

DISEÑO DE CONTROL PASIVO DE TABIQUES ACOPLADOS SISMORRESISTENTES DE VARIOS PISOS APLICANDO TÉCNICAS DE CONTROL ACTIVO PREDICTIVO

Ingeniero Civil Juan Pablo Ascheri.

Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras, F.C.E.I. y A. de la U.N.R.
Rosario.

Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Materiales de la F.C.E.I. y A. Integrante
del Laboratorio de Estructuras del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras.

Ingeniero Civil Marcelo Rubinstein.

Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras de la F.C.E.I. y A. de la U.N.R.
Rosario.

Profesor Titular de Análisis Estructural, F.C.E.I. y A., U.N.R. Jefe del Laboratorio de
Estructuras del I.M.A.E. Consultor estructural. Socio vitalicio de la Asociación de
Ingenieros Estructurales.

Dr. Ingeniero Civil Oscar Möller.

Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras, F.C.E.I. y A., de la U.N.R.
Rosario.

Doctor en Ingeniería, Profesor Titular de Hormigón Armado, Investigador "B" del
Consejo de Investigaciones U.N.R.

RESUMEN

En las últimas décadas, el control pasivo de la respuesta de estructuras sismorresistentes ha tenido un desarrollo importante. Su objetivo es evitar que la estructura incurra en el campo plástico ante sismos de diseño, dejando la función de disipar energía a dispositivos instalados para tal fin. Otro importante campo de aplicación es el reacondicionamiento de estructuras existentes.

En este trabajo se utiliza una metodología para el diseño de control pasivo aplicado a tabiques acoplados con vigas flexibles, empleando dispositivos de disipación de energía por fluencia de acero. La metodología se basa en la resolución de un modelo numérico a través de técnicas de control activo predictivo.

Se muestra una aplicación al diseño de control pasivo de tabiques acoplados de hormigón armado de ocho pisos para una construcción sismorresistente, supuestamente ubicada en la ciudad de Mendoza.

Se analizan los comportamientos de las estructuras con control y sin control utilizando modelos de análisis dinámico no lineal. Al mismo tiempo se estudia el cambio de niveles de acoplamiento y de parámetros dinámicos entre ambos casos.

El ejemplo muestra la factibilidad de la metodología propuesta y como subproducto permite obtener conclusiones de interés para el diseño de construcciones sismorresistentes.

SUMMARY

Passive control of earthquake resistant structures response has had an important development during the last two decades. Its objective is to avoid plastic structural incursion, for the design earthquake, reserving energy dissipation function to special devices. Another important application field is the existing structures retrofitting.

In this paper a passive control methodology is applied to coupled walls with flexible beams applying dissipation energy by yield steel devices. Predictive active control techniques applied to a mathematical model are the methodology basis.

Passive control design for RC coupled walls of an eight story earthquake resistant building, supposed placed in Mendoza City, is showed.

Control and without control structural behaviors are analyzed employing non lineal dynamics analysis models.

At once, for the two cases, changes in coupled levels and dynamics parameters are studied.

The example shows that the proposed methodology is feasible and, as sub product, allows to obtain useful conclusions for the earthquake resistant buildings design.

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.

Bajo esta premisa de evitar la incursión en el campo plástico de las estructuras ante sismos de ocurrencia rara, evitando de esta forma el daño de las mismas, se diseñan los mecanismos de disipación de energía.

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.

Un concepto interesante^{1,2,3,4}, que se propone 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 el control de dicha estructuras sometidas a una acción sísmica de diseño. Luego a través de estas fuerzas de control, optimizar y diseñar los elementos de control pasivo.

Este concepto utilizado para desarrollar una metodología de diseño la cual fue probada anteriormente en pórticos⁵ se aplica en este caso a un sistema de tabiques acoplados con vigas flexibles simulando una condición normal de diseño, o de rehabilitación, de una estructura de ocho pisos ubicada hipotéticamente en una zona de alta probabilidad sísmica como la Ciudad de Mendoza.

Los sistemas de disipación de energía mediante dispositivos de fricción o fluencia de acero necesitan que estos dispositivos se deformen para poder disipar energía a través de los lazos de histéresis que los caracterizan. Cuanto mayores son las deformaciones que sufren estos dispositivos, mayor es el área que queda encerrada dentro del lazo de histéresis y por lo tanto mayor es la energía que disipan, haciéndolos más eficientes.

Al mismo tiempo las distorsiones máximas que puede experimentar la estructura sin daño limitan las deformaciones máximas que pueden alcanzar estos dispositivos. Esto nos hace ver que la estructura debe estar diseñada para soportar deformaciones en el campo elástico lo suficientemente importantes como para que los dispositivos sean eficientes.

Esta es la causa por la cual esta metodología tuvo éxito en la aplicación sobre pórticos^{5,6,7,8,9}. En este trabajo se la aplica sobre sistemas de tabiques, los cuales para lograr la deformaciones requeridas deben estar acoplados a través de vigas lo suficientemente flexibles para permitir los desplazamientos entre tabiques sin la incursión en el campo plástico.

El diseño se hace en base a acelerogramas generados artificialmente con periodo de recurrencia de 475 años (10% de excedencia en 50 años).

Para el diseño de los dispositivos de disipación de energía se utilizaron disipadores por fluencia de acero, lo cual se justifica por la gran difusión y la vasta experiencia reunida, que permite conseguir sistemas de control económicos y confiables.

Se analizan los comportamientos de la estructura con control y sin control utilizando modelos de análisis dinámico no lineal. Al mismo tiempo se estudia el cambio de niveles de acoplamiento y de parámetros dinámicos entre ambos casos.

CONTROL ACTIVO PREDICTIVO

Principios

En un modelo en tiempo discreto, con intervalo Δt , se define para cada instante $k \Delta t$, por simplicidad en adelante k , un número finito de pasos λ , 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 .

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.^{10,11}

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

Siendo k , el número de instantes de tiempo Δt 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.

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:

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

$y_r(k)$ 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 λ , 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.

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^{5,6,7,8,9} 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.

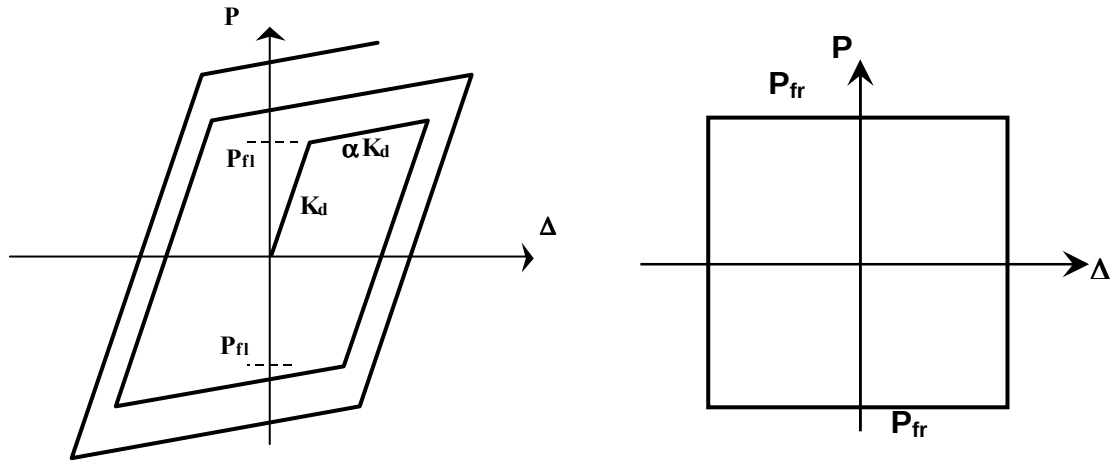


Figura 1 - Modelos de comportamiento fuerza - desplazamiento para disipadores de fluencia de acero y para disipadores de fricción.

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:

$$u_{pas}(k) = Cx(k) \quad (3)$$

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.

$$C = \{K_r; C_a\} \quad (4)$$

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

$$x(k) = \begin{Bmatrix} z(k) \\ \dot{z}(k) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

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

$$\Delta u(k) = u_{pas}(k) - u(k) \quad (6)$$

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

$$L = \sum_{k=ki}^{k=kf} \Delta u(k)^2 \quad (7)$$

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 ideal⁵, 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.

METODOLOGÍA

En este trabajo se utiliza una metodología para el diseño⁵ 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 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 (2), de forma tal de cumplir eficientemente con los límites de los parámetros de diseño especificados.
- Utilizando las ecuaciones (3) a (7) 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.
- A partir 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.).

APLICACIÓN

Introducción

Como ejemplo numérico se plantea un sistema de tabiques acoplados con vigas flexibles de ocho pisos. Las cargas gravitatorias de diseño sobre el mismo son de 120 kN por piso. De un anteproyecto se adoptaron las siguientes dimensiones, tabiques: 200x30cm, vigas: 12/25cm. Las armaduras cumplen con los requisitos del reglamento CIRSOC 201 (2000).

Para modelizar el comportamiento de la estructura con control pasivo, se le agregó en cada piso dos brazos rigidizadores que vinculan un dispositivo disipador por fluencia de aceros con las columnas. El modelo matemático de la estructura descripta se observa en la figura 3a.

Con el fin de investigar la respuesta del comportamiento estructural sometido a una fuerte excitación sísmica, se utilizó un acelerograma artificial generado para la ciudad de Mendoza con periodo de recurrencia de 475 años (10% de excedencia en 50 años)¹² el cual se muestra en la figura 3b.

El push over de la estructura sin el sistema de disipación de energía se observa en la figura 2, en la que se puede detectar el desplazamiento de fluencia en la cima de la estructura.

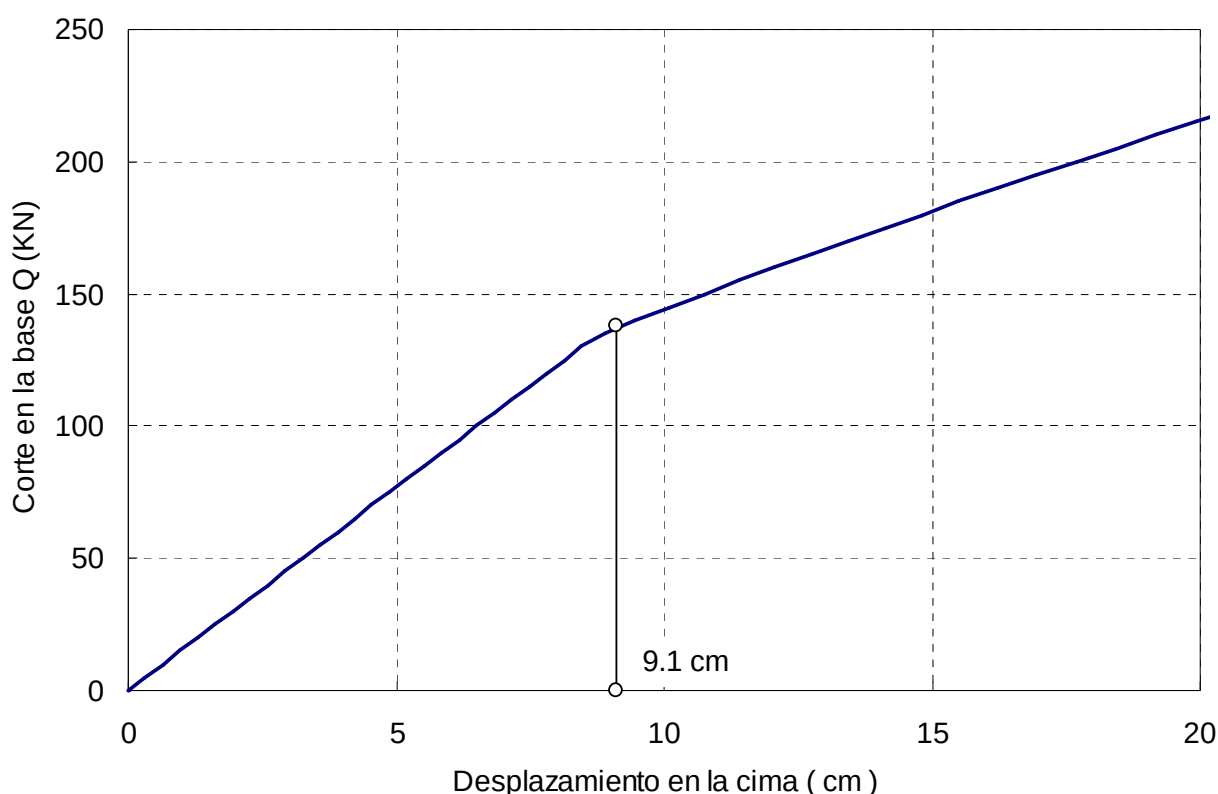
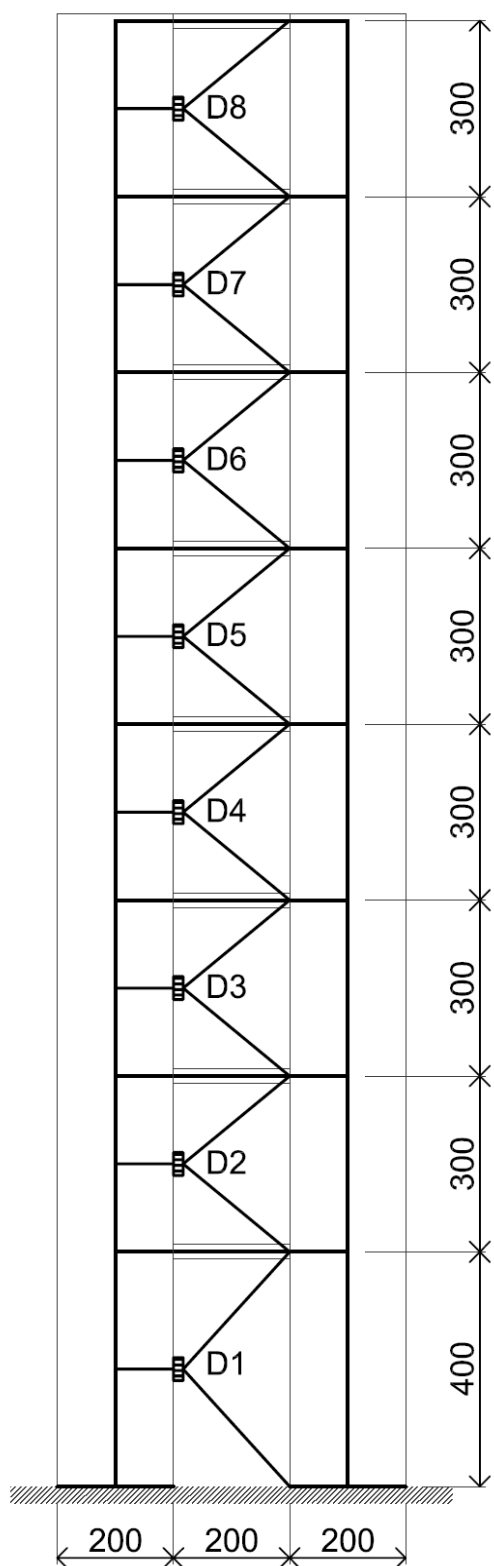
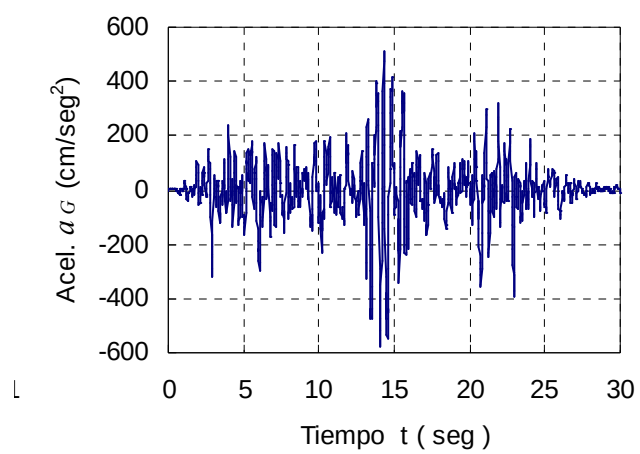


Figura 2: Push Over estructura sin sistema de disipación de energía



a) Modelo matemático de la estructura



b) Acelerograma artificial para la Ciudad de Mendoza

Figura 3: Estructura analizada y acelerograma empleado

Análisis con control activo

La evaluación con control activo se realizó con un modelo de un grado de libertad por piso donde los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez se obtuvieron de la estructura analizada.

Los resultados de las respuestas en desplazamiento máximos en la cima relativo a los desplazamientos sin control y las fuerzas de control máxima en el último piso, puede verse en la tabla 1, siendo q y r constantes que multiplican respectivamente a las matrices identidad y forman las matrices de peso Q y R .

Se observa la influencia de las matrices de peso en el comportamiento de la estructura con control activo, aumentando las magnitudes de las fuerzas de control y disminuyendo los desplazamientos en la cima a medida que se incrementa la relación q/r .

Para el dimensionamiento de los dispositivos de control pasivo, se elige la historia de fuerzas de control, desplazamientos y velocidades obtenidas del procesamiento de la estructura con la relación $q/r=3$, la cual la mantiene con desplazamientos máximos en la cima cercanos a los desplazamientos de fluencia de la estructura, evitando de esta forma la incursión en el campo inelástico y minimizando las fuerzas de control aplicadas.

q/r	FUERZAS CONTROL			DESPLAZAMIENTOS EN LA CIMA			
	MAX	MIN	MAX ABS	MAX	MIN	MAX ABS	REL
0.1	3.55	-3.82	3.82	24.58	-23.24	24.58	94.7%
0.5	14.72	-16.84	16.84	20.06	-20.11	20.11	77.5%
1	23.92	-28.59	28.59	15.67	-16.41	16.41	63.2%
3	42.80	-48.44	48.44	9.17	-9.35	9.35	36.0%
4	45.90	-51.68	51.68	7.98	-7.60	7.98	30.7%
5	47.08	-52.62	52.62	6.98	-6.47	6.98	26.9%
10	46.28	-53.49	53.49	4.81	-4.12	4.81	18.5%
50	55.79	-54.30	55.79	1.85	-2.62	2.62	10.1%

Tabla 1: Resumen de resultados del comportamiento de la estructura con control activo

Diseño de control pasivo

En este trabajo se utilizarán dispositivos de disipación de energía por fluencia de acero, lo cual se justifica por la gran difusión y la vasta experiencia reunida, que permite conseguir sistemas de control económicos y confiables.

Los valores de la carga de fluencia, rigidez y reendurecimiento que se observan en la curva histerética de la figura 1, dependen de las características mecánicas del acero utilizado y de las características geométricas del elemento. El coeficiente α corresponde al coeficiente de reendurecimiento del acero empleado.

Las características mecánicas del disipador se pueden determinar a través de las características del acero utilizado, las características geométricas de las chapas, ilustradas en la figura 4, y del número de chapas empleado. En el caso de los disipadores de tipo triangular, los parámetros necesarios para el modelo del comportamiento se obtienen de las fórmulas (8) a (10)¹³, donde N , es el número de chapas, P_{fl} es la fuerza de fluencia, K_d la rigidez y Δ_{fl} el desplazamiento de fluencia

mostrados en la figura 1.

$$P_{fl} = \frac{NEw_0h^2}{6L} \epsilon_{fl} \quad (8)$$

$$K_d = \frac{NEw_0h^3}{6L^3} \quad (9)$$

$$\Delta_{fl} = \frac{\epsilon_{fl}L^2}{h} \quad (10)$$

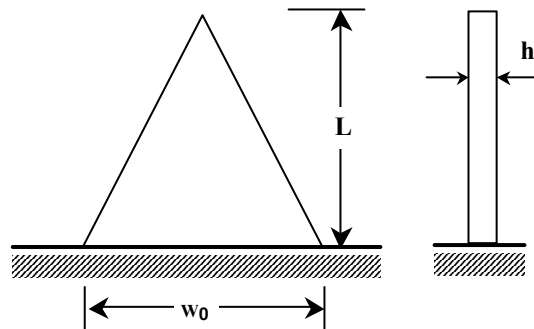


Figura 4: Modelo matemático de una chapa genérica del dispositivo disipador de energía por fluencia de aceros de chapas triangulares

A través de las historias de fuerzas de control, desplazamientos y aceleraciones en cada instante de muestreo, utilizando las ecuaciones (3) a (7), se obtuvieron los valores de rigidez y amortiguamiento óptimo para los resortes y amortiguadores ideales a aplicar en la estructura. Estos valores se exponen en la tabla 2.

	K KN/cm	C KNs/cm
D8	9.58	1.05
D7	20.54	3.20
D6	22.82	5.69
D5	11.67	8.19
D4	10.13	9.69
D3	38.09	10.21
D2	69.08	8.19
D1	232.03	22.91

Tabla 2: Valores óptimos de coeficientes rigidez y amortiguamiento del dispositivo de control pasivo obtenido a través de la modelización con control activo

Con estos valores y siguiendo como criterio la igualación de energía disipada y fuerza máxima entregada por los dispositivos ideales a la energía disipada y fuerza de fluencia de los dispositivos de fluencia de acero, se dimensionaron los dispositivos disipadores de energía por fluencia de acero cuyas características mecánicas y geométricas se muestran en la tabla 3.

DIS.	GEOMETRÍA				CARACTERÍSTICAS		
	N u.	w ₀ cm	L cm	h cm	Δ_{fl} cm	K _d KN/cm	P _{fl} KN
D8	10	14.21	26.63	1.27	0.638	53.94	34.42
D7	7	14.97	26.94	1.91	0.435	129.74	56.48
D6	10	15.03	24.95	1.91	0.374	234.09	87.45
D5	11	15.85	25.09	1.91	0.378	267.21	100.88
D4	10	14.42	29.28	2.54	0.386	329.27	127.05
D3	10	15.26	27.34	2.54	0.336	428.16	144.04
D2	10	13.13	26.23	2.54	0.309	417.40	129.17
D1	10	13.10	18.15	2.54	0.148	1257.30	186.32

Tabla 3: Características de los disipadores de energía adoptados

Las características del acero utilizado para el dimensionamiento de los dispositivos corresponde a un acero F-24.

Resultados numéricos

En la figura 5 se observa la comparación del comportamiento de las estructura ante el sismo de diseño teniendo en cuenta el modelo sin control, con control activo y con control pasivo.

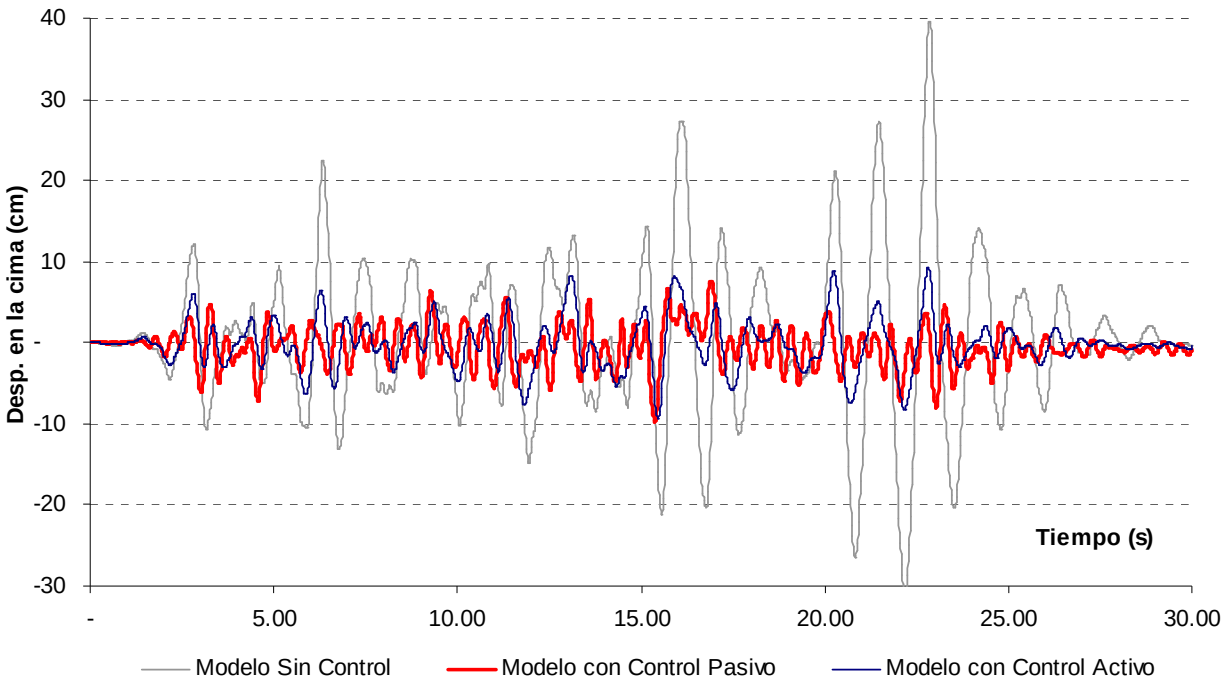


Figura 5: Respuesta de la estructura sin control, con control activo y con control pasivo

La tabla 4 describe los desplazamientos máximos en la cima para los tres modelos analizados.

	Modelo Sin Control	Modelo con Control Activo	Modelo con Control Pasivo
Max	39.59	9.17	7.54
Min	-31.07	-9.35	-9.71
Absoluto	39.59	9.35	9.71

Tabla 4: Comparación de los desplazamientos máximos en la cima para el modelo sin control, con control activo y con control pasivo.

La Tabla 5 compara las distorsiones de piso máximas en cada nivel para la estructura sin control y con control pasivo.

Nivel	1	2	3	4	5	6	7	8
Sin control	0.342%	0.913%	1.356%	1.745%	2.032%	2.197%	2.283%	2.300%
Con control	0.332%	0.219%	0.202%	0.470%	0.487%	0.488%	0.467%	0.447%

Tabla 5: Comparación de las distorsiones de piso extremas para los modelos sin control y con control pasivo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha avanzado sobre trabajos previos^{5,6,7,8,9} donde se propuso una metodología de diseño consistente en aplicar la teoría de control activo para obtener a través de su simulación numérica, historias de fuerzas de control útiles para el diseño y optimización de dispositivos de control pasivo.

La metodología ya probada en pórticos⁵, se aplicó a un sistema de tabiques acoplados mediante vigas flexibles.

Los resultados obtenidos en un ejemplo de aplicación han sido satisfactorios, pudiéndose observar que para diferentes grados de control activo, logrados a través de la elección de las matrices de peso R y Q, se obtienen diferentes resultados en desplazamientos y en fuerzas de control, lo que permite adoptar una relación adecuada entre ambas para el dimensionamiento de los dispositivos de control pasivo.

Los desplazamientos máximos en la cima obtenidos son muy cercanos a los objetivos propuestos, logrando tener una muy pequeña incursión en el campo inelástico para el sismo de diseño y reduciendo el desplazamiento máximo de 39.59 cm a sólo 9.71 cm.

Las distorsiones máximas de piso se controlaron llevándolas a distorsiones menores al 0,50 % (recomendadas para evitar daño en los elementos no estructurales). Además se nota el cambio de funcionamiento de la estructura pasando de un funcionamiento de tabiques aislados con distorsiones crecientes en los niveles, a un funcionamiento con distorsiones más parejas.

Se puede observar que el comportamiento de la estructura con control pasivo se ajusta mejor al comportamiento de la estructura con control activo en la zona de mayor exigencia del sismo, esto es debido a que en la zona de menor exigencia, los dispositivos trabajan sin llegar a la fluencia del material, actuando como un resorte, que como consecuencia hace la estructura más rígida provocando variación en su frecuencia.

En este ejemplo se puede observar como a través de la implementación de estos

dispositivos se pudo adecuar esta estructura dimensionada para un estado límite de seguridad de vida con distorsiones de piso máximas del orden de 2,30 %, a una estructura que cumple con el estado límite operacional con distorsiones de piso máximas de 0,49%.

Ampliando este trabajo, estableciendo criterios para el tratamiento con varios acelerogramas de una zona sísmica dada, se puede obtener una herramienta importante para el dimensionamiento de sistemas estructurales con control pasivo, los cuales pueden ser de implementación en estructuras sismorresistentes nuevas o en el campo de las intervenciones sobre estructuras existentes con el fin de su rehabilitación en su capacidad de resistencia antes fenómenos sísmicos.

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.

REFERENCIAS

1. A. M. Reinhorn, N. Gluck, J. Gluck, and R. Levy. Optimal Design of Supplemental Dampers for Control of Structures. *Proceedings 11th World Conference on Earthquake Engineering. Paris. France. Paper No 0998. 1998.*
2. Y. Ribakov and J Gluck. Active Control Of MDOF Structures with Supplemental Electrorheological Fluid Dampers. *Earthquake Engng. Strct. Dyn*, 28,143-156, 1999.
3. 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.
4. D. J. Dowdell and C. E. Ventura. Application of Control Theory for optimal Design of Added Viscous and Friction Dampers. *Proceedings 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver. Canada. Paper No 2481. 2004.*
5. Ascheri, J. P., Rubinstein M. y Möller, O., Diseño De Sistemas Sismorresistentes De Control Pasivo Utilizando Estrategia De Control Activo. *Memorias del XVI Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. Córdoba. Argentina. 2007.*
6. 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.*
7. 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.*
8. 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.*
9. 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.*
10. A. H. Barbat and J. M. Canet. *Estructuras Sometidas a Acciones Sísmicas.* Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2^a Edición, 1994.
11. T. T. Soong. *Active Structural Control: Theory and Practice.* Longman Scientific & Technical. 1990.
12. INPRES, "Microzonificación Sísmica del Gran Mendoza" Publicación Técnica N° 19. 1995.
13. T. T. Soong and G.F. Dargush. *Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering.* John Wiley & Sons Ltd. 1997.