

## COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE CONTROL PASIVO PARA PÓRTICOS SISMORRESISTENTES

**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](mailto:jascheri@fceia.unr.edu.ar)*

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

**Resumen.** El control pasivo de la respuesta de estructuras sismorresistentes tiene por finalidad disminuir significativamente el daño en la construcción para lo cual concentra la disipación de energía en dispositivos reemplazables, accionados por los desplazamientos de la estructura. Dentro de ellos se encuentran los disipadores por fluencia de metal insertados en los pórticos de hormigón armado y activados por los desplazamientos relativos de pisos, para los cuales resulta necesario disponer procedimientos de diseño eficientes.

En trabajos anteriores se han desarrollado dos metodologías de diseño. Una de ellas aplica técnicas de control activo predictivo para calcular fuerzas de control que optimizan la respuesta y a partir de estos resultados diseñar dispositivos de control pasivo que logran, con buena aproximación, reproducirlos. La otra, consiste en adoptar disipadores que aporten una adecuada fracción del corte basal y que entren simultáneamente en fluencia, luego mediante cálculos sencillos se determina la capacidad del sistema representada por un diagrama push-over simplificado, corte basal vs. desplazamiento en la cima y a continuación, a partir de parámetros del mismo, se calcula la demanda: aplicando espectros de diseño (YPS) se determina la ductilidad requerida y el desplazamiento último y finalmente se verifica el cumplimiento de requisitos establecidos.

En este trabajo se realiza un análisis comparativo de ambas metodologías. Para ello se aplican a un pórtico de hormigón armado de cinco pisos, ubicado en la ciudad de Mendoza, y se establecen objetivos avalados por la bibliografía: comportamiento elástico del pórtico y distorsión máxima de piso 0,7 %. Se señalan las ventajas comparativas en los aspectos operacional y de los resultados. Entre los elementos de juicio se aplica el índice de daño de Park y Ang y resultados de análisis no lineal, estático y dinámico..

## 1 INTRODUCCIÓN

El control pasivo mediante disipadores de energía, de estructuras sismorresistentes (Soong et al. 1997; Bozzo et al. 2000) se ha desarrollado desde aproximadamente tres décadas y es un tema de interés actual. Básicamente consiste en adicionar a la estructura dispositivos que disipan energía al ser accionados por las deformaciones que la misma experimenta, debido a la sollicitación sísmica, con el objetivo de suplantar fuentes de disipación de energía originadas en la estructura, evitando el daño correspondiente.

Una de las técnicas empleadas consiste en utilizar disipadores por fluencia de metal (Soong et al. 1997; Bozzo et al. 2000; Ascheri et al. 2006), formados por conjuntos de chapas, instalados mediante brazos metálicos en forma de V invertida en los entrepisos del pórtico y accionadas por el desplazamiento relativo de los respectivos pisos.

En la figura 1 se observan disipadores típicos, con chapas de pequeña dimensión con respecto al pórtico y forma adecuada para lograr una prematura e integral entrada en fluencia. Se logra así que el sistema de los disipadores y brazos de instalación, inicialmente más rígido que el pórtico, disipe energía mientras éste responde en el campo elástico. El daño se concentra en los disipadores, que son dispositivos reemplazables.

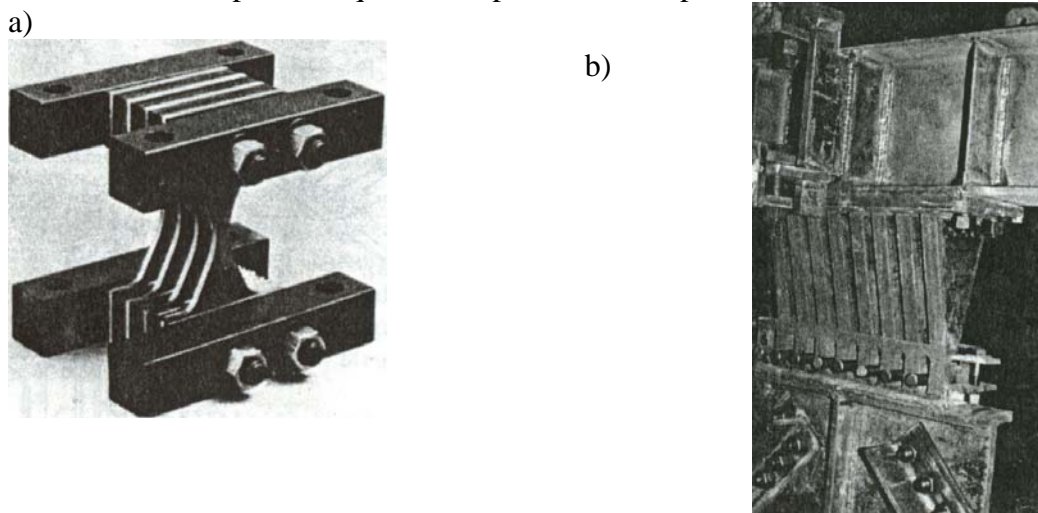


Figura 1: Amortiguadores metálicos; a) Amortiguador con chapas en forma de X (CounterQuake Corp.), b) Amortiguador de chapas triangulares (Tsai et al., 1993).

En este trabajo se comparan dos metodologías para el diseño de este tipo de control pasivo. Una de ellas (Ascheri et al. 2005; Ascheri et al. 2006) determina las características de los disipadores estableciendo criterios de equivalencia con resultados obtenidos aplicando la teoría de control activo predictivo. La otra aplica técnicas características de diseño preliminar, expresa la capacidad del sistema pórtico disipadores más brazos de instalación y de cada una de las partes mediante la determinación simplificada de los respectivos diagramas push-over y luego a partir de parámetros de estos diagramas y de un espectro de diseño en formato de punto de fluencia o YPS (Aschheim et al. 2000) determina la demanda expresada por el desplazamiento máximo requerido en la cima y distorsión de piso promedio correspondiente los que se comparan con valores límites preestablecidos.

Ambas metodologías se aplican al proyecto de disipadores por fluencia para un pórtico sismorresistente de hormigón armado de cinco pisos de una construcción ubicada en la ciudad de Mendoza. Luego se examina el desempeño de ambos diseños aplicando análisis dinámico no lineal mediante un acelerograma compatible con el lugar de emplazamiento (INPRES, 1995), finalmente se discuten las ventajas comparativas de ambas metodologías y se obtienen

conclusiones útiles para el proyecto de control pasivo, mediante disipadores por fluencia de metal en pórticos de hormigón armado sismorresistentes.

## 2 METODOLOGÍA DE DISEÑO BASADA EN PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO PRELIMINAR

La metodología de diseño de disipadores de energía por fluencia de metal aplicados a pórticos de hormigón armado, basada en procedimientos de diseño preliminar, ha sido desarrollada en el trabajo “Influencia de la rigidez del pórtico sismorresistente de hormigón armado en el diseño de disipadores de energía por fluencia de metal” (Rubinstein et al.), presentado en este ENIEF. Contando con esta referencia se prefiere acá resumir y expresar en forma conceptual el procedimiento de diseño.

### 2.1 Capacidad

El primer paso consiste en determinar la capacidad del conjunto pórtico-disipadores más brazos de instalación, expresada por el diagrama push-over corte basal vs. desplazamiento en la cima, simplificado trilineal (Kasai et. al 2004).

Este diagrama resulta de suponer los respectivos push-over de cada componente: pórtico y disipadores más brazos de instalación.

- Pórtico:

En la figura 2 se observa el diagrama push-over del pórtico, simplificado en forma lineal, donde  $V_{yp}$  y  $D_{yp}$  son, respectivamente, el corte basal y el desplazamiento en la cima correspondientes a la fluencia, por formación de un mecanismo dúctil. Para su determinación se aplica un procedimiento (Rubinstein et al. 2006; Rubinstein et al. 2007) que se resume a continuación:

Se adopta un mecanismo dúctil con rótulas plásticas en los extremos inferiores de las columnas del primer piso y en los extremos de vigas hasta aproximadamente las dos terceras partes de la altura del pórtico. El momento flector de fluencia en cada rótula se calcula como el producto de la curvatura de fluencia por la rigidez a flexión. La curvatura de fluencia se determina a partir de la geometría de la sección recta de la barra y de la deformación de fluencia de la armadura longitudinal (Priestley, 1998) y para la rigidez a flexión se utilizan valores reglamentarios del momento de inercia (INPRES-CIRSOC, 2000), que tienen en cuenta la fisuración. Luego el corte en la base se calcula aplicando el Principio de los Trabajos Virtuales sobre el mecanismo adoptado.

Por otra parte la rigidez global, correspondiente a corte en la base vs. desplazamiento en la cima se determina cargando al pórtico con carga triangular invertida de resultante unitaria y con la mencionada rigidez a flexión para sus barras.

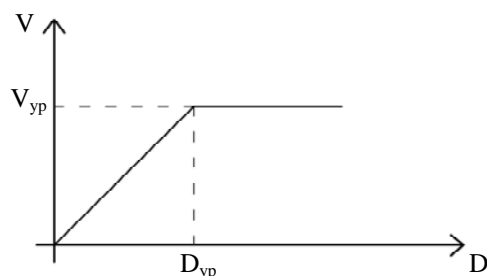


Figura 2: Diagrama push-over del pórtico

- Disipadores más brazos de instalación:

En la figura 3 se presenta un módulo genérico, correspondiente al entrepiso  $j$ , del sistema disipadores más brazos de instalación, en el cual intervienen las vigas del pórtico solicitadas axialmente.

El disipador genérico está formado por una cantidad  $N_j$  de chapas metálicas triangulares, con dimensiones  $W_0$  y  $L$  para la base y la altura y espesor  $h$ . El desplazamiento de fluencia y la fuerza correspondiente, resultan (Soong et al. 1997):

$$\Delta_y = \frac{\varepsilon_y L^2}{h} \quad (1)$$

$$F_{jy} = \frac{N_j E W_0 h^3}{6L^3} \Delta_y \quad (2)$$

Para el sistema considerado el esfuerzo de corte basal de fluencia  $V_{yd}$ , corresponde a la fuerza de fluencia del disipador del 1<sup>er</sup> piso:  $F_{1y}$ . De acuerdo con la experiencia este disipador se diseña tal que dicha fuerza se encuentre entre la mitad y la tercera parte del esfuerzo de corte basal de fluencia del pórtico.

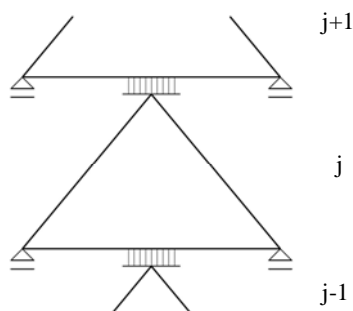


Figura 3: Módulo genérico del sistema disipadores más brazos de instalación

Por otra parte, para optimizar la disipación de energía, resulta conveniente que los disipadores entren en fluencia simultáneamente. Para lograr esto se tiene en cuenta que el sistema disipadores más brazos de instalación es relativamente rígido con respecto al pórtico y, con buena aproximación, el esfuerzo de corte es transmitido por él, hasta su entrada en fluencia. Además se acepta que el esfuerzo de corte corresponde a una distribución de fuerzas de piso con la conocida ley del método estático reglamentario. Con estas consideraciones, conocido el número de chapas del disipador del primer piso, resulta inmediato calcular el número de chapas de los pisos superiores, manteniendo las otras características constantes, para que todos lleguen a fluencia simultáneamente.

Luego la contribución de los disipadores al desplazamiento en la cima, cuando llegan a fluencia, resulta:

$$D_{yd}^d = N_p \Delta_y \quad (3)$$

Donde:  $N_p$  es el número de pisos y  $\Delta_y$  el desplazamiento de fluencia, según ecuación (1).

Por otra parte, conocida la fuerza de fluencia en el disipador, se calculan los esfuerzos normales y las dimensiones de los brazos de instalación. Luego se calculan las deformaciones axiales correspondientes y por un diagrama elemental de Williot (Norris et al. 1982) el corrimiento horizontal. La suma de estos corrimientos es la contribución de los brazos de instalación en el desplazamiento en la cima, cuando los disipadores llegan a fluencia:  $D_{yd}^b$ . En

el dimensionamiento de los brazos se tiene en cuenta que interesa minimizar esta contribución para ampliar la diferencia con respecto al desplazamiento en la cima de fluencia (formación de mecanismo dúctil) del pórtico, es decir, el intervalo en el que se disipa energía en el período elástico del pórtico.

Además se calcula la contribución en el desplazamiento en la cima cuando los disipadores llegan a fluencia, debida a la deformación de la armadura de los tramos traccionados de las vigas que transmiten la acción a los disipadores:  $D_{yd}^v$ . Para ello se elige, para dicha armadura, un valor de tensión de tracción compatible con el control de fisuración del hormigón.

Luego el desplazamiento en la cima, cuando los disipadores entran en fluencia, resulta:

$$D_{yd} = D_{yd}^d + D_{yd}^b + D_{yd}^v \quad (4)$$

En la figura 4 se muestra el diagrama push-over del sistema disipadores y brazos de instalación.

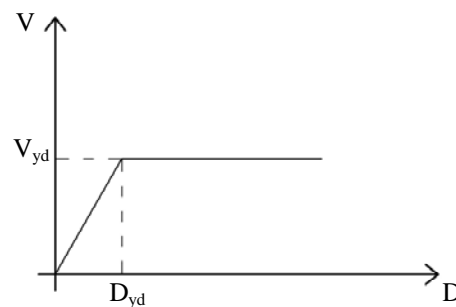


Figura 4: Diagrama push-over de los disipadores y brazos de instalación

- Pórtico – disipadores más brazos de instalación:

El diagrama push-over se obtiene por superposición de los respectivos diagramas de cada parte, como se observa en la figura 5, donde:

$$V_y = V_{yp} + V_{yd} \quad (5)$$

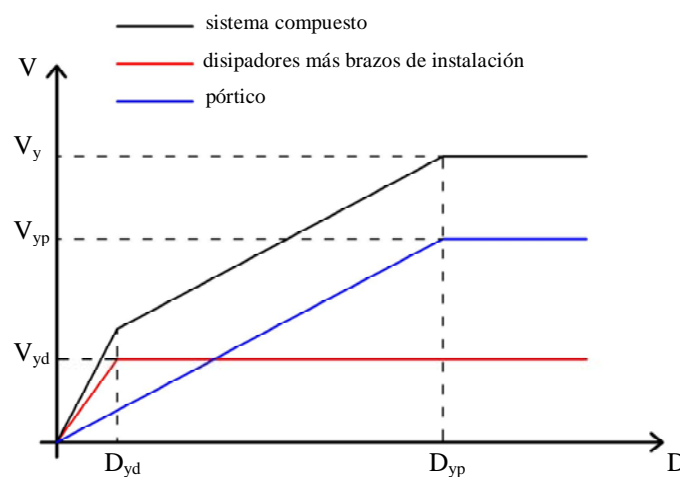


Figura 5: Diagramas push-over

## 2.2 Demanda

Interesa determinar la ductilidad requerida  $\mu_r$  al sistema disipadores más brazos de instalación que puede disipar energía en el intervalo  $(D_{yd}, D_{yp})$ , en el cual el pórtico se encuentra en el período elástico.

Para ello resulta conveniente expresar la demanda mediante un espectro de diseño inelástico en el formato punto de fluencia o YPS (Aschheim et al. 2000).

Uno de los parámetros de entrada al espectro de diseño es el desplazamiento de fluencia  $D_{yd}$ , transformado para el sistema asociado de un grado de libertad. Para calcular el coeficiente de transformación se supone para el primer modo de vibración variación lineal proporcional a la altura.

El otro parámetro es la resistencia del sistema disipadores más brazos de instalación, expresada por el corte basal por unidad de peso efectivo en el primer modo, promedio en el intervalo  $(D_{yd}, D_{yp})$ . Para su determinación se supone que la parte del peso efectivo en el primer modo que corresponde a dicho sistema es un porcentaje del total igual al de la respectiva participación en el corte basal y en consecuencia el cálculo se puede realizar con los valores totales del esfuerzo de corte basal en cada extremo del intervalo y con el valor total del peso efectivo del primer modo.

Con dichos parámetros del espectro de diseño, se obtiene  $\mu_r$  y luego se calcula el desplazamiento máximo requerido en la cima:

$$D_r = \mu_r \cdot D_{yd} \quad (6)$$

## 2.3 Requisitos de diseño. Verificación.

Se establecen requisitos de diseño (Bozzo et al. 2000; Kasai et al. 2004) con el objeto de evitar el daño en la estructura principal, concentrándolo en los disipadores, dispositivos reemplazables y acotarlo en los componentes no estructurales. Se exige respuesta del pórtico en su período elástico y se limita la distorsión de piso a 0,7%.

Luego se debe cumplir:

$$D_r \leq D_{yp} \quad (7)$$

$$\frac{D_r}{H} \leq 0,7\% \quad (8)$$

Si una o ambas condiciones no se verifican se deberán realizar modificaciones en el diseño. Para ello, se encuentran conceptos útiles en el trabajo “Influencia de la rigidez del pórtico sismorresistente de hormigón armado en el diseño de disipadores de energía por fluencia de metal” (Rubinstein et al.), presentado en este ENIEF.

## 3 METODOLOGÍA DE DISEÑO BASADA EN CONTROL ACTIVO PREDICTIVO

### 3.1 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 fuerzas 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  $k$ .

### 3.2 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. (Barbat et al. 1994, Soong 1990)

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k - nr) + w(k) \quad (9)$$

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.

### 3.3 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:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\lambda+nr} [\hat{y}(k+j|k) - y_r(k+j|k)]^T Q_j [\hat{y}(k+j|k) - y_r(k+j|k)] + \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{\lambda-1} \hat{u}(k+j|k)^T R_j \hat{u}(k+j|k) \quad (10)$$

$y_r(k)$  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  $\hat{u}$ .

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.

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.

### 3.4 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 descriptos en trabajos anteriores (Ascheri et al. 2007, 2006) 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 6.

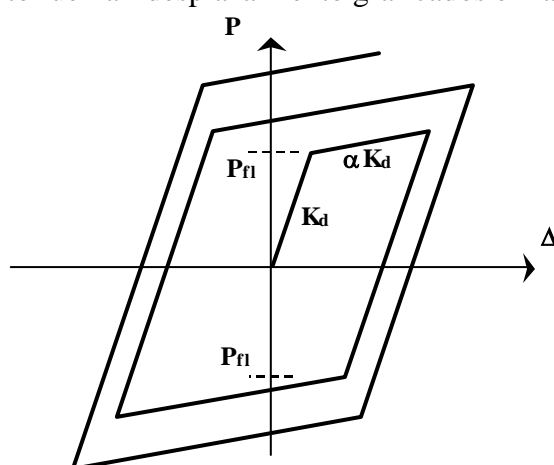


Figura 6: Modelos de comportamiento fuerza - desplazamiento para disipadores de fluencia de acero.

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:

$$u_{\text{pas}}(k) = Cx(k) \quad (11)$$

donde  $C$ , 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.

$$C = \{K_r; C_a\} \quad (12)$$

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

$$x(k) = \begin{Bmatrix} z(k) \\ \dot{z}(k) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

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



$$\Delta u(k) = u_{\text{pas}}(k) - u(k) \quad (14)$$

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

$$L = \sum_{k=k_i}^{k=k_f} \Delta u(k)^2 \quad (15)$$

donde  $k_i$  y  $k_f$  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<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 – Δ de ambos dispositivos y se despejan los parámetros característicos de los dispositivos de control pasivo necesarios para su dimensionamiento.

### 3.5 Metodología

En este trabajo se utiliza una metodología para el diseño (Ascheri et al. 2007) 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 lo somete a través de un software de control activo, a una familia de acelerogramas de diseño generado artificialmente. Estos acelerogramas se generan 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 (10), de forma tal de cumplir eficientemente con los límites de los parámetros de diseño especificados.
- Utilizando las ecuaciones (11) a (15) 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 para la cantidad de acelerogramas utilizada (no menos de tres) en cada nivel de sollicitación sísmica.
- A partir de los promedios de los parámetros de rigidez y amortiguamiento ideales de cada dispositivo se dimensionan los dispositivos de control pasivo, dependiendo de las características de los dispositivos a utilizar (fluencia de acero, fricción, etc.).

## 4 APLICACIÓN

### 4.1 Introducción

Como ejemplo numérico se plantea un pórtico de cinco pisos y tres columnas. El dimensionamiento sigue las prescripciones del reglamento INPRES-CIRSOC 103 para zona 2 (sismicidad moderada), resultando las dimensiones y características ilustradas en la figura 7.

Para ambas metodologías se utilizaron acelerogramas artificiales generados para la ciudad de Mendoza, a partir de los datos de la microzonificación sísmica correspondiente, (INPRES, 1995), con periodo de recurrencia de 475 años (10% de excedencia en 50 años). Para la construcción del espectro de diseño en formato de punto de fluencia o YPS graficado en la figura 8, utilizado en la metodología basada en diseño preliminar, se usaron nueve acelerogramas y a través de los correspondientes espectros de respuesta, se determinó el espectro de diseño mediante el valor medio más un desvío estándar. En el caso del dimensionamiento basado en control activo se procesó a través de la acción de tres acelerogramas.

Para la comparación inelástica se procesaron ambos modelos con un cuarto acelerograma generado con las mismas características.

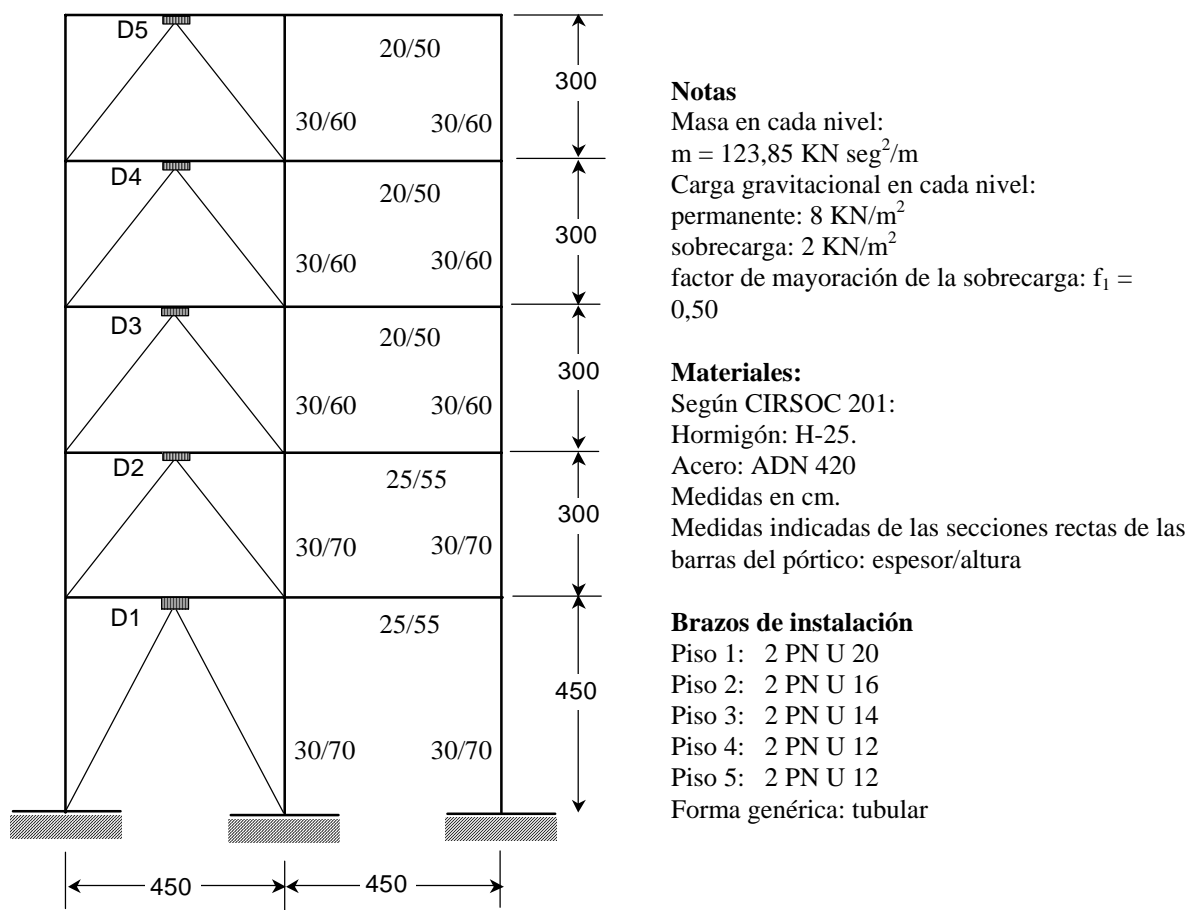


Figura 7: Modelo del pórtico con los sistemas de disipación de energía.

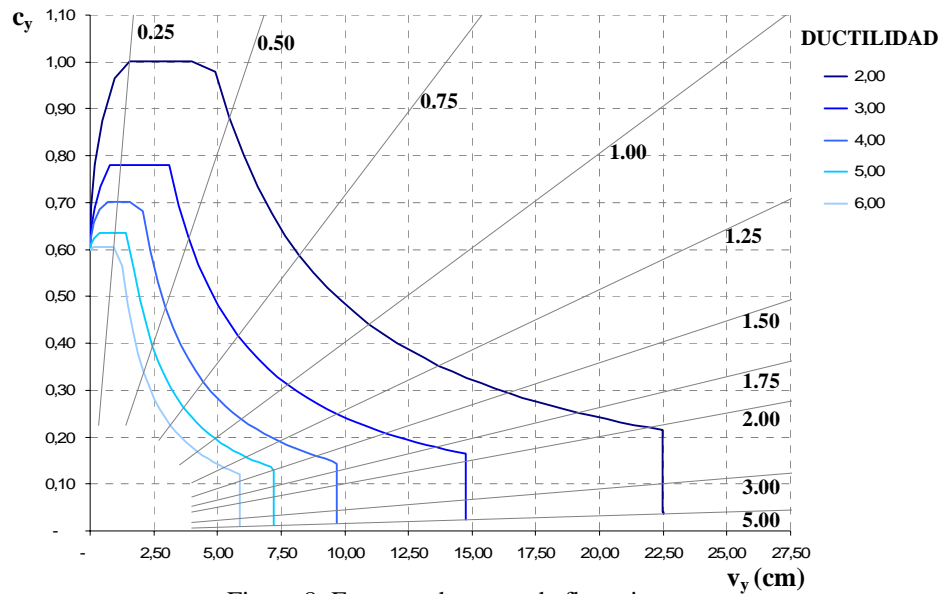


Figura 8: Espectro de punto de fluencia.

### 4.2 Resultado numérico

Los dispositivos dimensionados en ambas metodologías se describen en las tablas 1 y 2

| DISP. | GEOMETRÍA DISPOSITIVO |            |       |      | CARACTERÍSTICAS DISPOSITIVO |                |               |
|-------|-----------------------|------------|-------|------|-----------------------------|----------------|---------------|
|       | N                     | $\omega_0$ | L     | h    | $\Delta fl$                 | Ed             | Pfl           |
|       | u.                    | cm         | cm    | cm   | cm                          | KN/cm          | KN            |
| D1    | 10                    | 13.33      | 20.00 | 3.61 | <b>0.127</b>                | <b>2743.66</b> | <b>347.44</b> |
| D2    | 9                     | 13.33      | 20.00 | 3.61 | <b>0.127</b>                | <b>2469.29</b> | <b>312.69</b> |
| D3    | 8                     | 13.33      | 20.00 | 3.61 | <b>0.127</b>                | <b>2194.93</b> | <b>277.95</b> |
| D4    | 6                     | 13.33      | 20.00 | 3.61 | <b>0.127</b>                | <b>1646.19</b> | <b>208.46</b> |
| D5    | 3                     | 13.33      | 20.00 | 3.61 | <b>0.127</b>                | <b>823.10</b>  | <b>104.23</b> |

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

| DISP. | GEOMETRÍA DISPOSITIVO |       |       |      | CARACTERÍSTICAS DISPOSITIVO |               |               |
|-------|-----------------------|-------|-------|------|-----------------------------|---------------|---------------|
|       | N                     | w0    | L     | h    | Dfl                         | Ed            | Pfl           |
|       | u.                    | cm    | cm    | cm   | cm                          | KN/cm         | KN            |
| D1    | 10                    | 25.70 | 16.83 | 1.27 | <b>0.255</b>                | <b>386.35</b> | <b>98.50</b>  |
| D2    | 10                    | 28.22 | 22.45 | 1.91 | <b>0.302</b>                | <b>603.53</b> | <b>182.45</b> |
| D3    | 15                    | 14.90 | 26.57 | 2.54 | <b>0.318</b>                | <b>683.79</b> | <b>217.15</b> |
| D4    | 15                    | 15.47 | 24.93 | 2.54 | <b>0.280</b>                | <b>859.57</b> | <b>240.29</b> |
| D5    | 15                    | 17.45 | 27.50 | 2.54 | <b>0.340</b>                | <b>721.83</b> | <b>245.65</b> |

Tabla 2: Características de los dispositivos dimensionados con metodología basada en control activo

Ambos modelos fueron testeados con un software de análisis estático y dinámico no lineal (Möller 2001) 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.

Los resultados del push – over de ambos modelos en comparación con el del sistema sin control se grafican en la figura 9.

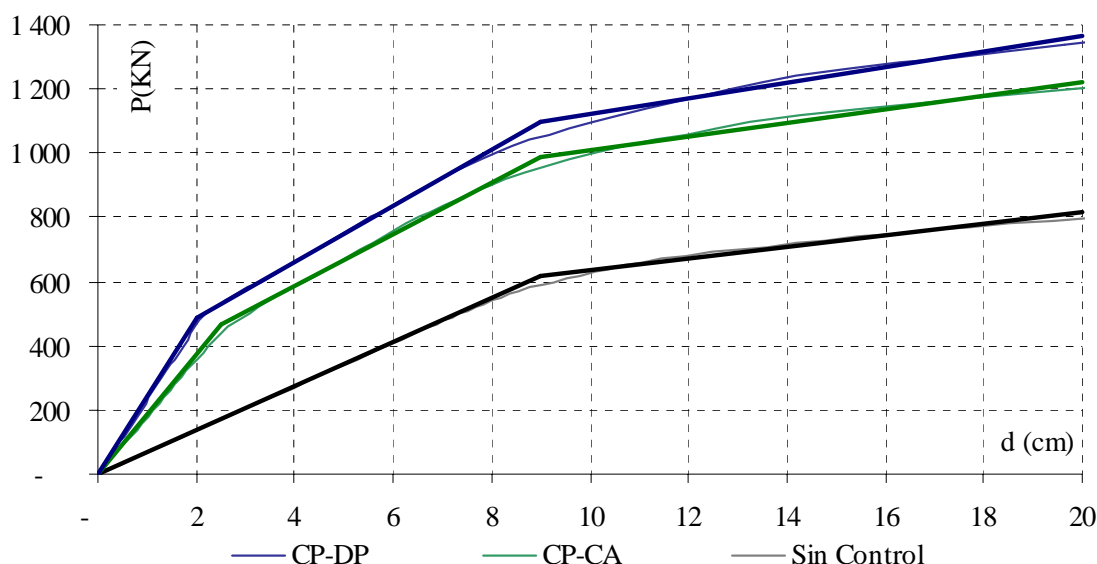


Figura 9: Push – Over del modelo con control pasivo dimensionada con la metodología basada en diseño preliminar (CP-DP), con la metodología basada en control activo (CP-CA) y de la estructura original sin control (Sin Control).

Se observa claramente que ambos sistemas con control pasivo presenta las clásicas curvas rectificadas con tres rectas con dos quiebres que representan la entrada en fluencia de los dispositivos y de las secciones de las vigas de la estructura respectivamente. Como es lógico la formación de rótulas plásticas en las secciones de vigas que se ven caracterizadas en el segundo quiebre de los modelos con control y en el único quiebre del modelo sin control demarca la deformación de fluencia de los pórticos, la cual coincide en todos los casos con un valor aproximado de 9 cm de desplazamiento en la cima.

En la tabla 3, 4 y 5 se comparan los desplazamientos máximos de piso, los cortes máximos en la base y las distorsiones máximas de piso obtenidas a través de la modelización de los tres pórticos sometidos a un acelerograma que cumple con las características de los acelerogramas utilizados para el dimensionamiento.

Se observa que el pórtico sin control duplica el desplazamiento de fluencia de aproximadamente 9 cm, y en ambos casos, los pórticos con control pasivo se encuentran por debajo de dicho límite, alcanzando entre el 60% y 70% de reducción del dicho índice.

|                         |                   | SC     | CP - CA | CP - DP |
|-------------------------|-------------------|--------|---------|---------|
| <b>Desp. en la cima</b> | <b>Max</b>        | 14.70  | 5.92    | 5.26    |
|                         | <b>Min</b>        | -18.64 | -7.74   | -5.83   |
|                         | <b>max abs</b>    | 18.64  | 7.74    | 5.83    |
|                         | <b>porcentual</b> | 100%   | 42%     | 31%     |

Tabla 3: Desplazamientos máximos en la cima para los pórticos sin control (SC), con control pasivo diseñado a través de la metodología basada en control activo (CP-CA) y con control pasivo diseñado a través de la metodología basada en diseño preliminar (CP-DP),

A pesar de la importante reducción en los desplazamientos en la cima, solo se incrementa un 25% en ambos casos los cortes máximos en la base, esto se describe en la tabla 4.

|                         |                   | <b>SC</b> | <b>CP - CA</b> | <b>CP - DP</b> |
|-------------------------|-------------------|-----------|----------------|----------------|
| <b>Corte en la base</b> | <b>Max</b>        | 806.49    | 1012.04        | 982.95         |
|                         | <b>Min</b>        | -730.91   | -913.07        | -1002.6        |
|                         | <b>max abs</b>    | 806.49    | 1012.04        | 1002.6         |
|                         | <b>porcentual</b> | 100%      | 125%           | 124%           |

Tabla 4: Corte en la base para los pórticos sin control (SC), con control pasivo diseñado a través de la metodología basada en control activo (CP-CA) y con control pasivo diseñado a través de la metodología basada en diseño preliminar (CP-DP),

En la tabla 5 se comparan las distorsiones máximas de piso en cada nivel, observando que se cumple con los requisitos establecidos en el diseño quedando en ambos casos por debajo del 0.70 %, mientras que el pórtico sin control alcanza un valor máximo de 1.50 % en el tercer piso.

|                                   |             | <b>SC</b> | <b>CP - CA</b> | <b>CP - DP</b> |
|-----------------------------------|-------------|-----------|----------------|----------------|
| <b>Distorsión de piso máximas</b> | <b>5° P</b> | 1.26%     | 0.19%          | 0.21%          |
|                                   | <b>4° P</b> | 1.45%     | 0.45%          | 0.41%          |
|                                   | <b>3° P</b> | 1.50%     | 0.61%          | 0.45%          |
|                                   | <b>2° P</b> | 1.27%     | 0.62%          | 0.43%          |
|                                   | <b>1° P</b> | 0.77%     | 0.50%          | 0.34%          |

Tabla 5: Distorsiones de piso para los pórticos sin control (SC), con control pasivo diseñado a través de la metodología basada en control activo (CP-CA) y con control pasivo diseñado a través de la metodología basada en diseño preliminar (CP-DP),

En la figura 10 se grafica la historia de desplazamiento en la cima del pórtico sin control y con ambos modelos de control pasivo dimensionados con las distintas metodologías.

Se observa además de la disminución de los picos de desplazamientos, el cambio de la frecuencia de vibración de ambos modelos.

La estructura sin control alcanza un índice de daño global de 0.50 y un índice de daño local máximo de 0.75, mientras que el pórtico dimensionado con la metodología basada en diseño preliminar y basada en control activo valores de 0.04 y 0.07 respectivamente en el índice de daño general y valores de 0.08 y 0.20 respectivamente para el índice de daño local máximo.

Estos resultados vuelven a mostrar que los dispositivos de control en ambos casos evitan, para estas condiciones de diseño, que la estructura incurra en el campo inelástico evitando en consecuencia el daño de la misma y concentrando dicho daño en los dispositivos de control diseñados para tal fin.

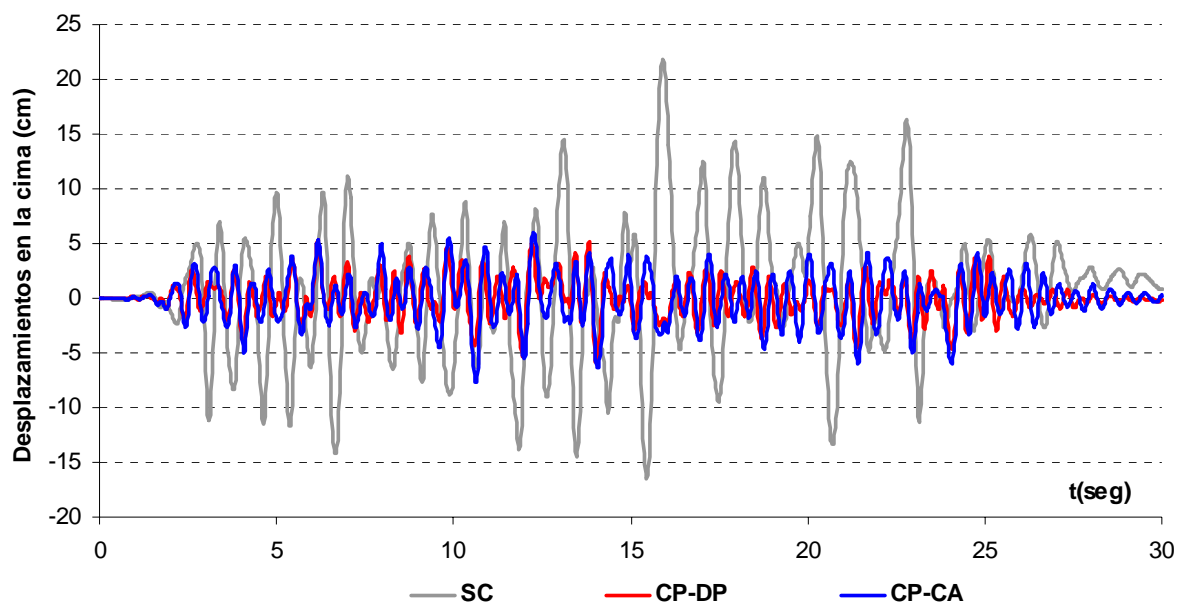


Figura 10: Historia de los desplazamientos en la cima de los tres pórticos analizado, la estructura original sin control (Sin Control), el modelo con control pasivo dimensionada con la metodología basada en diseño preliminar (CP-DP) y con la metodología basada en control activo (CP-CA).

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se han considerado dos metodologías para el diseño de control pasivo para pórticos sismorresistentes, mediante disipadores de energía por fluencia de metal, con el objetivo de examinar particularidades y ventajas relativas. Una de ellas aprovecha técnicas desarrolladas para control activo predictivo y la otra se basa en conceptos característicos de diseño preliminar.

Ambas metodologías se han aplicado al diseño de dichos dispositivos de control para un pórtico de hormigón armado de dos vanos y cinco pisos de una construcción sismorresistente, supuestamente ubicada en la ciudad de Mendoza y luego, empleando análisis dinámico no lineal, se examinó el desempeño de ambas variantes.

Se pueden expresar las siguientes conclusiones:

- Ambas metodologías demostraron su eficacia para lograr un diseño de control pasivo que satisface sus objetivos básicos: evitar daño en la estructura principal y minimizarlo en los componentes no estructurales.
- La metodología basada en control activo resulta más flexible para examinar distintas variantes de diseño, en la búsqueda de optimizar el proyecto.
- La metodología basada en conceptos de diseño preliminar es sencilla, no necesita software especializado y recurre a operaciones que se pueden realizar en forma manual.
- La metodología basada en control activo emplea acelerogramas característicos del lugar de emplazamiento, mientras que la de diseño preliminar utiliza un espectro de diseño inelástico en el formato de punto de fluencia.
- La metodología basada en diseño preliminar tiene un campo de aplicación más acotado, debido a que requiere de estructuras regulares y con la continuidad de los dispositivos de control para cumplir con las hipótesis planteadas en la misma.

## REFERENCIAS

- 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.*
- 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.*
- Aschheim, M.; Black, E. F. Yield point spectra for seismic design and rehabilitation, *Earthquake Spectra*, 16 (2), 2000.
- Barbat, A. H. and Canet J. M., *Estructuras Sometidas a Acciones Sísmicas*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2ª Edición. 1994.
- 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. Metodología para evaluación de la probabilidad de falla de estructuras sismorresistentes y calibración de códigos. *Tesis de Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional de Rosario, 249 páginas, 2001.*
- 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.