

VARIACIÓN EN LA RESPUESTA DINÁMICA DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA SEGÚN DISTINTOS ALGORITMOS DE ANÁLISIS

Gustavo L. Palazzo^{*}, Francisco J. Crisafulli[†] y Francisco López Almansa^{††}

^{*} Ceredetec
Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional
Rodríguez 273 (5500), Ciudad de Mendoza, Argentina
e-mail: gpalazzo@frm.utn.edu.ar

[†] Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Cuyo
Casilla de Correo 405 (5500), Ciudad de Mendoza, Argentina
e-mail: jcrisa@uncu.edu.ar

^{††} Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña
Av. Diagonal 649 (08028), Barcelona, España
e-mail: francesc.lopez-almansa@upc.edu

Palabras clave: análisis dinámico no lineal, procedimientos de análisis, disipadores de energía.

Resumen. *Gran cantidad de edificios en regiones de alta peligrosidad sísmica podrían necesitar una rehabilitación. Para ello pueden implementarse disipadores de energía basados en la plastificación de metales, tal como las barras de pandeo restringido. Pero es necesario profundizar investigaciones tendientes a optimizar el diseño de estructuras de hormigón armado rehabilitadas con estos dispositivos. Puede simularse el comportamiento de estos disipadores mediante el macro modelo de Wen, implementado en SAP2000. Para verificar la eficiencia de este modelo se comparan en este trabajo los resultados numéricos obtenidos con 2 programas de elementos finitos. Se realiza análisis dinámico lineal y no lineal de un pórtico con/sin disipadores, excitado según 5 acelerogramas. Se evalúa la respuesta estructural con distintos procedimientos de análisis y modelos constitutivos. En las conclusiones se destacan las diferencias encontradas.*

1 INTRODUCTION

Gran cantidad de estructuras de hormigón armado han sido construidas en regiones de alta peligrosidad sísmica cuando el conocimiento de la ingeniería sísmica era inexistente o estaba en sus comienzos. Como estas construcciones carecen de los avances logrados en el análisis y diseño sismorresistente de los últimos años, podrían tener un desempeño inadecuado frente a sismos destructivos. Puede ser necesario entonces su rehabilitación ¹.

Mediante la disipación pasiva de energía, por ejemplo a través de barras de pandeo restringido (Figura 1), es posible mejorar el comportamiento de estas estructuras ². En estos dispositivos una barra central de acero disipa energía a través de ciclos de fluencia estable de tracción – compresión. El pandeo se evita ubicando la barra dentro de un tubo de acero relleno de hormigón o mortero.

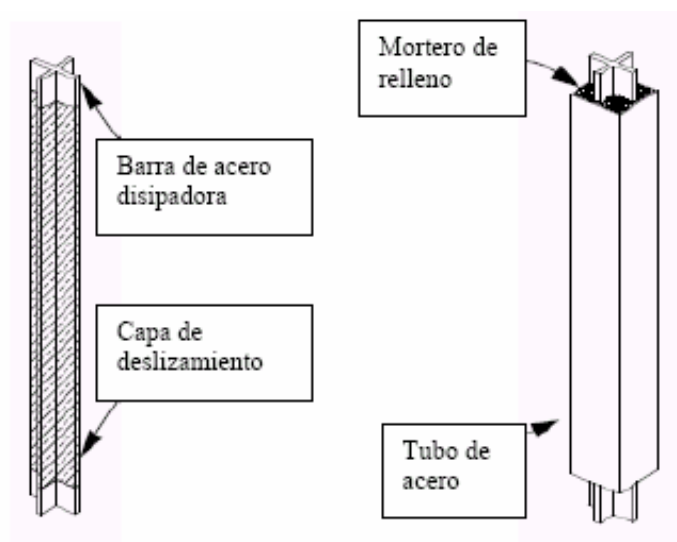


Figura 1: Barra de pandeo restringido

Varias investigaciones, especialmente con estructuras de acero, muestran las ventajas logradas al incorporar este tipo de disipadores ³.

Pero son necesarias nuevas investigaciones tendientes a establecer aspectos de diseño de las estructuras rehabilitadas con esta técnica.

En un trabajo anterior de los autores ⁴ se planteó un procedimiento numérico de optimización de los parámetros que define el comportamiento de las barras de pandeo restringido. En el mismo se empleó el macro modelo aproximado de Bouc-Wen para simular el comportamiento de estos disipadores ⁵. Este modelo ha sido usado por otros autores ^{6, 7, 8}; y puede también implementarse en el programa SAP2000 ⁹.

Dado que es necesario verificar la aproximación obtenida con la simulación empleada, el objetivo de este trabajo es comparar los resultados numéricos logrados con dos programas de elementos finitos, al excitar mediante distintos registros sísmicos una estructura de hormigón armado con barras de pandeo restringido.

Para lograr el objetivo propuesto se realizaron análisis dinámicos lineales y no lineales de un pórtico de hormigón armado con/sin disipadores, mediante dos programas de computación (SAP2000⁹ y PLCD2¹⁰). La estructura fue excitada con 4 acelerogramas de sismos destructivos, y una función sinusoidal. Si bien es necesario analizar la variación de distintos parámetros de respuesta (aceleración, desplazamiento, deriva de piso, esfuerzos internos y energía disipada), se concentró el estudio en las historias en el tiempo de los desplazamientos en el nivel superior de la estructura, y en sus valores máximos.

En las conclusiones se resaltan las principales diferencias obtenidas en las respuestas con las diversas simulaciones, y se plantea la necesidad de implementar modelos constitutivos termodinámicamente sustentables.

2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS NUMÉRICOS IMPLEMENTADOS

2.1 Parámetros geométricos, mecánicos y dinámicos de la estructura evaluada

A partir de los datos del pórtico presentado por Antonucci⁸, se realizó un modelo 2D en el programa SAP2000⁹ y PLCD2¹⁰, (Figura 2). El pórtico tiene un vano de 4.00 m de luz y una altura de 3.30 m por nivel. Las columnas y vigas de sección cuadrada tienen un lado de 0.26 m y 0.40 m respectivamente. El espesor de la losa es de 0.12 m, y la sobrecarga de 5.0 kN/m².

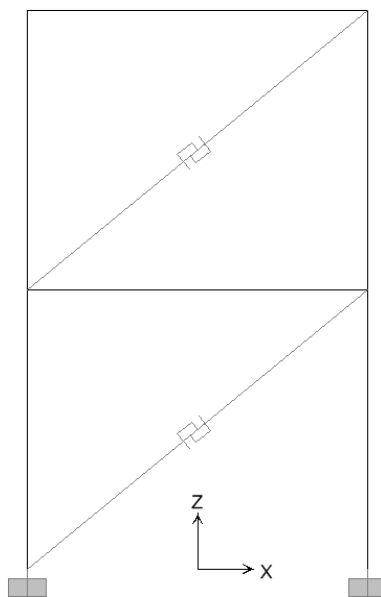


Figura 2: Esquema del modelo numérico de la estructura.

Para el hormigón armado se adoptó un módulo de elasticidad $E = 24821$ MPa y un coeficiente de Poisson $\nu = 0.17$. En las columnas de hormigón se consideró una masa por

unidad de volumen de 2.40 kN s²/m, y en las vigas otra de 9.97 kN s²/m (incluyendo aquí la masa correspondiente a la losa y la sobrecarga).

La estructura fue discretizada en SAP2000 con 8 elementos de pórtico, y 6 nodos con 2 grados de libertad cada uno. En PLCD2 se implementó un modelo con elementos tipo viga de Timoshenko, de 3 nodos, cuadrático, 2 grados de libertad en cada uno, 2 puntos de integración de Gauss, y con 6 capas. Se trabajó con un modelo denominado reducido (con 8 elementos y 14 nodos), y otro ampliado (con 40 elementos y 78 nodos).

Para las barras de pandeo restringido se adoptaron los parámetros indicados en Tabla 1. En ella f_y es la tensión umbral donde comienza la plasticidad; A el área de la barra; $K = E A / L$, la rigidez elástica del mismo (en función del módulo de elasticidad E , la sección transversal A y la longitud en fluencia L de la barra central); $F_y = f_y A$, la fuerza para la cual se inicia el comportamiento plástico; α es la relación de la rigidez post fluencia sobre la rigidez elástica; y n el parámetro antes mencionado del modelo de Wen.

Parámetro	Disipador	
	Pequeño	Grande
E	205900 MPa	205900 MPa
ν	0.25	0.25
f_y	111.1 MPa	111.1 MPa
A	2.25 E-04 m ²	9.00 E-04 m ²
K	8936 KN/m	35742 KN/m
F_y	25 KN	100 KN
α	0	0
n	1	1

Tabla 1: Parámetros mecánicos de los disipadores

La estructura libre tiene un período fundamental de 0.38 s (2.62 Hz), con diagonales pequeñas de 0.27 s (3.72 Hz) y con diagonales grandes de 0.17 s (5.74 Hz).

2.2 Acelerogramas seleccionados para excitar la estructura

Se consideraron dos sismos con epicentro cercano a la Provincia de Mendoza – Argentina: Caucete (San Juan, Argentina, 1977, Registro San Juan, pico de aceleración – PGA – 18.2 %g) y Viña del Mar (Chile, 1985, Registro Viña del mar S20W, PGA: 35.1 %g); y otros dos sismos importantes: Loma Prieta (Estados Unidos, 1989, Registro Santa Cruz, PGA: 44.0 %g) y Cape Mendocino de fuente cercana (Estados Unidos, 1992, Registro Cape Mendocino, PGA: 149.6 %g). Además se evaluó una excitación sinusoidal con igual período que el fundamental de la estructura libre (PGA: 10.2 %g). En la Tabla 2 se indican valores adoptados en la discretización de la excitación y de la respuesta.

Excitación	Datos de la excitación			Datos de la salida		
	Δt	Nº puntos	Duración [s]	Δt	Nº puntos	Duración [s]
Sinusoidal	0.020	570	11.4	0.020	1000	20.0
Caucete	0.040	250	10.0	0.040	500	20.0
Viña	0.017	2047	34.8	0.017	1000	17.0
Loma	0.020	1024	20.5	0.020	1000	20.0
Cape	0.020	1000	40.0	0.020	1000	20.0

Tabla 2: Parámetros de la discretización de la excitación y la respuesta.

En la Figura 3 se muestran los pseudo espectros de aceleraciones de los acelerogramas seleccionados.

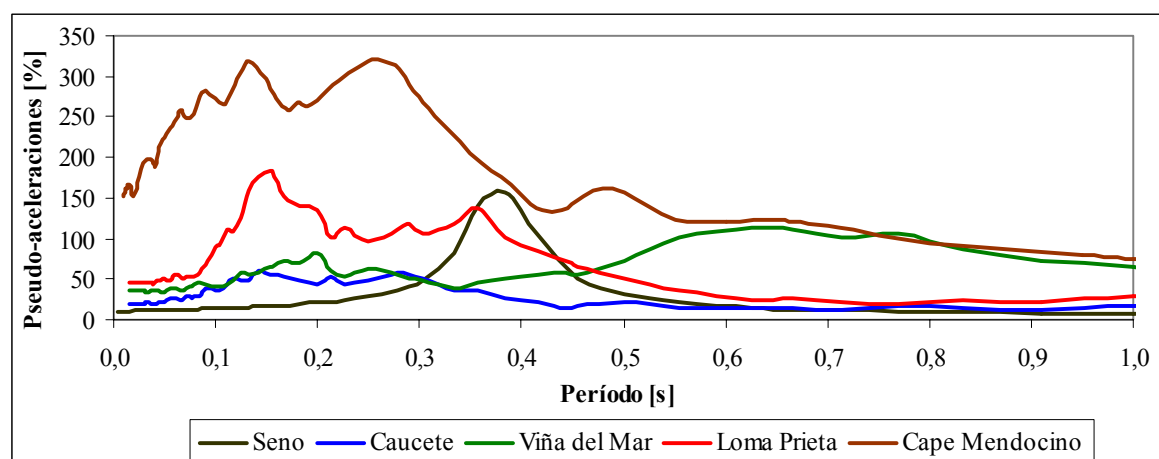


Figura 3: Espectros de pseudo-aceleraciones de los registros considerados.

2.3 Procedimientos de análisis estructural

En este trabajo se han realizado análisis dinámicos lineales y no lineales. Se trabajó con pequeñas deformaciones para no considerar el pandeo de las diagonales disipadoras, que en el caso de las barras de pandeo restringido (Figura 1) se evita por el fuste que las rodea.

Para obtener la historia de los desplazamientos en SAP2000 se consideró el procedimiento de análisis modal (Modal). La evaluación no lineal de la estructura con barras de pandeo restringido se realizó con el método de análisis no lineal rápido, considerado por Wilson ¹¹ especialmente eficiente para el análisis dinámico de estructuras con pequeño número de elementos no lineales (tal como el caso de estructuras con disipadores, suponiendo que aquella permanezca en rango elástico).

También se realizó con SAP2000, y con el programa PLCD2, análisis mediante la integración directa en el tiempo de la ecuación de movimiento (I.D.), empleando el

procedimiento de Newmark con coeficiente $\beta = 0.25$ y $\gamma = 0.5$.

El programa PLCD2¹⁰, desarrollado en el Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería de la Universidad Politécnica de Cataluña, permite trabajar con problemas de la mecánica de sólidos lineal, no lineal, con pequeñas o grandes deformaciones y análisis térmicos y termo-mecánicos acoplados. En la resolución de problemas de la mecánica de sólidos permite realizar análisis cuasi estáticos y dinámicos, sísmicos o no, con no linealidad constitutiva y geométrica. El código permite realizar análisis con materiales que presenten fenómenos de viscoelasticidad, daño y plasticidad generalizada

2.4 Modelos constitutivos

2.4.1 Para el hormigón armado de la estructura principal

Como SAP2000 no permite evaluar la no linealidad a nivel constitutivo de la estructura principal, se analizó la misma considerando al hormigón armado como un material isótropo, elástico y lineal, según los parámetros E y ν definidos en 2.1.

En PLCD2 se trabajó con los mismos parámetros, pero se empleó además un modelo viscoelástico. Este modelo permite simular en forma rigurosa el amortiguamiento del material, ya que su parámetro principal (el tiempo de retardo) puede obtenerse experimentalmente. Así se adoptó para el hormigón armado, de acuerdo a¹², un tiempo de retardo de 0.001 s. De esta manera se evita la consideración de porcentajes del amortiguamiento crítico para cada modo que debe definirse en el procedimiento de superposición modal clásico (válido solo para análisis lineal). Al respecto debe recordarse que en sistemas de varios grados de libertad el uso de este tipo de amortiguamiento viola el equilibrio dinámico y las leyes fundamentales de la física¹¹.

Si se considera un amortiguamiento según la fórmula de Rayleigh¹³ podrían lograrse respuestas coincidentes en desplazamientos, velocidades, aceleraciones y deformaciones, si el coeficiente proporcional a la rigidez de la fórmula mencionada se iguala al tiempo de retardo del modelo viscoso¹⁴. Pero tampoco en este caso se lograrán respuestas iguales en tensiones. Por ello, en los análisis efectuados con SAP2000 se trabajó con un amortiguamiento de Rayleigh con un coeficiente proporcional a la rigidez de 0.001. También se evaluaron las diferencias al considerar un porcentaje del amortiguamiento crítico del 5% (igual para todos los modos), que es el valor que habitualmente se emplea para este tipo de material.

2.4.2 Para las barras de pandeo restringido

Las barras de pandeo restringido fueron consideradas con comportamiento elástico lineal y elasto-plástico.

Para el comportamiento E.P. en SAP2000 se adoptó el macro modelo de Wen^{5, 11}. Mientras que en PLCD2 se trabajó con el modelo elasto-plástico clásico sin amortiguamiento, con una superficie de fluencia de Von Mises y plasticidad asociada¹⁵.

3 RESULTADOS OBTENIDOS

La respuesta que se presenta en esta parte corresponde a la historia de los desplazamientos en el nivel superior del pórtico, sus valores máximos, y los ciclos histeréticos que se obtienen para el disipador pequeño del segundo nivel, excitado según una función sinusoidal de PGA variable.

Las diferencias porcentuales obtenidas en análisis modal e I.D. se realizó respecto los resultados obtenidos en este último procedimiento de análisis. De igual manera al comparar los resultados obtenidos en SAP2000 (I.D.) y PLCD2, modelo ampliado, se efectuó en base a estos últimos valores.

3.1 Estructura libre

La Tabla 3 y 4 muestran los desplazamientos máximos para la estructura sin diagonales con/sin amortiguamiento. En SAP2000 se consideró análisis modal (Modal) e integración directa en el tiempo (I.D.). En PLCD2 también se realizó el análisis con I.D. considerando una discretización reducida (Red.) y una ampliada (Ampl.). En la Figura 4 se comparan las historias de los desplazamientos obtenidos en SAP2000 y PLCD2.

Excitación	SAP			PLCD2			Dif [%] (1) – (2)
	Modal	I.D. (1)	Dif [%]	Red.	Ampl. (2)	Dif [%]	
Sinusoidal	38.9	28.60	-36.0	31.49	30.27	-4.0	5.5
Caucete	1.83	1.91	4.2	1.90	1.82	-4.4	-4.9
Viña	5.23	3.86	-35.5	4.40	4.18	-5.3	7.7
Loma	12.60	10.86	-16.0	11.25	10.92	-3.0	0.5
Cape	11.47	12.54	8.5	12.21	12.37	1.3	-1.4

Tabla 3: Desplazamientos máximos en la estructura libre no amortiguada.

Excitación	SAP			PLCD2			Dif [%] (1) – (2)
	Modal	I.D. (1)	Dif [%]	Red.	Ampl. (2)	Dif [%]	
Sinusoidal	19.77	15.33	-29.0	16.68	15.33	-8.8	0.0
Caucete	1.29	1.27	-1.6	1.17	1.22	4.1	-4.1
Viña	3.13	3.01	-4.0	3.10	3.07	-1.0	2.0
Loma	9.86	8.69	-13.5	8.93	8.83	-1.1	1.6
Cape	12.35	12.65	2.4	12.57	12.63	0.5	-0.2

Tabla 4: Desplazamientos máximos en la estructura libre amortiguada.

En SAP2000 se observan diferencias apreciables entre el análisis modal y la I.D., no cuando se comparan estos resultados con la I.D. en PLCD2 (modelo ampliado). Tampoco se tienen diferencias considerables entre los resultados obtenidos en PLCD2 con los modelos

ampliados y reducido.

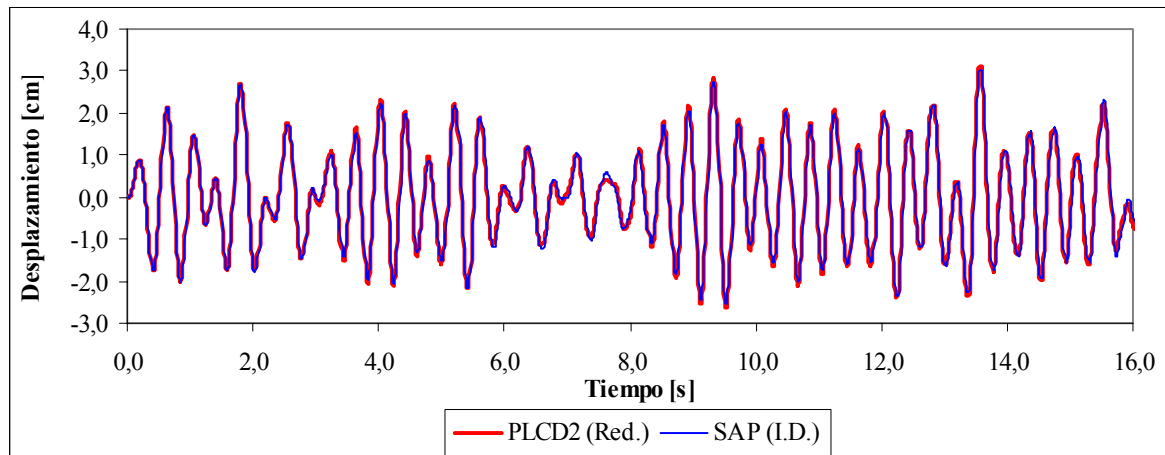


Figura 4: Historia de los desplazamientos en la estructura libre amortiguada, excitación de Viña.

3.2 Estructura con diagonales (modelo constitutivo elástico lineal)

La Tabla 5 y 6 muestran los desplazamientos máximos para la estructura con diagonales pequeñas con/sin amortiguamiento, considerando para las mismas un comportamiento elástico lineal (E.L.). La Tabla 7 y 8 muestra los valores correspondientes a la estructura con diagonales grandes. En la Figura 5 se comparan las historias de los desplazamientos obtenidos en SAP2000 con análisis modal e I.D.

Excitación	SAP			PLCD2			Dif [%] (1) – (2)
	Modal	I.D. (1)	Dif [%]	Red.	Ampl. (2)	Dif [%]	
Sinusoidal	0.73	0.76	3.9	0.75	0.76	1.3	0.0
Caucete	1.65	2.28	27.6	1.94	1.99	2.5	-14.6
Viña	2.20	3.28	32.9	3.09	3.14	1.6	-4.5
Loma	5.89	4.24	-38.9	4.52	4.47	-1.1	5.1
Cape	5.95	6.37	6.6	6.35	6.34	-0.2	-0.5

Tabla 5: Desplazamientos máximos en la estructura con diagonales pequeñas (E.L.), sin amortiguamiento.

Excitación	SAP			PLCD2			Dif [%] (1) – (2)
	Modal	I.D. (1)	Dif [%]	Red.	Ampl. (2)	Dif [%]	
Sinusoidal	0.69	0.72	4.2	0.72	0.72	0.0	0.0
Caucete	1.67	1.41	-18.4	1.35	1.36	0.7	-3.7
Viña	1.43	1.58	9.5	1.44	1.45	0.7	-9.0
Loma	3.51	3.44	-2.0	3.38	3.36	-0.6	-2.4
Cape	5.87	5.84	-0.5	5.84	5.84	0.0	0.0

Tabla 6: Desplazamientos máximos en la estructura con diagonales pequeñas (E.L.), con amortiguamiento.

Excitación	SAP			PLCD2			Dif [%] (1) – (2)
	Modal	I.D. (1)	Dif [%]	Red.	Ampl. (2)	Dif [%]	
Sinusoidal	0.16	0.17	5.9	0.17	0.17	0.0	0.0
Caucete	1.15	0.71	-62.0	0.70	0.64	-9.4	-10.9
Viña	3.20	1.27	-152.0	1.30	1.20	-8.3	-5.8
Loma	2.76	3.24	14.8	3.15	3.18	0.9	-1.9
Cape	2.03	2.04	0.5	2.07	2.02	-2.5	-1.0

Tabla 7: Desplazamientos máximos en la estructura con diagonales grandes (E.L.), sin amortiguamiento.

Excitación	SAP			PLCD2			Dif [%] (1) – (2)
	Modal	I.D. (1)	Dif [%]	Red.	Ampl. (2)	Dif [%]	
Sinusoidal	0.15	0.15	0.0	0.15	0.15	0.0	0.0
Caucete	0.68	0.45	-51.1	0.44	0.43	-2.3	-4.7
Viña	0.80	0.78	-2.6	0.78	0.76	-2.6	-2.6
Loma	1.46	1.78	18.0	1.75	1.72	-1.7	-3.5
Cape	1.91	1.94	1.5	1.96	1.94	-1.0	0.0

Tabla 8: Desplazamientos máximos en la estructura con diagonales grandes (E.L.), con amortiguamiento.

También para la estructura con barras diagonales, consideradas con comportamiento elástico lineal se observan diferencias apreciables entre el análisis modal y la I.D. en SAP2000, no así cuando se comparan estos resultados con la I.D. en PLCD2 (modelo ampliado). La mayor diferencia entre resultados de SAP2000 y PLCD2 se da para el registro de Caucete, el cual fue discretizado cada 0.04 s, mientras que en el resto de los acelerogramas se trabajó con 0.02 s. Tampoco se tienen diferencias considerables entre los resultados obtenidos en PLCD2 con los modelos ampliados y reducido

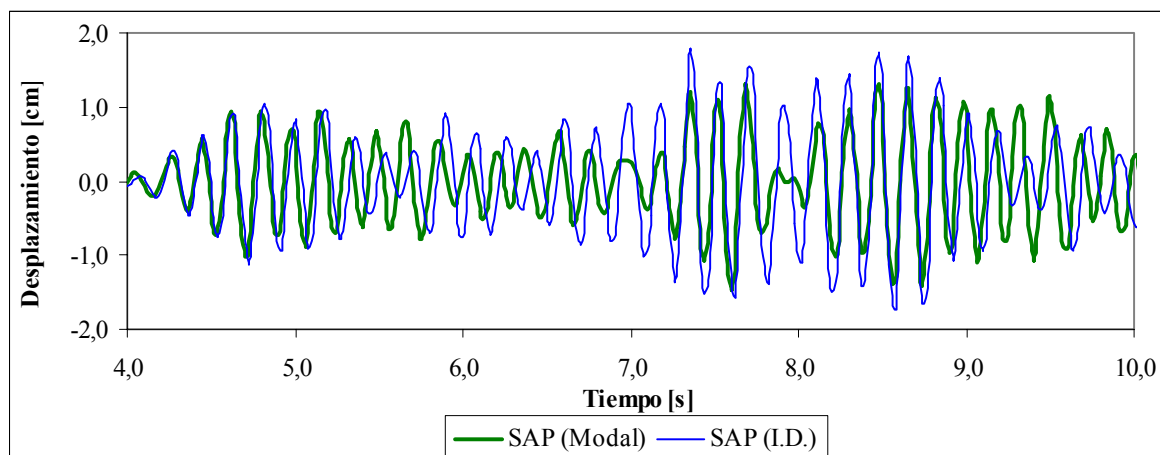


Figura 5: Historia de los desplazamientos en la estructura con diagonales grandes (E.L.) y amortiguamiento, excitación de Loma.

3.3 Estructura con diagonales (modelo constitutivo elasto-plástico)

La Tabla 9 y 10 muestran los desplazamientos máximos para la estructura con diagonales pequeñas con/sin amortiguamiento, considerando para las mismas un comportamiento elasto-plástico (modelo de Wen en SAP2000 y modelo E,P. clásico en PLCD2). La Tabla 11 y 12 muestra los valores correspondientes a la estructura con diagonales grandes. En las Figuras 6 y 7 se comparan las historias de los desplazamientos obtenidos en SAP2000 y PLCD2.

3.3.1 Estructura con diagonales pequeñas

Excitación	SAP			PLCD2			Dif [%] (1) – (2)
	Modal	I.D. (1)	Dif [%]	Red.	Ampl. (2)	Dif [%]	
Sinusoidal	0.78	0.80	2.5	0.75	0.74	-1.4	-8.1
Caucete	1.14	1.00	-14.0	1.16	1.16	0.0	13.8
Viña	1.19	1.13	-5.3	1.28	1.26	-1.6	10.3
Loma	2.35	2.32	-1.3	2.49	2.11	-18.0	-10.0
Cape	11.02	10.98	-0.4	4.34	10.84	60.0	-1.3

Tabla 9: Desplazamientos máximos en la estructura con diagonales pequeñas (E.P.), sin amortiguamiento.

Excitación	SAP			PLCD2			Dif [%] (1) – (2)
	Modal	I.D. (1)	Dif [%]	Red.	Ampl. (2)	Dif [%]	
Sinusoidal	0.76	0.76	0.0	0.73	0.73	0.0	-4.1
Caucete	1.09	0.95	-14.7	1.11	1.11	0.0	14.4
Viña	1.14	1.08	-5.6	1.24	1.23	-0.8	12.2
Loma	2.29	2.25	-1.8	2.45	2.03	-20.7	-10.8
Cape	10.89	10.87	-0.2	4.30	10.65	59.6	-2.1

Tabla 10: Desplazamientos máximos en la estructura con diagonales pequeñas (E.P.), con amortiguamiento.

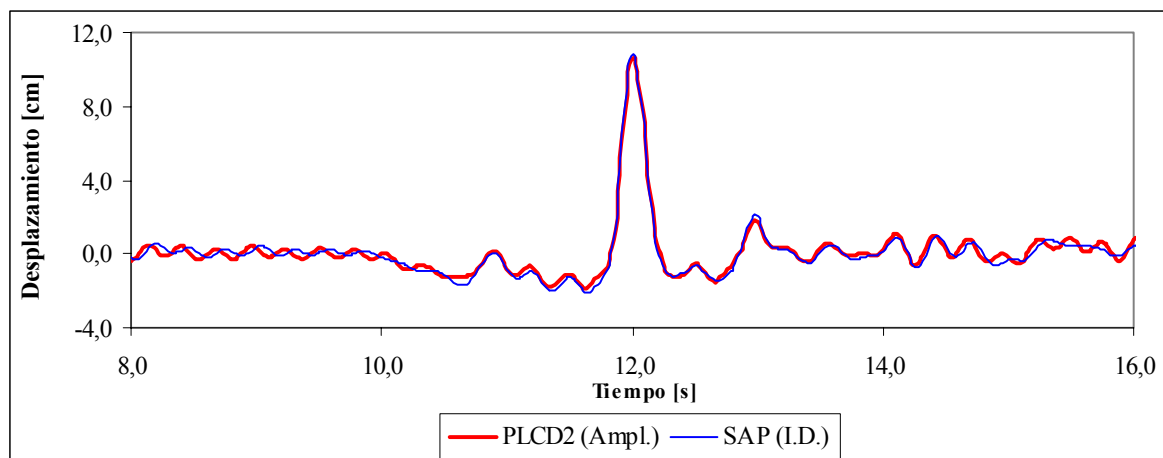


Figura 6: Historia de los desplazamientos en la estructura con diagonales pequeñas (E.P.) y amortiguamiento, excitación de Cape.

3.3.2 Estructura con diagonales grandes

Excitación	SAP			PLCD2			Dif [%] (1) – (2)
	Modal	I.D. (1)	Dif [%]	Red. (2)	Ampl.	Dif [%]	
Sinusoidal	0.17	0.17	0.0	0.17	0.17	0.0	0.0
Caucete	0.41	0.47	12.8	0.70	0.63	-11.1	25.4
Viña	0.86	0.81	-6.2	0.94	0.89	-5.6	9.0
Loma	1.07	1.03	-3.9	2.49	1.24	-100.8	16.9
Cape	6.45	6.47	0.3	3.67	5.46	32.8	-18.5

Tabla 11: Desplazamientos máximos en la estructura con diagonales grandes (E.P.), sin amortiguamiento.

Excitación	SAP			PLCD2			Dif [%] (1) – (2)
	Modal	I.D. (1)	Dif [%]	Red. (2)	Ampl.	Dif [%]	
Sinusoidal	0.16	0.15	-6.7	0.16	0.16	0.0	6.3
Caucete	0.39	0.41	4.9	0.59	0.55	-7.3	25.5
Viña	0.89	0.73	-21.9	0.83	0.89	6.7	18.0
Loma	1.05	0.98	-7.1	2.45	1.19	-105.9	17.6
Cape	6.36	6.38	0.3	3.63	5.38	32.5	-18.6

Tabla 12: Desplazamientos máximos en la estructura con diagonales grandes (E.P.), con amortiguamiento.

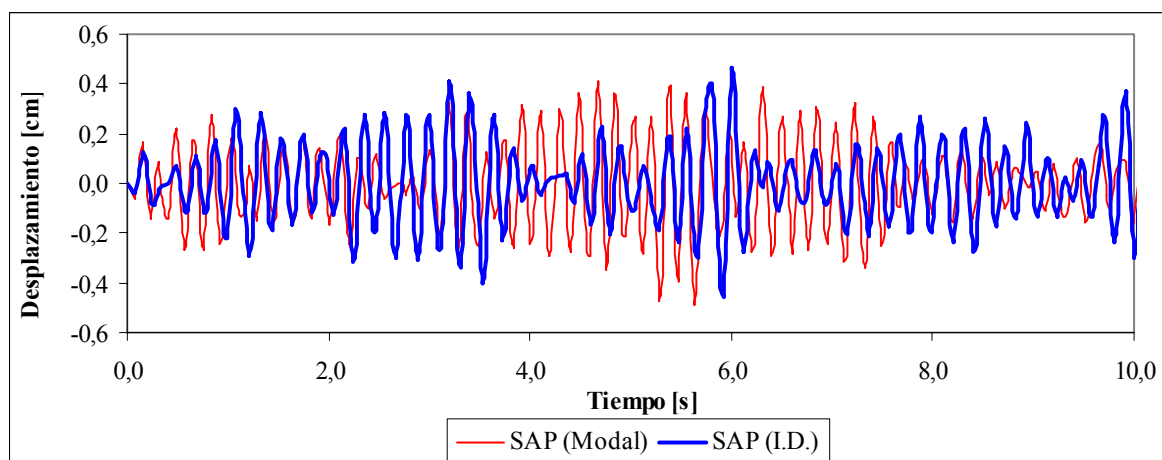


Figura 7: Historia de los desplazamientos en la estructura con diagonales grandes (E.P.), sin amortiguamiento, excitación de Cauçete.

Al considerar la plastificación de las barras diagonales las diferencias entre los resultados de SAP2000 y PLCD2 son en general significativas. Además el modelo reducido en PLCD2 pierde precisión.

3.4 Consideraciones sobre la disipación de energía histerética

Para evaluar la disipación de energía durante el comportamiento no lineal del disipador, se compararon los ciclos histeréticos obtenidos para el disipador pequeño del nivel superior. Así en SAP2000 se consideró análisis modal con amortiguamiento de Rayleigh proporcional a la rigidez de 0.001 y un porcentaje del amortiguamiento crítico para cada modo del 5%. En PLCD2 se obtuvieron estos ciclos en base a un análisis con integración directa y tiempo de retardo para la estructura de hormigón armado de 0.001 s. La estructura fue excitada según la función sinusoidal antes definida, pero con PGA de 10.2, 15.3, 20.4 y 25.5 %g. En la Figura 8 se comparan los ciclos obtenidos.

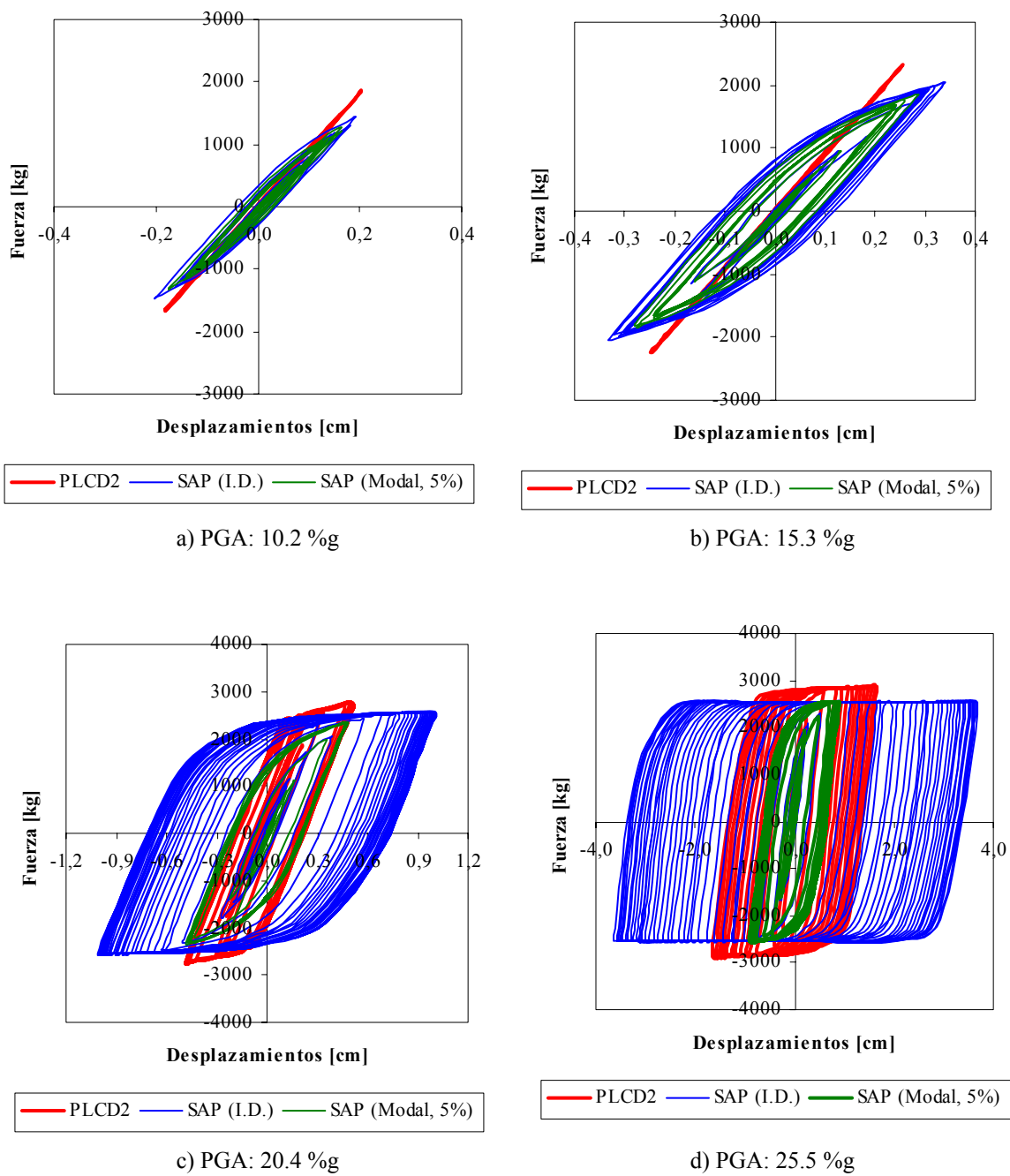


Figura 8: Ciclos histéricos para la estructura con excitación sinusoidal con distintos PGA.

Se observa gran disparidad en la energía disipada en forma histérica según los distintos análisis efectuados. Además el inicio del comportamiento plástico comienza primero en el análisis con modelo de Wen (SAP2000) y luego en el modelo de PLCD2 con comportamiento

elasto-plástico.

4 CONCLUSIONES

Los valores máximos de desplazamientos en la estructura libre o con diagonales con comportamiento elástico lineal son aproximadamente coincidentes si se emplea un análisis con integración directa de la ecuación de movimiento, tanto en SAP2000 como en PLCD2. En estos casos las diferencias son apreciables al comparar en SAP2000 la respuesta mediante análisis modal e integración directa.

Al considerar la plastificación de las barras diagonales las diferencias entre los resultados de SAP2000 y PLCD2 son significativas. Además el modelo reducido en PLCD2 pierde precisión.

El cálculo de la energía disipada por comportamiento histerético de las barra de pandeo restringido varía significativamente al considerar distintos procedimientos de análisis. Cabe considerar que en el macro modelo de Wen implementado por SAP2000 el usuario no define ningún parámetro relacionado con el amortiguamiento o la disipación de energía de la barra de pandeo restringido.

Se estima conveniente para investigaciones dirigidas a evaluar la eficiencia de los disipadores en la rehabilitación de estructuras de hormigón armado implementar modelos constitutivos basados en la mecánica de los sólidos, y profundizar los estudios tendientes a simular de manera más rigurosa el amortiguamiento estructural y la disipación de energía.

5 REFERENCIAS

- [1] I. Aiken, *Passive Energy Dissipation – Hardware and Applications*, Proceeding Los Angeles County and Seaso Symposium on Passive Energy Dissipation Systems for New and Existing Building, Los Angeles, Estados Unidos (1996).
- [2] G. Palazzo y F. Crisafulli, *Evaluación de la Eficiencia de Disipadores por Fluencia Usados para la Rehabilitación de Pórticos*, Memorias de las XVIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Buenos Aires, Argentina (2004).
- [3] A. Watanabe, Y. Hitomi, E. Saeki, A. Wada y M. Fujimoto, *Properties of Brace Encased in Buckling- Restraining Concrete and Steel Tube*, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Paper No. 6-7-4, Vol. IV, pp. 719- 724 (1998).
- [4] G. Palazzo, F. Crisafulli, y F. López Almansa, *Evaluación Numérica de la Respuesta Sismorresistente de un Pórtico de Hormigón Armado Rehabilitado con Barras de Pandeo Restringido*, Memorias del Simposio fib “El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo, La Plata, Argentina (2005).
- [5] Y-K. Wen, *Method for Random Vibration of Hysteretic Systems*, Journal of The Engineering Mechanics Division, 102 (EM2): 249-63, ASCE (1976).
- [6] C. Black, N. Makris, e I. Aiken, *Component Testing, Stability Analysis Characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Report PEER 2002/08 (2002).
- [7] F. González, *Linealización Equivalente No Gaussiana Para El Análisis Sísmico de*

- Sistemas Histeréticos, Métodos Numéricos En Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, Ed. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (2002).
- [8] R. Antonucci, F. Balducci, F. Bartera, M. Castellano, K. Fuller, y R. Giacchetti, *Shaking Table Testing of an R/C Frame with Dissipative Bracings*, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canadá, paper N° 1967 (2004).
- [9] SAP2000, Version 9.0.1, *Analysis Reference Manual*, Computer & Structures, Inc. (2004).
- [10] PLCD2, Programa desarrollado por S. Oller, B. Luccioni, A. Hanganu, O. Salomón, E. Car, L. Neamtu, y F. Zalamea, Universidad Politécnica de Cataluña (2004).
- [11] E. Wilson, *Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*, Computer & Structures, Inc. (2002).
- [12] A. Barbat, A. Hanganu, A. Oller, y E. Oñate, *Rigorous Damping Matriz for Finite Element Models with Viscous Behaviour*, *Revista Societatti de Inginerie Asistata de Calculator*, N° 5 (1993).
- [13] I R. Clough, y J. Penzien, *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Inc. (1975).
- [14] B. Luccioni, S. Oller, y A. Barbat, *Simulación del Amortiguamiento Estructural de Rayleigh por Medio de Modelos Viscoelásticos*, *Memorias de las XXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Tomo IV, pp 1-12, Tucumán, Argentina, (1995).
- [15] L. Malvern, *Introduction to the Mechanics of Continuos Médium*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (1969).