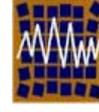




Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e
Ingeniería Antisísmica

Nº A13-09 ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO CON BARRAS DE PANDEO RESTRINGIDO.

Gustavo Palazzo¹, Francisco Crisafulli², Francisco López Almansa³ y Carlos Frau⁴

1.- Ceredetec, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional
Rodríguez 273, (5500) Ciudad Capital, Mendoza, Argentina
e-mail: gpalazzo@frm.utn.edu.ar

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

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

4.- Ceredetec, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional
Rodríguez 273, (5500) Ciudad Capital, Mendoza, Argentina
e-mail: cdfrau@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

El comportamiento de estructuras construidas hace varias décadas en zonas sísmicas, podría no ser satisfactorio frente a un terremoto. Las técnicas de rehabilitación basadas en la disipación pasiva de energía mejoran la respuesta estructural. En países con tecnologías emergentes podrían implementarse barras de pandeo restringido, que disipan energía por la fluencia de metales. En numerosas investigaciones se ha usado el modelo de Wen para simular numéricamente la respuesta de estos disipadores. En este trabajo se propone analizar las características de este modelo y comparar las respuestas obtenidas cuando se usan otros modelos constitutivos. A partir del análisis dinámico lineal y no lineal de una estructura excitada con acelerogramas de sismos reales, mediante dos programas de elementos finitos, se evaluaron las limitaciones del modelo.

Palabras Clave: análisis dinámico no lineal, disipadores de energía, modelos constitutivos.

1 INTRODUCCIÓN

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 (Aiken, 1996).

Mediante la disipación pasiva de energía, por ejemplo a través de barras de pandeo restringido, es posible mejorar el comportamiento de estas estructuras (Palazzo y Crisafulli, 2004).

Varias investigaciones, especialmente con estructuras de acero, muestran las ventajas logradas al incorporar este tipo de disipadores (Watanabe et al, 1998).

En numerosos trabajos se ha utilizado el macro modelo aproximado de Bouc-Wen para simular el comportamiento de los disipadores mencionados (Black et al., 2002, González, 2002, Méndez et al., 2002, Antonucci et al., 2004). Este modelo puede también implementarse en el programa SAP2000 (2004).

Es necesario verificar, como en todo estudio de este tipo, que el modelo numérico implementado pueda simular con buena aproximación la respuesta de la estructura real.

Con la intención de evaluar las particularidades del modelo de Wen se establece como objetivo de este trabajo la comparación de las respuestas numéricas que se obtienen en SAP2000 para una estructura con disipadores, respecto a los resultados que se logran cuando en otro programa se usan modelos basados en la mecánica de los sólidos.

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 (SAP2000, 2004, y PLCD2, 2004). La estructura fue excitada con los acelerogramas de dos sismos destructivos, y se implementaron diferentes modelos constitutivos. 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 DEL MODELO NUMÉRICO

2.1 Procedimientos de análisis

Para estructuras con disipadores de energía puede implementarse en SAP2000 (2004) el método de análisis no lineal rápido. Este algoritmo de cálculo es considerado por Wilson (2002) 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).

Con este algoritmo la estructura principal se resuelve mediante el procedimiento de superposición modal clásico, donde se asume que la matriz de amortiguamiento es diagonalizable. En ella hay que definir los porcentajes del amortiguamiento crítico para cada modo. Pero, tal como lo expresa Wilson (2002), en sistemas de varios grados de libertad el uso de este tipo de amortiguamiento viola el equilibrio dinámico y las leyes fundamentales de la física.

También en SAP2000 puede realizarse una integración directa en el tiempo. Allí puede simularse el amortiguamiento según la fórmula de Rayleigh (Clough y Penzien, 1975). En este caso, si el coeficiente proporcional a la rigidez de la fórmula mencionada se iguala al tiempo de retardo de un modelo viscoso, se tendrán respuestas coincidentes en desplazamientos, velocidades, aceleraciones y deformaciones; pero no en tensiones (Luccioni et al., 1995).

El programa PLCD2 (2004), 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.

En este trabajo se han realizado análisis dinámicos lineales y no lineales. En SAP2000 se consideró el análisis modal (A.M.) y la integración directa en el tiempo (I.D.T.). En los dos programas usados 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 2.1) se evita por el fuste que las rodea.

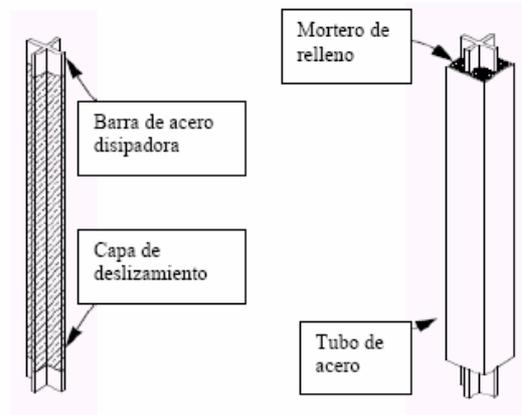


Figura 2.1.: Barras de pandeo restringido.

Para la integración directa en el tiempo de la ecuación de movimiento se consideró en ambos programas el procedimiento de Newmark, con coeficiente $\beta = 0.25$ y $\gamma = 0.5$.

2.2 Modelos constitutivos para simular el comportamiento de las barras de pandeo restringido

Para aproximar el comportamiento no lineal de las barras central de estos disipadores puede emplearse el modelo de Wen. Así, para sistemas de varios grados de libertad Baber y Wen (1981) plantearon la ecuación de movimiento con una fuerza de restitución q_i según la Ec. 2.1.

$$q_i = c_i \dot{u}_i + \alpha_i K_i u_i + (1 - \alpha_i) K_i z_i \quad (2.1)$$

En la Ec. anterior c_i es el amortiguamiento viscoso, \dot{u}_i la velocidad, u_i el desplazamiento en el nivel i , α_i la relación de la rigidez post fluencia sobre la rigidez elástica, K_i la rigidez tangente inicial y z_i el parámetro correspondiente a la histéresis. Luego de definir los parámetros A , α y β ; el valor de z_i se calcula mediante la E. 2.2, (Wen, 1976).

$$\dot{z} = \alpha |\dot{u}| z^n - \beta \dot{u} |z|^n + A \dot{u} \quad (2.2)$$

Los parámetros que pueden introducirse en el modelo de Wen considerado por SAP2000 son α , K , F_y (fuerza de fluencia) y el parámetro n para controlar la forma del ciclo histérico. Tal como lo indica Wen (1976), según sean los parámetros que intervienen en la determinación de z_i será la forma del

comportamiento histerético de la estructura. De acuerdo a la Ec. (2.1) es también necesario definir el amortiguamiento viscoso que le corresponde al disipador.

A partir de la mecánica de los medios continuos, en cambio, se pueden formular modelos termodinámicamente sustentables. Así para el acero puede plantearse el modelo elasto-plástico con una superficie de fluencia de Von Mises y plasticidad asociada (Malvern, 1969). También el amortiguamiento del material podría simularse con el modelo clásico de Kelvin (Barbat et al., 1993), donde el mismo queda determinado por el tiempo de retardo que puede obtenerse experimentalmente. Éste corresponde al tiempo necesario para que el sistema amortiguador – estructura alcance una configuración estable. La respuesta de estructuras de hormigón armado puede simularse, además de un modelo viscoso, con un modelo de degradación – plasticidad – viscosidad (Oller et al., 1996), modelo de daño – plástico (Oller et al., 1990) o un modelo de daño viscoso (Barbat et al., 1997).

En este estudio, y a los efectos de alcanzar el objetivo planteado en la introducción, se consideró para las barras de pandeo restringido el modelo de Wen, el modelo elasto-plástico (E.P.) y el modelo clásico de Kelvin (V.E.). Para el hormigón armado, como SAP2000 realiza un análisis lineal de la estructura principal, se consideró en PLCD2 también el modelo viscoso de Kelvin (V.E.). Los parámetros usados en estos modelos se indican en 2.4.

2.3 *Acelerogramas seleccionados para excitar la estructura*

Se consideró el acelerograma del sismo de Cauçete, San Juan, Argentina (Registro San Juan, 1977) con un pico de aceleración de 18.5 % de g; y el de Loma Prieta, Estados Unidos (Registro Santa Cruz, 1989), con un pico de aceleración de 44.0 % de g. En la Figura 2.2 se muestran los pseudo espectros de aceleraciones.

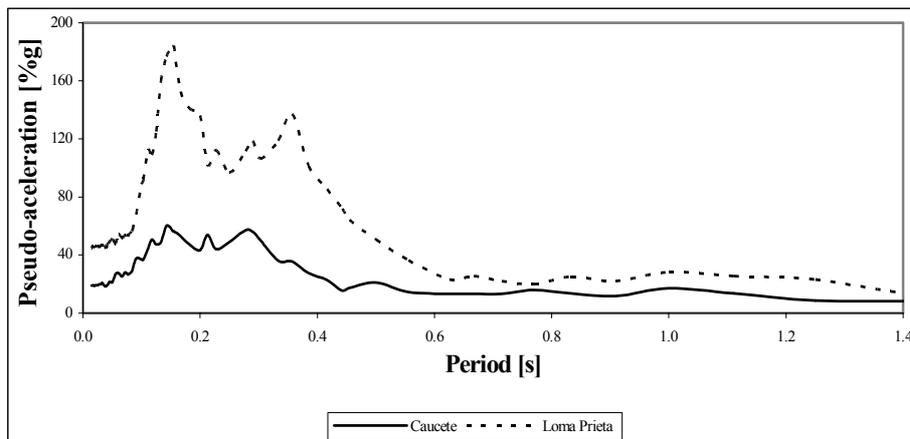


Figura 2.2: Espectros de pseudo aceleraciones para los acelerogramas considerados.

2.4 Estructura analizada

A partir de los datos del pórtico presentado por Antonucci et al. (2004), se realizó un modelo 2D en el programa SAP2000 y PLCD2, (Figura 2.3). 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.

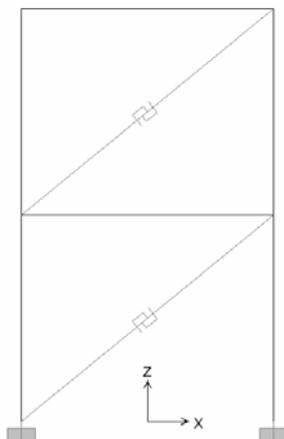


Figura 2.3: Esquema del modelo numérico de la estructura.

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 6 elementos de pórtico, y 6 nodos con 2 grados de libertad cada uno. En PLCD2 para la estructura de hormigón armado se usó un modelo con 6 elementos tipo viga de Timoshenko, de 3 nodos, cuadrático, dos puntos de integración de Gauss, y con 6 capas. Se logró un modelo con 14 nodos, con 2 grados de libertad en cada uno. Las diagonales fueron modeladas de igual manera con 1 elemento por barra.

Para las barras de pandeo restringido se adoptaron los parámetros indicados en Tabla 2.1. 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 (se adoptó el valor considerado por Palazzo et al, 2005); y n el parámetro antes mencionado del modelo de Wen (también se adoptó el valor considerado por Palazzo et al, 2005)

TABLA 2.1: PARÁMETROS DE LOS DISIPADORES

Modelo	Parámetro	Disipador 1	Disipador 2
E.P.	E	205900 MPa	205900 MPa
	ν	0.25	0.25
	fy	111.19 MPa	111.19 MPa
	A	9.00 E-04 m ²	2.25 E-04 m ²
Wen	K	35.74 MN/m	8.93 MN/m
	Fy	0.10 MN	0.025 MN
	α	0,025	0,025
	n	1	1

Para la estructura excitada con el acelerograma de Caucete se consideró el Disipador 1. Sus características fueron seleccionadas de acuerdo a los parámetros óptimos determinados por Palazzo et al. (2005). En el análisis de la estructura con el Disipador 2 se excitó la estructura con el acelerograma de Loma Prieta.

En la Tabla 2.2 se indican los períodos de la estructura obtenidos en SAP2000 para las distintas configuraciones adoptadas.

TABLA 2.2: PERÍODO DE LA ESTRUCTURA

Modo	Configuración de la estructura				
	Libre	Barras diagonales		Barras según modelo Wen	
		Disipador 1	Disipador 2	Disipador 1	Disipador 2
1	0.382	0.174	0.269	0.383	0.382
2	0.139	0.066	0.100	0.139	0.139

Se observa que al incluir en el modelo de SAP2000 las barra diagonales como elementos *link* (modelo de plasticidad de Wen), no cambian los períodos respecto de la estructura libre.

En Tabla 2.3 y 2.4 se muestran los parámetros adoptados para la consideración del amortiguamiento material en PLCD2 y el estructural en SAP2000.

Teniendo en cuenta el trabajo de Barbat et al. (1993) se considera un tiempo de retardo de 0.001 s para la estructura de hormigón armado. Para este material en SAP2000 – I.D.T. se tomó igual valor como coeficiente proporcional a la rigidez de la fórmula de Rayleigh. En SAP2000 – A.M. se trabajo con la fracción de amortiguamiento crítico viscoso que suele usarse en los análisis dinámicos de estructuras de hormigón. Para las diagonales se consideró un tiempo de retardo de 0.0015 s cuando la estructura fue excitada con el sismo de Caucete, y de 0.005 s para el sismo de Loma Prieta. Estos valores arbitrarios se eligieron de forma tal que la respuesta del modelo V.E. en PLCD2 fuera similar a la de SAP2000 – I.D.T. con el modelo de Wen.

TABLA 2.3: TIEMPO DE RETARDO EN PLCD2

Modelo constitutivo	Material	Magnitud [s]
Viscoelástico	Hormigón Armado	0.001 s
	Acero (para barra diagonal)	0.0015 (Caucete) 0.005 (Loma Prieta)

TABLA 2.4: AMORTIGUAMIENTO ESTRUCTURAL EN SAP2000

Tipo de análisis	Tipo	Magnitud
I.D.T	Coeficiente proporcional a la rigidez de la fórmula de Rayleigh	0.001
A.M.	Fracción de amortiguamiento crítico viscoso para todos los modos	0.05

3 RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Estructura libre

La historia en el tiempo de los desplazamientos según PLCD2 y SAP2000 – I.D.T. para la estructura con o sin amortiguamiento son coincidentes, tal como se observa en Figura 3.1 para el caso del terremoto de Loma Prieta. En la Figura 3.2 se observan las diferencias entre SAP2000 – I.D.T. y SAP2000 – A.M. que se tienen aun sin considerar amortiguamiento en la estructura. En la Figura 3.3 puede apreciarse la coincidencia de la respuesta en PLCD2 para el modelo constitutivo elástico lineal (E.L.) con amortiguamiento de Rayleigh (coeficiente proporcional a la rigidez igual a 0.001) y modelo V.E. con tiempo de retardo 0.001 s.

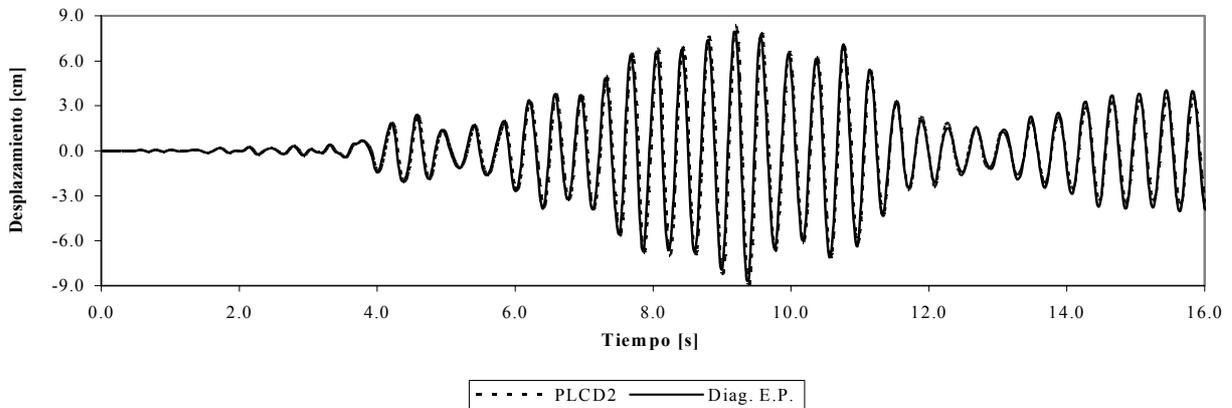


Figura 3.1: Historia en el tiempo de los desplazamientos, acelerograma de Loma Prieta.

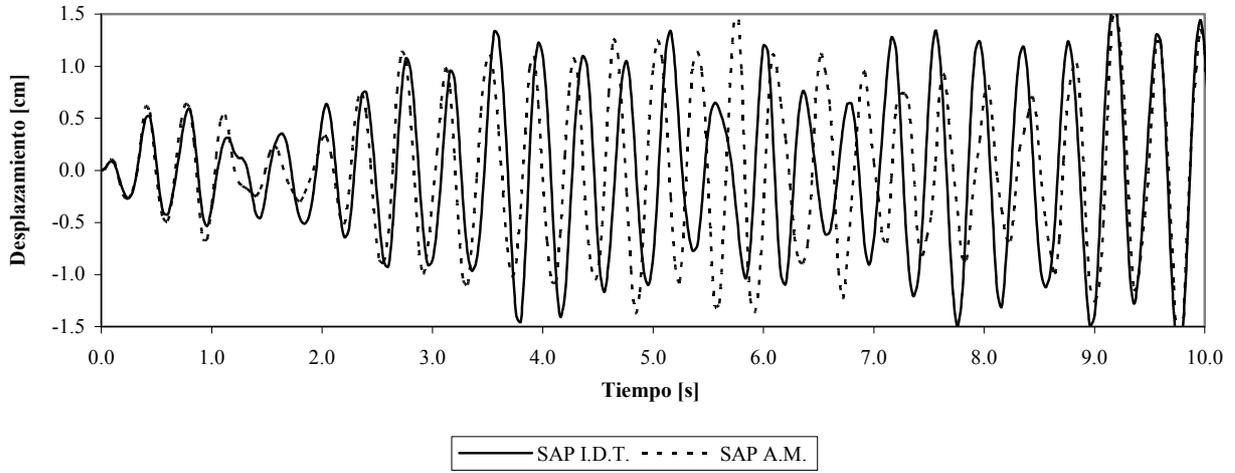


Figura 3.2: Historia en el tiempo de los desplazamientos, acelerograma de Cauce.

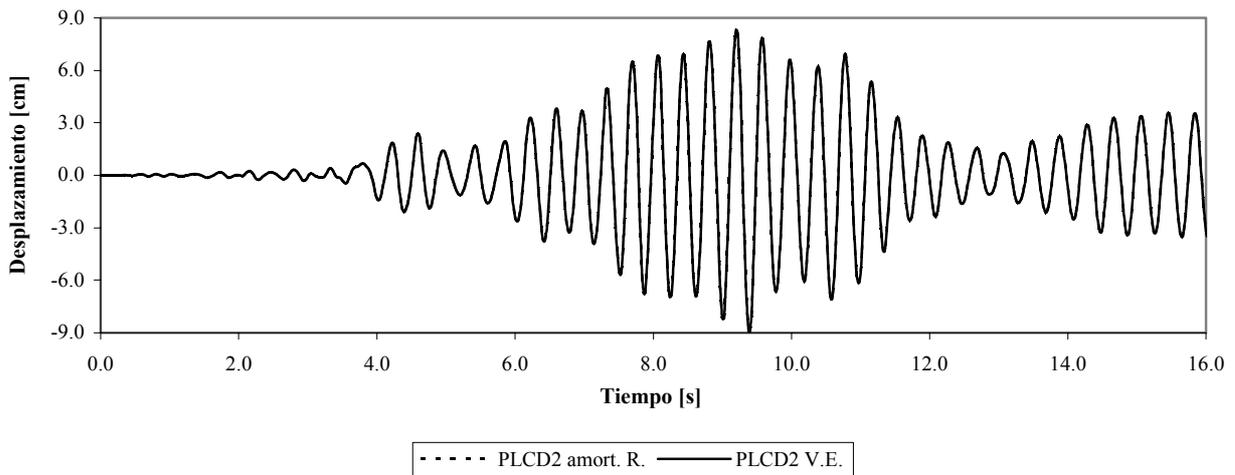


Figura 3.3: Comparación de la historia en el tiempo de los desplazamientos, acelerograma de Loma Prieta

Los valores máximos de los desplazamientos para la estructura libre se muestran en Tabla 3.1. Las diferencias entre PLCD2 y SAP2000 – I.D.T. son menores al 8 %. Para la estructura amortiguada se observa una diferencia apreciable entre el valor máximo de SAP2000 – I.D.T. y SAP2000 – A.M. Para los valores de amortiguamiento adoptados se logra reducir la respuesta en más de un 30 % en el caso del sismo de Cauce, y de un 20 % para el de Loma Prieta.

TABLA 3.1: VALORES MÁXIMOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN [CM],
ESTRUCTURA LIBRE.

Programa		Acelerograma			
		Caucete		Loma Prieta	
		Sin amort.	Con amort.	Sin amort.	Con amort.
PLCD2	V.E.	-	1.17	-	8.91
	E.L.	1.82	1.18	11.25	8.93
SAP2000	I.D.T.	1.91	1.27	10.86	8.69
	A.M.	1.83	1.25	12.60	4.68

3.2 Estructura con diagonales elásticas

La historia en el tiempo de los desplazamientos según PLCD2 y SAP2000 – I.D.T., tanto para la estructura con o sin amortiguamiento, son coincidentes para ambos registros sísmicos, tal como se observa en Figura 3.4 para la estructura excitada con el acelerograma de Cauçete. Como en el caso de la estructura libre se presentaron diferencias entre las respuestas en SAP2000 – I.D.T. y SAP2000 – A.M. También en este caso se lograron respuestas iguales en PLCD2 para el modelo constitutivo E.L. con amortiguamiento de Rayleigh (coeficiente proporcional a la rigidez igual a 0.001) y el modelo V.E. con tiempo de retardo de 0.001 s.

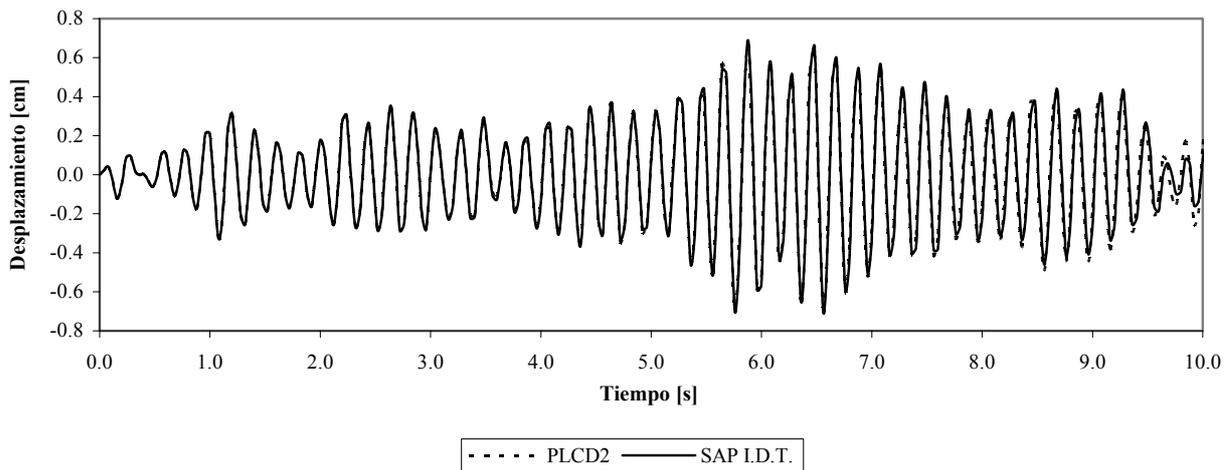


Figura 3.4: Historia en el tiempo de los desplazamientos, acelerograma de Cauçete.

Los valores máximos de los desplazamientos para la estructura con diagonales elásticas se muestran en la Tabla 3.2. Las diferencias entre PLCD2 y SAP2000 – I.D.T. son menores al 5 %. También en este caso

para la estructura amortiguada se observa una diferencia apreciable entre el valor máximo de SAP2000 – I.D.T. y SAP2000 – A.M. Como en el caso de la estructura libre, para los valores de amortiguamiento adoptados se logra reducir la respuesta en más de un 30 % en el caso del sismo de Cauce, y de un 20 % para el de Loma Prieta.

TABLA 3.2: VALORES MÁXIMOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN [CM],
ESTRUCTURA CON DIAGONALES ELÁSTICAS

Programa		Acelerograma			
		Caucete		Loma Prieta	
		Sin amort.	Con amort.	Sin amort.	Con amort.
PLCD2	V.E.	-	0.45	-	3.57
	E.L.	0.70	0.45	4.96	3.55
SAP2000	I.D.T.	0.71	0.46	4.69	3.55
	A.M.	1.15	0.42	4.98	2.28

3.3 Estructura con diagonales que pueden superar el límite de fluencia

En esta parte se mantuvo en PLCD2 el modelo V.E. para la estructura de hormigón armado (con tiempo de retardo de 0.001 s) y se consideró un modelo E.P. y V.E. para las diagonales. Tal como se observa en la Figura 3.5 la respuesta en PLCD2 con el modelo E.P. y el V.E. son aproximadamente coincidentes para el sismo de Loma Prieta. En el caso del terremoto de Cauce las gráficas de la Figura 3.6 tienen el mismo período, pero distinta amplitud (dado el valor arbitrario tomado como tiempo de retardo en el modelo V.E.). En la Figura 3.7 se comparan las respuestas entre el modelo V.E. en PLCD2 y el análisis en SAP2000 – I.D.T. de la estructura con barras modeladas según la aproximación de Wen.

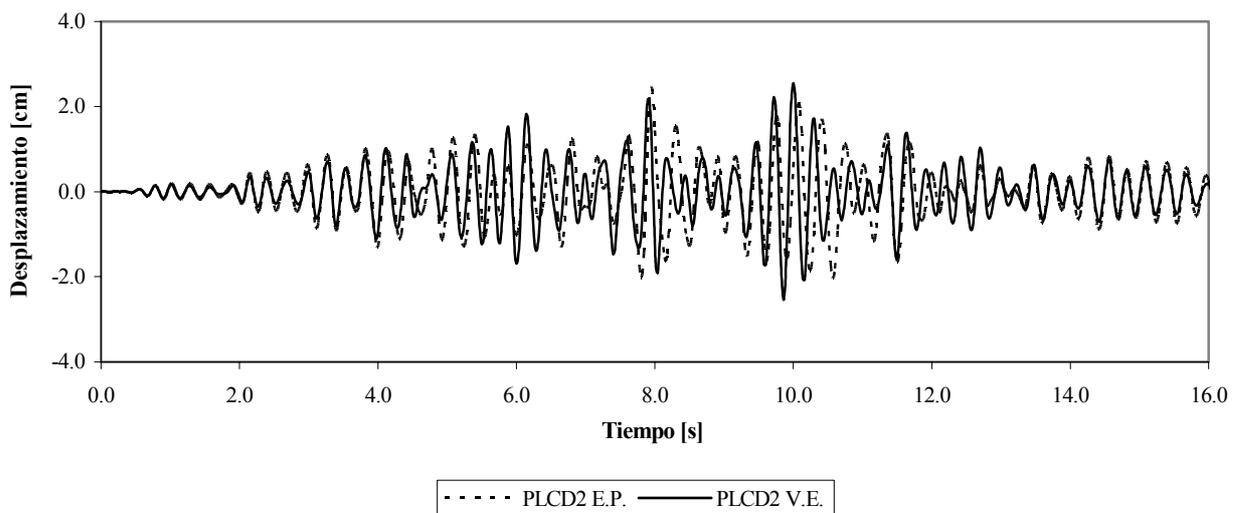


Figura 3.5: Historia en el tiempo de los desplazamientos, acelerograma de Loma Prieta.

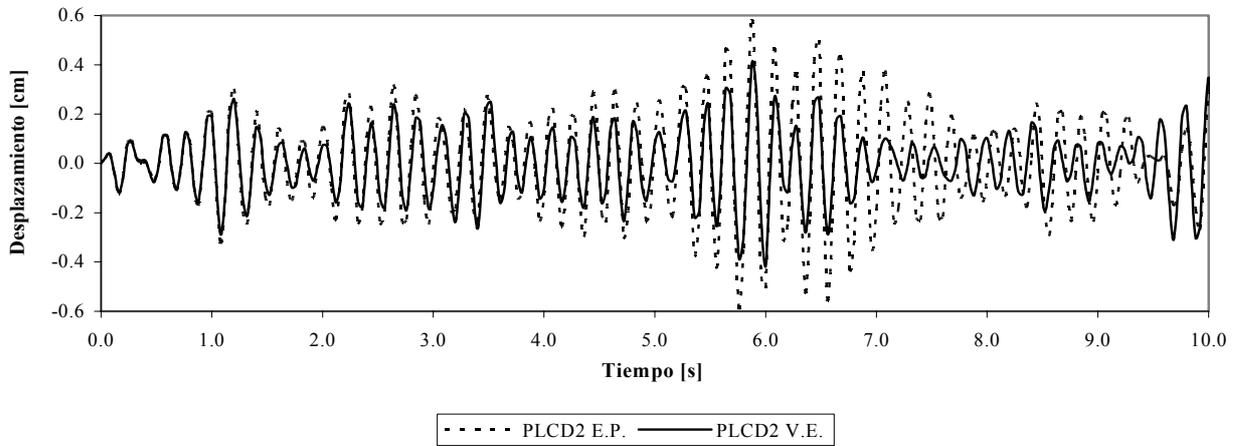


Figura 3.6: Historia en el tiempo de los desplazamientos, acelerograma de Cauce.

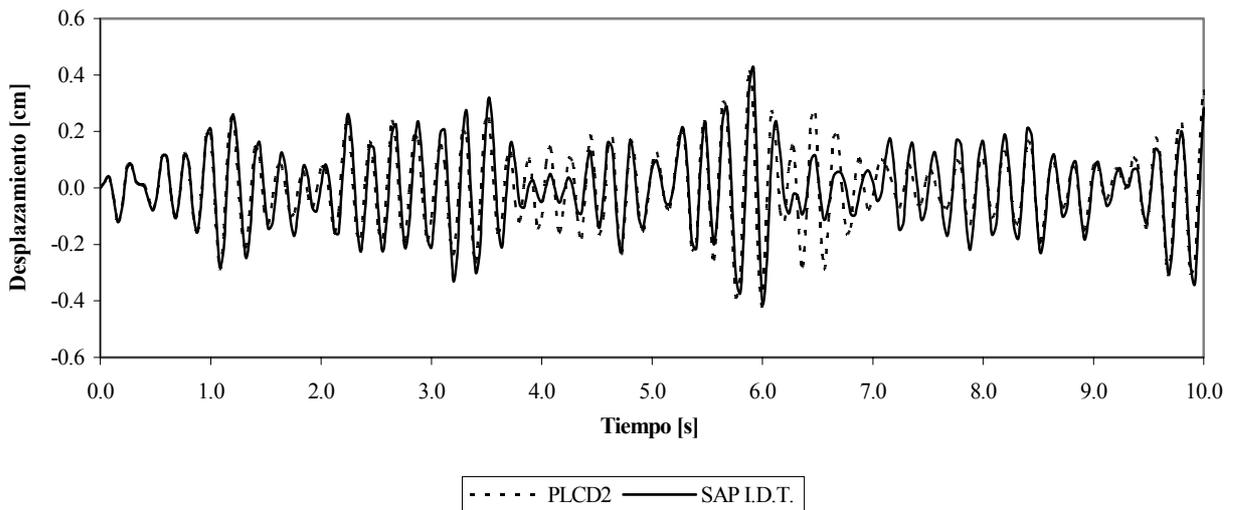


Figura 3.7: Comparación de la historia en el tiempo de los desplazamientos, diagonales con modelo V.E y de Wen, estructura amortiguada, sometida al acelerograma de Cauce.

Los valores máximos de los desplazamientos para la estructura con diagonales que pueden fluir se muestran en Tabla 3.3. Las diferencias entre PLCD2 y SAP2000 – I.D.T. son menores al 5 %. Se observa en la Tabla que, según sea el modelo constitutivo adoptado para las diagonales, pueden lograrse reducciones de los desplazamientos superiores al 50 %.

TABLA 3.3: VALORES MÁXIMOS DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN [CM],
ESTRUCTURA AMORTIGUADA CON DIAGONALES QUE PUENE FLUIR.

Programa		Acelerograma					
		Caucete			Loma Prieta		
		Sin diag.	Diag. E.L.	Diag. que fluyen	Sin diag.	Diag. E.L.	Diag. que fluyen
PLCD2	E.P.	1.17	-	0.59	8.91	-	2.45
	V.E.	1.17	0.45	0.42	8.91	3.55	2.55
SAP2000	I.D.T.	1.27	0.46	0.42	8.69	3.55	2.54

4 CONCLUSIONES

En el análisis dinámico de la estructura de hormigón armado sometida a acciones sísmicas, con modelo constitutivo elástico lineal y amortiguamiento estructural (SAP2000, integración directa en el tiempo) o con un modelo viscoelástico (PLCD2), las historias en el tiempo de los desplazamientos pueden ser coincidentes. Para ello el tiempo de retardo del modelo viscoelástico (que puede obtenerse experimentalmente) debe igualarse al coeficiente proporcional a la rigidez de la fórmula de Rayleigh. Esta coincidencia no se logra cuando en SAP2000 se implementa un análisis modal, y se usa una fracción de amortiguamiento viscoso del 5 % para todos los modos. Si en la estructura se consideran barras diagonales de acero, con modelo constitutivo elástico lineal, se verifican las mismas conclusiones anteriores.

La respuesta de la estructura analizada puede reducirse considerablemente si se le incorporan diagonales de acero que puedan fluir sin pandear. Pero esa disminución es variable según los parámetros adoptados en los modelos constitutivos de los disipadores (modelo de Wen, elasto-plástico o viscoelástico).

Es necesario investigar también la influencia de la discretización del modelo en las respuestas obtenidas.

En el macro modelo de Wen intervienen parámetros que el autor no relaciona con características propias del material. Se estima conveniente que en investigaciones basadas en el análisis de este tipo de construcciones se implementen modelos numéricos termodinámicamente sustentables, donde puedan establecerse parámetros precisos para evaluar el amortiguamiento estructural y la energía disipada por la estructura con barras disipadoras de energía.

REFERENCIAS

- Aiken, I., (1996). Passive Energy Dissipation – Hardware and Applications. *Proceeding Los Angeles County and Seaosc Symposium on Passive Energy Dissipation Systems for New and Existing Building*, Los Angeles, Estados Unidos.
- Antonucci, R., Balducci, F., Bartera, F., Castellano, M. G., Fuller, K. y Giacchetti, R. (2004). Shaking Table Testing of an R/C Frame with Dissipative Bracings. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canadá, paper N° 1967.
- Baber, T. y Wen, Y-K., (1981). Random Vibration of Hysteretic, Degrading Systems. *Journal of The Engineering Mechanics Division*, 104 (EM6): 1069-1087, ASCE.
- Barbat, A., Hanganu, A. Oller, S. y Oñate E. (1993). *Revista Societatti de Inginerie Asistata de Calculador*, N° 5.
- Barbat, A., Oller, S., Oñate, E. y Hanganu, A. (1997). Viscous Damage Model for Timoshenko Beam Structures. *Int. J. Solids Structures*, Vol. 34, N° 30, pp. 3953-3976.
- Black, C., Makris, N. y Aiken, I., (2002). Component Testing, Stability Analysis Characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, Report PEER 2002/08.
- Clough, R. y Penzien, J. (1975). *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Inc.
- González, F. (2002). 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.
- Luccioni B., Oller, S. y Barbat, A. (1995). 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.
- Malvern, L. (1969). *Introduction to the Mechanics of Continuos Médium*, Prentice may, Usa.
- Méndez, E., Ayala, G. y Barrón, R. (2002) Solución Numérica del problema de Linealización Equivalente de un Oscilador No Lineal Sometido a Sismos Simulados Semiempíricamente, *Métodos Numéricos En Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, Ed. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.

Palazzo, G. y Crisafulli, F. (2004). 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.

Palazzo, G., Crisafulli, F. y López Almansa, F. (2005). 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.

Oller, S., Luccioni, B. y Barbat, A. (1996). Un método de Evaluación del Daño Sísmico en Estructuras de Hormigón Armado. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 12,2, 215-238.

Oller, S., Oñate, E., Oliver, J. y Lubliner, J. (1990). Finite Element Nonlinear Análisis of Concrete Structures Using a Plastic-Damage Model. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 35, N° 1/2/3, pp 219-231.

PLCD2 (2004). Programa desarrollado por Oller, S., Luccioni, B., Hanganu A., Salomón O., E. Car, E., Neamtu, L. y Zalamea F., Universidad Politécnica de Cataluña.

SAP2000, Version 9.0.1 (2004). Analysis Reference Manual, Computer & Structures, Inc.

Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Wada, A. y Fujimoto, M. (1998). 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.

Wen, Y-K. (1976). Method for Random Vibration of Hysteretic Systems. *Journal of The Engineering Mechanics Division*, 102 (EM2): 249-63, ASCE.

Wilson, E., (2002). Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, Computer & Structures, Inc.

AGRADECIMIENTOS

El Ing. Gustavo Palazzo ha realizado este trabajo con el apoyo del Programa Alban, Programa de becas de alto nivel de la Unión Europea para América Latina, beca N° E04D044399AR; y de la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina, a través de sus becas para la formación de postgrado de docentes.