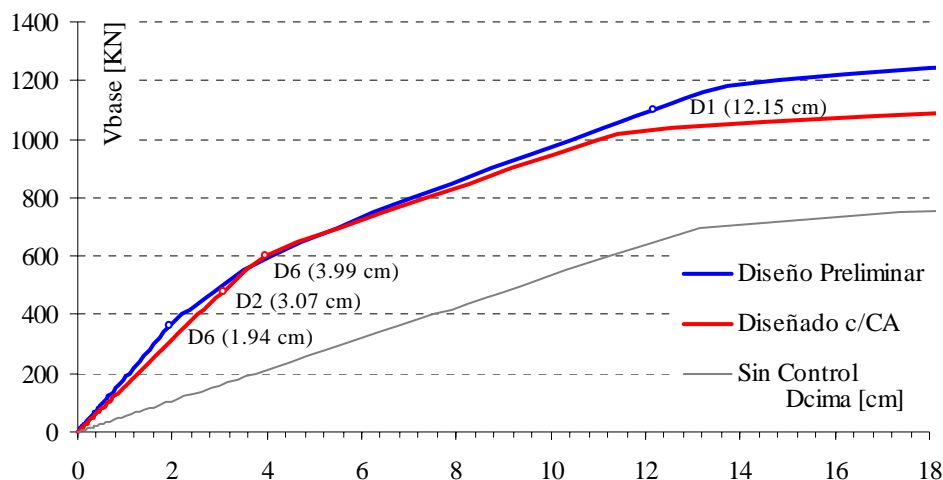


Figura 5 – Push over de las estructuras analizadas

Se puede observar que a pesar que los dos modelos diseñados con control tienen un comportamiento similar, el diseñado con control activo tiene una rigidez inicial menor y el primer punto de quiebre se encuentra mucho más fácil de identificar, ya que el primer dispositivo D2 entra en fluencia con un desplazamiento en la cima de 3.07 cm y el último el D6 con 3.99 cm. En cambio en el caso del diseño preliminar, el primero D6 entra en fluencia con un desplazamiento en la cima de 1.96 cm mientras que el último D1 con 12.15 cm.

También se observa que la estructura diseñada con diseño preliminar alcanza una resistencia mayor, situación lógica ya que la suma de las cargas de fluencia de los dispositivos es un 45 % mayor a la de los dispositivos diseñados con control activo.

- **Verificación dinámica no lineal**

Para poder comparar la performance de los distintos modelos se rescataron los promedios de los desplazamientos máximos en la cima ( $D_{cima}$ ), corte máximo en la base ( $V_0$ ), índice de daño de Park y Ang (DI), índice de daño local máximo (DILOM), distorsión máxima de piso (DISTMAX) y relación deformación máxima sobre deformación de fluencia, a la cual podríamos llamar ductilidad máxima, alcanzada por cada dispositivo ( $DR/DY_i$ ).

Todos estos parámetros pueden verse en las tablas 6

<b>Variables</b>	<b>Sin Control</b>	<b>Diseñada con Diseño Preliminar</b>	<b>Diseñada con Control Activo</b>
<b>Dcima [cm]</b>	18.92	9.67	10.98
<b><math>V_0</math> [KN]</b>	1 013.19	1 289.40	1 158.75
<b>DI</b>	0.120	0.029	0.039
<b>DILOM</b>	0.291	0.045	0.078
<b>DISTMAX</b>	1.551%	0.856%	0.900%
<b>DR/DY 1</b>	-	1.09	2.96
<b>DR/DY 2</b>	-	3.20	4.81
<b>DR/DY 3</b>	-	6.15	4.77
<b>DR/DY 4</b>	-	8.92	5.55
<b>DR/DY 5</b>	-	11.91	5.93
<b>DR/DY 6</b>	-	15.05	6.14

Tabla 6: Comparación de performance para acelerogramas de ocurrencia rara

En la tabla 6 se puede ver de forma comparativa los valores obtenidos en la verificación dinámica no lineal para el caso de acelerogramas de ocurrencia rara. Se observa fácilmente la diferencia entre el sistema sin control y los sistemas con control pasivo.

En cuanto a la comparación entre ambos sistemas con control, se observa en principio que los dos no logran cumplir con el propósito establecido, obteniendo distorsiones máximas de piso por encima de 0.70%. A pesar de ello la diferencia entre estos dos modelos y el modelo sin control es apreciable, logrando reducir este parámetro un 45 % en el caso del diseño basado en diseño preliminar y un 42 % en el del basado en control activo. La misma conclusión se puede ver para el desplazamiento máximo en la cima.

El corte máximo en la base describe un aumento de un 27% para el caso del diseño preliminar contra solo un 14% para el caso del diseño basado en control activo.

Una notable diferencia se observa en la performance de los dispositivos, con valores muy dispersos de ductilidad con picos muy elevados en el caso del diseño preliminar contra un comportamiento mucho más uniforme con valores máximos muy inferiores en el basado en control activo. Esta situación trasluce una utilización más eficiente de los dispositivos en este último caso, donde todos llegan a valores de ductilidad mucho más parejo por lo tanto se podría decir que todos disipan energía en forma más uniforme.

Variables	Diseñada con Diseño Preliminar	Diseñada con Control Activo
<b>Dcima [cm]</b>	2.25	2.65
<b>V0 [KN]</b>	422.64	423.58
<b>DI</b>	0.007	0.008
<b>DILOM</b>	0.012	0.014
<b>DISTMAX</b>	0.186%	0.200%
<b>DR/DY 1</b>	0.23	0.67
<b>DR/DY 2</b>	0.40	0.94
<b>DR/DY 3</b>	0.52	0.86
<b>DR/DY 4</b>	0.67	0.77
<b>DR/DY 5</b>	1.50	0.69
<b>DR/DY 6</b>	2.11	0.65

Tabla 7: Comparación de performance para acelerogramas de ocurrencia frecuente

En la tabla 7 se muestran los resultados para los acelerogramas de ocurrencia frecuente, observando una notable diferencia. La estructura diseñada con diseño preliminar no cumple con los requisitos establecidos, teniendo que efectuar reparaciones en los dispositivos superiores ante la ocurrencia de un acelerograma de este nivel, mientras que en la estructura diseñada con la metodología basada en control activo, el promedio de las ductilidades están por debajo de la unidad.

Sólo con el fin de ilustrar la diferencia de comportamiento, en la figura 6 se muestra la historia de desplazamientos en la cima para las estructuras analizadas para uno de los acelerogramas de ocurrencia rara utilizados para el diseño de los dispositivos.

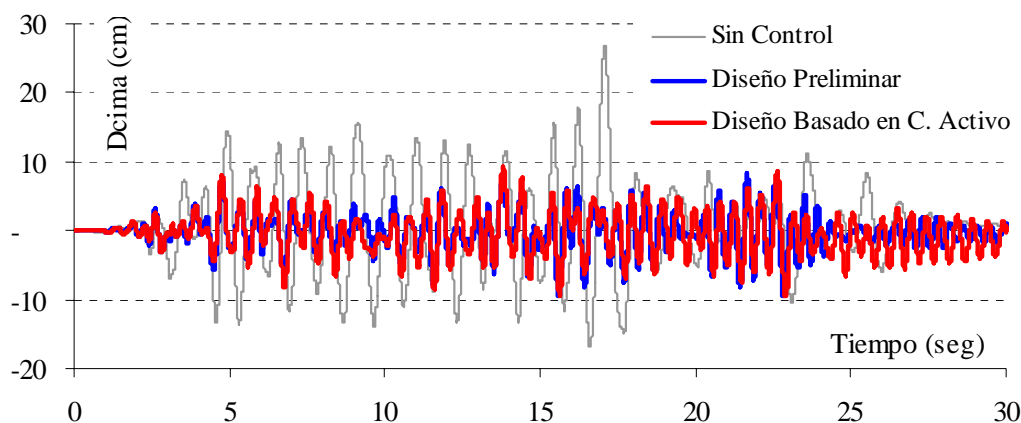


Figura 6 – Historia de Desplazamiento en la cima para un acelerograma de ocurrencia rara para los tres modelos analizados

## 7 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto una metodología de diseño de dispositivos para sistemas estructurales con control pasivo a través de la modelización con un algoritmo de control activo predictivo.

La misma permite dimensionar los dispositivos teniendo en cuenta distintos requisitos para diferentes niveles de sollicitación sísmica.

La aplicación propuesta permite obtener varias conclusiones:

En la modelización con control activo se logró alcanzar los objetivos planteados sin inconvenientes modificando las matrices de peso  $Q$  y  $R$ . En este caso, con la exigencia de terremotos “raros”, se fijó como parámetro de diseño lograr una distorsión de piso máxima de 0,70 % para limitar el daño en los elementos no estructurales. Esta situación fue la única restricción debido a que el desplazamiento máximo en la cima no era determinante ya que los tabiques tenían reserva elástica suficiente para seguir deformándose sin incursionar en el campo plástico. A pesar de ello se podría haber agregado otros parámetros a controlar y obtenido el control adecuado para cumplir con todos ellos.

La verificación no lineal para este nivel de sollicitación sísmica mostró un buen comportamiento a pesar de no lograr en promedio las distorsiones exigidas. Se consiguió disminuir en un 42 % las distorsiones máximas de piso con un incremento de solo 14% del corte en la base. La causa probable por la cual no se consiguió cumplir con los requisitos establecidos se atribuye a la lógica pérdida de eficiencia entre el sistema modelizado con control activo y el diseñado a partir de éste con control pasivo.

Se puede ver que el sistema diseñado con la metodología de diseño preliminar, en este nivel de sollicitación sísmica, tiene una buena performance, incluso obtiene valores de distorsión máxima de piso promedio menores al anterior. A pesar de ello esta reducción de un 45% en las distorsiones de piso la logra con un incremento del corte en la base de un 27%.

La mayor diferencia entre ambos métodos se encuentra en la verificación con terremotos “frecuentes”. Este nivel de sollicitación sísmica, pone de manifiesto la capacidad que tiene la metodología basada en control activo para reflejar el comportamiento real de la estructura, logrando en este caso que ningún dispositivo incursione en campo inelástico, evitando su reemplazo o reparación.

El diseño propuesto se mantuvo con una única distribución de dispositivos para poder compararlos con los del diseño preliminar, pero, teniendo en cuenta los primeros resultados, se podría haber planteado eliminar el dispositivo D1 e inclusive el D2. Dicha acción se puede realizar sólo observando los resultados de las fuerzas de control aplicadas para la modelización con un solo acelerograma, sin la necesidad de avanzar en la metodología.

Esta herramienta permite analizar y optimizar no sólo las características de los dispositivos a utilizar, sino su ubicación y distribución en la estructura.

Sin duda, se deben realizar varias aplicaciones para poder ajustar la pérdida de eficiencia en pasaje del sistema de control activo a control pasivo. A partir de dichas evaluaciones se puede plantear un objetivo a cumplir más exigente para que luego, en el sistema real de control pasivo implementado se logre alcanzar las metas establecidas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Nacional de Rosario y al Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras, por el apoyo recibido para la realización de este trabajo.



**BIBLIOGRAFÍA**

- Ascheri, J. P., Rubinstein M. y Möller, O., Implementación de un Elemento No Lineal para la Modelización del comportamiento de un disipador de energía por fluencia de acero. *Memorias del XVIII Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. Tandil. Argentina. 2009.*
- Ascheri, J. P., Rubinstein M. y Möller, O., Comparación de Metodologías de Diseño de Control Pasivo para Pórticos Sismorresistentes. *Memorias del XVII Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. San Luis. Argentina. 2008.*
- Ascheri, J. P., Rubinstein M. y Möller, O., Diseño De Sistemas Sismorresistentes de Control Pasivo Utilizando Estrategia de Control Activo Predictivo. *Memorias del XVI Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. Córdoba. Argentina. 2007.*
- Barbat, A. H. and Canet J. M., *Estructuras Sometidas a Acciones Sísmicas*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2ª Edición. 1994.
- Bozzo, L. M. y Barbat, A. H., Diseño sismorresistente de edificios. Técnicas convencionales y avanzadas, *Editorial Reverté S.A., 2000.*
- Chen, C. T., *Linear System Theory and Design*. Oxford University Press, Inc. 1999.
- 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.*
- Möller, O., Rubinstein, M., Cóceres, H., Combinación de planos sismorresistentes para análisis dinámico no lineal de estructuras espaciales. *Mecánica Computacional Vol. XXII, pág. 997-1011, AMCA. ISSN 1666-6070. 2003.*
- Park, Y.J., Ang A. H.-S., Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, *J. struct. Eng. ASCE 111, 722-739. 1985.*
- 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.*
- Rubinstein, M., Möller, O., Ascheri, J.P., Aira, R., Giuliano A., Mejoras para una Metodología de Diseño Preliminar de Estructuras Sismorresistentes con Disipadores de Energía. *Memorias del XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. San Juan. Argentina. 2010.*
- Rubinstein, M., Möller, O., Ascheri, J.P., Aira, R., Diseño preliminar de tabiques sismorresistentes acoplados con brazos de instalación y disipadores de energía. *Memorias del XVIII Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. Tandil, Buenos Aires. Argentina. 2009.*
- Soong, T. T. and Dargush, G. F., *Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering*. John Wiley & Sons Ltd. 1997.