

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE
HIDALGO**

**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DE ESTRUCTURAS
EXISTENTES SUJETAS A SECUENCIAS SÍSMICAS.**

T E S I S

PRESENTADA POR:

ISRAEL APOLO MALDONADO AGUILERA

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO CIVIL**

DIRIGIDO POR:

DR. JORGE RUIZ GARCIA

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Abril 2006

Índice

Introducción	- 1 -
1.1 Motivación.....	- 1 -
1.2 Secuencias sísmicas y sus características	- 3 -
1.2.1 Definición de secuencia sísmica.....	- 3 -
1.2.2 Ley de Omori.....	- 3 -
1.2.3 Migración de replicas	- 6 -
1.3 Efecto de las secuencias sísmicas durante sismos históricos	- 10 -
1.4 Objetivos.....	- 14 -
1.4 Organización.....	- 15 -
 Selección del catálogo de Secuencias Sísmicas	- 16 -
2.1 Introducción.....	- 16 -
2.2 Base Mexicana de Sismos Fuertes.....	- 17 -
2.3 Criterios de selección	- 23 -
1.6 Efecto de la duración (Intensidad de Arias)	- 28 -
 Demandas de distorsión máxima y residual en S1GD.....	- 38 -
3.1 Introducción.....	- 38 -
3.2 Revisión de estudios previos	- 39 -
3.3 Sistemas considerados en este estudio	- 42 -
3.3.1 Características.....	- 42 -
3.3.1 Análisis no lineal	- 42 -
3.3.2 Modelos histereticos considerados en este estudio.....	- 43 -
3.4 Secuencias sísmicas consideradas en este estudio.....	- 45 -
3.5 Resultados.....	- 48 -

Demandas de distorsión máxima y residual en SMGD	- 95 -
4.1 Introducción.....	- 95 -
4.2 Descripción de los edificios estudiados.....	- 96 -
 Conclusiones	 - 102 -
 Catálogo de secuencias.....	 - 104 -
 Bibliografía	 - 119 -

Índice de Figuras

Figura 1.1 Esquema del ambiente de las replicas.....	- 2 -
Figura 1.2 Ilustración de la Ley de Omori y de la Ley de Omori modificada.	- 5 -
a) Tasa de ocurrencia de replicas después del evento principal, plano Log-Normal.	6
b) Ajuste de la Ley de Omori, en el plano Log-Log.....	6
Figura 1.3 Sismo de Loma Prieta de 1989, seguimiento de la ley de Omori (Schaff et al., 1998).....	- 6 -
Figura 1.4 Mapa de fallas y estaciones locales y regionales del área en estudio. Estrellas sólidas, epicentros del sismo de Valle Imperial (IVE) del 15 de Octubre de 1979 (Chávez et al., 1982) y el evento principal (VE) del 9 de Junio de 1980 y la replica del 9 de Junio de 1980. IF= Falla Imperial; SS = Salton Sea; SJF=Falla de San Jacinto; BSZ = Zona sísmica de Brawley; MSZ = Zona sísmica de Mexicali SHF = Falla de Sand Hills; LSF = Falla de Laguna Salada; SaJF = Falla de Sierra Juárez; CR = Río Colorado; CG = Golfo de California. Las líneas segmentadas encierran las zonas sísmicas (BSZ y MSZ) basado en la actividad sísmica (Johnson, 1979; Frez and González, 1987).....	- 7 -
Figura 1.5 Epicentros de replicas del sismo de Victoria. Todas las presentadas desde Junio de 1980 hasta Febrero de 1981. CPV: Volcán de Cerro Prieto. Ver Fig. (1.1) para otras abreviaturas.....	- 8 -
Figura 1.6 Epicentros de replicas del sismo de Valle Imperial. Todas las presentadas desde Octubre de 1979 hasta Marzo de 1980 de 1980. CPV: Volcán de Cerro Prieto. Ver Figura 1.1 para otras abreviaturas.	- 9 -
Figura 1.7 En la fotografía se muestran personas evacuadas en el sismo de Algeria del 21 de Mayo del 2003.	- 11 -
Figura 1.8 Fotografías de una construcción con un daño ligero provocado por el sismo de Kocaeli en Turquía, la cual tuvo un colapso total debido a una replica de menor magnitud un mes más tarde. USGS (2000).	- 12 -
Figura 1.9 Fotografías de una columna con un daño ligero provocado por el sismo de Molise en Italia, y un gran daño provocado por la replica un día después del evento	

principal. Fotografías de Mucciarelli y Gallipoli, Universidad de Basilicata, Italia y Dr. Paolo Bazzurro,	- 13 -
Figura 2.1 Catalogo de Acelerogramas 1960-1993. Publicado en Julio de 1995.....	- 19 -
Figura 2.2 Catalogo de Acelerogramas Volumen I. Publicado en Mayo de 1997.	- 19 -
Figura 2.3 Catalogo de Acelerogramas Volumen II.....	- 20 -
a) Producción de acelerogramas por institución (1960-1993).....	- 21 -
b) Productividad y crecimiento de la red acelerografica (1960-1993).	- 22 -
c) Localización de epicentros que generaron algún acelerograma de 1960 a 1993.	- 22 -
d) Red Acelerografica de México.....	- 22 -
Figura 2.4 Estadísticas sobre los datos de la base (BMDSF).	- 22 -
a) Secuencia sísmica CHI1850919 componente N-90-W.	- 25 -
b) Secuencia sísmica CHI1850919 componente N-00-E.	- 25 -
Figura 2.5 Acelerogramas de la secuencia CHI1850919 en sus dos componentes horizontales.....	- 25 -
a) Secuencia sísmica CDAF850919 componente N-90-E.....	- 26 -
a) Secuencia sísmica CDAF850919 componente N-00-E.....	- 27 -
Figura 2.6 Acelerogramas de la secuencia CDAF850919 en sus dos componentes horizontales.....	- 27 -
a) Secuencia sísmica PAPN850919 componente S-90-W.	- 27 -
b) Secuencia sísmica PAPN850919 componente S-00-W.	- 28 -
Figura 2.7 Acelerogramas de la secuencia PAPN850919 en sus dos componentes horizontales.....	- 28 -
Figura 2.8 Acelerograma del sismo del 19 de Septiembre de 1985, estación “La Unión” componente S-90-E.	- 29 -
Figura 2.9 Intensidad de Arias; sismo del 19 de Septiembre de 1985, estación “La Unión” componente S-90-E.	- 30 -
Figura 2.10 Duración del sismo del 9 de Septiembre de 1985, estación “La Unión” componente S-90-E.	- 30 -
Figura 3.1 Secuencia sísmica empleada por Amadio et al. (2003).....	- 40 -
Figura 3.2 Modelos histereticos empleados por Luco et al. (2004)	- 42 -

Figura 3.3 Sistema Bilineal Ruiz et al. (2003)	- 44 -
Figura 3.4. Modelos histereticos empleados en este estudio: (a) Clough Modificado (MC); (b) degradación de rigidez(SD); (c) moderada degradación de rigidez y resistencia (MSSD); y (d) severa degradación de rigidez y de resistencia (SSSD).	- 45 -
Figura 3.5 Secuencia RIIS761207.	- 46 -
Figura 3.6 Secuencia OAXM781129.	- 46 -
Figura 3.7 Secuencia VCPS800609.	- 47 -
Tabla 4.1 Elementos viga y sus momentos para edificio de tres niveles.....	- 96 -
Tabla 4.2 Elementos columna y sus momentos para edificio de tres niveles.....	- 97 -
Tabla 4.3 Pesos de los entrepisos para edificio de tres niveles.	- 97 -
Figura 4.1 Alzado del marco analizado de 3 niveles.....	- 97 -
Figura 4.2 Planta del marco analizado de 3 niveles.	- 98 -
Tabla 4.4 Elementos viga y sus momentos para edificio de tres niveles.....	- 98 -
Tabla 4.5 Elementos columna y sus momentos para edificio de tres niveles.....	- 99 -
Tabla 4.6 Pesos de los entrepisos para edificio de tres niveles.	- 99 -
Figura 4.3 Alzado del marco analizado de 13 niveles.....	- 101 -
Figura 4.4 Planta del marco analizado de 13 niveles.	- 101 -

Introducción

1.1 Motivación

Actualmente existe un consenso entre la comunidad enfocada a la ingeniería sísmica de que el daño en elementos estructurales, y en algunos elementos no estructurales, es consecuencia de las demandas de desplazamientos lateral inducidas a la estructura cuando es expuesta a excitaciones sísmicas. En consecuencia, recientes metodologías para el diseño de nuevas estructuras y para la evaluación de estructuras existentes basadas en conceptos de desempeño se fundamentan en una estimación de las demandas máximas de desplazamiento lateral.

Las recientes metodologías se basan en la evaluación del desempeño donde el desempeño estructural es basado en las demandas máximas de entrepiso, esto no es suficiente ya que no se toma en cuenta la evaluación de demandas de deformación residual las cuales juegan un papel importante en el comportamiento estructural.

Sísmicamente se recomienda hacer una evaluación de las restricciones que limitan la deformación residual, pero no se incluye procedimientos específicos para la estimación de las demandas de deformación residual.

La magnitud de las deformaciones residuales es importante ya que esta determina tanto la factibilidad técnica y económica para hacer reparaciones en estructuras dañadas.

Las metodologías actuales de diseño sísmico, únicamente toman en cuenta un solo evento sísmico, que es lo que se muestra en los espectros de diseño, pero realmente las estructuras no son expuestas a un solo evento sino a secuencias sísmicas.

Las réplicas sísmicas pueden provocar debilitación o colapso de estructuras quizás ya dañadas por el evento principal. En la Figura 1.1 se muestra un esquema del ambiente de las réplicas.

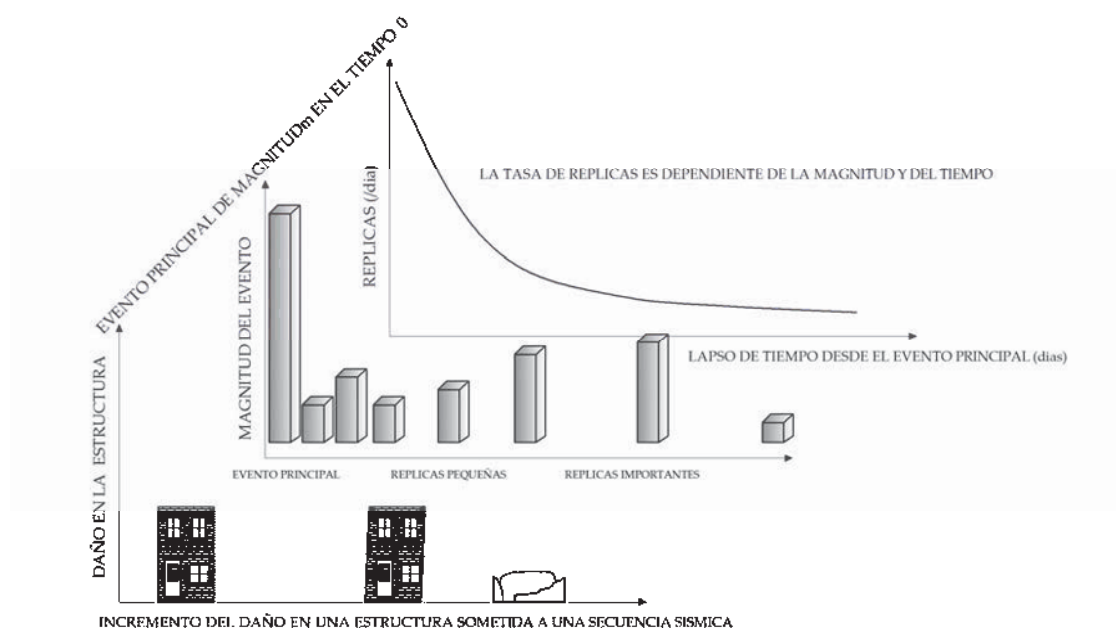


Figura 1.1 Esquema del ambiente de las réplicas.

1.2 Secuencias sísmicas y sus características

A partir del monitoreo de incontables eventos sísmicos, los sismólogos han observado que estos ocurren en grupos, a los cuales han denominado como “enjambres” y estos tienen su ocurrencia en una región específica dentro de un intervalo de tiempo determinado.

En una secuencia sísmica seguramente los sismos siguen patrones globales de grupo, pero cabe mencionar que los sismos considerados individualmente son aleatorios e impredecibles, por tales consideraciones estos deben de ser considerados como un grupo, esto para poder identificar patrones, de ocurrencia y de limitación espacial ya que estos tienden a presentarse muy cerca de las fallas de ruptura en un área de influencia.

1.2.1 Definición de secuencia sísmica

En una secuencia sísmica, el evento principal es el evento de mayor magnitud que se presenta. De esta forma los sismos que ocurren previamente a este son llamados precursores, los cuales son de menor magnitud que el evento principal y ocurren en número limitado. Finalmente, las réplicas son sismos que se registran días, e inclusive meses después del evento principal y estos sismos son usualmente de menor magnitud que el evento principal.

1.2.2 Ley de Omori

Un seguimiento de la sismicidad subsecuente a la presentación de un evento principal ha evidenciado que la tasa de ocurrencia alcanza su máximo y posteriormente decae conforme se incrementa el tiempo a partir de la ocurrencia del evento principal. Con base en esta observación, Omori (1894) propuso la siguiente ecuación que relaciona el decremento de la

tasa de ocurrencia de las replicas sísmicas con el recíproco del tiempo medido después de ocurrido el evento principal. En 1894

$$n(t) = \frac{K}{c+t} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde $n(t)$ es el número de sismos medidos en un cierto intervalo de tiempo, t . Y donde los parámetros c y K se definen para una secuencia particular.

La ecuación 1.1 se conoce como la **“Ley de Omori”**. Posteriormente, la Ecuación 1.1 fue modificada, por Utsu (1961) para reflejar que la tasa de ocurrencia de las replicas decrece no linealmente.

$$n(t) = \frac{K}{(c+t)^p} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Donde p es un parámetro que se ajusta para una secuencia sísmica dada. En general, el parámetro p toma valores de entre 0.7–1.5. A la Ec. 1.2 se le denomina como la **“Ley de Omori modificada”**.

Debe notarse que el ajuste de los parámetros c , K y p pueden obtenerse a partir de métodos estadísticos. Sin embargo, dado que los valores de los parámetros son obtenidos utilizando los datos obtenidos después de la ocurrencia del evento principal, por ello no tienen un significado físico. En la Figura 1.2 se muestra la Ley de Omori y la Ley de Omori modificada.

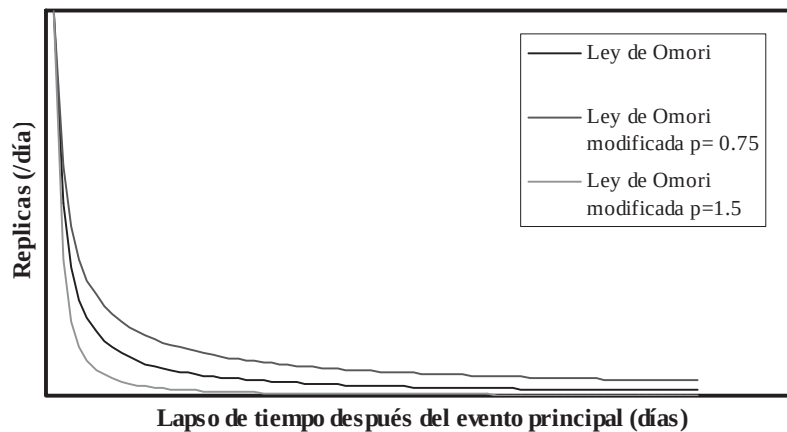


Figura 1.2 Ilustración de la Ley de Omori y de la Ley de Omori modificada.

Las ecuaciones 1.1 y 1.2 describen la tasa (i.e. frecuencia) con que decrecen las réplicas con respecto al tiempo; es decir, la tasa de réplicas es inversamente proporcional al tiempo después de ocurrido el evento principal. Por ejemplo, cuando p es igual a 1; al segundo día tendremos aproximadamente la mitad del número de réplicas del primer día y una décima parte del número de réplicas del primer día en el día diez.

Otra ley principal que describe las réplicas es conocida como la ley de Bath y esta dice que ningún evento principal típico tiene una réplica aproximadamente de magnitud 1 (sobre la media de 1.2) menor que este evento principal. Las secuencias de réplicas son típicamente seguidas con la escala de Gutenberg-Richter.

Para ilustrar la tasa de ocurrencia, en la Figura 1.3 se presenta la secuencia de réplicas que siguió al evento principal del sismo de Loma Prieta, California, en 1989 ($M_w = 6.9$).

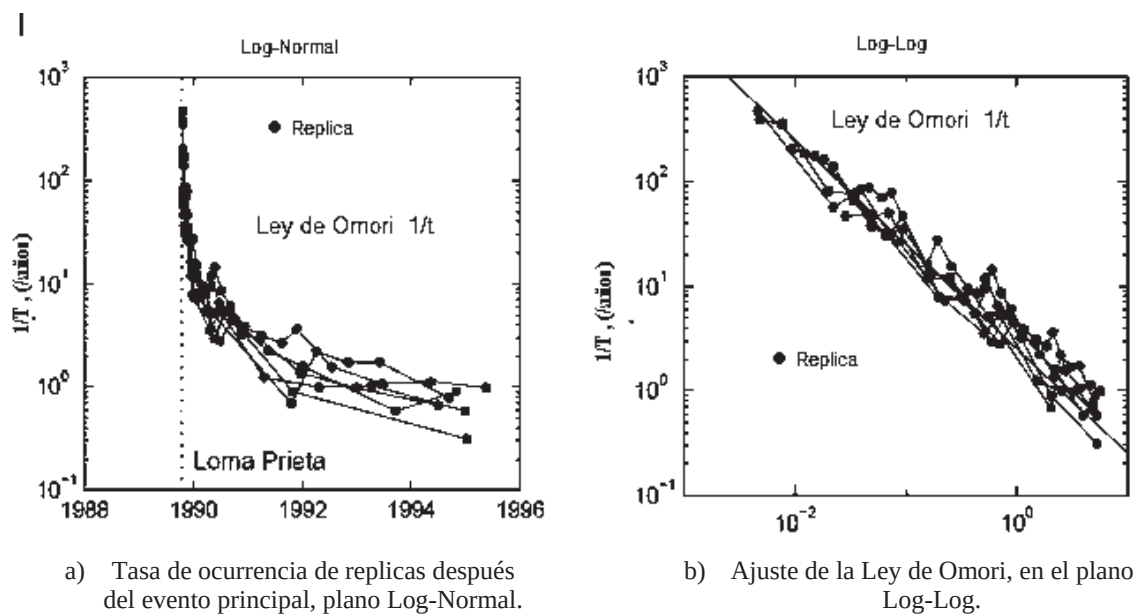


Figura 1.3 Sismo de Loma Prieta de 1989, seguimiento de la ley de Omori (Schaff et al., 1998).

1.2.3 Migración de replicas

En una secuencia sísmica, el evento principal tiene un área de influencia en la cual se producen los precusores y las replicas, en ocasiones esta área llega a ser bastante representativa. La mayoría de los precusores y las replicas de poca magnitud se presentan cerca del lugar donde se presenta el evento principal y por lo general se presentan sobre un área de influencia de la falla en la que se origino el evento principal, en el caso de la replicas de gran magnitud por lo general se presentan lejos del lugar donde se presento el evento principal.

Lo anterior lo presento el sismo de Victoria del 9 de Junio de 1980 de magnitud 6.1 Ml el cual ocurrió alrededor de 50 Km. al sureste de la ciudad de Mexicali, Baja California en el Valle de Mexicali cerca de la intersección de la falla de Cerro Prieto con el río Colorado Figura 1.4. El sismo de victoria fue parte de un fuerte incremento de la sismicidad ocurrida en el área del valle Mexicali-Imperial desde 1973 hasta 1981; en esta actividad sísmica se

incluyen muchos grupos de precursores y replicas, además algunos eventos de moderada magnitud como el sismo del Valle Imperial del 15 de Octubre de 1979 de magnitud 6.4 MI

Figura 1.5.

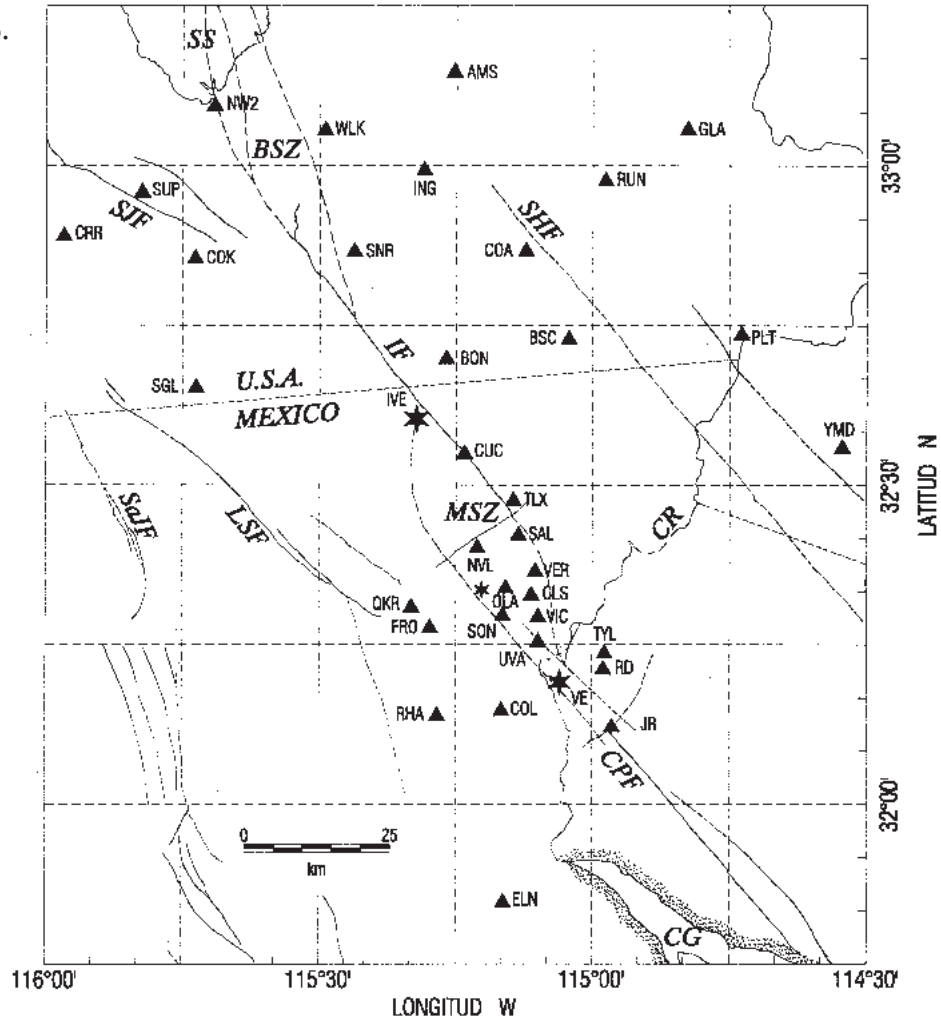


Figura 1.4 Mapa de fallas y estaciones locales y regionales del área en estudio. Estrellas sólidas, epicentros del sismo de Valle Imperial (IVE) del 15 de Octubre de 1979 (Chávez et al., 1982) y el evento principal (VE) del 9 de Junio de 1980 y la replica del 9 de Junio de 1980. IF= Falla Imperial; SS = Salton Sea; SJF= Falla de San Jacinto; BSZ = Zona sísmica de Brawley; MSZ = Zona sísmica de Mexicali SHF = Falla de Sand Hills; LSF = Falla de Laguna Salada; SaJF = Falla de Sierra Juárez; CR = Río Colorado; CG = Golfo de California. Las líneas segmentadas encierran las zonas sísmicas (BSZ y MSZ) basado en la actividad sísmica (Johnson, 1979; Frez and González, 1987).

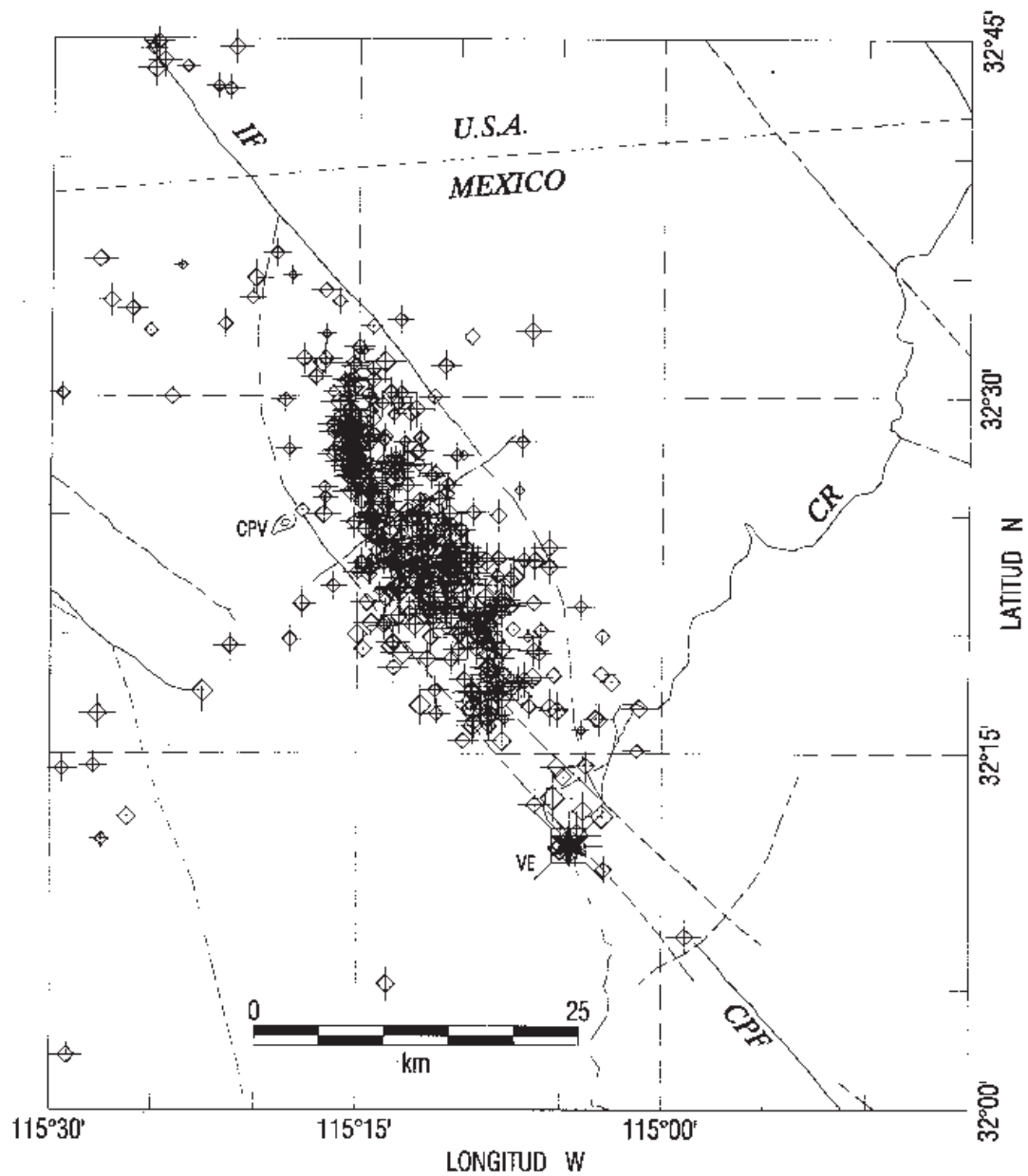


Figura 1.5 Epicentros de replicas del sismo de Victoria. Todas las presentadas desde Junio de 1980 hasta Febrero de 1981. CPV: Volcán de Cerro Prieto. Ver Fig. (1.1) para otras abreviaturas.

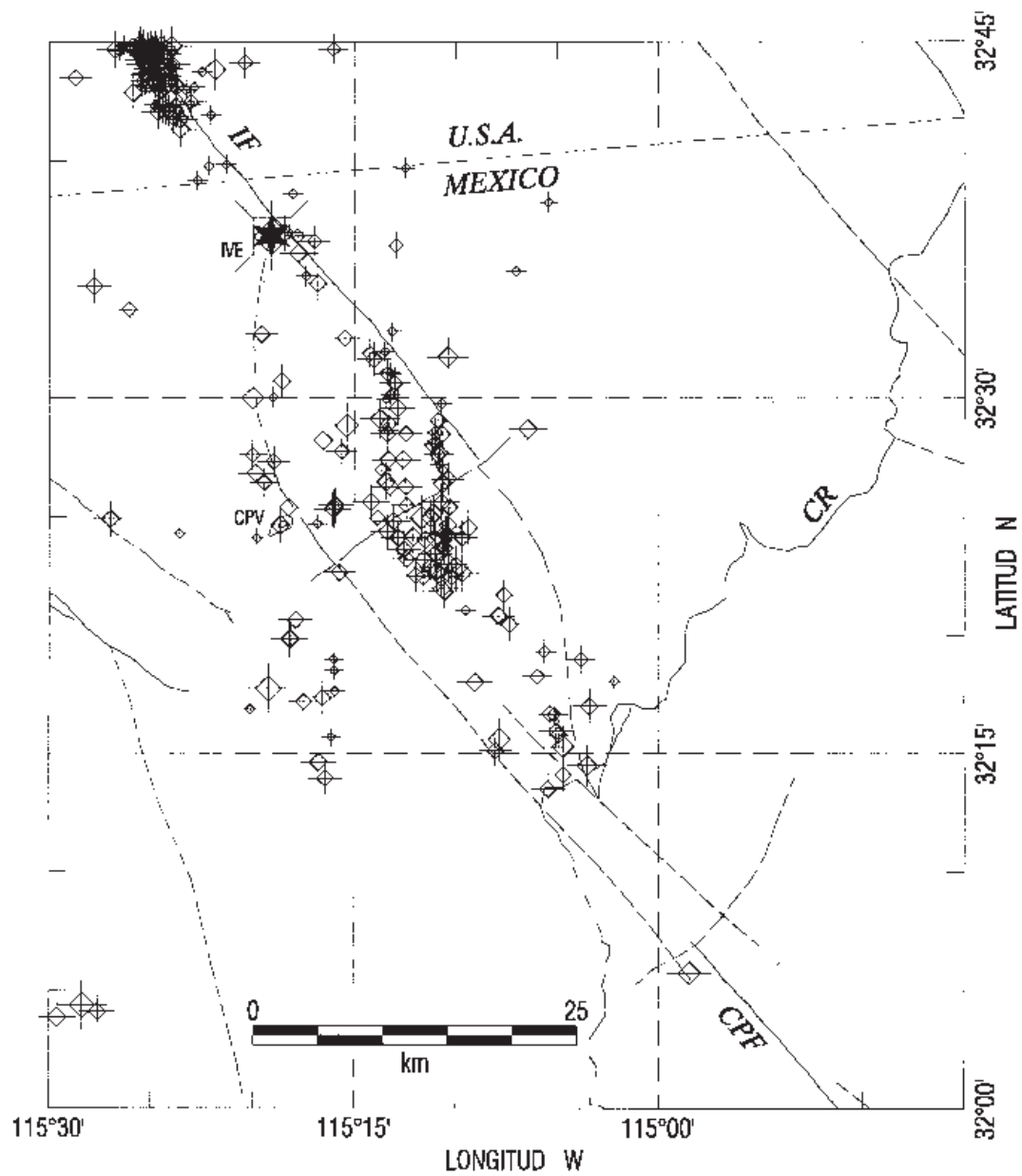


Figura 1.6 Epicentros de replicas del sismo de Valle Imperial. Todas las presentadas desde Octubre de 1979 hasta Marzo de 1980 de 1980. CPV: Volcán de Cerro Prieto. Ver Figura 1.1 para otras abreviaturas.

El sismo de Victoria del 9 de Junio de 1980, presento un mecanismo focal de fallamiento de rumbo con movimiento lateral derecho en un plano vertical. No se observaron en la superficie evidencias de los desplazamientos ocasionados por la propagación de la fractura del evento principal. La actividad de replicas se localizo al noroeste del epicentro del evento principal, concentrándose en pequeños grupos en o cerca del extremo noroeste de la falla Cerro Prieto. Algunas replicas se localizaron al norte de donde termina la falla Cerro Prieto y hacia el extremo sureste de la falla Imperial. Solo un pequeño numero de replicas fue localizado en los alrededores del evento principal y ocurrieron pocas horas después de este. La actividad de replicas esta localizada principalmente entre 3 y 8 Km. de profundidad, ubicándose la mayoría de ellas por debajo de la grueso capa de sedimentos. La profundidad promedio de las replicas generalmente decrece hacia el noroeste, alejándose del epicentro del evento principal, el cual se encuentra a 9 Km. de profundidad. Los mecanismos focales compuestos de las replicas muestran un movimiento lateral derecho sobre un plano vertical con orientación N45°W para el grupo mas cercano al evento principal, y callamiento normal para el grupo en el extremo noroeste de la falla Cerro Prieto. Dos pequeños grupos sísmicos ocurrieron pocas horas antes del evento principal.

1.3 Efecto de las secuencias sísmicas durante sismos históricos

Las replicas sísmicas también afectan en gran parte la decisión de evacuar una edificación ya que esta íntimamente ligado con la seguridad de las personas. Como ocurrió en sismo de Algeria el 21 de Mayo del 2003 en el cual murieron más de 1000 personas y alrededor de 7000 heridos en el evento principal y fueron evacuadas miles de personas por miedo al colapso de las construcciones en una replica Figura 1.7.



Figura 1.7 En la fotografía se muestran personas evacuadas en el sismo de Algeria del 21 de Mayo del 2003.

En cuanto al manejo de cómo, cuando y porque evacuar Gallagher et. al. En 1999 publico algunos manuales para la evaluación de la seguridad respecto al daño provocado y el si permitir o no la entrada a las construcciones las cuales pueden ser débiles ante posibles replicas sísmicas, todo esto en base a la ocurrencia de las mismas obtenidas por Reasenger y Jones en California en 1994.

En cuanto a la seguridad pública esta se ve afectada ante este u otro tipos de eventos naturales, ya que en el periodo en que las personas se encuentran evacuadas, sus propiedades pueden ser saqueadas y además de la inseguridad que se presenta en estos lugares. Esto provoca que esto sea una importante contribución de perdidas financieras por el sismo.

Las estructuras con un daño menor después del evento principal tienen una muy alta probabilidad de aumentar este daño con la presentación de alguna replica, aunque esta sea de menor magnitud que el evento principal, ya que la estructura en el evento principal

desempeño un trabajo y su capacidad estructural se vio reducida por tal razón al momento de presentarse una replica esta incrementa su daño y puede incluso llegar a provocar el colapso.

Lo anterior se pudo observar en sismo de Kocaeli, Turquía en 1999 de magnitud 7.4 y a un mes se presento una replica de magnitud de 5.9 en el cual murieron 7 personas y resultando heridas por lo menos 239 personas y además provocando el colapso de docenas de construcciones en tres ciudades cercanas al epicentro de la replica. En la Figura 1.8a se muestra la fotografía de una estructura la cual resistió el evento principal y en la Figura 1.8b se muestra la misma estructura colapsada por la replica presentada un mes mas tarde.



a) Después del evento principal de magnitud 7.4 el 17 de Agosto de 1999

b) Después de la replica de magnitud 5.9 el 13 de Septiembre de 1999

Figura 1.8 Fotografías de una construcción con un daño ligero provocado por el sismo de Kocaeli en Turquía, la cual tuvo un colapso total debido a una replica de menor magnitud un mes más tarde. USGS (2000).

Otro ejemplo es el sismo de Molise, Italia del 31 de Octubre del 2002 de magnitud 5.7 el cual tuvo una replica al día siguiente de una magnitud igual al evento principal, en la Figura 1.9a se muestra el daño ocasionado a una estructura expuesta al evento principal y en la

Figura 1.9b se muestra el daño a la misma estructura ocasionado un día después por una replica de igual magnitud al evento principal.



a) Después del evento principal de magnitud 5.7 el 31 de Octubre del 2002



b) Después de la replica de magnitud 5.7 el 1 de Noviembre del 2002

Figura 1.9 Fotografías de una columna con un daño ligero provocado por el sismo de Molise en Italia, y un gran daño provocado por la replica un día después del evento principal. Fotografías de Mucciarelli y Gallipoli, Universidad de Basilicata, Italia y Dr. Paolo Bazzurro,

En cuanto a México, docenas de estructuras de concreto tuvieron que ser demolidas después de 1985, por el peligro que representaban y por las dificultades técnicas para ser reparadas ya que tenían grandes deformaciones permanentes.

El sismo del 17 de Enero de 1994 Northridge, California causo daños cuantiosos en varias ciudades del sur de California, incluyendo el valle de San Fernando, Santa Mónica y el este de los Ángeles, de magnitud 6.4 y su epicentro se localizo a 1.6 km. de Northridge y a 32 km. al noroeste de los Ángeles. El cual se considera una de las catástrofes mas costosas en la historia de lo E.U.A. en el cual las perdidas económicas ascendieron a mas de 30 billones de dólares. Similarmente en Kobe, Japón de 1995 en el cual varios puentes de pilas fueron demolidos después del sismo Hyogo-Ken_Nambu por el elevado costo que habría representado el reparar las columnas con una deformación permanente grande. Todo lo

anterior pone en evidencia la necesidad de efectuar una evaluación de la capacidad residual de las estructura dañadas para soportar una replica.

1.4 Objetivos

El objetivo global de esta tesis consiste en ampliar nuestro conocimiento sobre el efecto de las secuencias sísmicas (i.e., evento principal-replicas) en la respuesta inelástica de estructuras. Para tal fin, se realizaron estudios analíticos en sistemas de un grado de libertad (S1GL) y en sistemas de múltiples grados de libertad (SMGL), representativos de edificios de acero diseñados de acuerdo a la normatividad mexicana. Los siguientes objetivos particulares de este estudio se resumen a continuación:

- 1) Identificar, seleccionar y ensamblar un catalogo de secuencias sísmicas a partir de la Base Mexicana de Sismos Fuertes (SMIS, 199X).
- 2) Estudiar la influencia de secuencias sísmicas con diferentes características (contenido de frecuencia, duración, etc.) en la respuesta sísmica de S1GL.
- 3) Explorar el efecto del periodo fundamental de vibración, de la resistencia lateral y del tipo de comportamiento histeretico en la respuesta dinámica no-lineal de S1GL sujetos diversas secuencias sísmicas.
- 4) Investigar la respuesta inelástica de dos marcos de acero con diferente número de niveles, diseñados de acuerdo con la normatividad mexicana, al ser excitados por secuencias sísmicas con diferentes características.

1.4 Organización

El material presentado en esta tesis se organiza en 5 capítulos y un apéndice A.

En un primer capítulo se describe la importancia de considerar las demandas de deformación residual tanto locales como globales; como efecto de eventos sísmicos (i.e. secuencias sísmicas). En el cual se presenta una gama de ejemplos de edificaciones que fueron expuestas a secuencias sísmicas de gran importancia en el mundo.

En un segundo capítulo se presenta un catalogo de secuencias sísmicas, las cuales se identificaron a partir de la Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes 1960-1999 en su segunda edición.

Posteriormente en un tercer capítulo se evalúa las demandas del desplazamiento inelástico en Sistemas de un grado de libertad como respuesta a secuencias sísmica. Secuencias sísmicas que se seleccionaron del catalogo ensamblado en el capítulo dos.

En un cuarto capítulo se evalúa las demandas de distorsión máxima y residual en Sistemas de varios grados de libertad sometidos a las secuencias sísmicas utilizadas para estudios de sistemas de un grado de libertad en el capítulo tres.

Finalmente en el capítulo cinco se presentan conclusiones y observaciones obtenidas de este trabajo.

De una manera anexa se considero incluir en un apéndice “A” el catalogo de acelerogramas de las secuencias sísmicas, identificadas en el capítulo dos.

Selección del catálogo de Secuencias Sísmicas

2.1 Introducción

Idealmente, la evaluación de las demandas sísmicas que actúan sobre una estructura, y las inherentes incertidumbres asociadas a su estimación, requiere la disponibilidad de acelerogramas (i.e. historias de aceleración) que representen el peligro sísmico de la región donde se encuentra ubicada dicha estructura.

Sin embargo, los acelerogramas seleccionados deben presentar características de intensidad, contenido de frecuencia y duración que sean compatibles con escenarios sísmicos específicos.

En la actualidad, no existe un procedimiento unificado que permita conocer el número mínimo de acelerogramas necesarios para lograr una evaluación adecuada y confiable de la respuesta sísmica de estructuras.

El objetivo de este capítulo consiste en presentar la metodología empleada en este estudio para seleccionar un conjunto de secuencias sísmicas que fueran adecuadas para evaluar la respuesta sísmica de estructuras entre réplicas.

2.2 Base Mexicana de Sismos Fuertes

En el año de 1960 comenzó la instrumentación sísmica de movimientos fuertes en México. En este año se instalaron los primeros acelerógrafos en la Ciudad de México, uno en la Alameda Central y otro en Ciudad Universitaria. Esto después del destructivo terremoto de San Marcos ($M=7.5$), ocurrido en 1957, en el cual los ingenieros de esa época, observaron la importancia de medir las ondas sísmicas generados por los temblores fuertes, esto con la intención de obtener datos que permitieran estudiar los efectos de temblores en suelos y estructuras (i.e. respuesta sísmica).

En ese tiempo únicamente se disponía de sismógrafos de alta ganancia los cuales era común que se saturaran en sus registros, lo cual hacía que la información obtenida fuera inadecuada.

En 1962 a raíz de los temblores de Acapulco, hubo gran interés de los investigadores de obtener datos, por lo cual se instalaron más sismógrafos en la ciudad de México y en otras regiones sísmicas del país, y particularmente en las grandes presas hidroeléctricas que se encontraban en construcción, lo cual hizo posible la recolección de datos valiosos de mediciones directas de importantes sismos.

En las décadas subsecuentes la red acelerográfica de México mantuvo un crecimiento moderado hasta 1985 cuando se contaba con 110 estaciones, pero después del sismo del 19

de Septiembre de 1985 mas instituciones vieron la importancia de sumarse al trabajo de instalar y operar redes sísmicas y el recolectar datos de movimientos fuertes.

En Julio de 1995 la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica publico su segundo volumen de la base de datos la cual contiene información detallada de 5252 acelerogramas de tres componentes registrados en México desde 1960 a diciembre de 1993. La descripción de cada acelerograma incluye, entre otros datos, su identificación, fecha y hora de registro, duración, valores máximos de aceleración para cada componente y especificación del instrumento que lo registró. También se presenta información de los 925 sismos que generaron esos registros y cuyas magnitudes van desde 2.5 hasta 8.1. Se dan referencias cruzadas que permiten al usuario fácilmente localizar cualquier acelerograma de este amplio espectro de registros y eventos, así como estadísticas generales acerca de los datos registrados en más de 3 décadas. Como referencia se proporciona al final una extensa bibliografía con cerca de 120 trabajos publicados en México sobre estos datos. Figura 2.1.



Figura 2.1 Catalogo de Acelerogramas 1960-1993. Publicado en Julio de 1995.

En Mayo de 1997 la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica publico el disco compacto volumen I, el cual fue editado por el Cenedic, de la Universidad de Colima. En este primer CD-ROM se describe la estructura de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes y se presenta de manera condensada la información que sobre instrumentación, el registro de temblores fuertes y la sismicidad asociada se ha recolectado en México de 1960 a 1995. Contiene además las series de tiempo de 4659 acelerogramas de tres componentes registrados en el periodo 1992 a 1995, todas ellas en un nuevo formato estándar. Se incluye en el disco un sistema de búsqueda que facilita al usuario el acceso a los datos por fecha de los sismos, estación acelerográfica o clave del acelerograma. Los registros obtenidos con la búsqueda pueden ser desplegados, graficados en pantalla e impresora o transferidos a otro medio de almacenamiento. Figura 2.2.



Figura 2.2 Catalogo de Acelerogramas Volumen I. Publicado en Mayo de 1997.

En un segundo Volumen de este disco compacto, el cual integra datos desde 1960 hasta 1999, se presenta información acerca de instrumentación sísmica de temblores fuertes, estaciones acelerograficas, sismicidad y acelerogramas producidos en México, en el cual se presentan datos de 547 estaciones con 2062 temblores, que van de magnitud 1.6 a 8,1 y datos descriptivos de 13,835 registros acelerograficos. Figura 2.3.

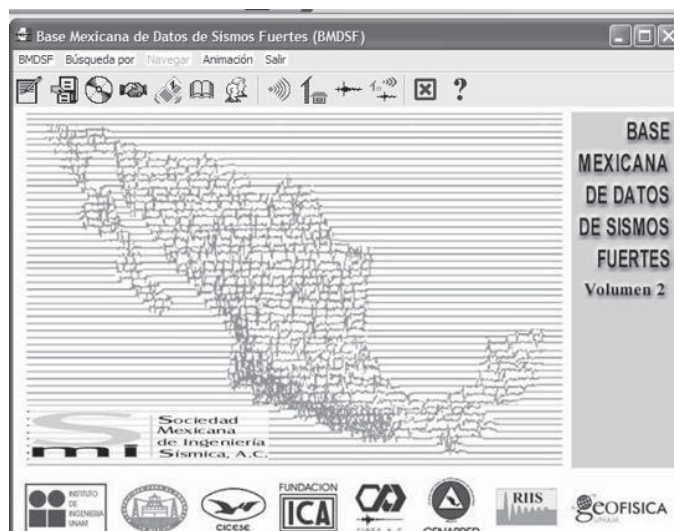


Figura 2.3 Catalogo de Acelerogramas Volumen II.

Instituciones que han contribuido con información:

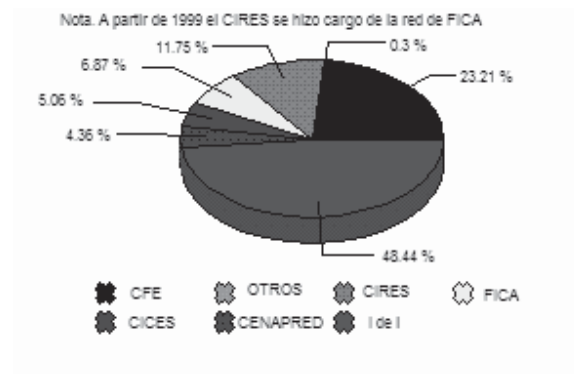
- Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C. Fundación Javier Barros Sierra, México, D.F.
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, BCN.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación.
- Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Ingeniería Experimental y Control, México, D.F.

- Fundación ICA, México, D.F.
- Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Instituto de Investigación para la Ingeniería, A.C., Guadalajara, Jal.

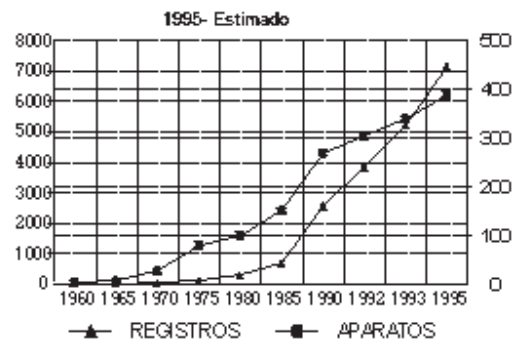
Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica, RIIS, integrada por:

- Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.
- Universidad Autónoma de Guerrero.
- Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.
- Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Universidad Autónoma del Estado de México.
- Universidad Autónoma del Estado de Chiapas.
- Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente.
- Universidad Autónoma de Puebla.
- University of Nevada at Reno, Mackay School of Mines.

Estadísticas sobre los datos de la base.



a) Producción de acelerogramas por institución (1960-1993).



b) Productividad y crecimiento de la red acelerografica (1960-1993).



c) Localización de epicentros que generaron algún acelerograma de 1960 a 1993.



d) Red Acelerografica de México.

Figura 2.4 Estadísticas sobre los datos de la base (BMDSF).

2.3 Criterios de selección

En esta sección se describe el procedimiento y criterio de selección de las secuencias sísmicas y las correspondientes historias de aceleraciones que conforman el catálogo empleado.

En principio se identificaron todas las secuencias sísmicas (i.e. evento principal y al menos una replica) incluidas en la BMDSF durante el intervalo de 1960-1999. Así de esta manera se identificaron cerca de 500 secuencias.

Posteriormente, se procedo a seleccionar las secuencias que cumpliesen con los siguientes requisitos:

a) Magnitud

Magnitud del evento principal mayor o igual a 5.5

Magnitud de la replica mayor o igual a 4.0

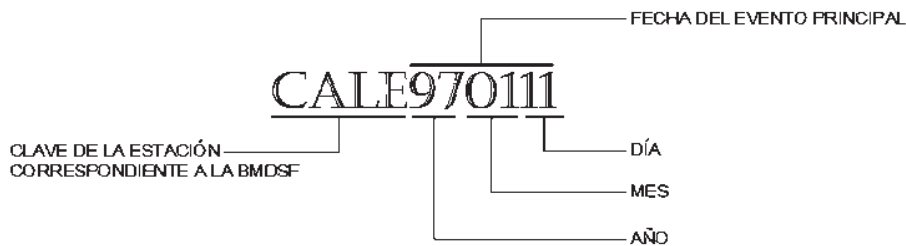
b) Información sobre el tipo de terreno donde se ubica la estación acelerografica.

c) Historias de aceleraciones registradas en estaciones ubicadas en terreno libre, o bien en edificaciones de poca altura donde la interacción suelo-estructura es despreciable.

d) Secuencias en las cuales al menos una de las los componentes horizontales de aceleración del evento principal sea mayor a 100 cm/s^2 .

Finalmente, se seleccionaron 52 secuencias las cuales, cumplieron con los requisitos anteriores, de las cuales 29 contienen una replica, 11 incluyen dos replicas, 6 consideran tres replicas, 5 contienen cuatro replicas y una incluye cinco replicas. Estas 52 secuencias sísmicas contienen un total de 146 historias de aceleraciones.

Para fines de identificación, se empleo la siguiente nomenclatura para cada secuencia sísmica:

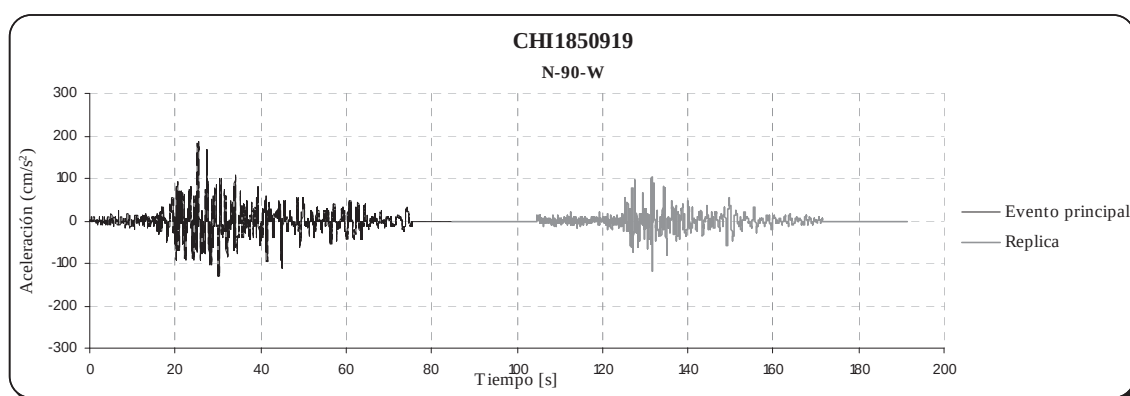


Así, en la Tabla 2.1 se presenta una lista completa de todas las secuencias (i.e. evento principal-replicas) recopiladas para este estudio, que incluye el nombre de la estación, la clave del acelerograma de acuerdo con la BMDSF, la componente y su aceleración máxima del terreno, el tipo de terreno donde se ubica la estación y la duración efectiva del acelerograma de acuerdo a la definición de Trifunac y Brady (1975).

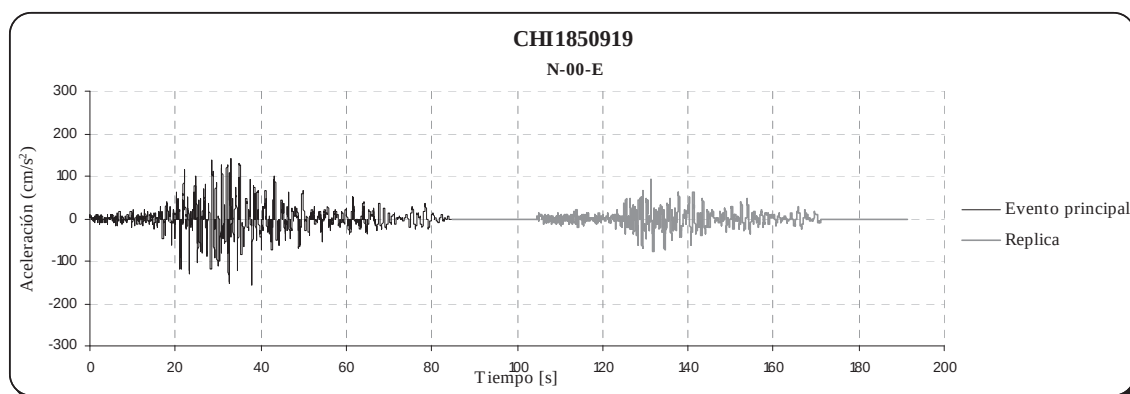
Con el fin de ilustrar algunas secuencias sísmicas consideradas en esta investigación, en las Figuras 2.5 y 2.6 se presentan las secuencias sísmicas registradas en las estaciones CDAF, ubicada en la Ciudad de México, y CHI1, localizada en la Ciudad de Chilpancingo, durante los eventos sísmicos de Septiembre de 1985. Cabe recordar que el evento principal

($M_w=8.0$) ocurrió el 19 de Septiembre de 1985, frente a las costas de Michoacán a las 7:18 a.m., mientras que la replica mas importante se registro dos días después, el 21 de Septiembre a la 1:37 a.m. ($M_s=7.6$).

Nota: La replica debió haberse sentido primero en Chilpancingo y después en la Ciudad de México, esto debido a la ubicación del epicentro.

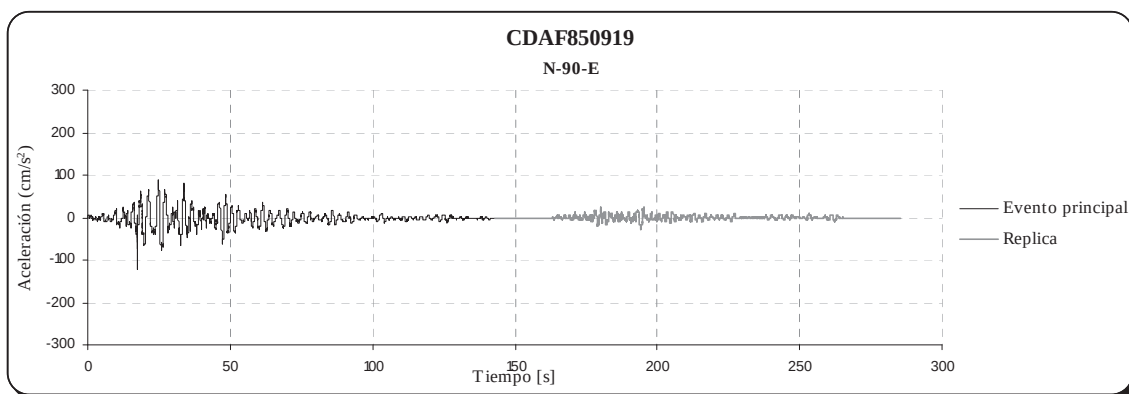


a) Secuencia sísmica CHI1850919 componente N-90-W.

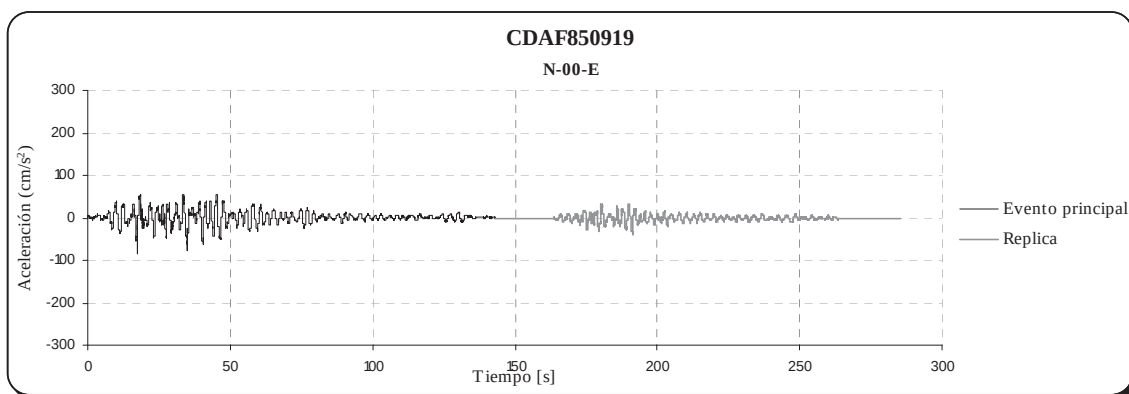


b) Secuencia sísmica CHI1850919 componente N-00-E.

Figura 2.5 Acelerogramas de la secuencia CHI1850919 en sus dos componentes horizontales.



a) Secuencia sísmica CDAF850919 componente N-90-E.

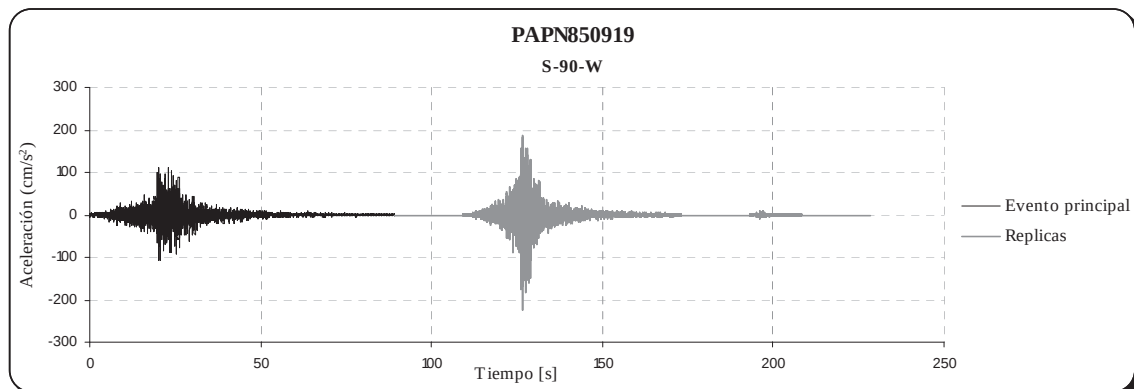


a) Secuencia sísmica CDAF850919 componente N-00-E.

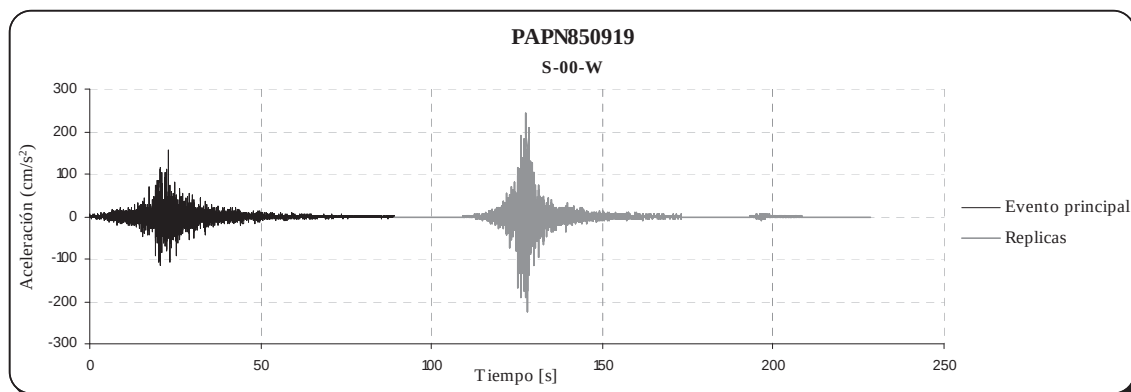
Figura 2.6 Acelerogramas de la secuencia CDAF850919 en sus dos componentes horizontales.

Graficas similares a las Figuras 2.5 y 2.6 considerando ambas componentes horizontales, para cada secuencia sísmica se pueden consultar en el **Apéndice A**.

Es interesante notar que la intensidad (medida por la aceleración máxima del terreno) de algunas replicas es ligeramente mayor que la del evento principal, aun cuando la magnitud del evento que genero la replica fue mayor. Por ejemplo en la estación PAPANOA, ubicada en el estado de Guerrero, se registro una secuencia sísmica con tales características, lo cual se ilustra en la Figura 2.7 durante los sismos de Septiembre de 1985.



a) Secuencia sísmica PAPN850919 componente S-90-W.



b) Secuencia sísmica PAPN850919 componente S-00-W.

Figura 2.7 Acelerogramas de la secuencia PAPN850919 en sus dos componentes horizontales

En la secuencia sísmica de la Figura 2.7 la aceleración máxima del terreno, ocasionada por el evento principal fue de 154.95 cm/s^2 , mientras que durante la replica se registro una aceleración máxima del terreno de 242.69 cm/s^2 en su componente S00W. Otros ejemplos de esto son las siguientes secuencias: RIIS761207 y PARS850919.

Así mismo, inspeccionando las historias de aceleraciones incluidas en el Apéndice A, se puede identificar algunas características en las secuencias sísmicas. En general, las replicas exhiben un similar contenido de frecuencias que el evento principal. Sin embargo, normalmente difiere la duración e intensidad del movimiento.

1.6 Efecto de la duración (Intensidad de Arias)

Es importante conocer si un evento es de corta o larga duración. Actualmente eso se logra con la teoría que propuso Trifunac y Brady en 1975. Estos autores definen la duración, t_d , como el intervalo de tiempo desde el 5% al 95% de la Intensidad de Arias.

La Intensidad de Arias fue definida por Arias en 1970 como:

$$I_a = \int_0^{\infty} a(t)^2 dt \quad \text{Ecuación 2.1}$$

En donde I_a es la Intensidad de Arias en unidades de longitud por tiempo, $a(t)$ es la aceleración en gal (cm/s^2).

Para nuestro caso es de importancia conocer la duración de todos los eventos principales de las secuencias sísmicas. A continuación se muestra un registro de la estación “La Unión” del sismo del 19 de Septiembre de 1985. Fig. (2.8)

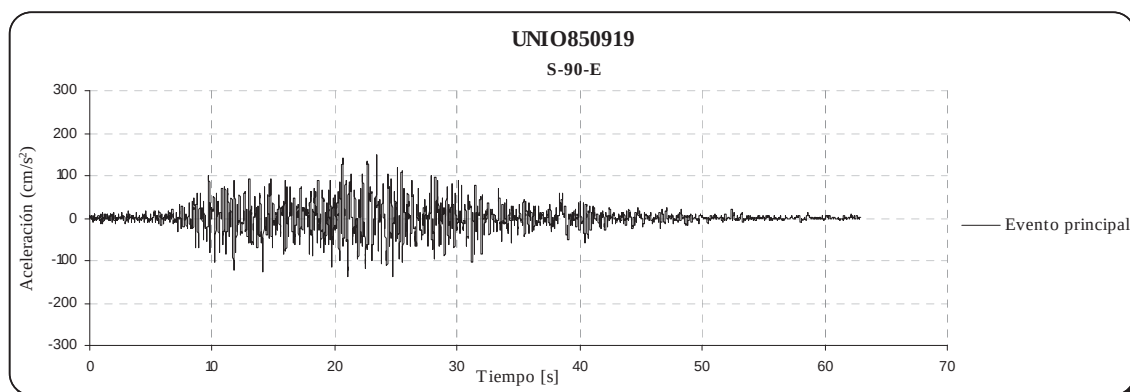


Figura 2.8 Acelerograma del sismo del 19 de Septiembre de 1985, estación “La Unión” componente S-90-E.

Teniendo el registro proseguimos a calcular la Intensidad de Arias. Graficando tenemos lo siguiente. Fig. (2.9).

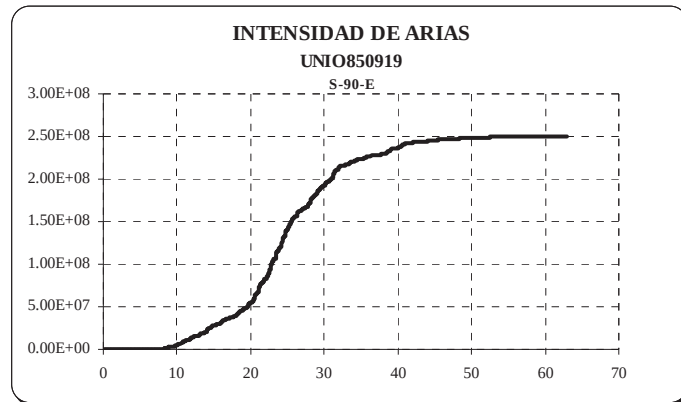


Figura 2.9 Intensidad de Arias; sismo del 19 de Septiembre de 1985, estación “La Unión” componente S-90-E.

Normalizando los valores. Fig. (2.10).

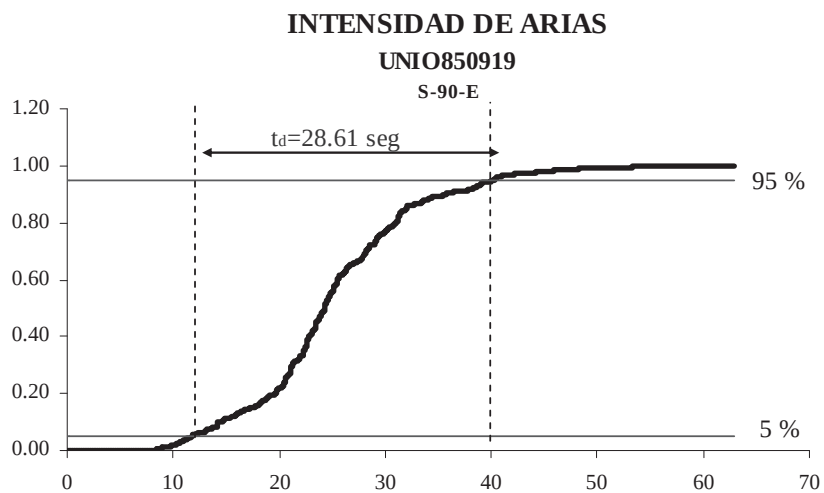


Figura 2.10 Duración del sismo del 9 de Septiembre de 1985, estación “La Unión” componente S-90-E.

En el Tabla 2.1 Catálogo de secuencias sísmicas se incluyen los t_d del evento principal de las 52 secuencias sísmicas en estudio.

Tabla 2.1 Catálogo de secuencias sísmicas

Secuencia	Nombre de la estación	Clave de Acelerogramas	Magnitud	Componente	Acel. Máx., (cm/s ²)	Tipo de suelo	t _a (s)
RIIS761207	RIITO REGIÓN NOROESTE DE SONORA	RIIS7612.071	5.6 ^a	S45W	232.17	Sedimentos (aluvión)	23.45
				S45E	-161.08		23.87
		RIIS7612.072	5.6 ^a	S45W	-260.46		
OAXM781129	OAXACA FACULTAD DE MEDICINA OAXACA, OAXACA			S45E	-178.63	Aluvial	
		OAXM7811.291	7.8 ^d	N00E	216.43		8.58
				N90W	144.83		8.02
		OAXM7811.292	5.3 ^b	N00E	-56.90		
				N90W	38.40		
OAXM781129		OAXM7811.293	4.5 ^b	N00E	98.21		
				N90W	0.00		
DELS791015	DELTA VALLE DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA	DELS7910.151	6.6 ^a	N08W	340.40	Sedimentos (aluvión)	69.39
				S82W	-230.55		75.68
		DELS7910.152	5.2 ^a	N08W	180.17		
VCPS800609	VOLCÁN DE CERRO PRIETO VALLE DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA			S82W	-48.41	Rocas volcánicas	
		VCPS8006.091	6.1 ^a	N45E	-534.94		9.37
				N45W	-530.63		10.64
		VCPS8006.092		N45E	-136.85		
				N45W	-102.60		
VCPS800609		VCPS8006.093	4.3 ^a	N45E	-60.91		
				N45W	26.97		
VICS800609	VICTORIA GUADALUPE VICTORIA, VALLE DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA	VICS8006.091	6.1 ^a	N50E	-958.66	Sedimentos (aluvión)	10.98
				N40W	874.64		9.49
		VICS8006.093	4.9 ^a	N50E	-129.98		
				N40W	-181.08		
		VICS8006.094	5.3 ^a	N50E	-272.54		
AZIH850919	AEROPUERTO ZIHUATANEJO ZIHUATANEJO, GUERRERO			N40W	385.68		
		AZIH8509.191	8.1 ^d	N90E	-153.93		23.37
				N00E	-98.62		25.77
		AZIH8509.211	7.6 ^d	N90E	133.14		
				N00E	-158.23		
CDAF850919	CENTRAL DE ABASTOS FRIGORÍFICO COL. SAN JOSÉ ACULCO, MÉXICO D.F.					Arcilla	
		CDAF8509.191	8.1 ^d	N90E	-117.49		82.89
				N00E	-86.00		102.76
		CDAF8509.211	7.6 ^d	N90E	-28.71		
				N00E	-41.15		
CHI1850919	CHILPANCINGO CHILPANCINGO, GUERRERO					Roca	
		CHI18509.191	8.1 ^d	N00E	-157.37		46.32
				N90W	187.33		42.26
		CHI18509.211	7.6 ^d	N00E	93.48		
				N90W	-118.14		
INMD850919	INFIERNILLO MARGEN DERECHA MICHOACÁN, GUERRERO					Brechas y conglomerados	
		INMD8509.191	8.1 ^d	N75E	99.63		40.87
				N15W	142.63		38.36
		INMD8509.211	7.6 ^d	N75E	34.18		
				N15W	-35.24		
PAPN850919	PAPANOA PAPANOA, GUERRERO					Roca	
		PAPN8509.191	8.1 ^d	S90W	111.61		25.41
				S00W	154.95		25.22
		PAPN8509.211	7.6 ^d	S90W	-219.83		
				S00W	242.69		
PAPN850919		PAPN8509.212	4.2 ^c	S90W	10.86		
				S00W	7.61		
PARS850919	EL PARAÍSO EL PARAISO, GUERRERO					Roca	
		PARS8509.191	8.1 ^d	S90E	87.32		23.60
				S00E	-109.82		22.72
		PARS8509.211	7.6 ^d	S90E	-473.78		
				S00E	-625.78		
SUCH850919	EL SUCHIL EL SUCHIL, GUERRERO					Roca	
		SUCH8509.191	8.1 ^d	S90W	-81.45		20.51
				S00W	-103.12		18.36
		SUCH8509.211	7.6 ^d	S90W	72.00		
				S00W	-85.98		

Secuencia	Nombre de la estación	Clave de Acelerogramas	Magnitud	Componente	Acel. Máx. (cm/s ²)	Tipo de suelo	ta (s)
UNIO850919	LA UNIÓN LA UNIÓN GUERRERO	UNIO8509.191	8.1 ^d	S90W S00E	148.58 -165.29	Roca	28.61
		UNIO8509.211	7.6 ^d	S90W S00E	-76.98 -49.54		27.64
VILC850919	VILLITA CORONA CENTRO PRESA LA VILLITA MICHOACÁN-GUERRERO	VILC8509.191	8.1 ^d	S85W S05W	-305.01 697.61	Sobre presa en la frontera del núcleo de arcilla y el enrocamiento	45.70
		VILC8509.211	7.6 ^d	S85W S05W	115.10 195.57		43.26
VILE850919	VILLITA MARGEN DERECHA PRESA LA VILLITA MICHOACÁN-GUERRERO	VILE8509.191	8.1 ^d	S90E S00E	122.54 -125.17	Roca	41.84
		VILE8509.211	7.6 ^d	S90E S00E	41.10 30.41		43.38
ZACA850919	ZACATULA ZACATULA, MICHOACÁN	ZACA8509.191	8.1 ^d	N90W S00E	-174.18 262.23	Arcilla compacta	47.01
		ZACA8509.192	4.8 ^b	N90W S00E	15.31 -12.44		41.73
		ZACA8509.193	5.0 ^b	N90W S00E	-4.79 6.70		
		ZACA8509.211	7.6 ^d	N90W S00E	70.82 72.73		
ACAC890425	ACAPULCO CENTRO CULTURAL ACAPULCO, GUERRERO	ACAC8904.251	6.9 ^d	N90E N00E	-116.80 -101.21	Arena-Limo-Arcilla	55.71
		ACAC8904.253	4.8 ^b	N90E N00E	10.71 -23.53		65.06
ACAD890425	ACAPULCO ESCUELA DIANA ACAPULCO, GUERRERO	ACAD8904.251	6.9 ^d	N90E N00E	-331.53 -335.00	Limo arenoso	5.04
		ACAD8904.253	4.8 ^b	N90E N00E	-6.65 -9.22		9.48
ACAZ890425	ACAPULCO LA ZANJA ACAPULCO, GUERRERO	ACAZ8904.251	6.9 ^d	N90E N00E	154.70 149.39	Deposito barra	20.96
		ACAZ8904.252	4.8 ^b	N90E N00E	-8.60 -10.85		22.70
COPL890425	CÓPALA CÓPALA, GUERRERO	COPL8904.251	6.9 ^d	N90E N00E	57.74 -105.14	Roca	14.29
		COPL8904.252	4.8 ^b	N90E N00E	9.59 -7.92		7.04
VIGA890425	LAS VIGAS LAS VIGAS, GUERRERO	VIGA8904.251	6.9 ^d	S90E S00E	-310.08 345.94	Roca	9.37
		VIGA8904.252	4.8 ^b	S90E S00E	-10.46 -17.23		9.83
IND1941210	INFIERNILLO POZO 50 M PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	IND19412.101	6.6 ^e	N70E N20W	225.38 -235.91	Transición entre filtros y enrocamiento compactado	14.19
		IND19412.102	4.0 ^c	N70E N20W	5.74 7.18		26.95
MZ01951009	TERMOELÉCTRICA MANZ. COL. TERRENO SUB MANZANILLO, COLIMA	MZ019510.092	7.3 ^b	N00E N90E	387.62 387.13	Campo libre	68.99
		MZ019510.097	4.9 ^b	N00E N90E	26.57 27.83		72.70
MZ03951009	TERMOELÉCTRICA MANZ. COL. PRIMER N. PISO MANZANILLO, COLIMA	MZ039510.092	7.3 ^b	N00E N90E	304.23 274.51	Estructura	78.86
		MZ039510.097	4.9 ^b	N00E N90E	18.85 22.10		71.10

Secuencia	Nombre de la estación	Clave de Acelerogramas	Magnitud	Componente	Acel. Máx. (cm/s ²)	Tipo de suelo	t _d (s)
PAPN960715	PAPANOA PAPANOA, GUERRERO	PAPN9607.151	6.5 ^d	N90W N00W	-319.64 -292.86	Roca	8.77
		PAPN9607.153	4.2 ^c	N90W N00W	-22.42 -32.27		8.71
		PAPN9607.154	4.4 ^c	N90W N00W	16.51 18.04		
		PAPN9607.157	4.1 ^c	N90W N00W	-20.95 -31.88		
CALE970111	CALETA DE CAMPOS CALETA DE CAMPOS, MICHOACÁN	CALE9701.111	6.9 ^d	S90E S00E	396.21 -350.27	Roca	14.59
		CALE9701.113	4.7 ^c	S90E S00E	-9.97 -8.61		14.83
		CALE9701.122	4.6 ^c	S90E S00E	12.44 12.44		
		CALE9701.161	4.9 ^d	S90E S00E	-61.25 66.99		
IN08970111	INFIERNILLO BASE CORTINA PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	IN089701.111	6.5 ^b	N80E N10W	-243.99 434.52	Sobre cuerpo de la cortina enrocamiento a volteo	22.38
		IN089701.121	4.6 ^c	N80E N10W	-8.40 7.79		19.26
		IN089701.122	4.3 ^c	N80E N10W	-7.47 6.83		
		IN089701.161	5.1 ^c	N80E N10W	16.97 -22.45		
IN12970111	INFIERNILLO MEDIA CORONA PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	IN129701.111	6.5 ^b	N80E N10W	-395.73 492.40	Sobre cuerpo de la cortina enrocamiento a volteo	23.60
		IN129701.113	4.7 ^c	N80E N10W	5.80 -8.70		24.96
		IN129701.121	4.6 ^c	N80E N10W	5.31 7.02		
		IN129701.122	4.6 ^c	N80E N10W	-7.66 13.76		
		IN129701.123	4.3 ^c	N80E N10W	-9.09 11.47		
		IN129701.161	5.1 ^c	N80E N10W	23.45 -28.40		
IN18970111	INFIERNILLO CORONA CENTRO PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	IN189701.111	6.5 ^b	N70E N20W	323.50 -303.85	Sobre cuerpo de la cortina entre el núcleo de arcilla y el enrocamiento	27.95
		IN189701.121	4.6 ^c	N70E N20W	-3.99 7.03		32.25
		IN189701.122	4.6 ^c	N70E N20W	-5.44 9.85		
		IN189701.123	4.3 ^c	N70E N20W	-6.36 6.08		
		IN189701.161	5.1 ^c	N70E N20W	21.09 -27.28		
IND1970111	INFIERNILLO POZO 50 M PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	IND19701.111	6.5 ^b	N70E N20W	-168.43 -246.68	Transición entre filtros y enroca- miento compactado	25.98
		IND19701.121	4.6 ^c	N70E N20W	3.30 5.23		30.26
		IND19701.122	4.6 ^c	N70E N20W	5.64 -7.72		
		IND19701.123	4.3 ^c	N70E N20W	8.53 6.18		
		IND19701.161	5.1 ^c	N70E N20W	13.76 -17.86		

Secuencia	Nombre de la estación	Clave de Acelerogramas	Magnitud	Componente	Acel. Máx. (cm/s ²)	Tipo de suelo	ta (s)
IND2970111	INFIERNILLO POZO A 25 M PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	IND29701.111	6.5 ^b	N70E	-274.68	Transición entre filtro y enroca- miento compactado	24.82
				N20W	212.52		35.57
		IND29701.121	4.6 ^c	N70E	3.92		
				N20W	4.20		
		IND29701.122	4.6 ^c	N70E	4.39		
				N20W	7.04		
IND29701.123			4.3 ^c	N70E	-5.19		
				N20W	-5.32		
		IND29701.161	5.1 ^c	N70E	16.66		
				N20W	-19.62		
INM1970111	INFIERNILLO MARGEN IZQUIERDA PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	INM19701.111	6.5 ^b	N65E	-334.00	Brechas y conglomerados	21.92
				N25W	450.75		24.20
		INM19701.121	4.6 ^c	N65E	9.60		
				N25W	6.11		
		INM19701.122	4.3 ^c	N65E	-10.03		
				N25W	6.16		
INM19701.161			5.1 ^c	N65E	-19.23		
				N25W	-16.21		
INPT970111	INFIERNILLO POTABILIZADORA PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	INPT9701.111	6.5 ^b	N75E	332.62	Brechas y conglomerados	18.92
				N15W	282.37		17.19
		INPT9701.112	4.7 ^c	N75E	-2.31		
				N15W	3.87		
		INPT9701.121	4.6 ^c	N75E	-5.48		
				N15W	6.94		
INPT9701.122			4.3 ^c	N75E	-4.96		
				N15W	-6.42		
		INPT9701.161	5.1 ^c	N75E	11.01		
				N15W	16.28		
LZ02970111	SICARTSA LÁZARO C. MICH. PLANTA B. PISO LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN	LZ029701.111	6.9 ^d	N30E	115.76	Estructura SICARTSA planta baja	50.90
				N60W	133.00		52.01
		LZ029701.121	4.9 ^b	N30E	4.42		
				N60W	5.37		
		LZ029701.161	4.9 ^d	N30E	6.83		
				N60W	6.82		
LZ06970111	SICARTSA LÁZARO C. MICH. SEGUNDO N. PISO LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN	LZ069701.111	6.9 ^d	N30E	166.75	Estructura SICARTSA (segundo nivel)	37.84
				N60W	193.57		48.50
		LZ069701.121	4.9 ^b	N30E	9.82		
				N60W	15.36		
		LZ069701.161	4.9 ^d	N30E	13.63		
				N60W	19.64		
LZ07970111	SICARTSA LÁZARO C. MICH. SEGUNDO N. GAB LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN	LZ079701.111	6.9 ^d	N60E	414.32	SICARTSA (segundo nivel) Tab. Min. Derecho)	42.54
				S30W	274.85		31.35
		LZ079701.121	4.9 ^b	N60E	20.61		
				S30W	12.34		
		LZ079701.161	4.9 ^d	N60E	26.67		
				S30W	16.69		
LZ08970111	SICARTSA LÁZARO C. MICH. SEGUNDO N. GAB LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN	LZ089701.111	6.9 ^d	S00E	304.30	SICARTSA (segundo nivel) Tab. Min. Derecho)	44.30
				S90W	233.54		33.19
		LZ089701.121	4.9 ^b	S00E	17.58		
				S90W	17.30		
		LZ089701.161	4.9 ^d	S00E	24.20		
				S90W	23.91		

Secuencia	Nombre de la estación	Clave de Acelerogramas	Magnitud	Componente	Acel. Máx. (cm/s ²)	Tipo de suelo	ta (s)
VILB970111	VILLITA BASE CORTINA PRESA LA VILLITA MICHOACÁN-GUERRERO	VILB9701.111	6.5 ^b	S85W S05E	183.84 132.19	Sobre cuerpo de la cortina (enrocamiento)	27.86 35.77
		VILB9701.121	4.6 ^c	S85W S05E	4.34 4.56		
		VILB9701.122	4.3 ^c	S85W S05E	-5.13 -5.03		
		VILB9701.161	5.1 ^c	S85W S05E	23.97 16.28		
VILC970111	VILLITA CORONA CENTRO PRESA LA VILLITA MICHOACÁN-GUERRERO	VILC9701.111	6.5 ^b	S85W S05E	-169.37 -624.56	Sobre cuerpo de la cortina en el contacto entre el núcleo de arcilla y el enrocamiento	31.11 34.82
		VILC9701.121	4.6 ^c	S85W S05E	-4.01 14.66		
		VILC9701.161	5.1 ^c	S85W S05E	19.15 49.98		
VILD970111	VILLITA MARGEN DERECHA PRESA LA VILLITA MICHOACÁN-GUERRERO	VILD9701.111	6.5 ^c	S85W S05E	172.18 -124.68	Brecha andesítica	22.74 21.84
		VILD9701.112	4.7 ^c	S85W S05E	-6.05 2.62		
		VILD9701.121	4.6 ^c	S85W S05E	-10.97 3.40		
		VILD9701.122	4.3 ^c	S85W S05E	8.36 -5.14		
		VILD9701.161	5.1 ^c	S85W S05E	34.07 -12.04		
VILF970111	VILLITA BASE CAD. 0+355 PRESA LA VILLITA MICHOACÁN-GUERRERO	VILF9701.111	6.5 ^b	S85W S05E	-139.63 144.80	Sobre el cuerpo de la presa (enrocamiento)	28.57 36.09
		VILF9701.121	4.3 ^c	S85W S05E	-3.65 4.36		
		VILF9701.161	5.1 ^c	S85W S05E	20.17 18.21		
VIL970111	VILLITA MARGEN IZQUIERDA PRESA LA VILLITA MICHOACÁN-GUERRERO	VIL9701.111	6.5 ^b	S85W S05E	174.70 -163.63	Brecha andesítica	22.83 22.22
		VIL9701.121	4.3 ^c	S85W S05E	7.71 4.50		
		VIL9701.161	5.1 ^c	S85W S05E	10.60 9.73		
IK18970522	INFIERNILLO CORONA CENTRO PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	IK189705.221	5.9 ^b	N70E N20W	-132.12 283.35	Sobre cuerpo de la cortina en el contacto entre el núcleo de arcilla y el enrocamiento	24.95 22.98
		IK189705.222	4.3 ^c	N70E N20W	-10.85 -6.73		
IND1970522	INFIERNILLO POZO 50 M PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	IND19705.221	5.9 ^b	N70E N20W	-139.35 190.21	Transición entre filtro y enrocamiento compactado	22.94 25.84
		IND19705.222	4.3 ^c	N70E N20W	13.69 12.13		
IND2970522	INFIERNILLO POZO A 25 M PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	IND29705.221	5.9 ^b	N70E N20W	-119.30 -245.96	Transición entre filtro y enrocamiento compactado	24.23 24.90
		IND29705.222	4.3 ^c	N70E N20W	7.47 8.36		
INM1970522	INFIERNILLO MARGEN IZQUIERDA PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	INM19705.221	5.9 ^b	N65E N25W	238.47 -296.68	Brechas y conglomerados	14.40 12.23
		INM19705.222	4.3 ^c	N65E N25W	18.50 -14.73		

Secuencia	Nombre de la estación	Clave de Acelerogramas	Magnitud	Componente	Acel. Máx. (cm/s ²)	Tipo de suelo	ta (s)
INPT970522	INFIERNILLO POTABILIZADORA PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	INPT9705.221	5.9 ^b	N75E	-212.63	Brechas y conglomerados	14.16
				N15W	-221.07		13.33
		INPT9705.222	4.3 ^c	N75E	10.34		
				N15W	-9.61		
IK18990621	INFIERNILLO CORONA CENTRO PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	IK189906.211	6.0 ^b	N20W	-380.67	Sobre cuerpo de la cortina en el contacto entre el núcleo de arcilla y el enrocamiento	23.01
				N70E	-231.23		19.69
		IK189906.212	4.1 ^c	N20W	-7.93		
				N70E	5.63		
IND1990621	INFIERNILLO POZO 50 M PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	IND19906.211	6.0 ^b	N70E	269.40	Transición entre filtro y enrocamiento compactado	20.75
				N20W	-222.88		22.99
		IND19906.212	4.1 ^c	N70E	-7.18		
				N20W	-6.94		
INMI990621	INFIERNILLO MARGEN IZQUIERDA PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	INMI9906.211	6.0 ^b	N65E	438.81	Brechas y conglomerados	16.54
				N25W	521.66		8.75
		INMI9906.212	4.1 ^c	N65E	12.93		
				N25W	-16.67		
INPT990621	INFIERNILLO POTABILIZADORA PRESA EL INFIERNILLO MICHOACÁN-GUERRERO	INPT9906.211	5.8 ^c	N75E	-249.75	Brechas y conglomerados	11.37
				N15W	-195.19		14.30
		INPT9906.212	4.1 ^c	N75E	6.73		
				N15W	4.79		
UNIO990621	LA UNIÓN LA UNIÓN, GUERRERO	UNIO9906.211	5.8 ^d	N90W	101.04	Roca	10.57
				N00W	73.24		13.47
		UNIO9906.212	4.1 ^c	N90W	-2.74		
				N00W	2.71		

La magnitud M^a, M^b, M^c, M^d, y M^e, corresponden respectivamente a Ml, Mb, Mc, Ms, y Mw.

Donde Ml= Magnitud local, Mb= Magnitud de onda de cuerpo, Mc, Ms= Magnitud basada en la velocidad de onda de corte, y Mw= Magnitud de momento.

Demandas de distorsión máxima y residual en S1GD

3.1 Introducción

En este capítulo se ilustra el comportamiento de sistemas de un grado de libertad expuestos a eventos sísmicas (i.e., secuencias sísmicas), las cuales han sido seleccionadas del catálogo integrado en el Capítulo 2.

La manera más sencilla de entender el comportamiento de las estructuras son los sistemas de un grado de libertad, ya que resulta obvio que al tener variables, se logra una interpretación sencilla.

En una primera parte, se muestra una breve revisión de estudios previos, los cuales fueron elaborados por Amadio et al. 2003, Amadio et al. 2004 y Luco et al. 2004, los cuales tratan de demostrar la influencia de las secuencias sísmicas (i.e., replicas) en las edificaciones.

Posteriormente se presentan los sistemas considerados, de los cuales se describe sus características, análisis y comportamiento histerético.

Como una herramienta de ayuda se recurrió al programa RESIN v. 3.1 (Ruiz-Miranda 2005), con el cual se obtuvo los resultados de los diferentes sistemas considerados.

Finalmente se hizo una revisión de resultados, donde se explica el efecto del periodo (T), del nivel de resistencia lateral (C_y), y una breve comparación entre las secuencias utilizadas.

3.2 Revisión de estudios previos

Existen muy pocas investigaciones analíticas encaminados a estudiar el efecto de las secuencias sísmicas en la respuesta estructural (Amadio et al., 2003; Amadio et al., 2004; Luco et al., 2004). La mayor parte de las observaciones previas sobre el efecto de las secuencias sísmicas proviene de la respuesta de sistemas de un grado de libertad (S1GL) y, en menor medida, del análisis de sistemas de múltiples grados de libertad (SMGL). A continuación se describen brevemente los escasos estudios previos publicados en la literatura.

Amadio et al. (2003) estudio la respuesta inelástica de S1GL con tres niveles de ductilidad de desplazamiento (i.e., máximo desplazamiento inelástico normalizado con respecto al desplazamiento de fluencia del sistema), μ , prefijados al ser sometidos a dos

tipos de secuencias sísmicas. Para definir sus secuencias sísmicas, los autores consideraron un acelerograma real (registrado en El Centro, California, durante el terremoto de 1940) y dos acelerogramas sintéticos (compatibles con el espectro de diseño del Eurocódigo 8 para sitios de terreno firme y blando) como eventos principales. Posteriormente, ensamblaron cada secuencia sísmica al repetir una o dos veces la historia de aceleración del terreno, con un umbral de 40 seg. entre cada evento. Es decir, las replicas tenían exactamente las mismas características del evento principal, En la Figura 1.6 se ilustra una secuencia sísmica empleada por Amadio et al. (2003). Asimismo, en este estudio también se considero el efecto de cuatro tipos de comportamiento histeretico: 1) Elastoplastico, 2) Bilineal (con y sin degradación de rigidez, y 3) Con degradación de rigidez y resistencia.

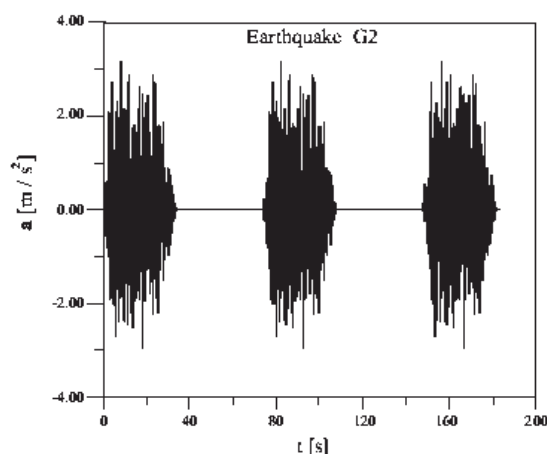


Figura 3.1 Secuencia sísmica empleada por Amadio et al. (2003)

Para evaluar el efecto de las secuencias sísmicas en la respuesta inelástica de S1GL, los autores evaluaron cinco demandas sísmicas (aceleración y desplazamiento espectral, máxima energía plástica y viscosa, así como la energía de entrada). Así, sus resultados se expresaron en términos del factor de comportamiento q , que representa el cociente de la máxima demanda de resistencia lateral requerida para alcanzar un valor prefijado de μ y la demanda mínima de resistencia lateral requerida para mantener al sistema elástico (i.e.,

asociada a la fluencia del sistema). Cabe aclarar que el factor q empleado por los autores es conceptualmente similar al factor de comportamiento sísmico Q incluido en la normatividad mexicana (CFE, 1993). Adicionalmente, ellos emplearon dos índices de daño propuestos en la literatura para evaluar el daño acumulado ocasionado por las secuencias sísmicas.

A partir de su estudio, los autores concluyen que la consideración de secuencias sísmicas en la respuesta inelástica de S1GL da lugar a un incremento en el daño acumulado del sistema y, en consecuencia, a una disminución del factor q . Lo anterior implica que en estructuras sometidas a secuencias sísmicas, su resistencia lateral disminuye después del evento principal, deteriorándose aun mas al ser excitadas por la replica debido a la acumulación de daño. Ellos reconocen que la respuesta no-lineal de S1GL ante secuencias sísmicas depende del periodo de vibración del sistema, de las características de la secuencia sísmica, así como de la ductilidad de desplazamiento disponible.

Respecto a los análisis numéricos que consideran los sistemas de un grado de libertad, los sistemas son característicos de tener diferentes clases de ductilidad y manejar varios grados de libertad. Destacando ambos tipos de sistemas ya sean de uno o varios grados de libertad pueden sufrir un alto daño con las repeticiones sísmicas. De esta manera estos efectos deberían ser tomados adecuadamente dentro del diseño sísmico.

Luco (et. al., 2004), en su trabajo titulado *Analisis estatico vs. Analisis dinámico de la capacidad residual, de una edificación que sufrió daño en un evento principal, para resistir una replica*. En el cual hace utilización de sistemas de un grado de libertad para comparar la capacidad residual contra sistemas de múltiples grados de libertad. Para los cuales se analizo un marco de tres niveles. En este trabajo, se hace la suposición de que el sistema de múltiples grados de libertad, se comporte como un sistema de un grado de libertad, utilizando el periodo fundamental del SMGL. Para lo cual se recurrió a tres diferentes modelaciones histereticas, mostradas en la Figura 3.2.

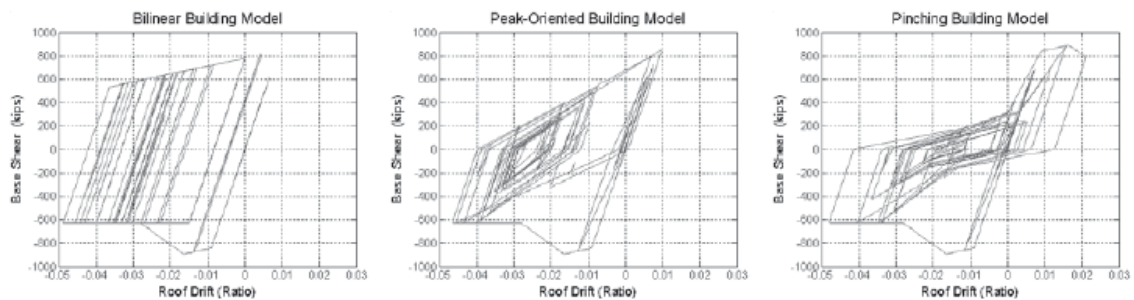


Figura 3.2 Modelos hystereticos empleados por Luco et al. (2004)

Luco et. al 2004, coinciden con opinión de Amadio et. al., La cual plantea la importancia de tomar en cuenta los efectos sísmicos no como eventos aislados, si no como un grupo (i.e., secuencias sísmicas) y el de general mas estudios en esta área, ya que esto puede tener un gran impacto económico y social, el cual nos ayude a tomar decisiones, tanto de diseño como de reparación de estructuras.

3.3 Sistemas considerados en este estudio

3.3.1 Características

Los sistemas de un grado de libertad considerados en estudio, se integraron de la siguiente forma, se tomaron valores del periodo (T) 2.0, 1.0, 0.5 y 0.2 seg., además se considero un amortiguamiento del 5 % y se vario su resistencia lateral (C_y) con valores de 0.01, 0.02, 0.05 y 0.1. Se tomo todas combinaciones posibles, tomando en cuenta que algunos de los sistemas que se comportaban elásticamente se eliminaron.

3.3.1 Análisis no lineal

Existe dos tipos de comportamiento inelástico de los edificios: no linealidad geométrica y del material. Ambos se reflejan en cambios en las relaciones cargas-deformación de los elementos que conforman la estructura y, por tanto, se modifican las ecuaciones de equilibrio dinámico.

Cuando se consideran efectos no lineales las ecuaciones de equilibrio dinámico adoptan la siguiente forma:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + [\mathbf{F}(\mathbf{u}) - \mathbf{K}_g \mathbf{u}] = -\mathbf{M} \mathbf{R} \ddot{s}(t) \quad 3.1$$

Donde $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ y $\mathbf{K}$ son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, y el termino que toma en cuenta las fuerzas restitutivas, $\mathbf{K}\mathbf{u}$ se ha remplazado por $[\mathbf{F}(\mathbf{u}) - \mathbf{K}_g \mathbf{u}]$, donde $\mathbf{K}_g$ es la matriz de rigideces geométrica que toma en cuenta los efectos de esbeltez, y $\mathbf{F}(\mathbf{u})$ es un vector de fuerzas que es función no lineal del vector de los desplazamientos $\mathbf{u}$. El efecto inmediato de no linealidad impide resolver el sistema por medio del análisis modal.

3.3.2 Modelos histereticos considerados en este estudio

Estudios previos que han investigado la respuesta inelástica de estructuras cuando son sometidas a grandes sismos, comúnmente se ha empleado los modelos elastoplastico perfecto. Este estudio principalmente se basa en este comportamiento bilineal y este tipo de modelación nos muestra una idea clara de cómo se comporta el sistema, por lo cual se seleccionaron seis secuencias sísmicas, esto a fin de investigar el comportamiento ante secuencias de diferentes características. En la Figura 3.3 se muestra el modelo elastoplastico perfecto.

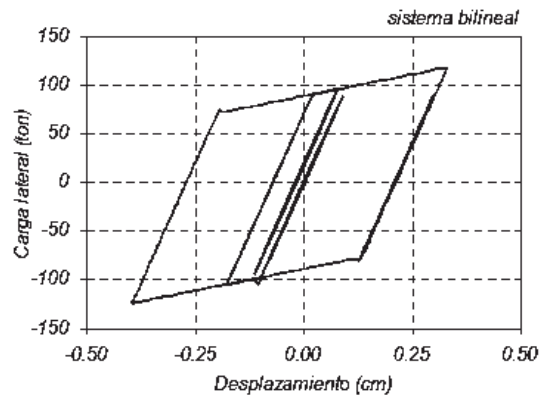


Figura 3.3 Sistema Bilineal Ruiz et al. (2003)

El modelo bilineal tiene una desventaja ya que no toma en cuenta las degradaciones de rigidez y de resistencia del sistema. Por lo cual una de las secuencias utilizada para obtener la respuesta bilineal, se utilizara para obtener un sistema Clough Modificado (MC), uno con degradación de rigidez (SD), otro con degradación de rigidez y resistencia moderada y finalmente uno con severa degradación de rigidez. En la Figura 3.4 se muestra los sistemas que consideran degradación de la rigidez y resistencia utilizados en este estudio.

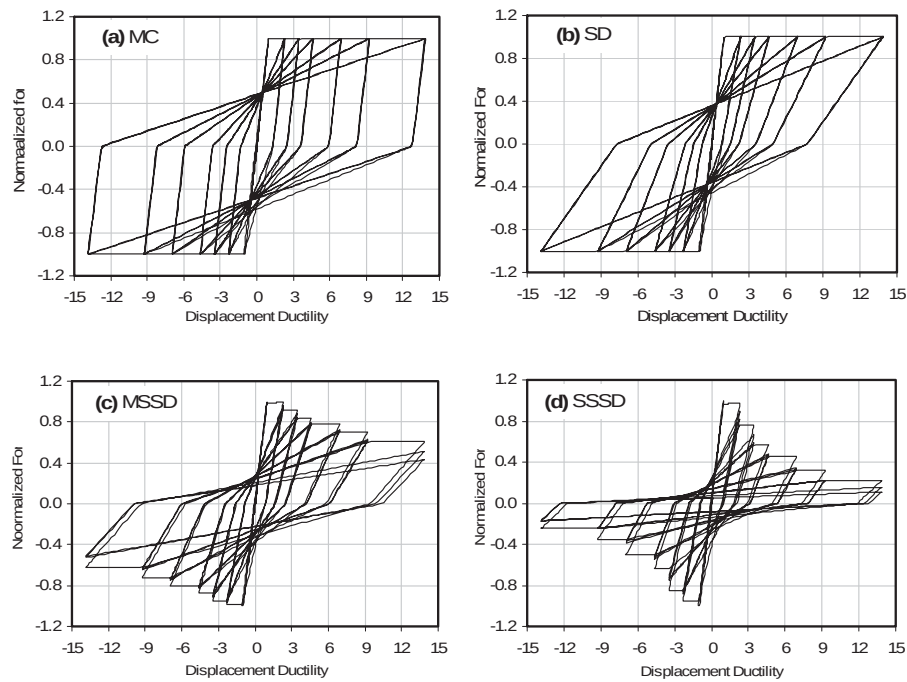


Figura 3.4. Modelos histereticos empleados en este estudio: (a) Clough Modificado (MC); (b) degradación de rigidez(SD); (c) moderada degradación de rigidez y resistencia (MSSD); y (d) severa degradación de rigidez y de resistencia (SSSD).

3.4 Secuencias sísmicas consideradas en este estudio

Del catalogo elaborado en el Capitulo 2 de este trabajo, se seleccionaron seis secuencias sísmicas, las cuales se enumeran orden cronologico se describe a continuación:

Como primer secuencias tenemos la de RIIS761207, esta secuencia se puede observar que la replica muestra una gran similitud tanto en frecuencia como en historia de aceleraciones al evento principal. Por tal razón se decidió llevar al estudio bilineal esta secuencia. Figura 3.5.

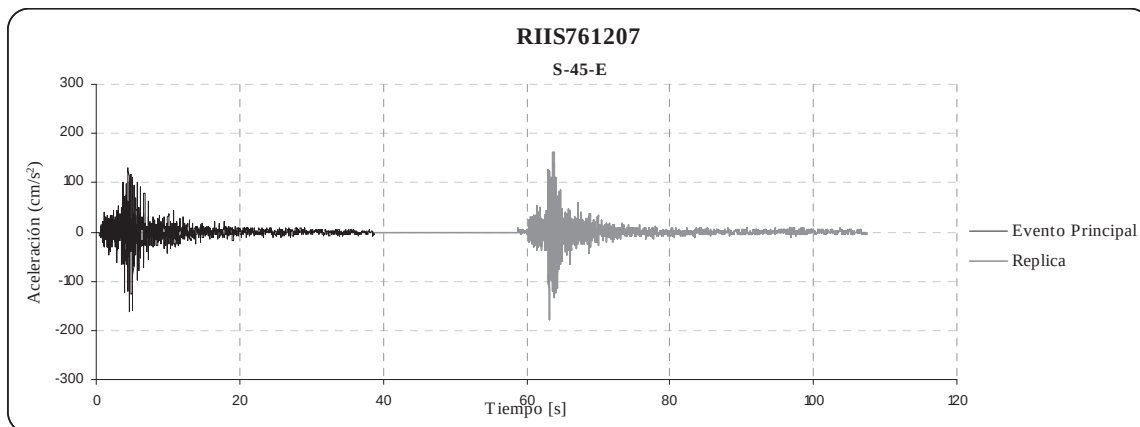


Figura 3.5 Secuencia RIIS761207.

Seguidamente se selecciono la secuencia OAXM781129, resulta interesante observar esta secuencia ya que esta muestra un comportamiento que se esperaría comúnmente, al presentar replicas con menos aceleraciones al evento principal. Como se puede observar en la Figura 3.6 esta secuencia cuenta con dos replicas las cuales tienen aceleraciones no despreciables.

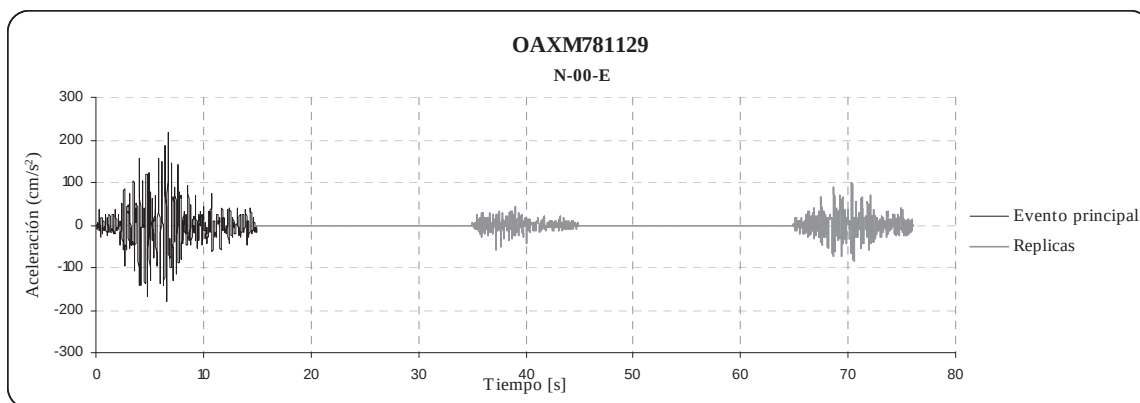


Figura 3.6 Secuencia OAXM781129.

La siguiente secuencia en estudio fue la VCPS800609, la cual contiene dos replicas y además la aceleración máxima del evento principal es grande. Figura 3.7.

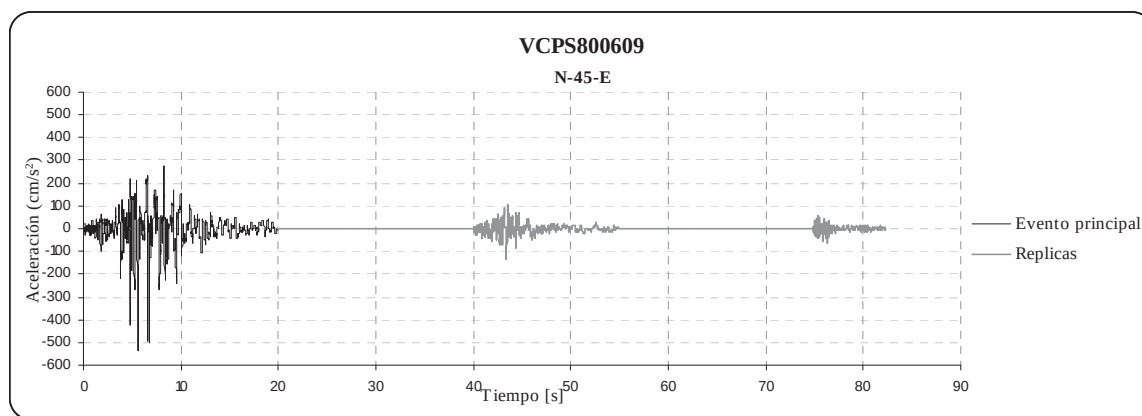
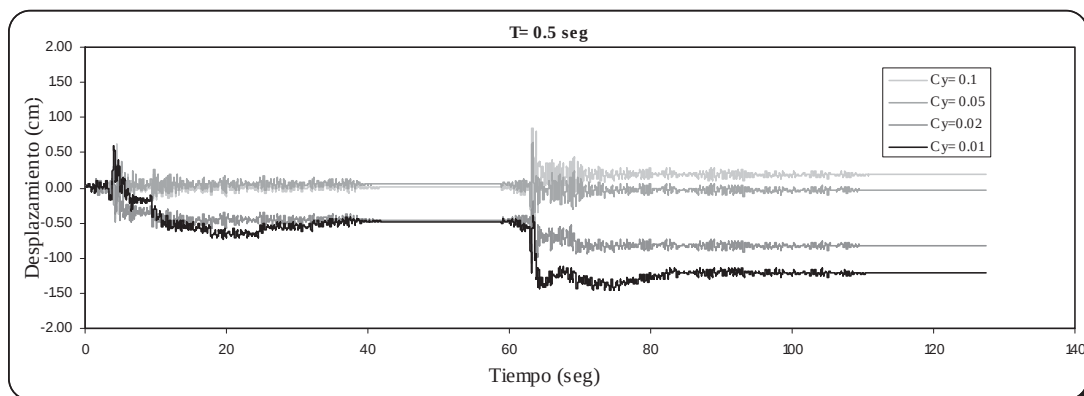
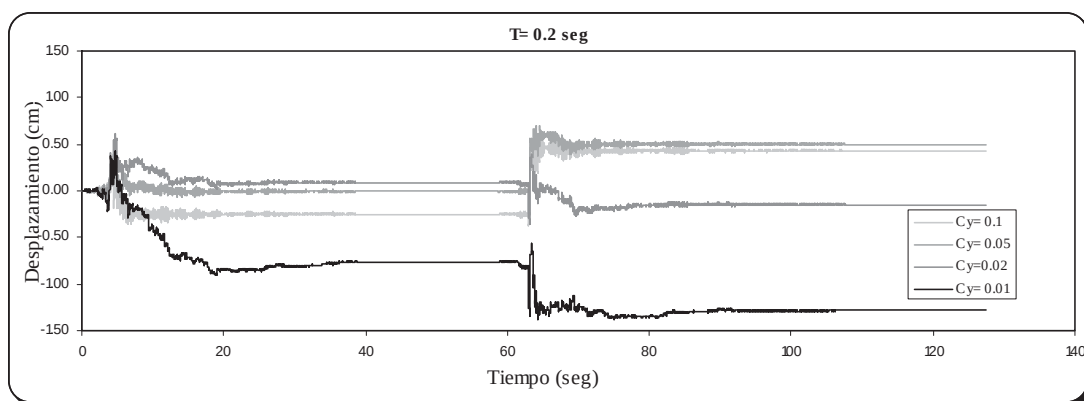


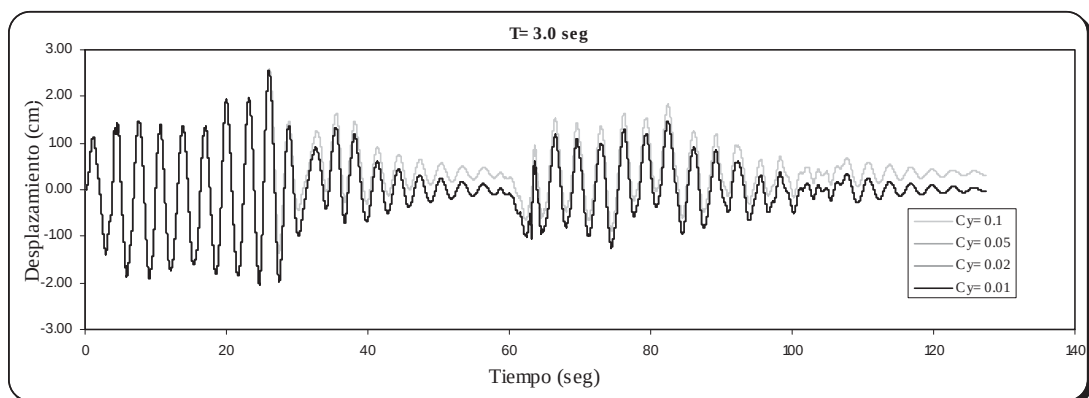
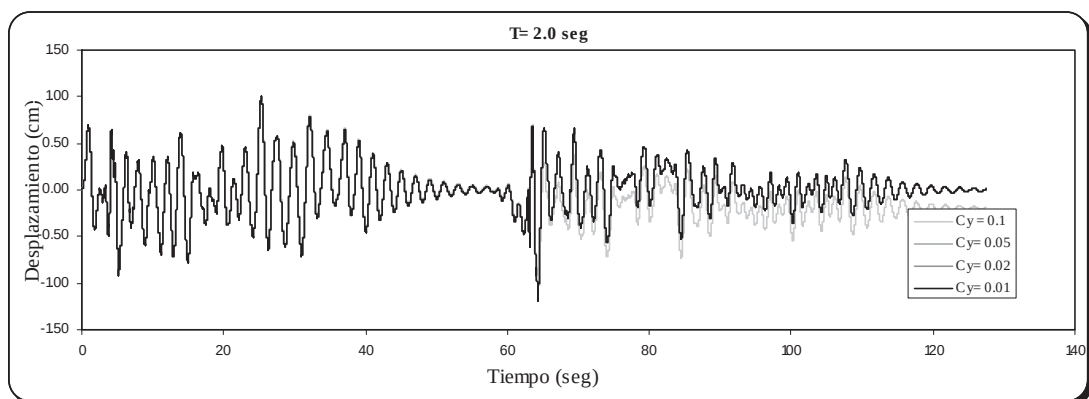
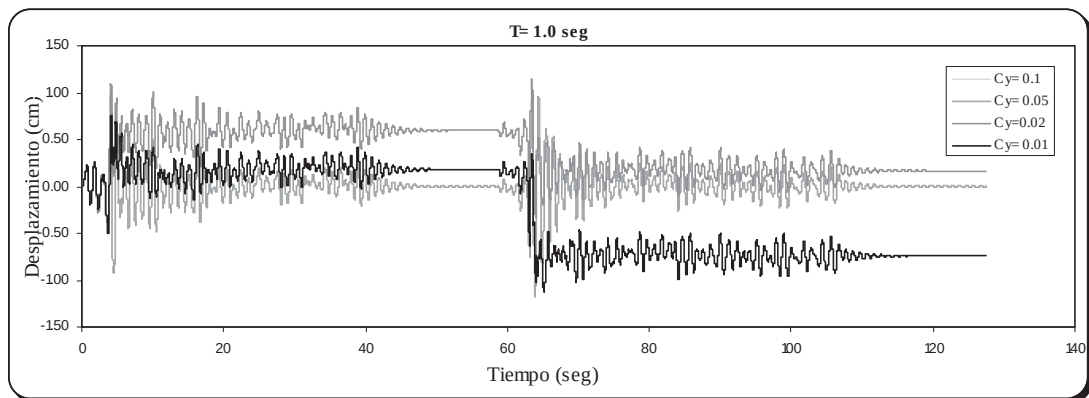
Figura 3.7 Secuencia VCPS800609.

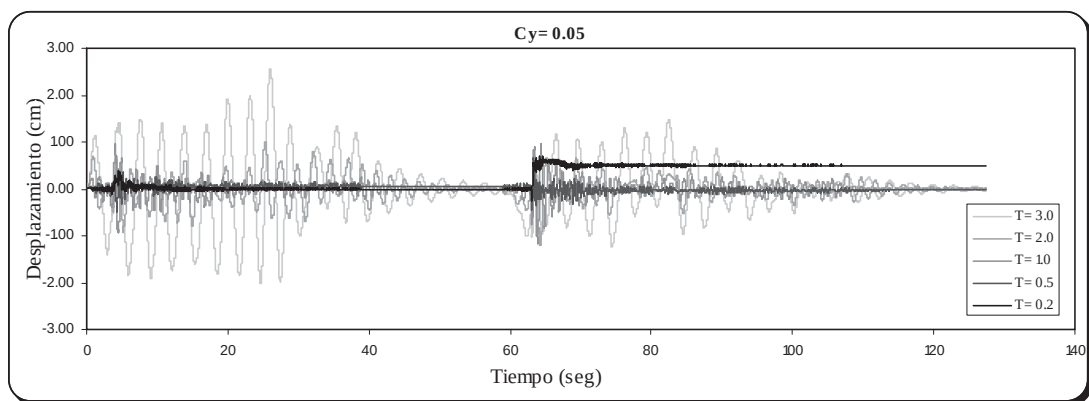
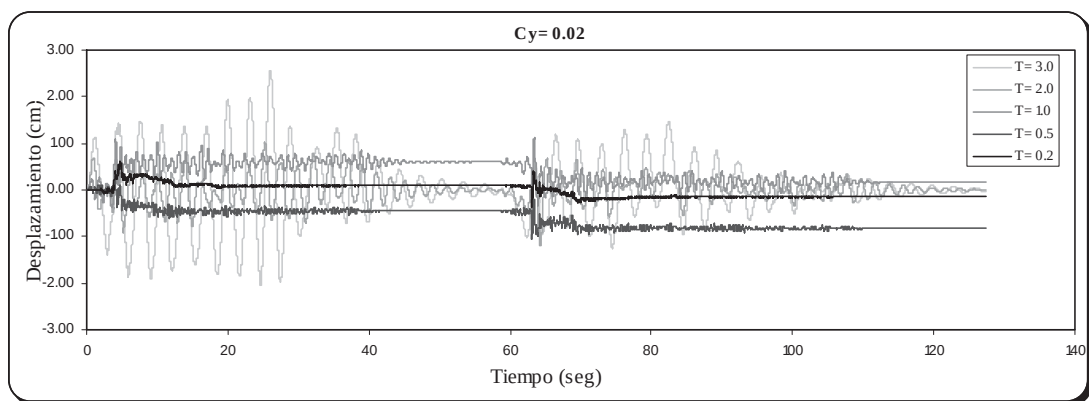
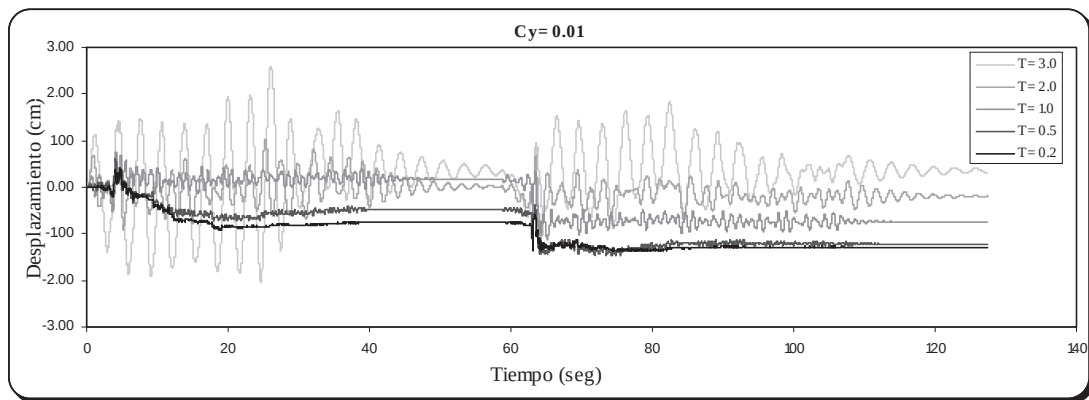
Además se decidió estudiar las secuencias CDAF850919, PAPN850919 en sus dos componentes.

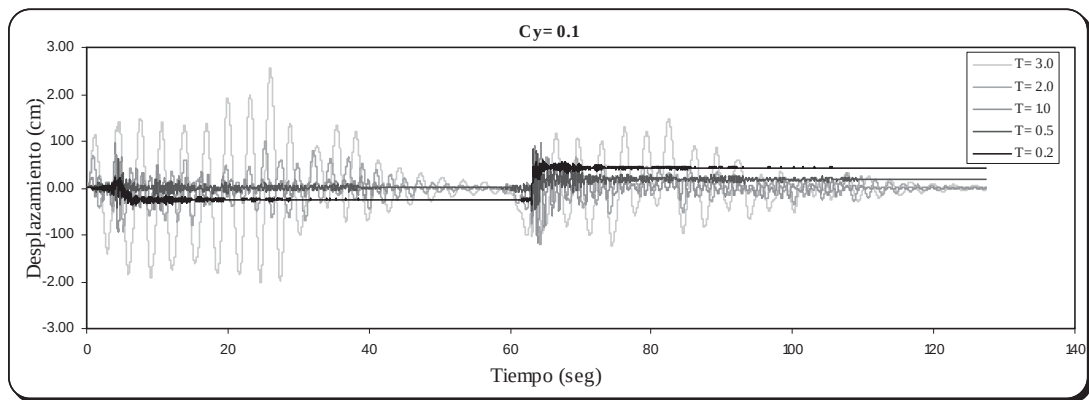
3.5 Resultados

Comportamiento Bilineal para la secuencia RIIS761207

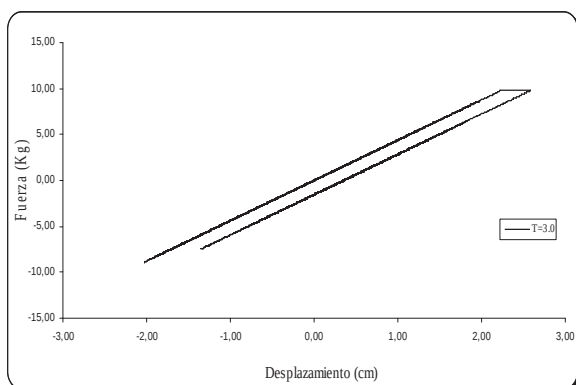
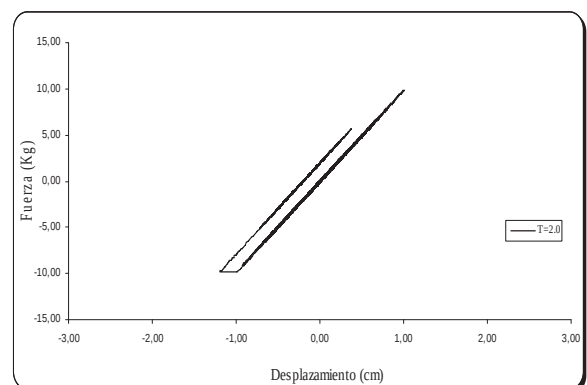
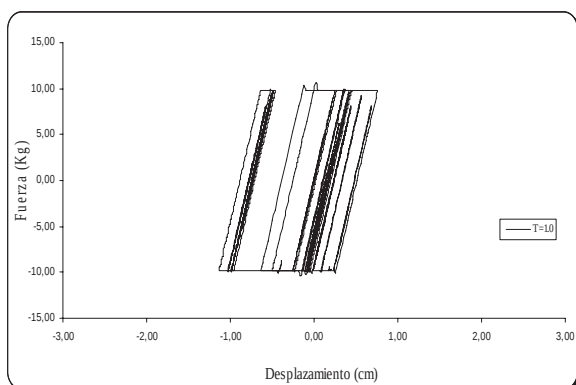
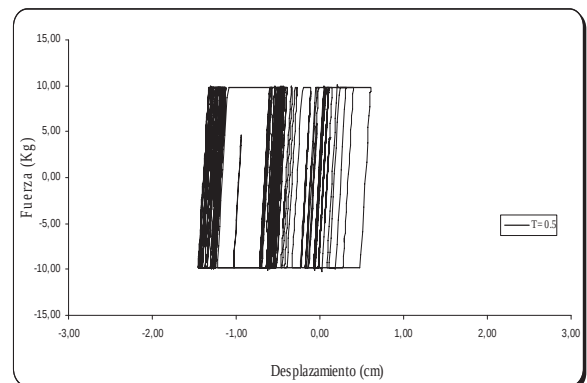
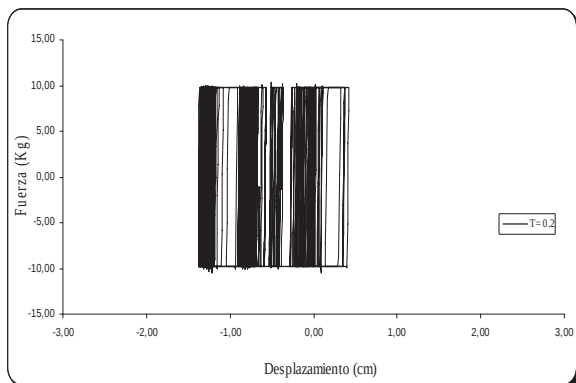




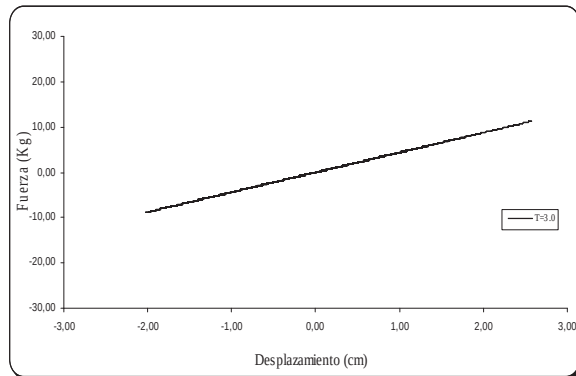
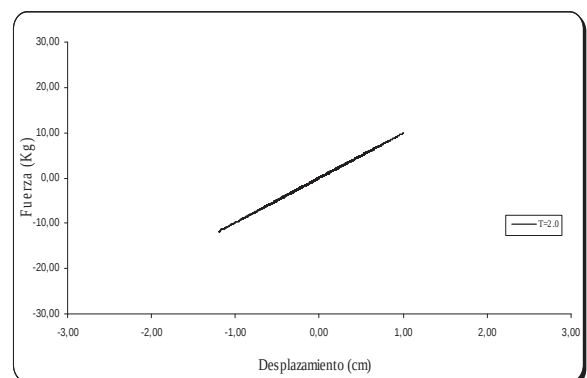
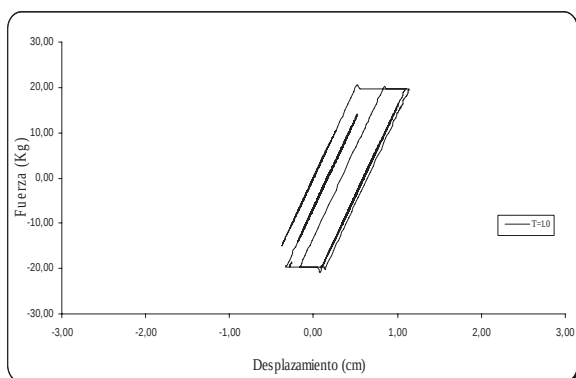
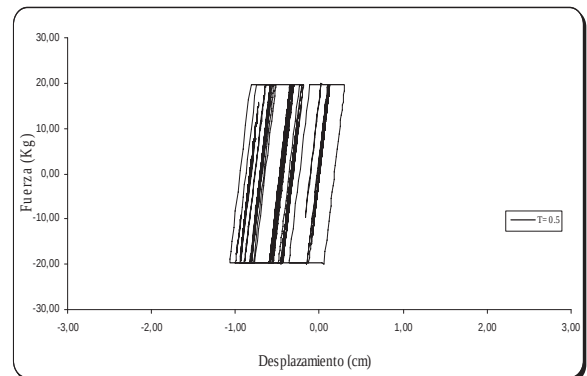
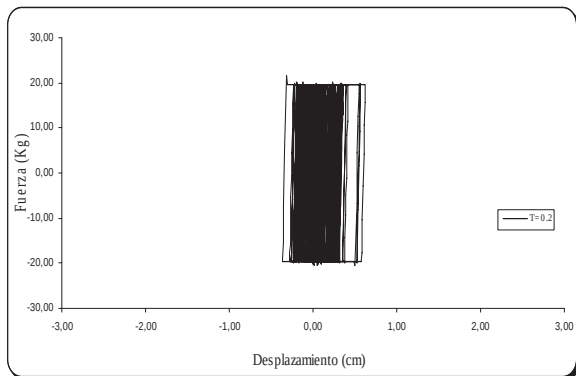




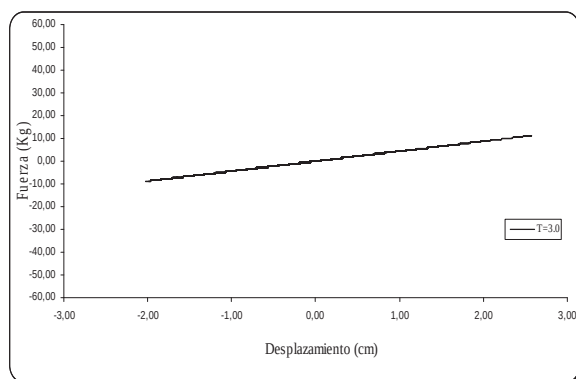
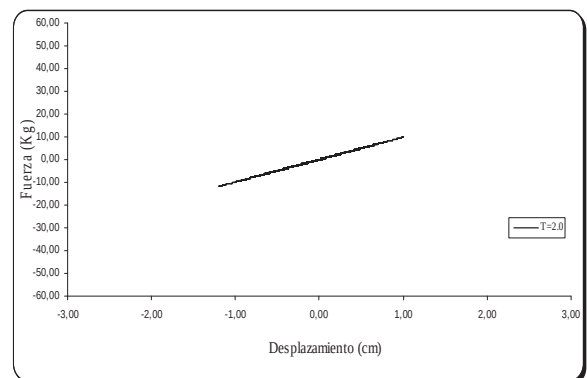
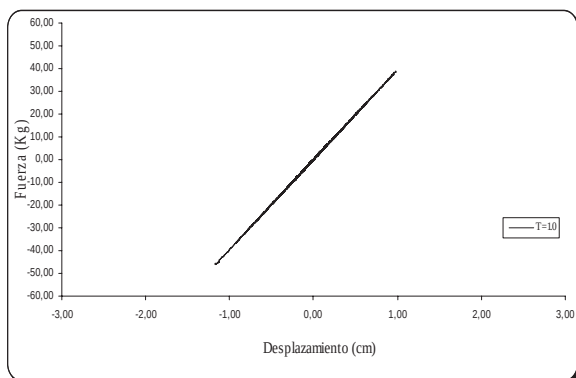
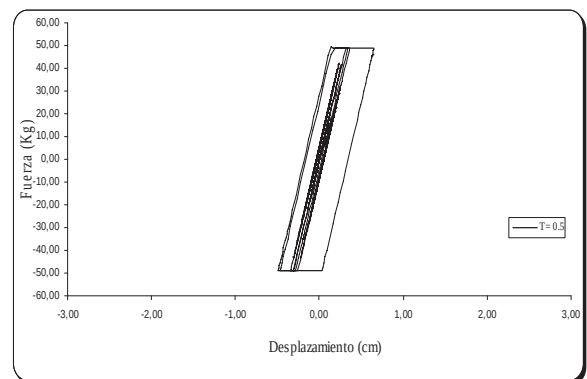
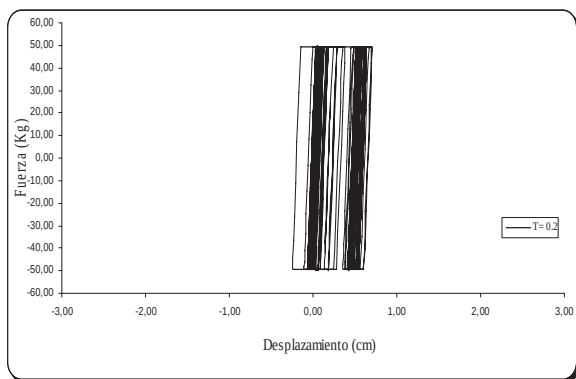
Comportamiento Bilineal para la secuencia RIIS761207 $C_y = 0.01$



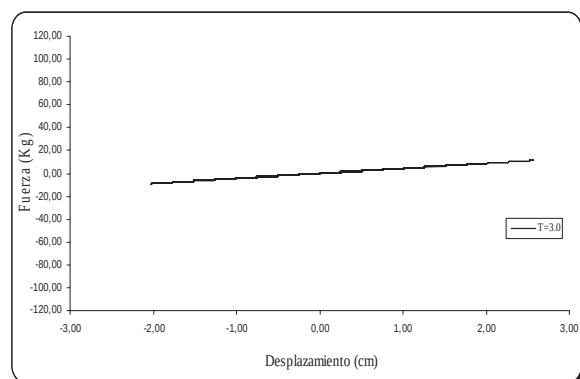
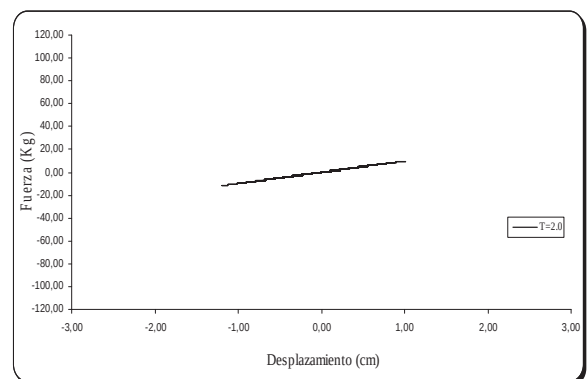
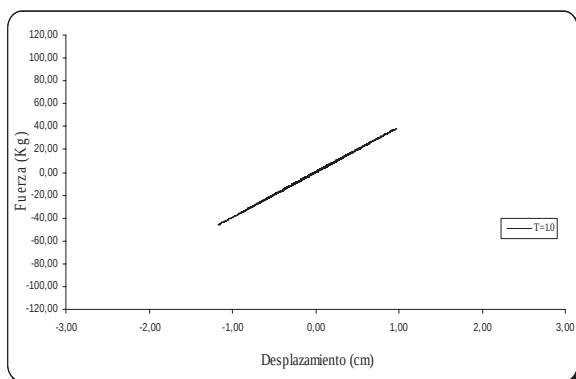
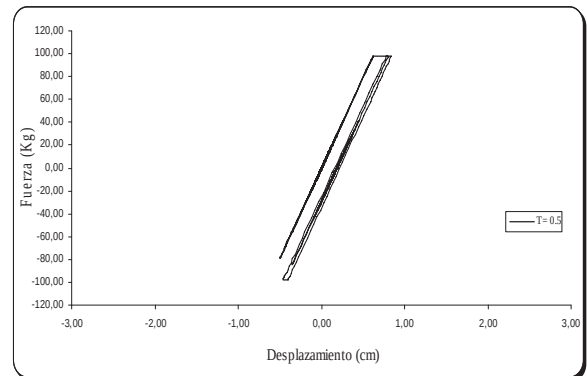
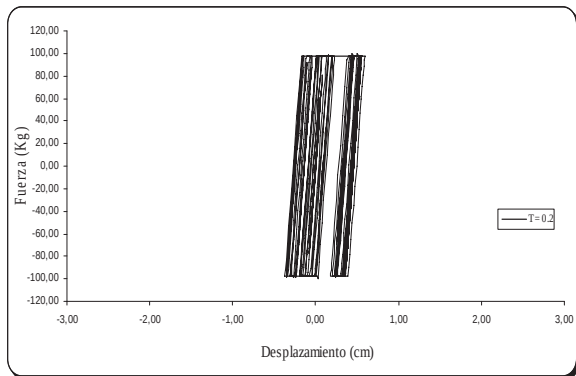
Comportamiento Bilineal para la secuencia RIIS761207 $C_y = 0.02$



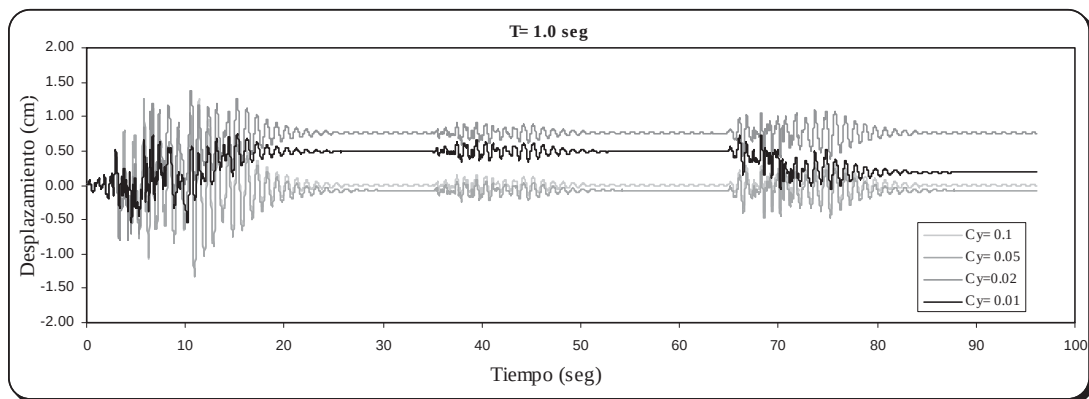
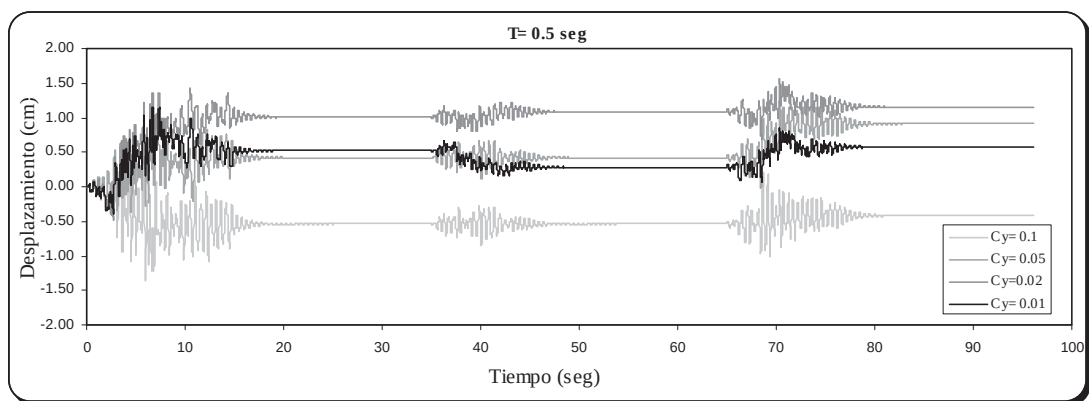
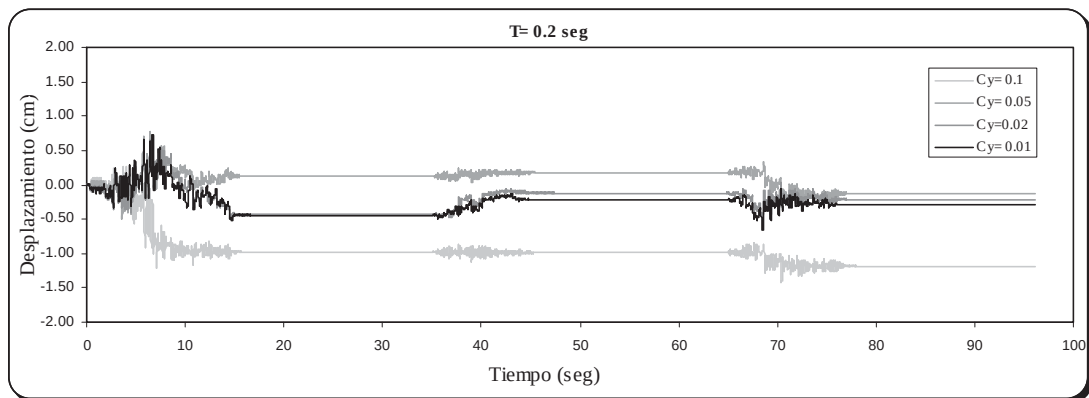
Comportamiento Bilineal para la secuencia RIIS761207 $C_y = 0.05$

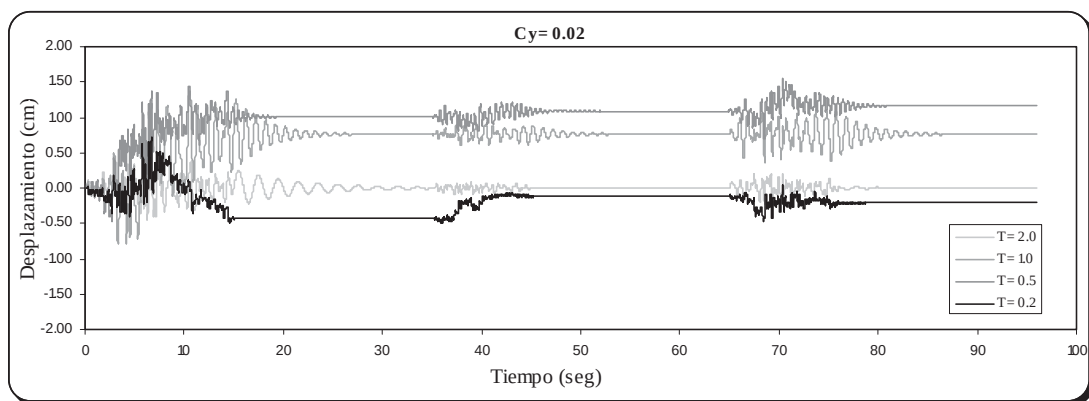
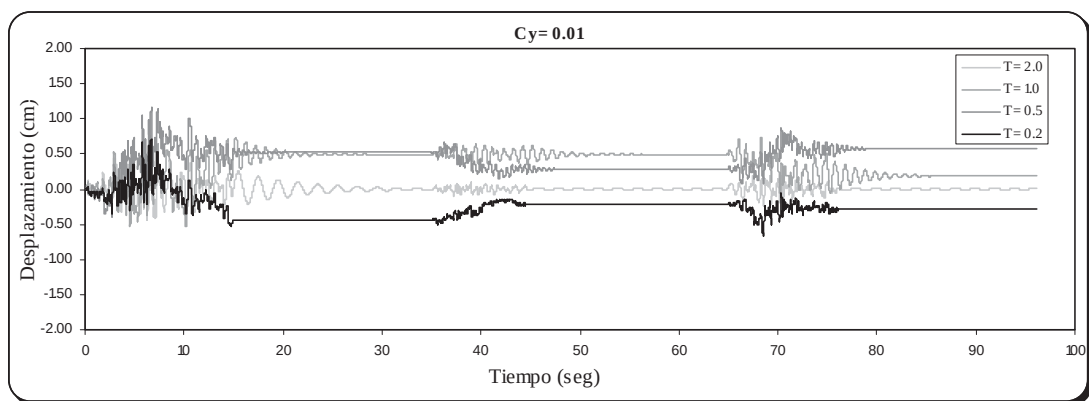
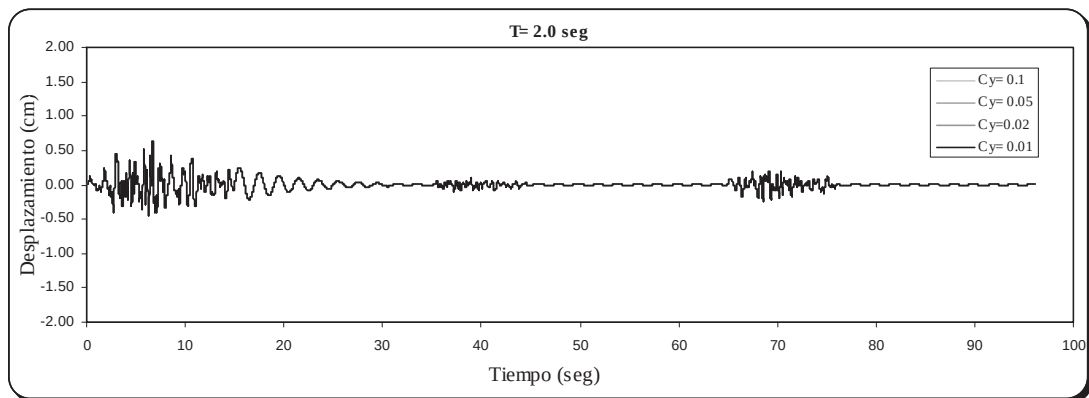


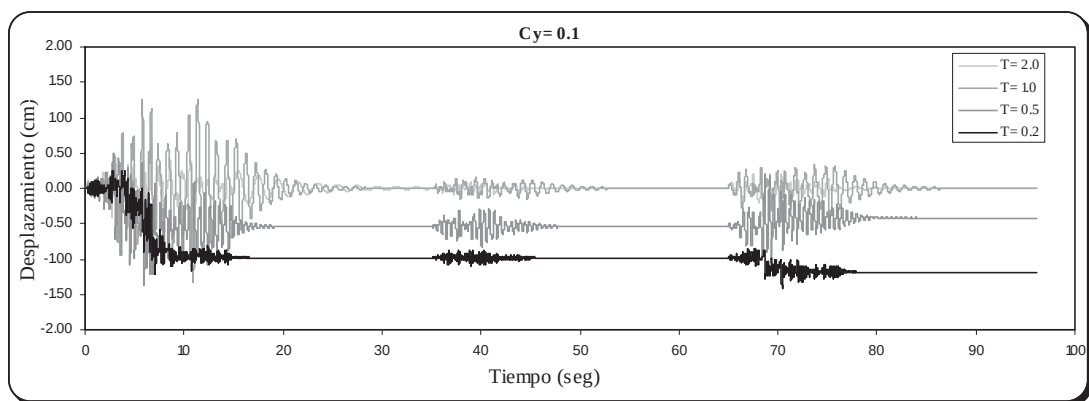
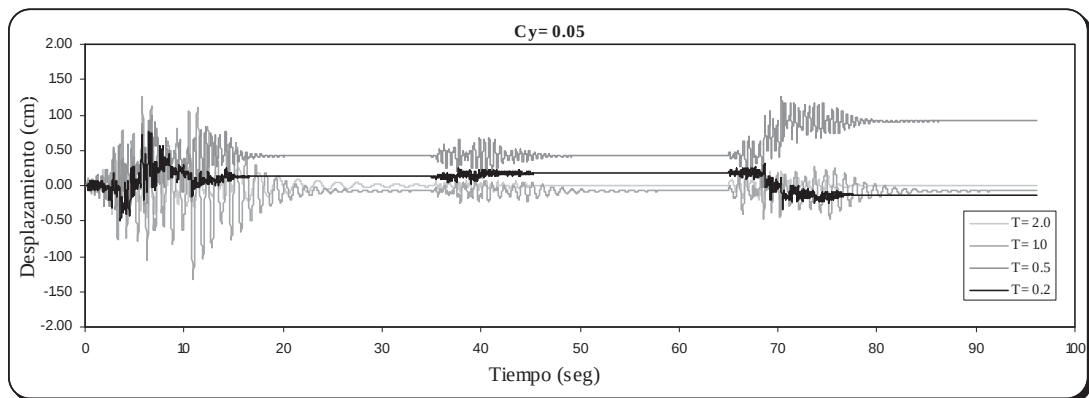
Comportamiento Bilineal para la secuencia RIIS761207 $C_y = 0.1$



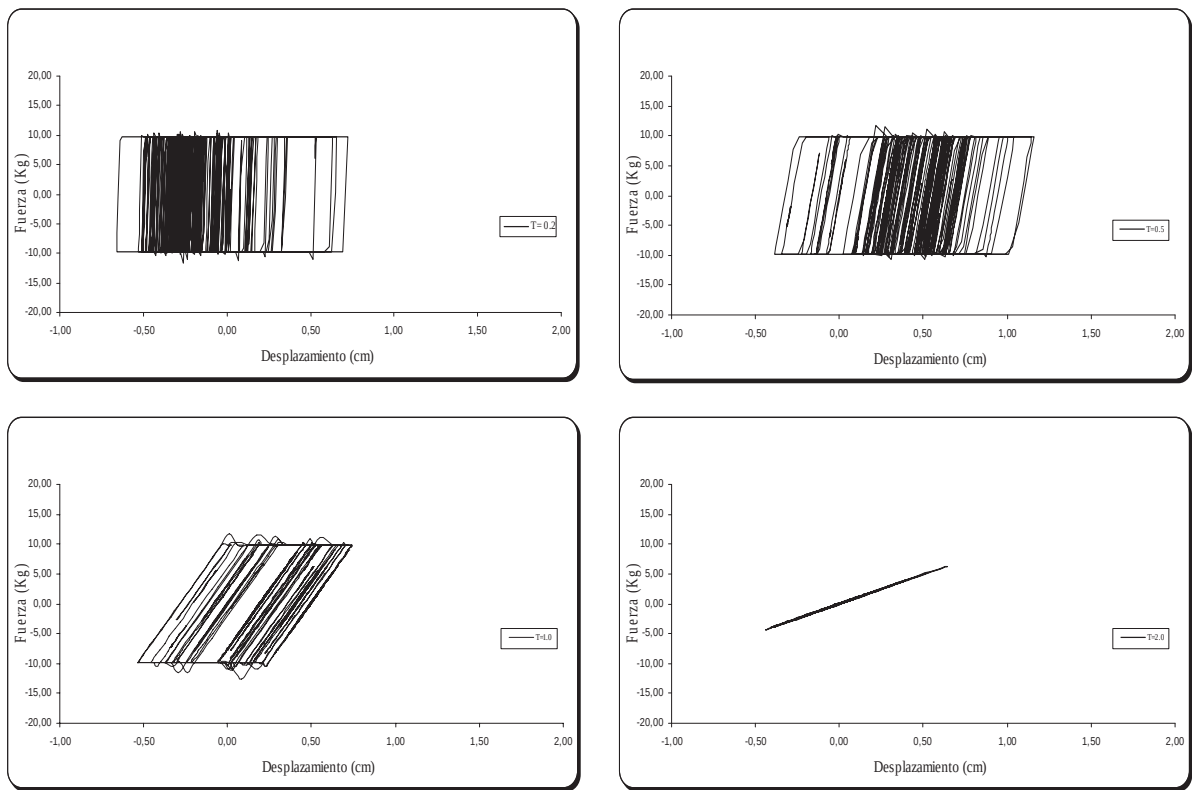
Comportamiento Bilineal para la secuencia OAXM781129



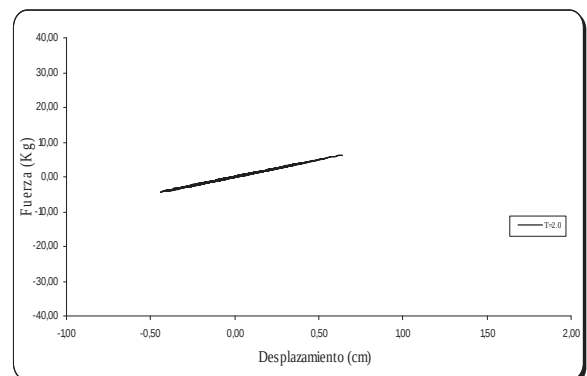
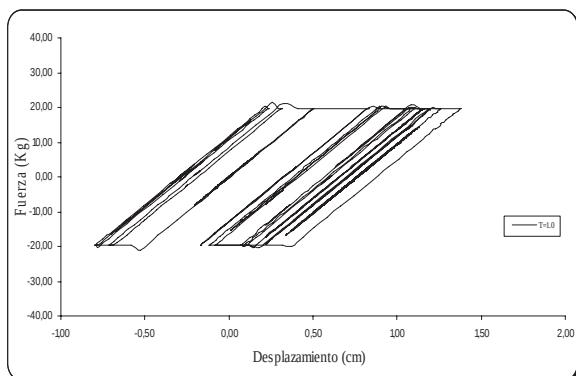
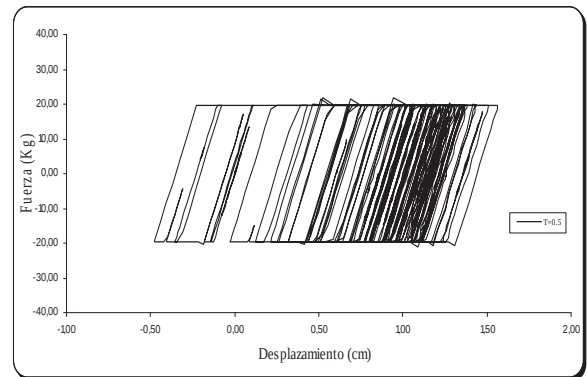
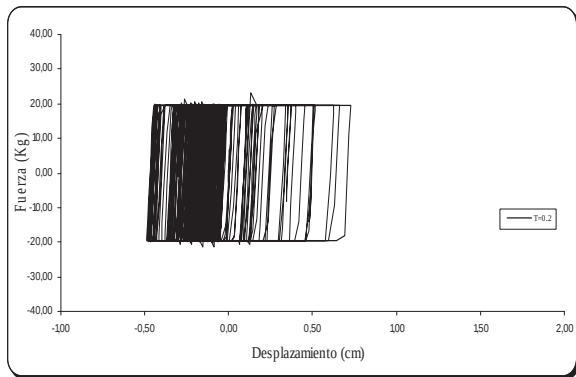




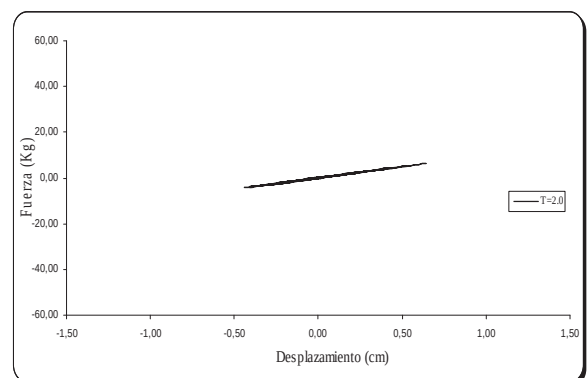
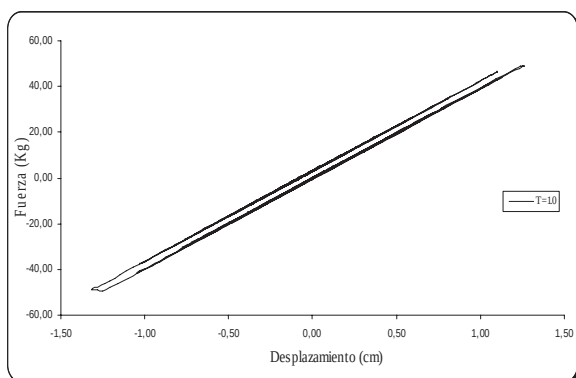
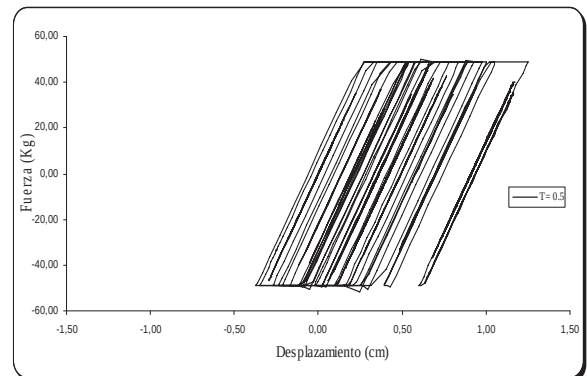
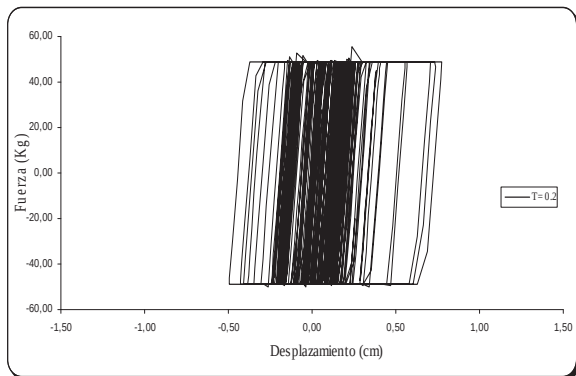
Comportamiento Bilineal para la secuencia OAXM781129 $C_y = 0.01$



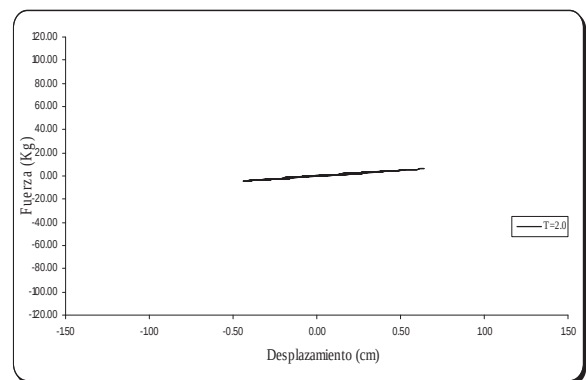
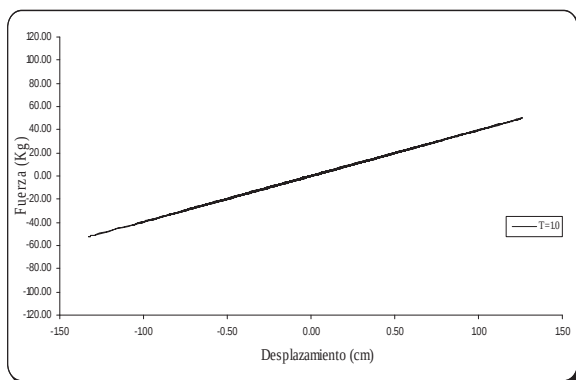
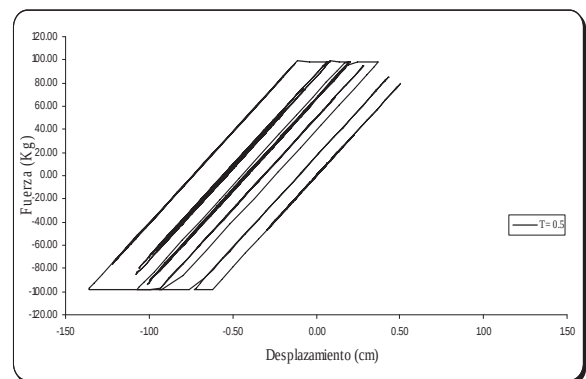
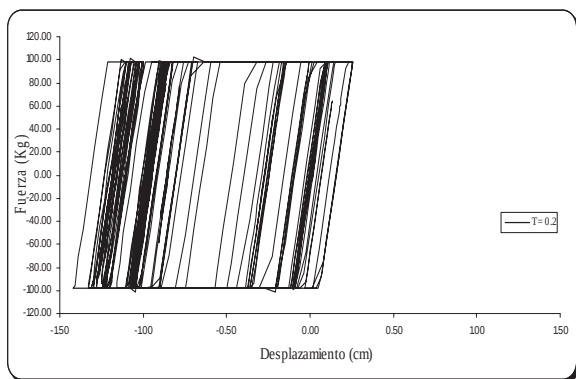
Comportamiento Bilineal para la secuencia OAXM781129 $C_y = 0.02$



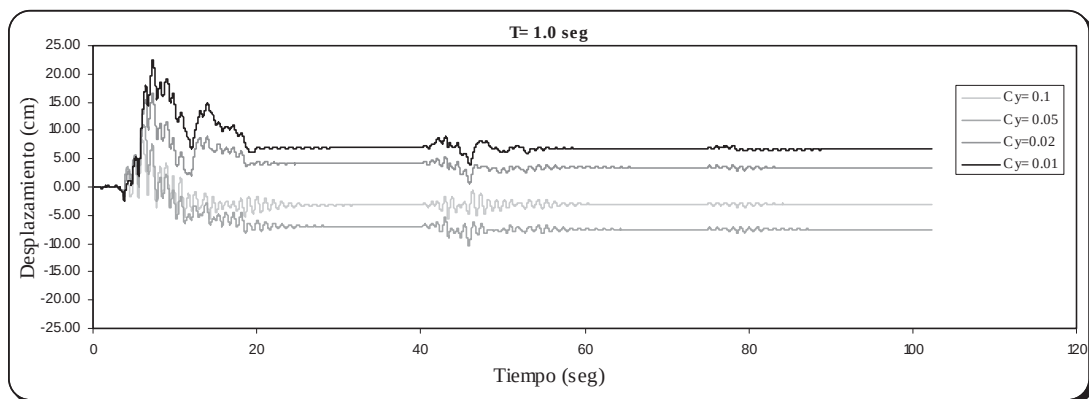
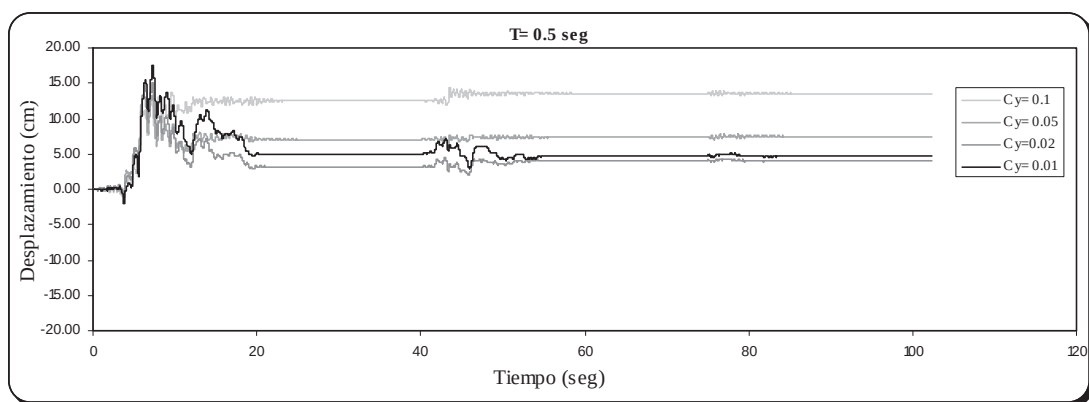
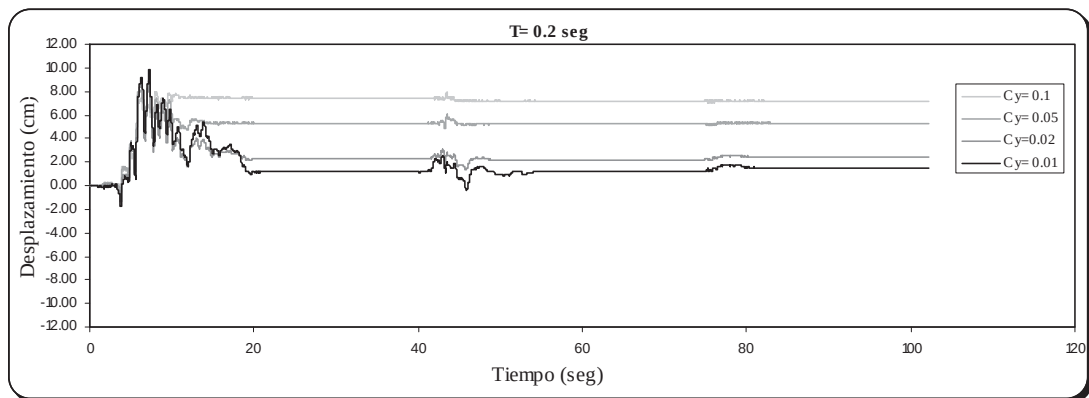
Comportamiento Bilineal para la secuencia OAXM781129 $C_y = 0.05$

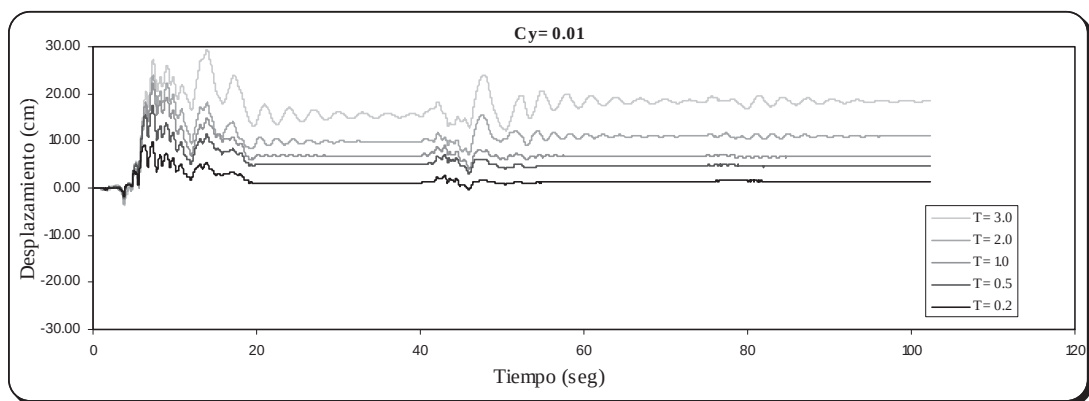
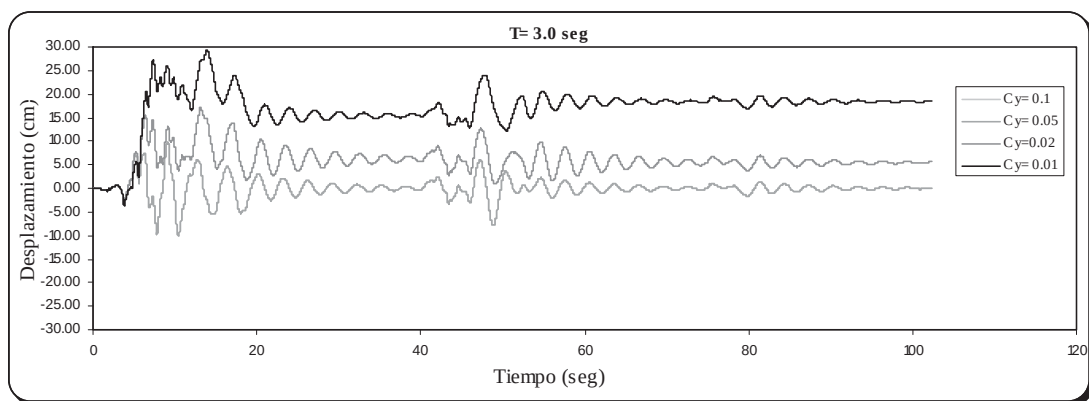
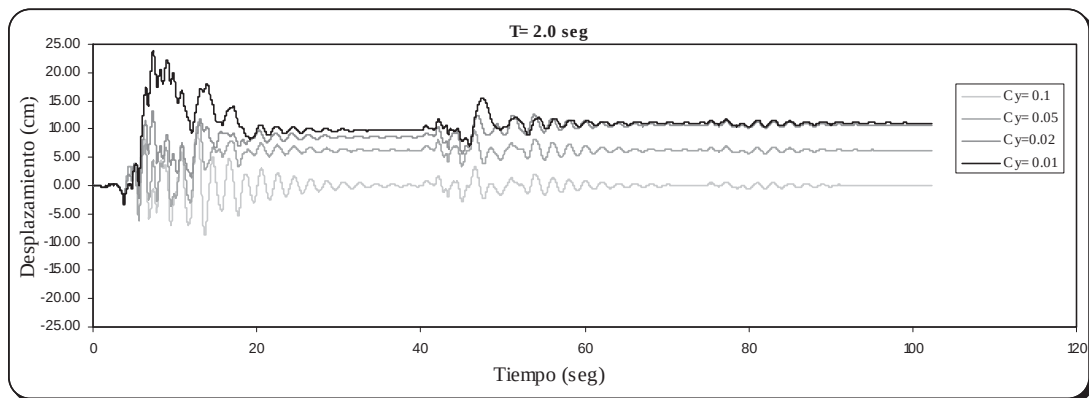


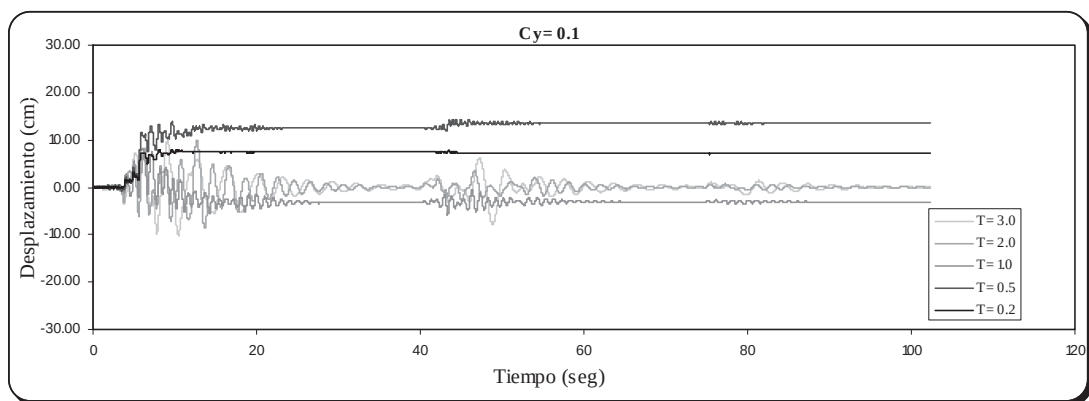
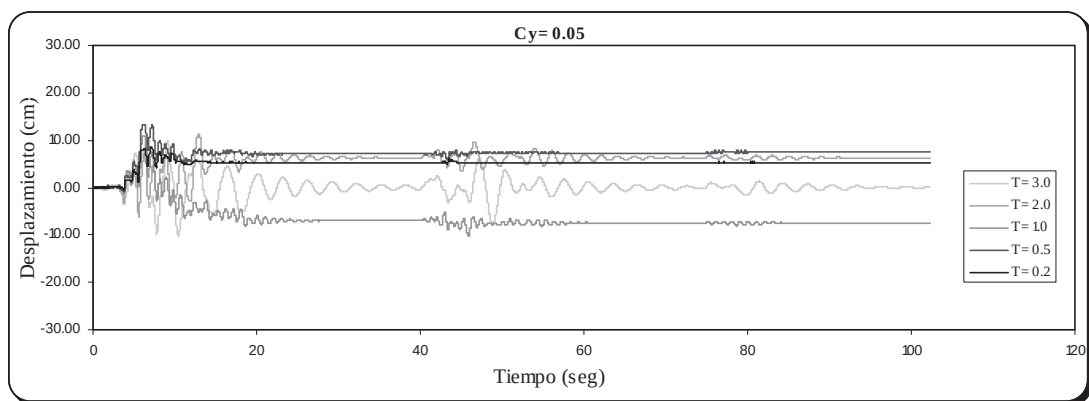
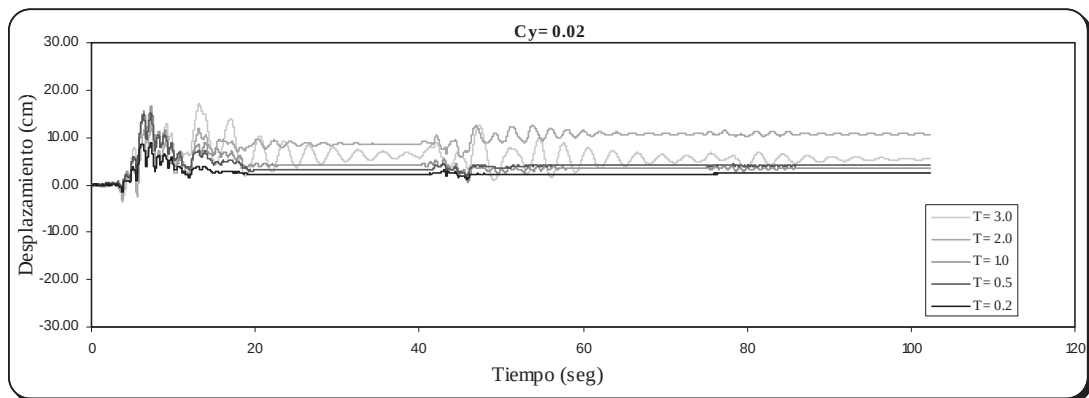
Comportamiento Bilineal para la secuencia OAXM781129 $C_y = 0.1$



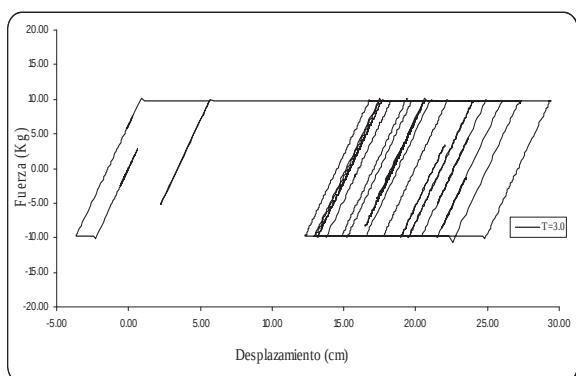
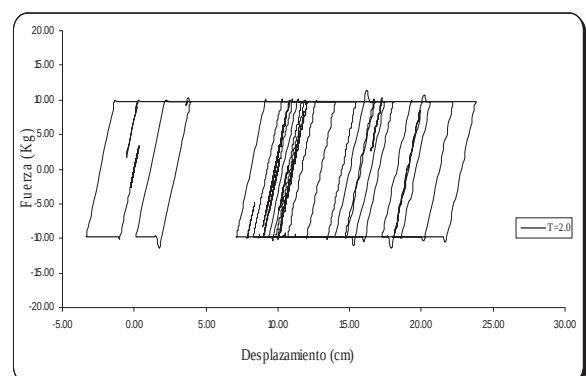
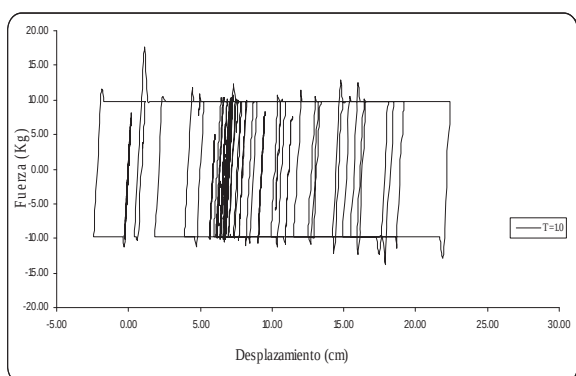
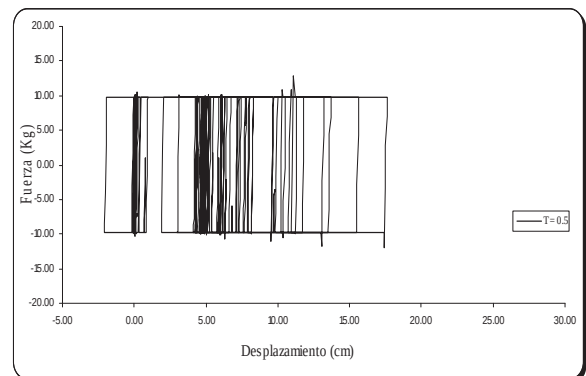
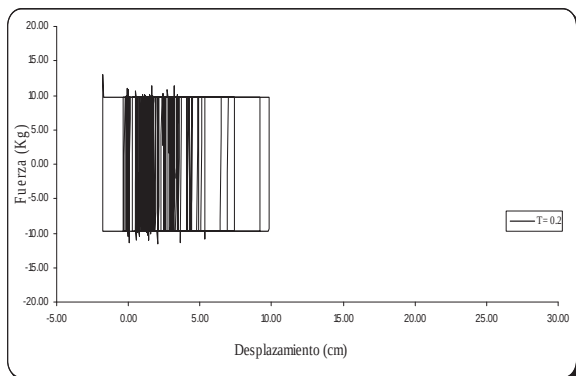
Comportamiento Bilineal para la secuencia VCPS800609



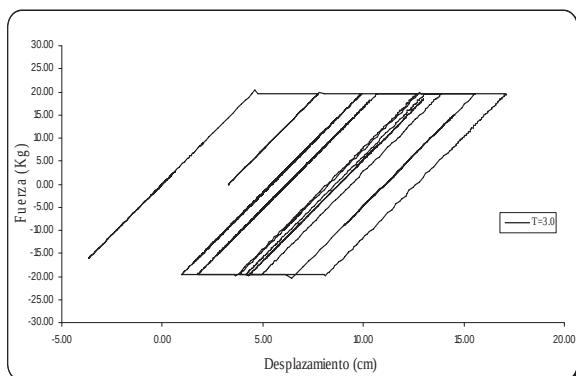
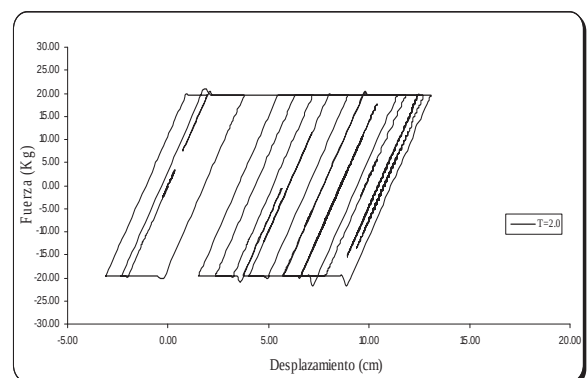
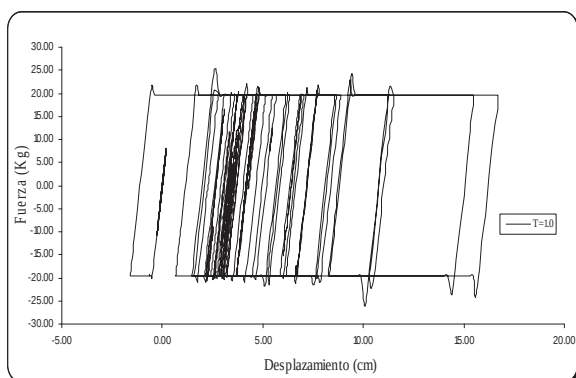
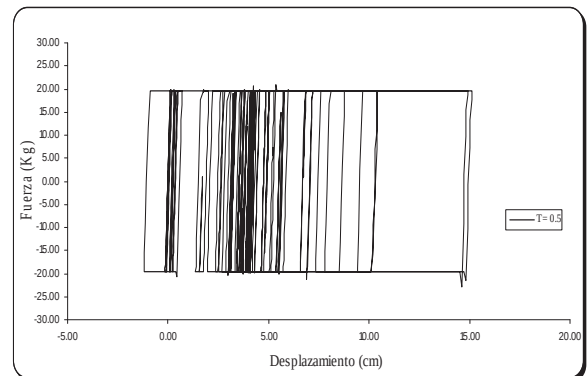
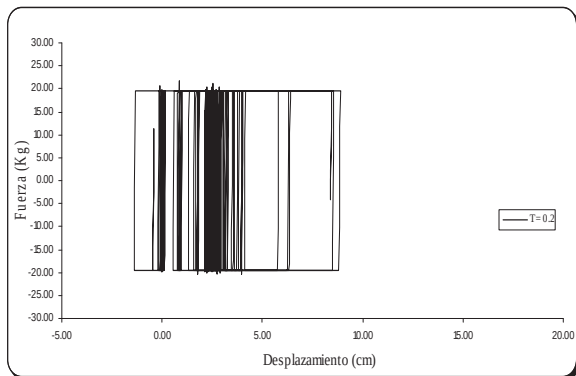




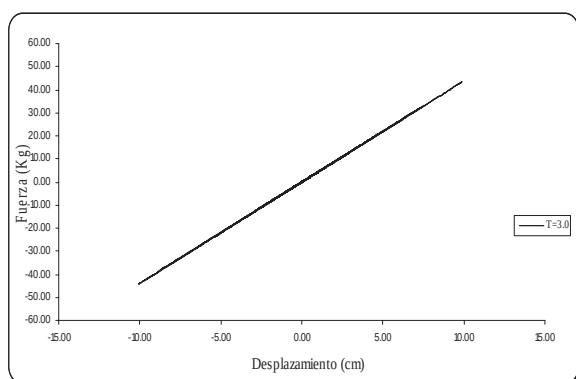
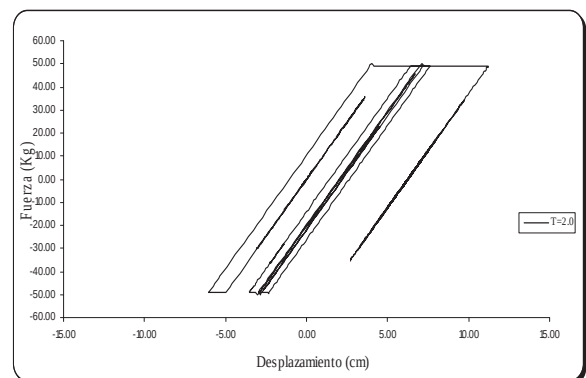
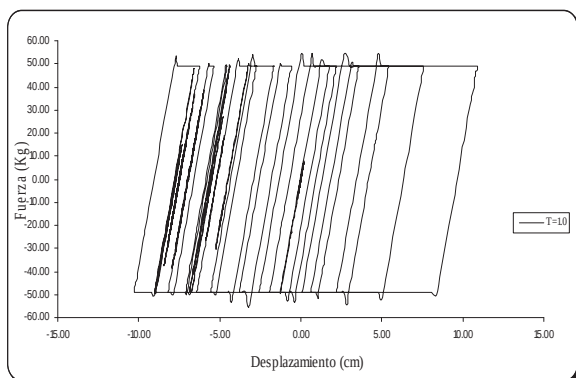
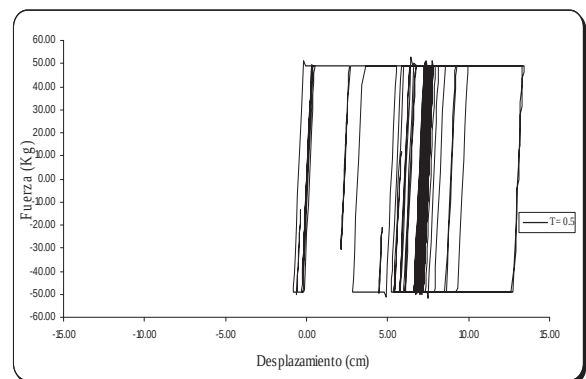
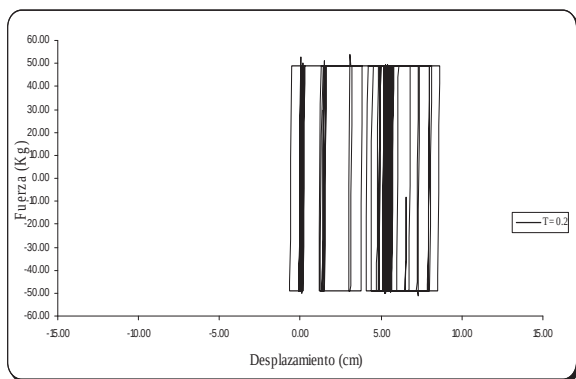
Comportamiento Bilineal para la secuencia VCPS800609 $C_y = 0.01$



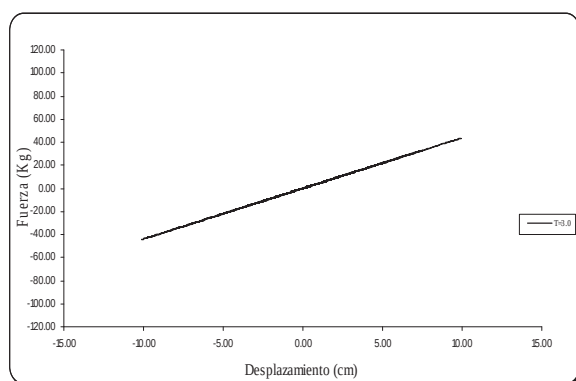
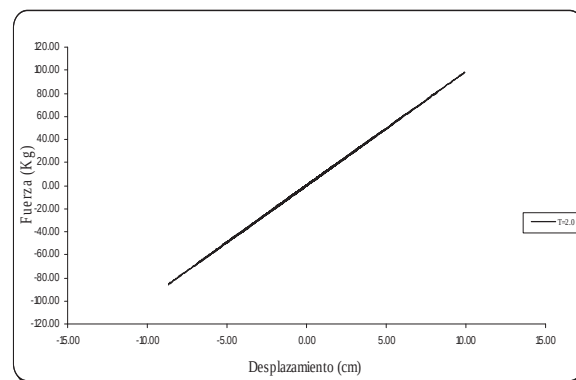
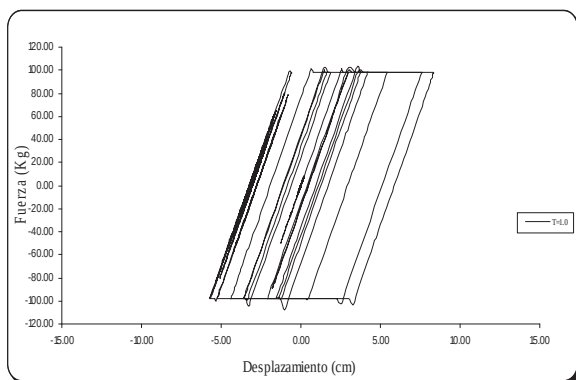
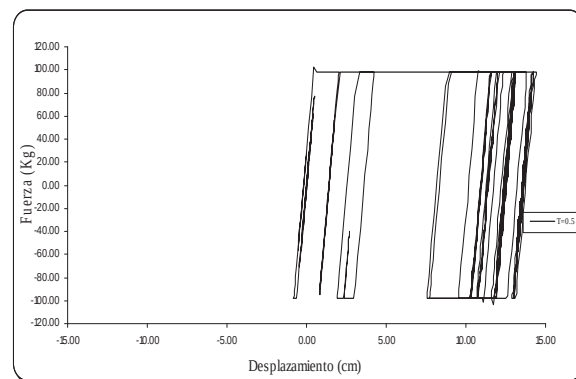
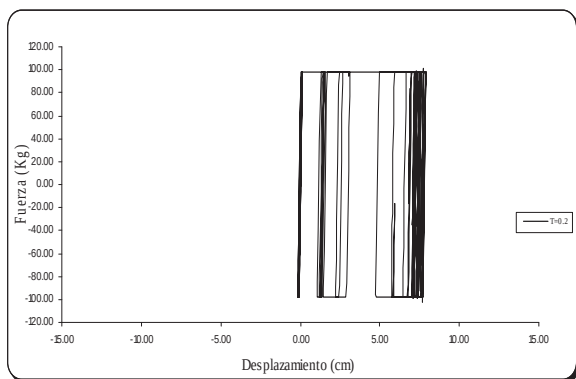
Comportamiento Bilineal para la secuencia VCPS800609 $C_y = 0.02$



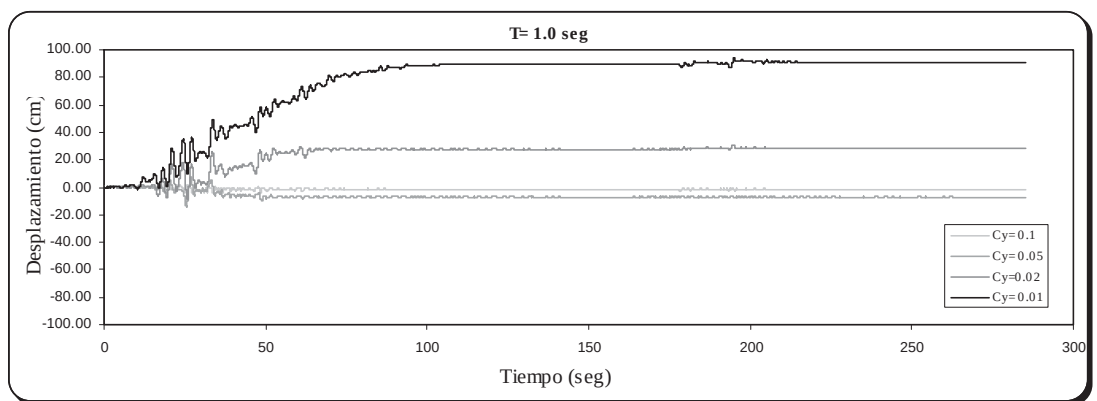
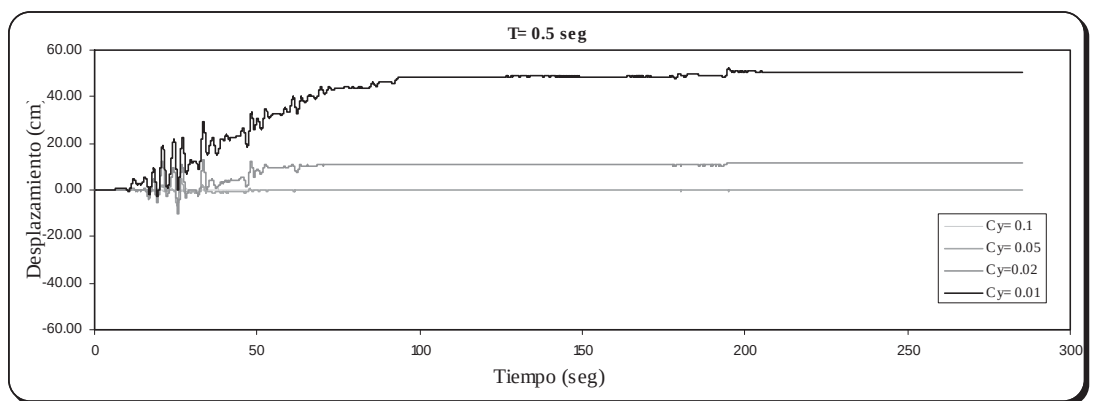
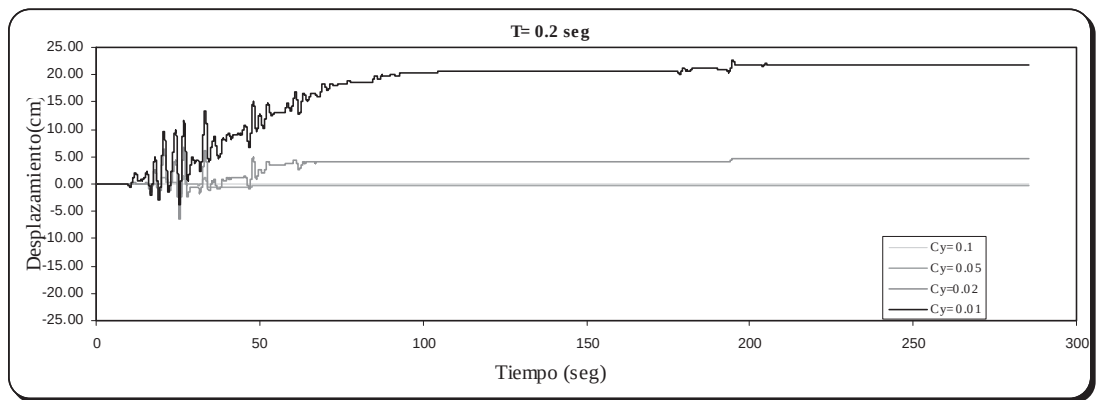
Comportamiento Bilineal para la secuencia VCPS800609 $C_y = 0.05$

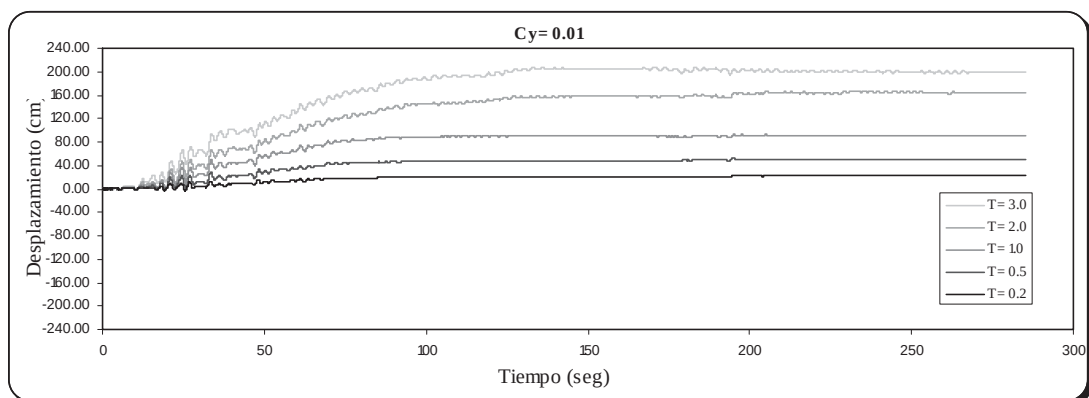
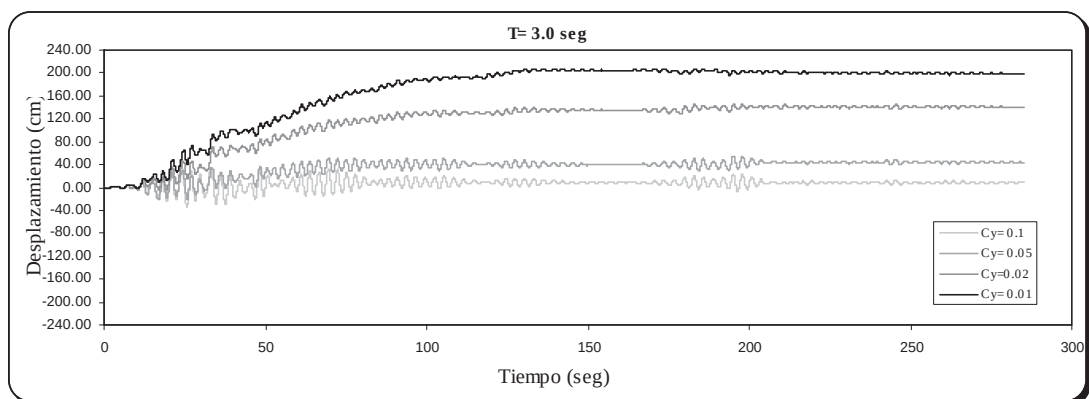
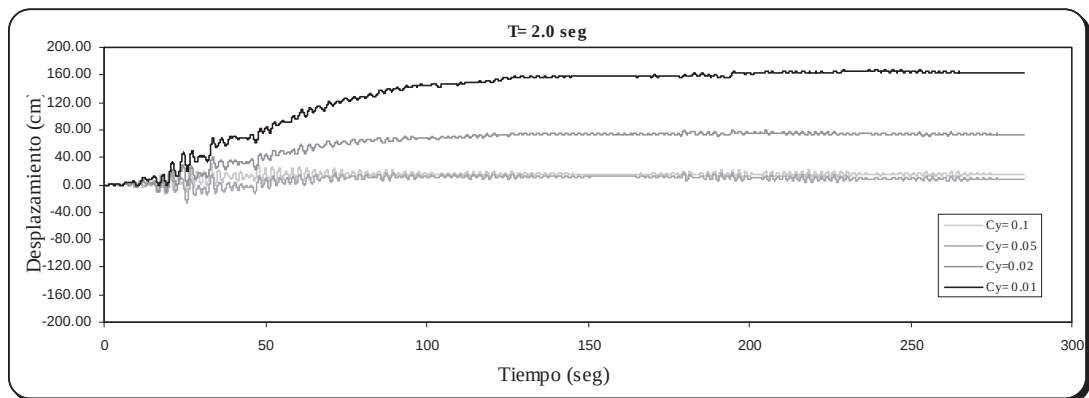


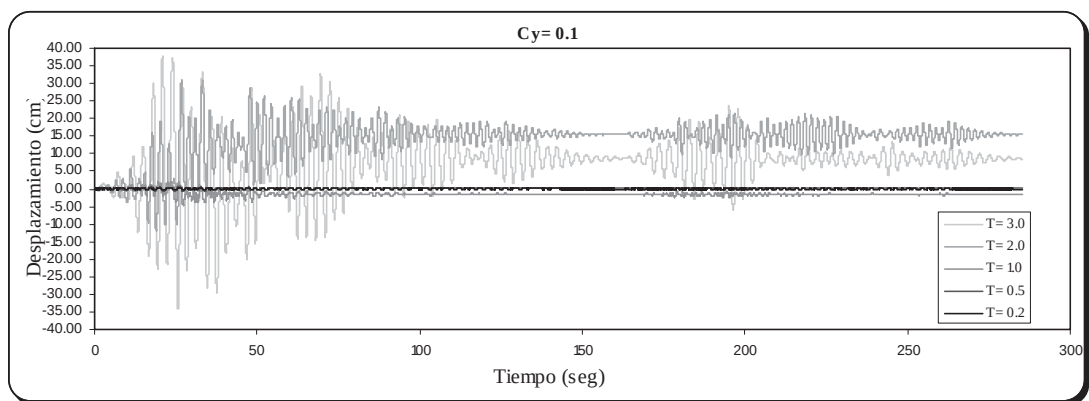
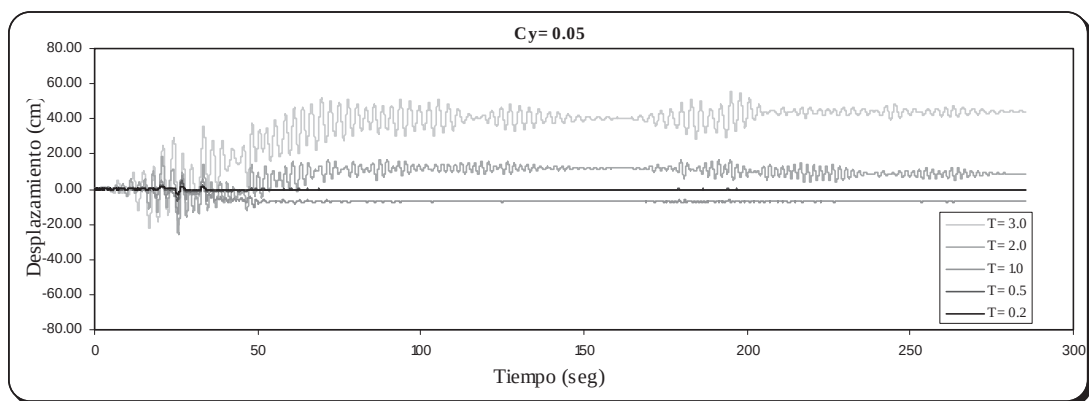
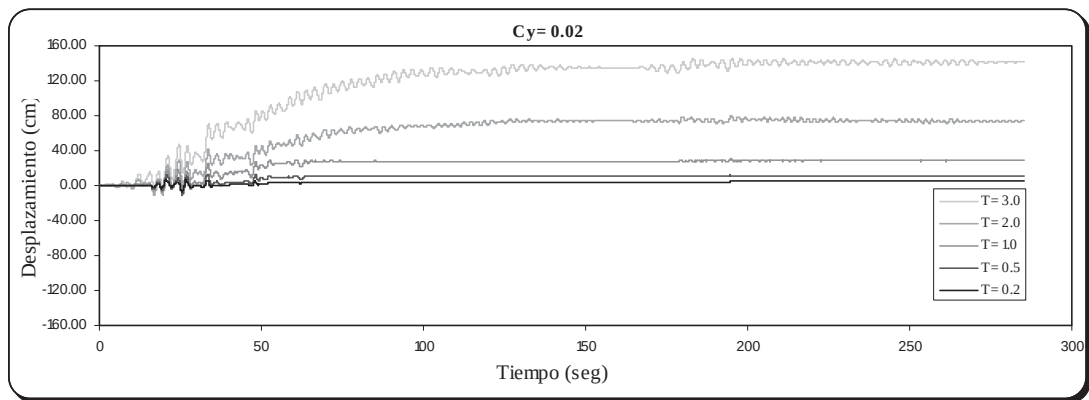
Comportamiento Bilineal para la secuencia VCPS800609 $C_y = 0.1$



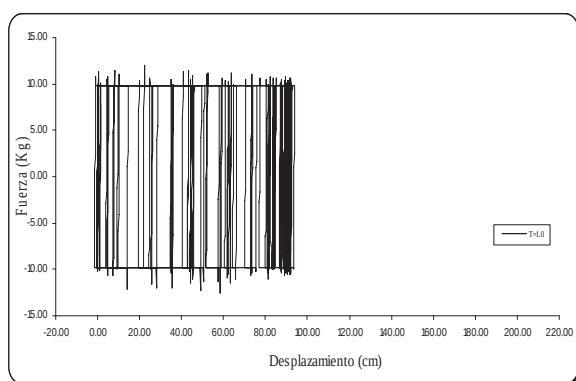
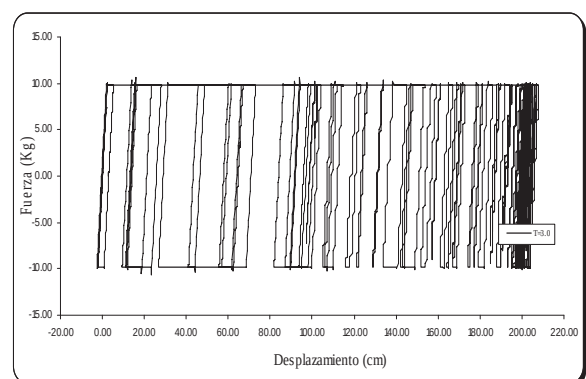
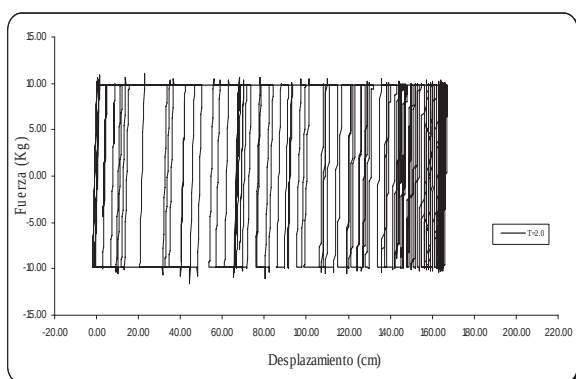
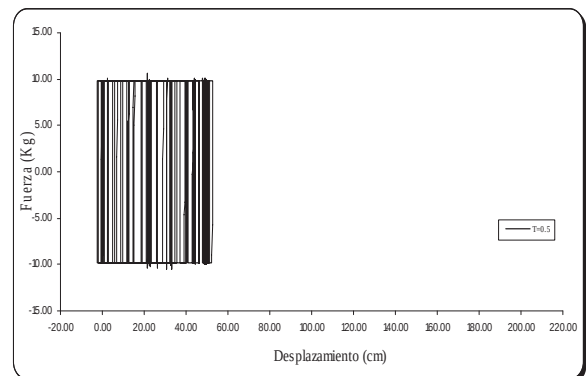
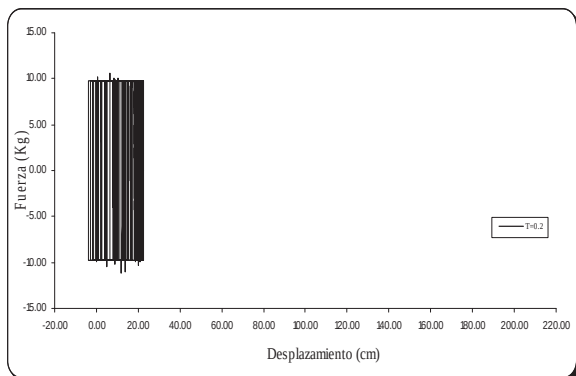
Comportamiento Bilineal para la secuencia CDAF850919



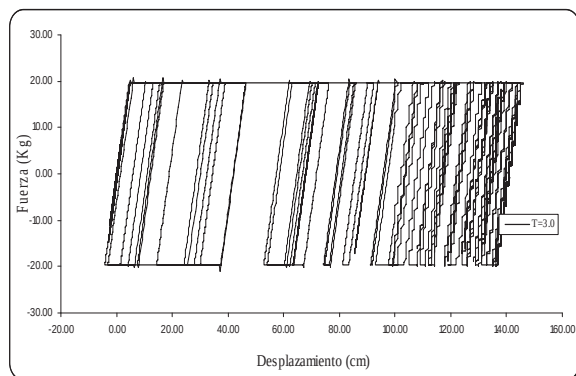
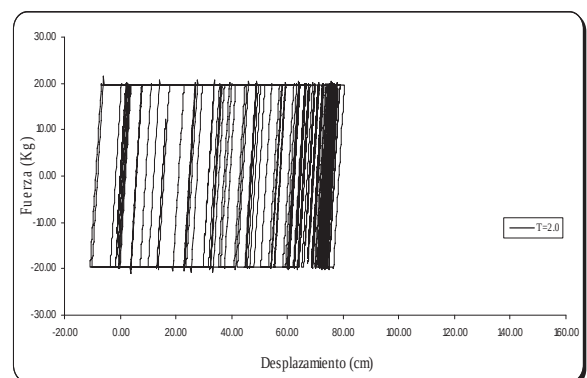
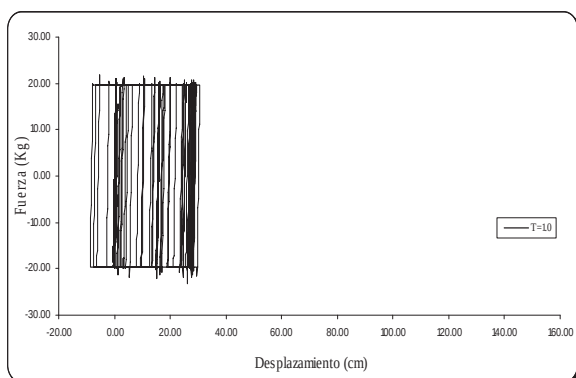
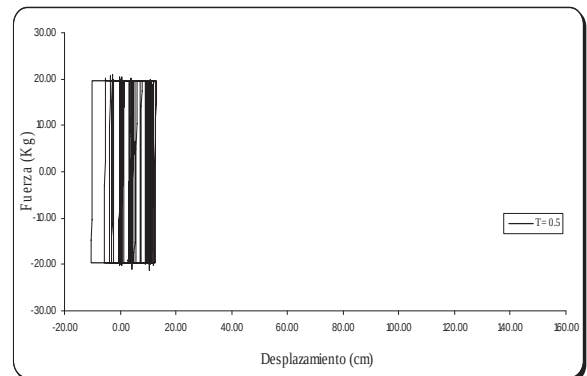
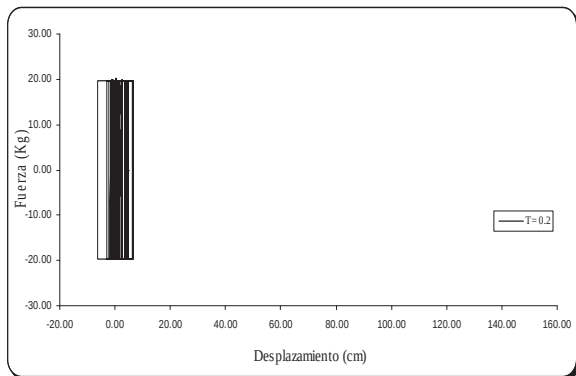




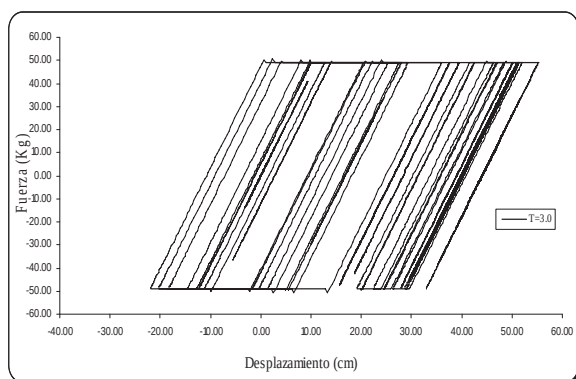
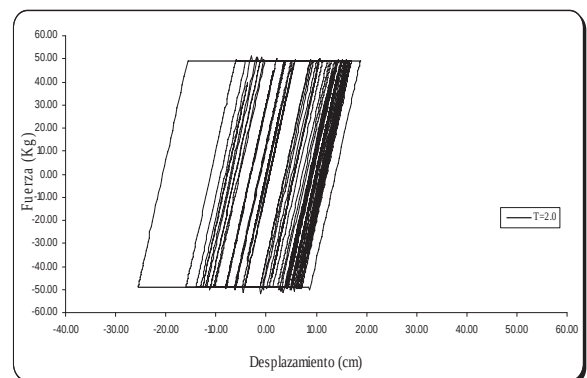
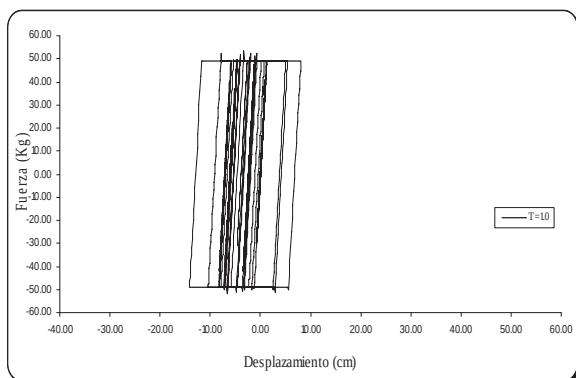
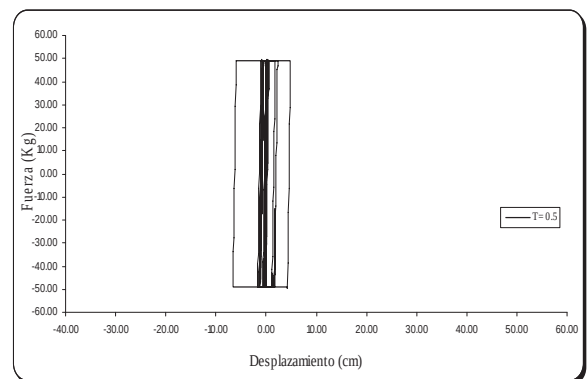
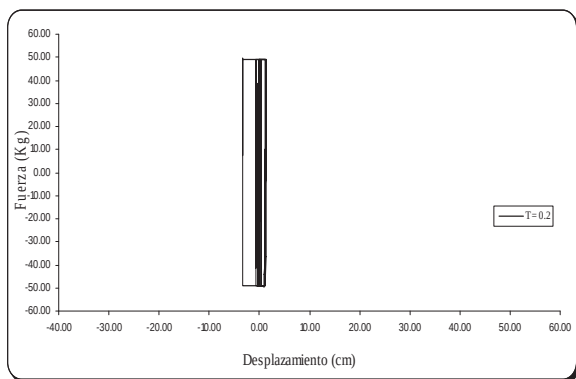
Comportamiento Bilineal para la secuencia CDAF850919 $C_y = 0.01$



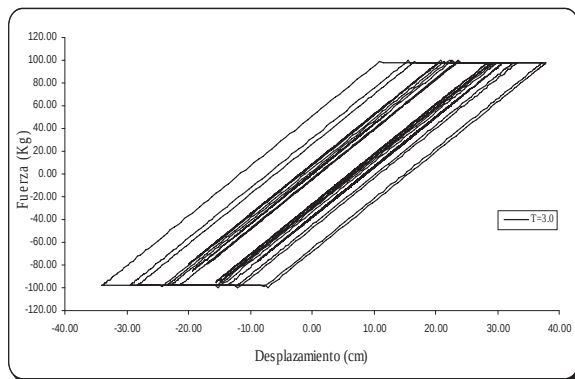
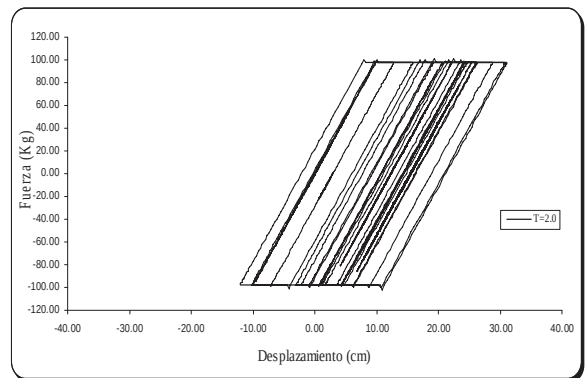
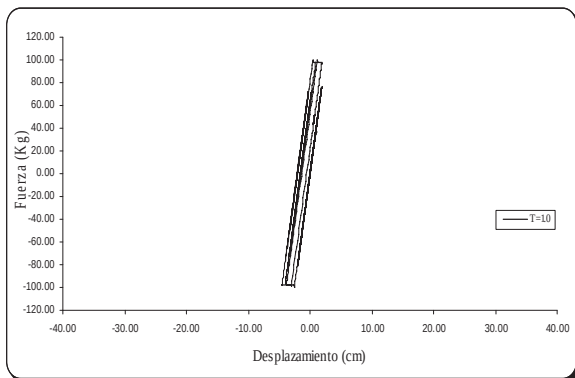
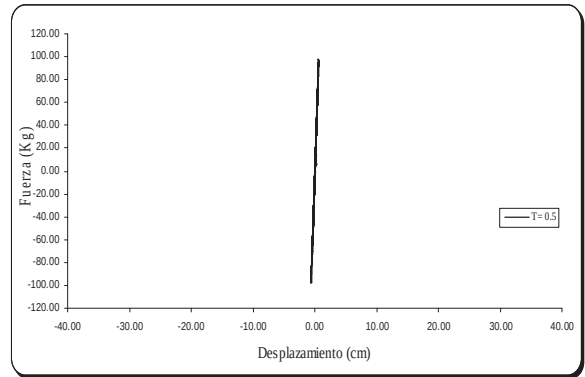
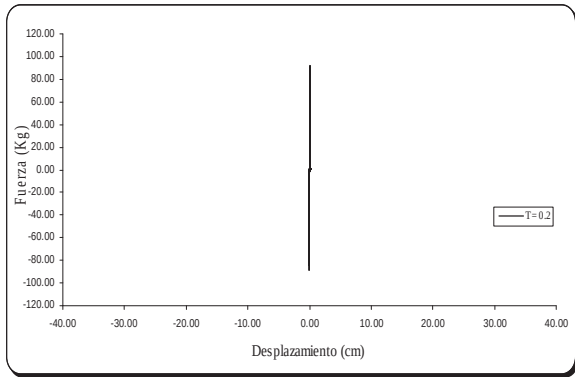
Comportamiento Bilineal para la secuencia CDAF850919 $C_y = 0.02$



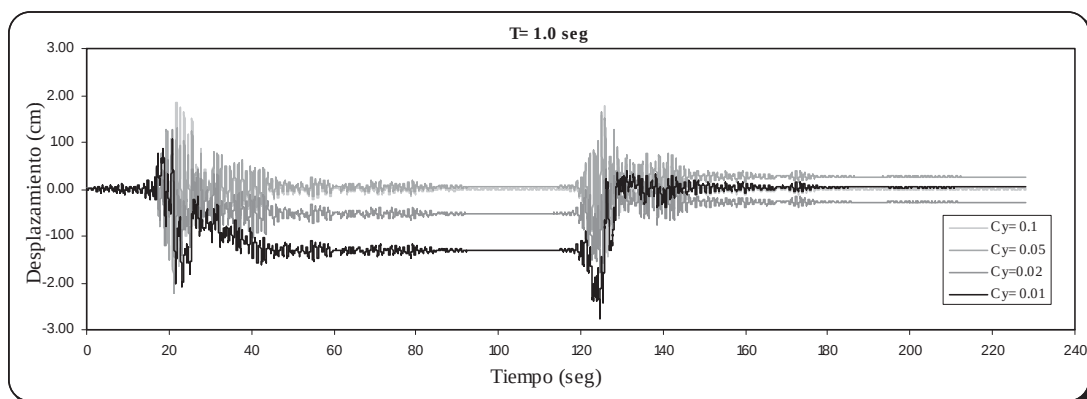
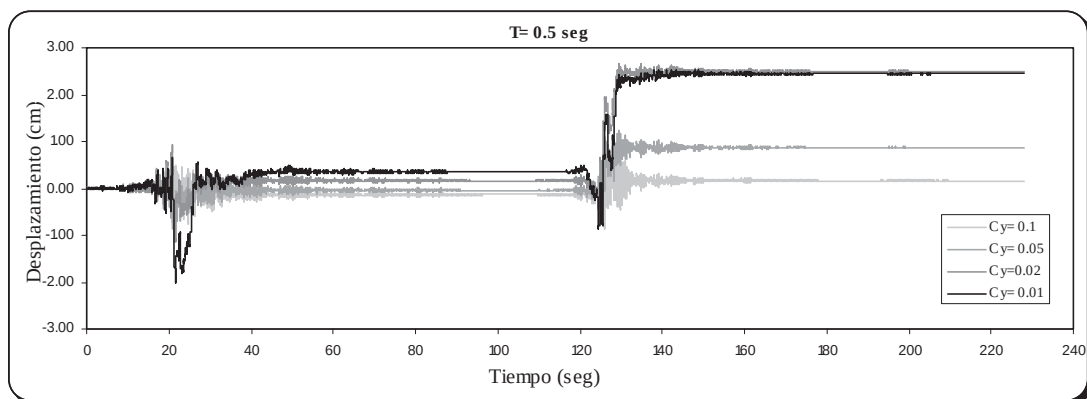
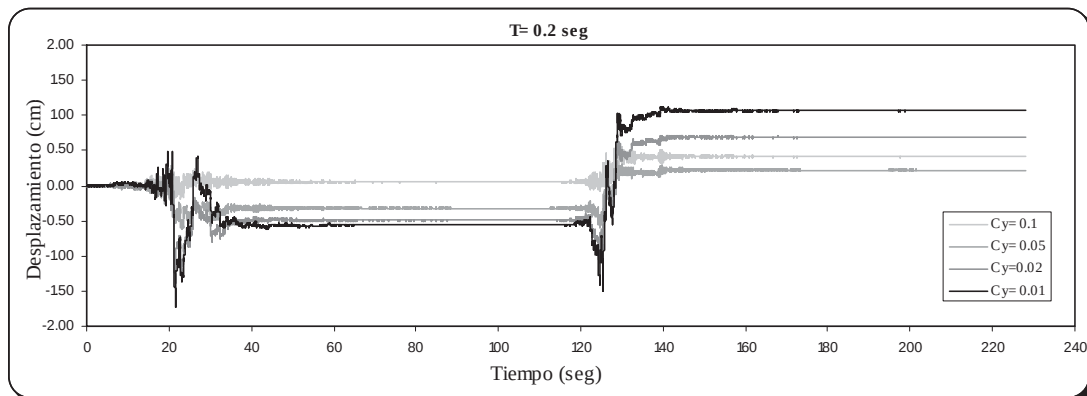
Comportamiento Bilineal para la secuencia CDAF850919 $C_y = 0.05$

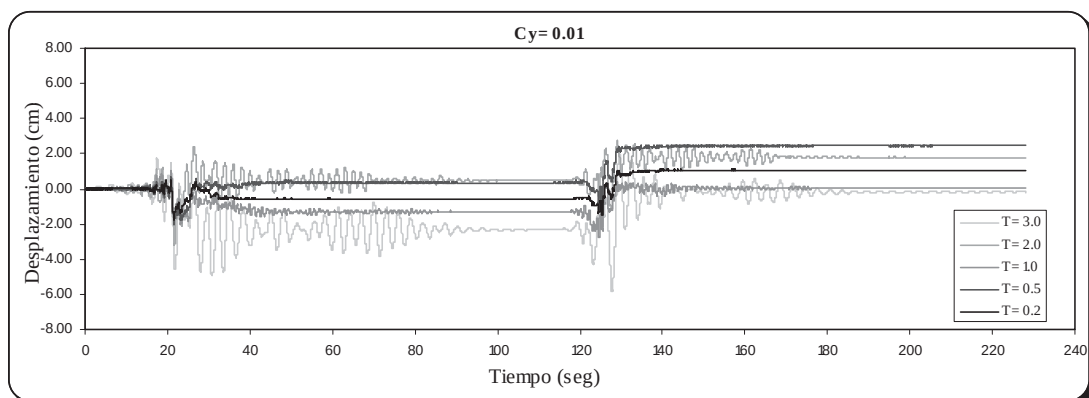
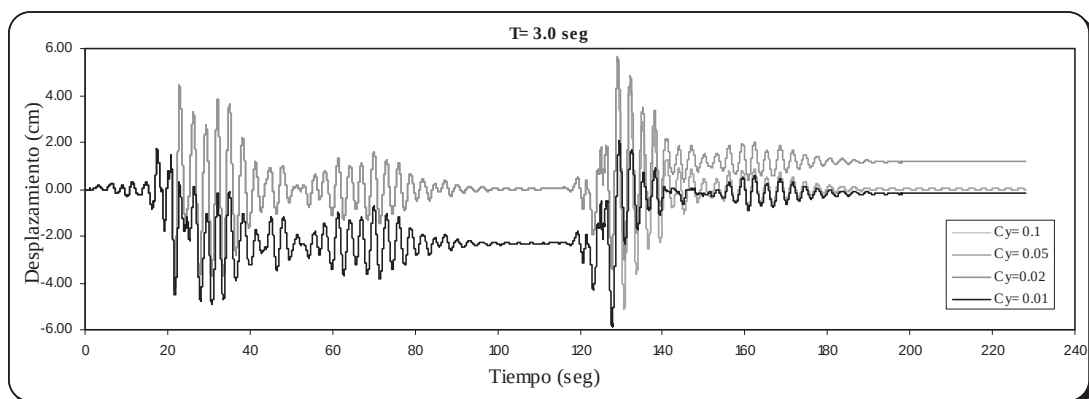
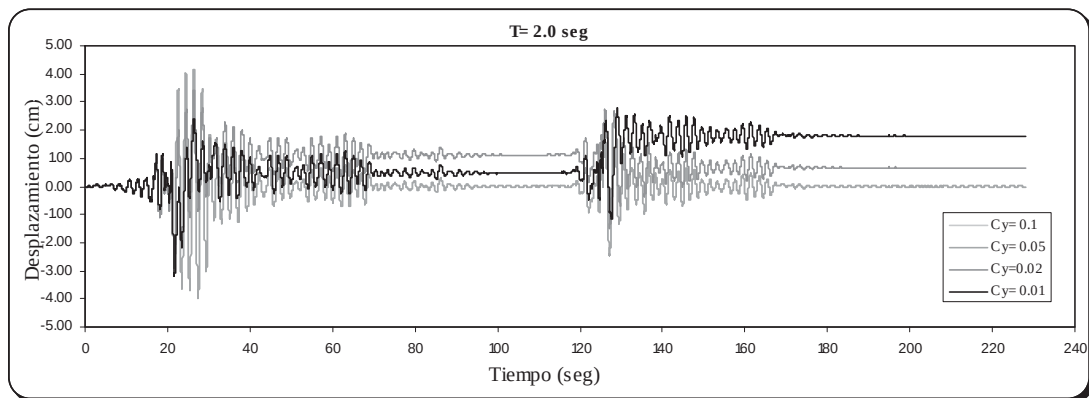


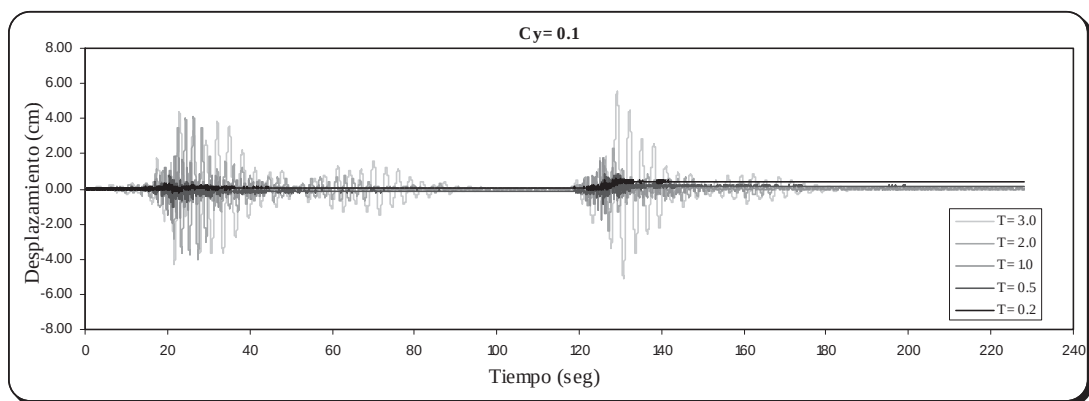
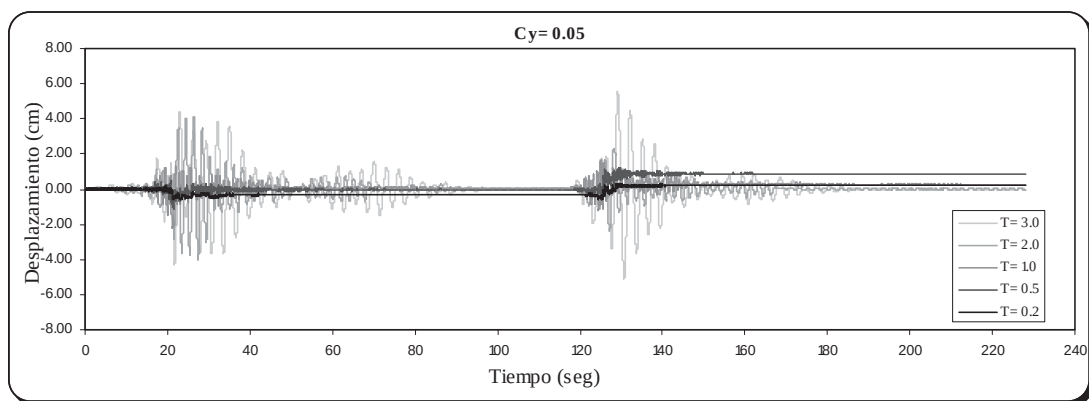
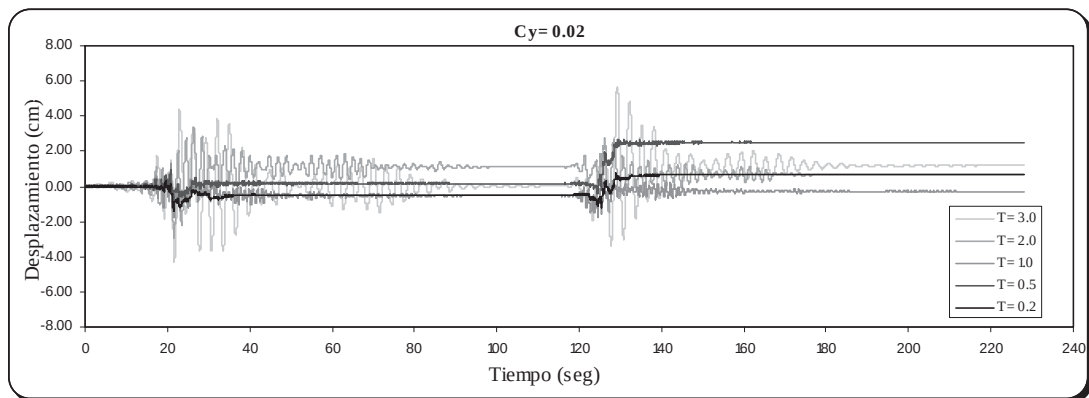
Comportamiento Bilineal para la secuencia CDAF850919 $C_y = 0.1$



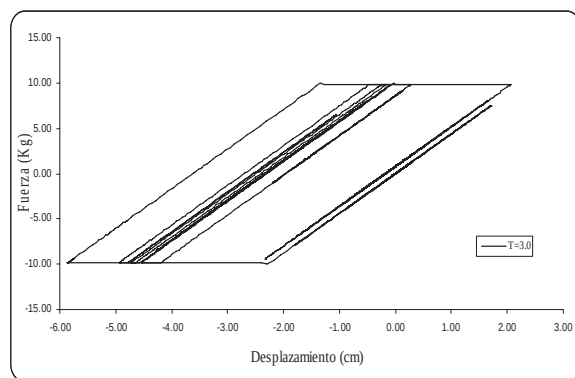
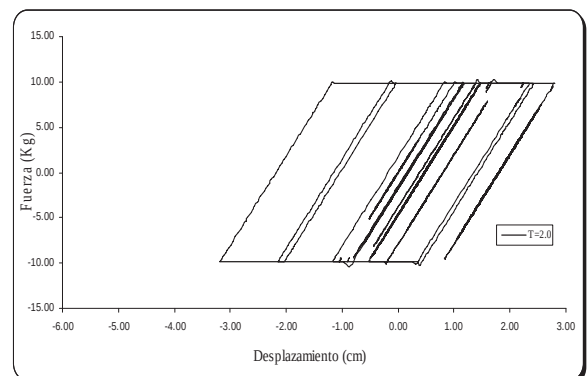
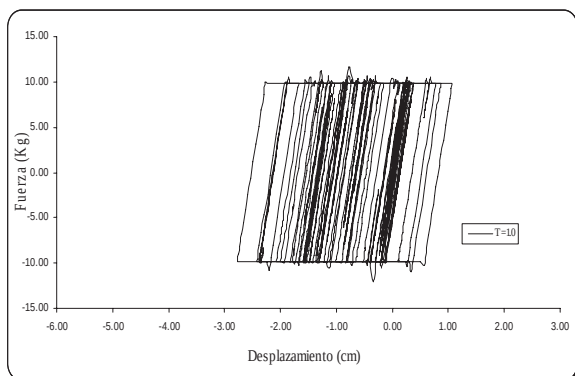
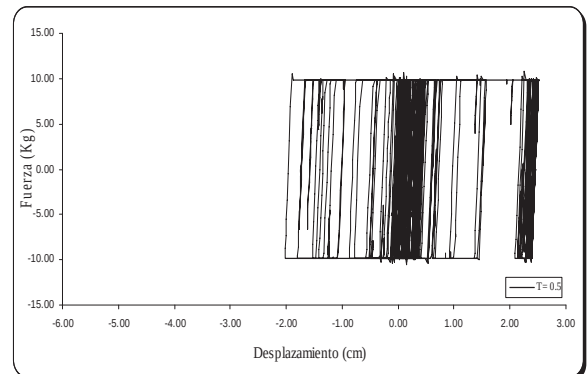
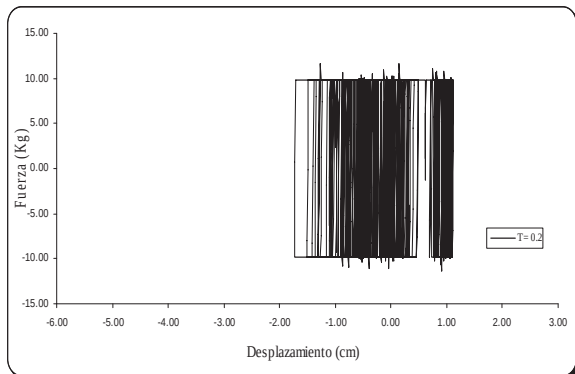
Comportamiento Bilineal para la secuencia PAPN850919 componente S00W.



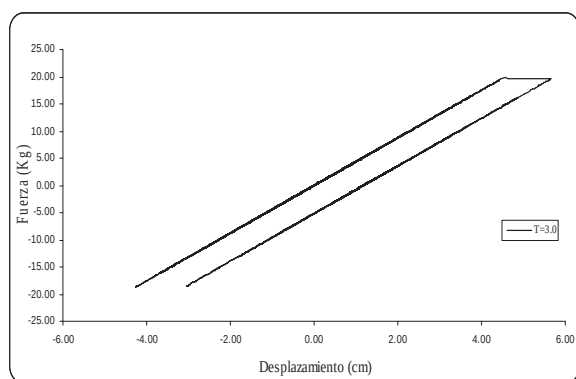
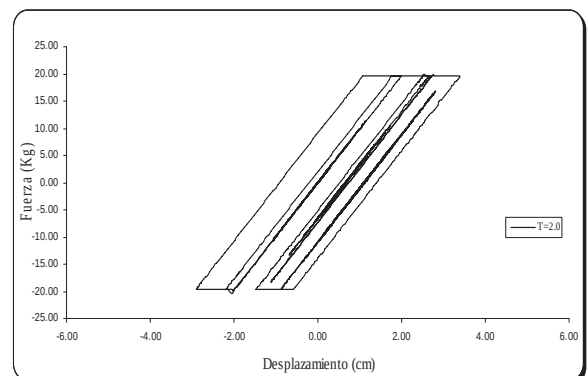
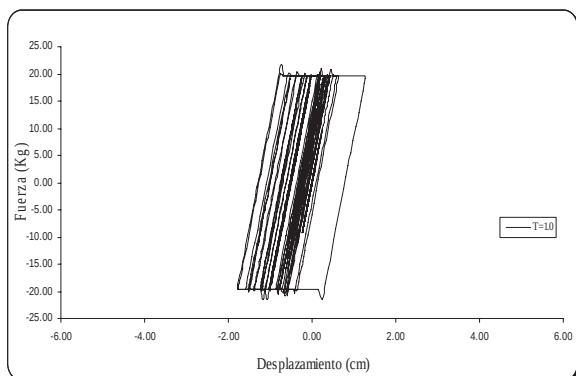
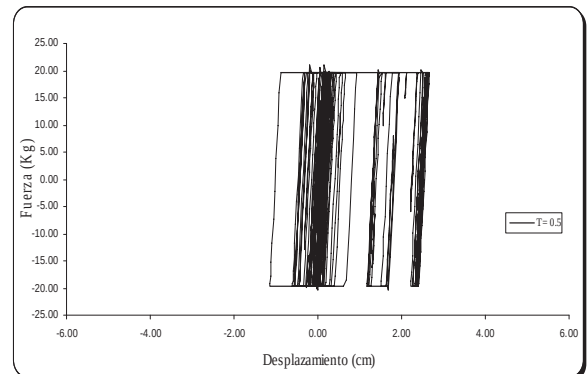
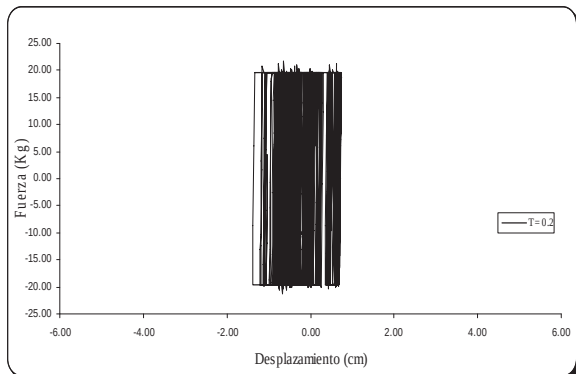




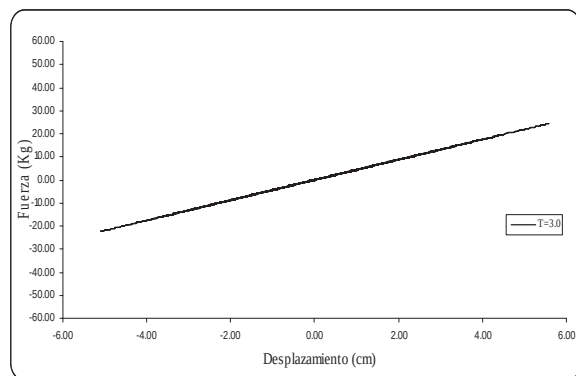
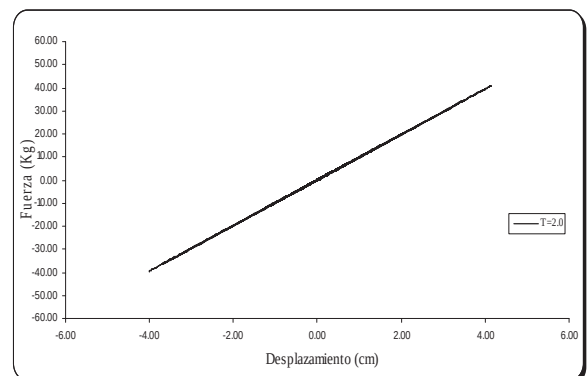
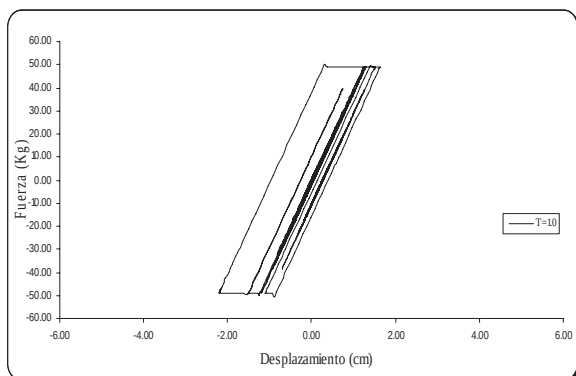
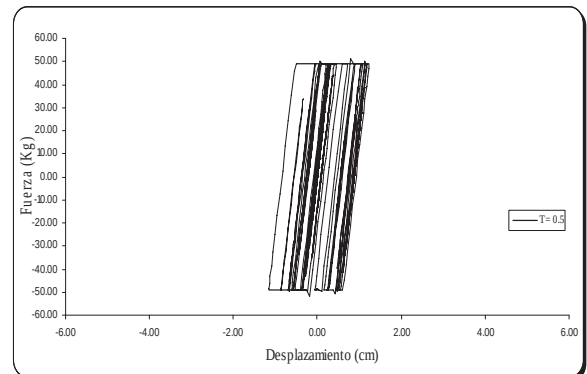
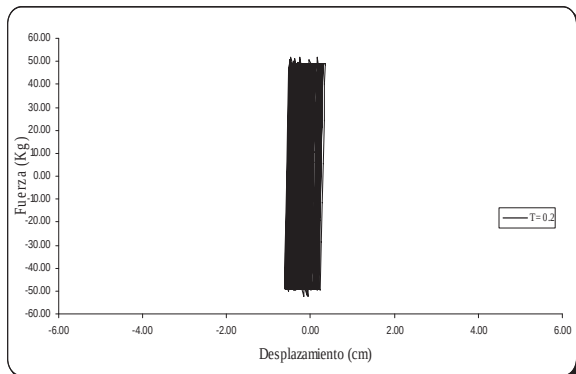
**Comportamiento Bilineal para la secuencia PAPN850919 $C_y = 0.01$
componente S00W.**



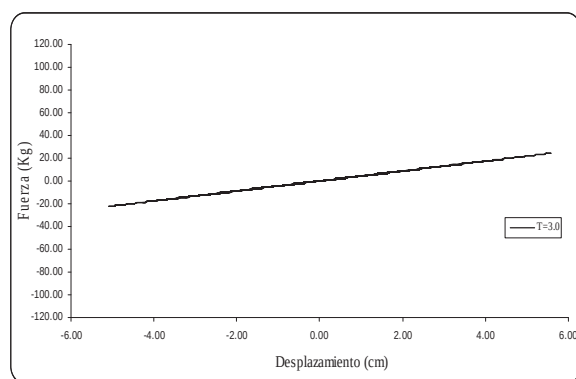
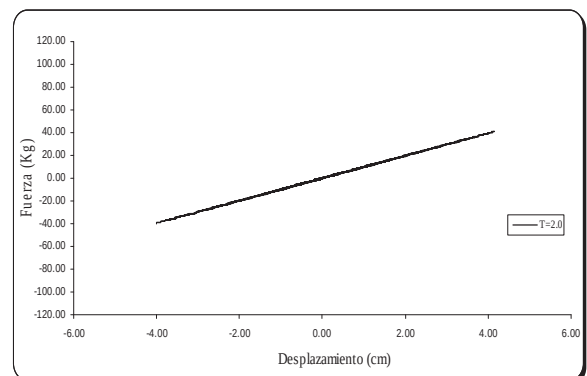
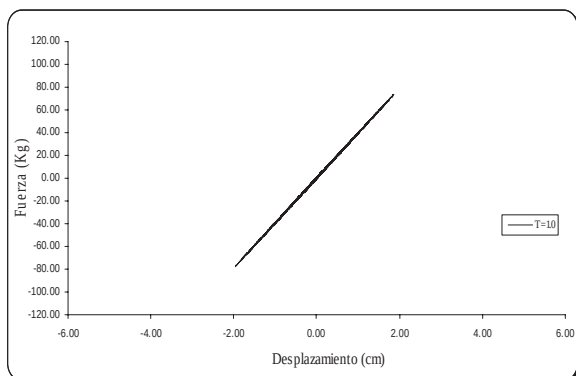
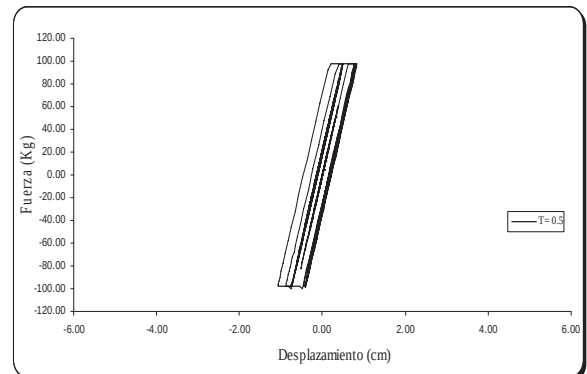
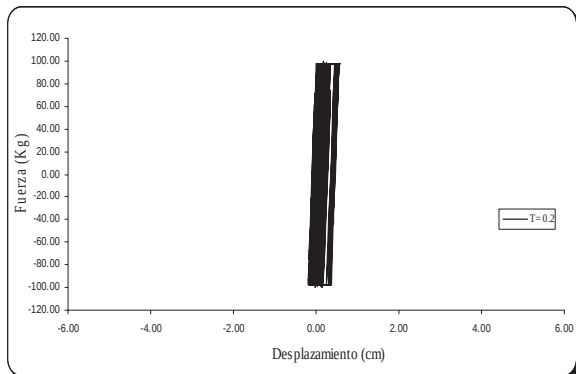
**Comportamiento Bilineal para la secuencia PAPN850919 $C_y = 0.02$
componente S00W.**



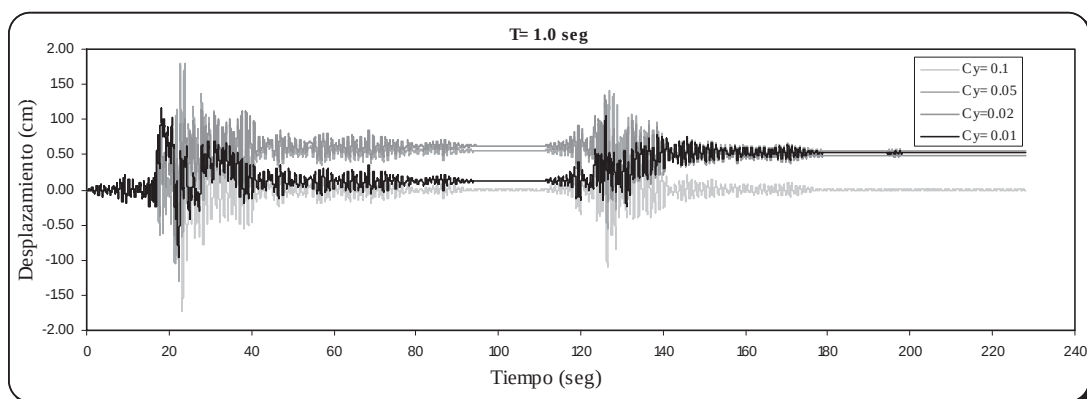
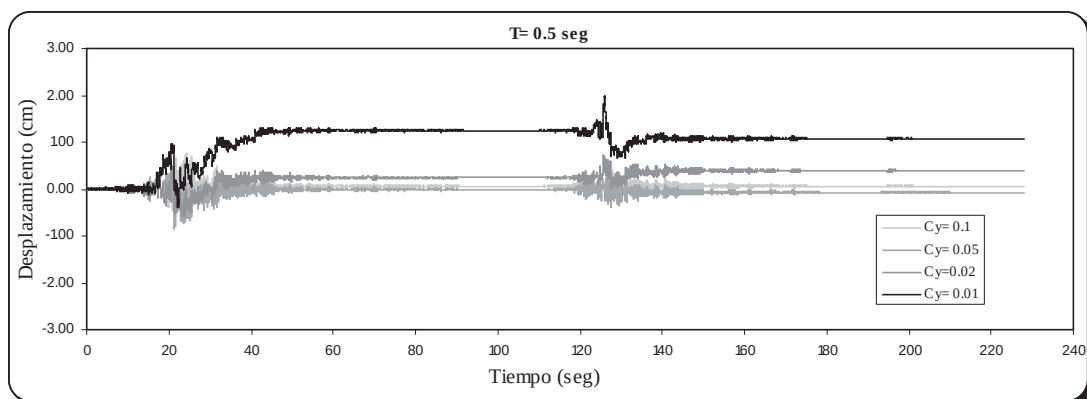
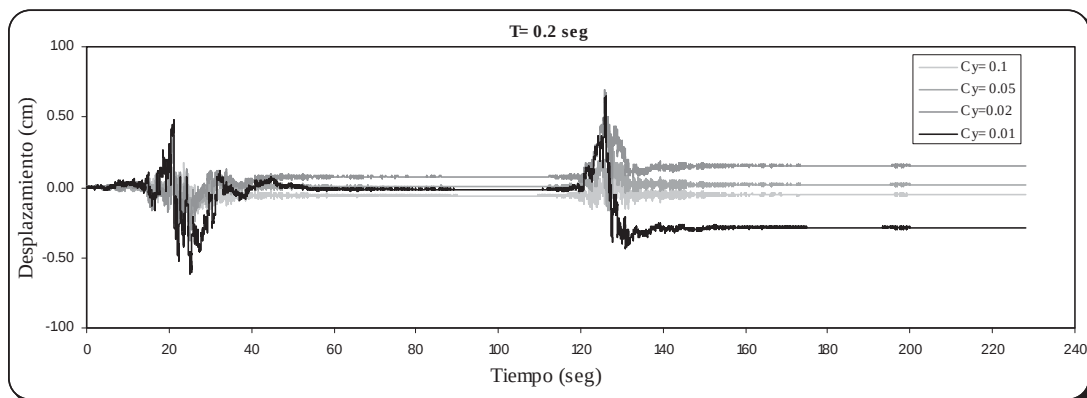
**Comportamiento Bilineal para la secuencia PAPN850919 $C_y = 0.05$
componente S00W.**

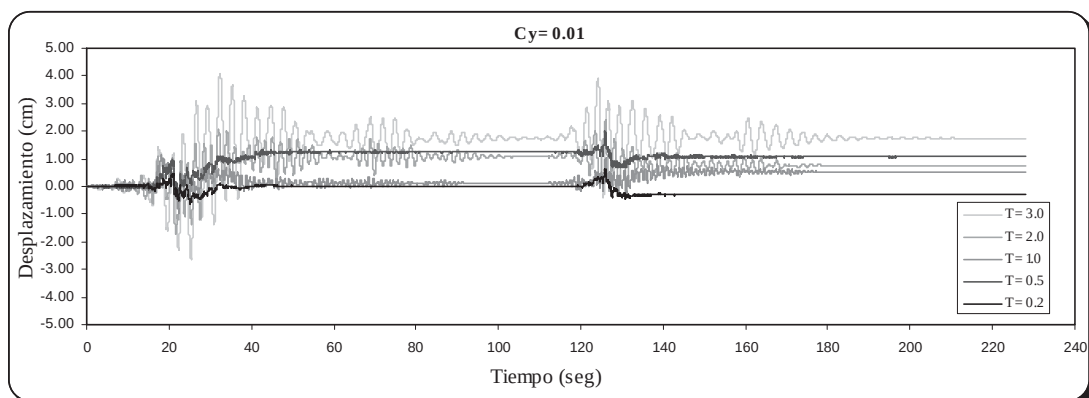
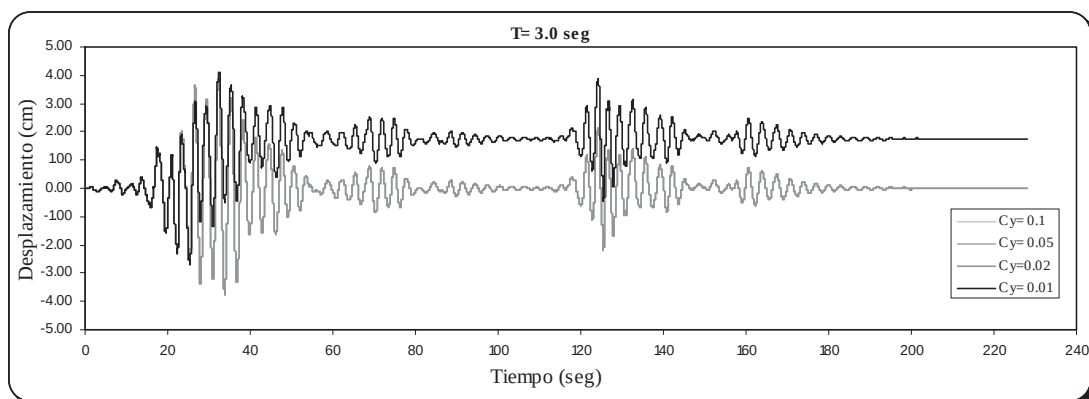
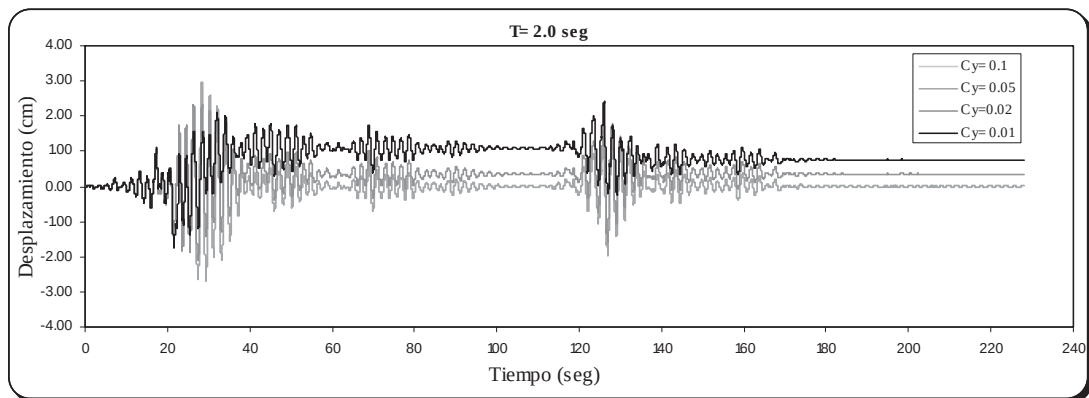


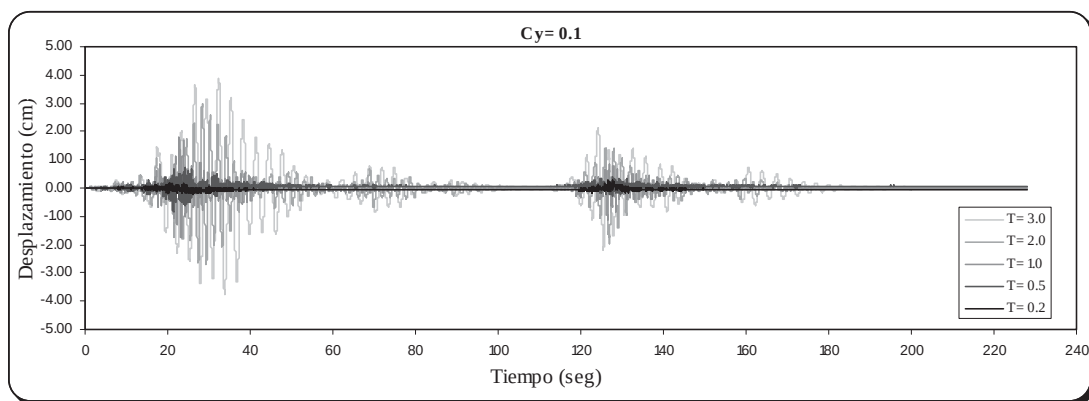
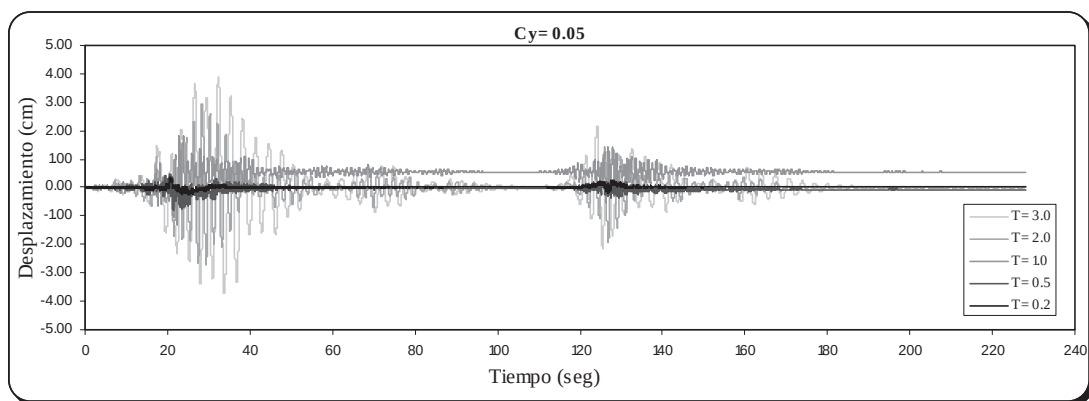
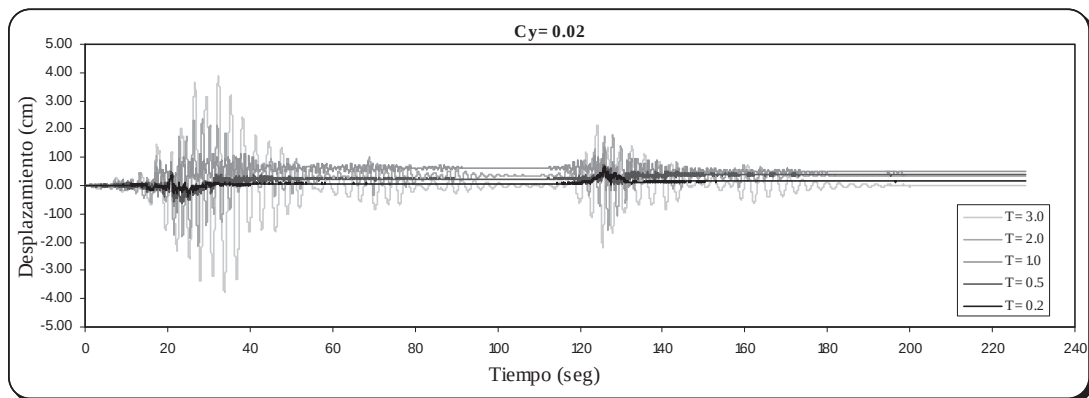
**Comportamiento Bilineal para la secuencia PAPN850919 $C_y = 0.1$
componente S00W.**



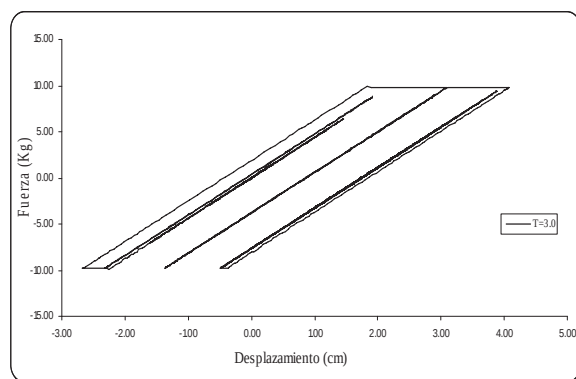
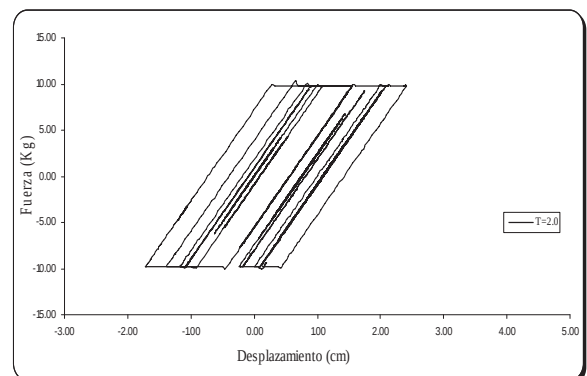
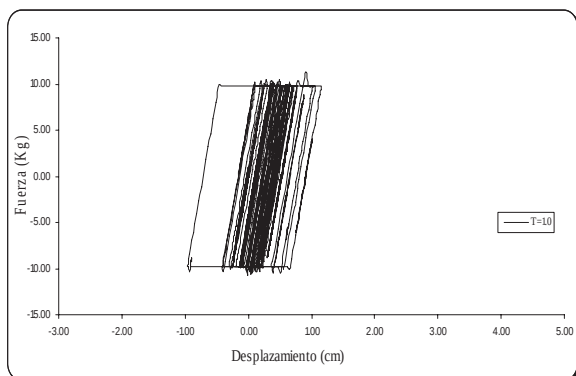
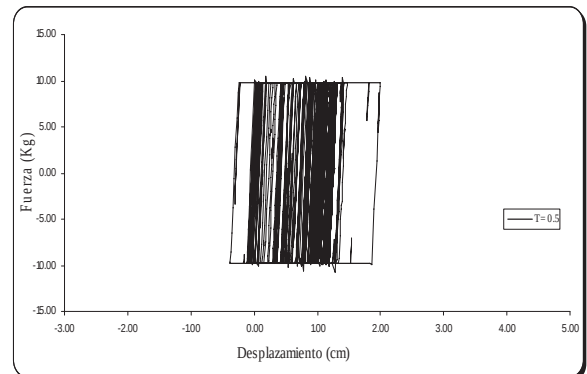
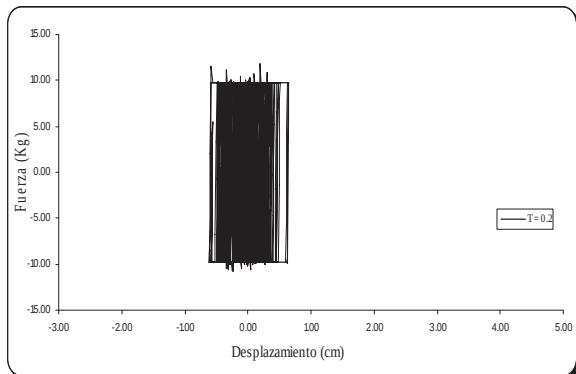
Comportamiento Bilineal para la secuencia PAPN850919 componente S90W.



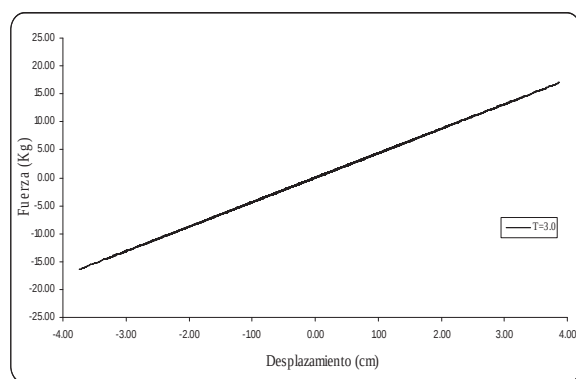
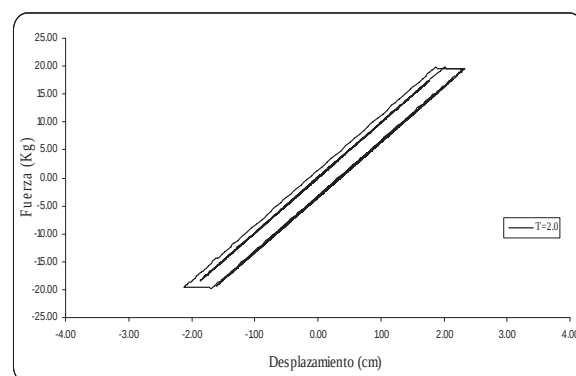
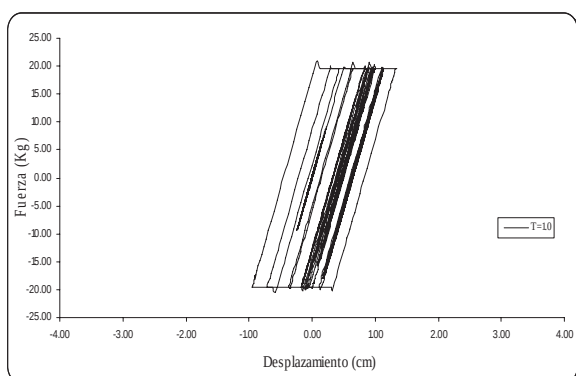
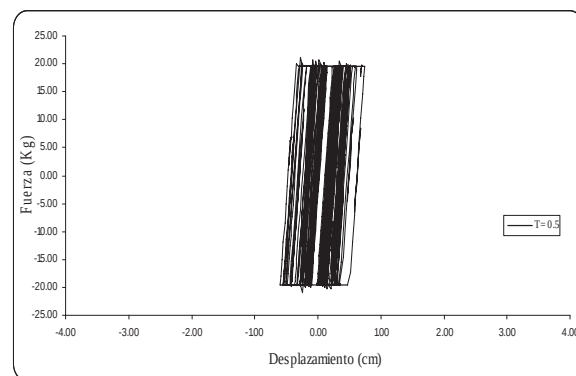
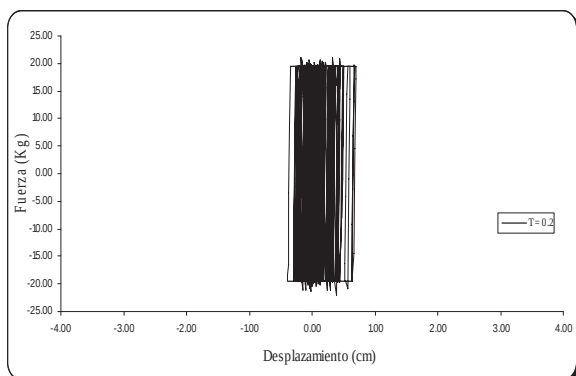




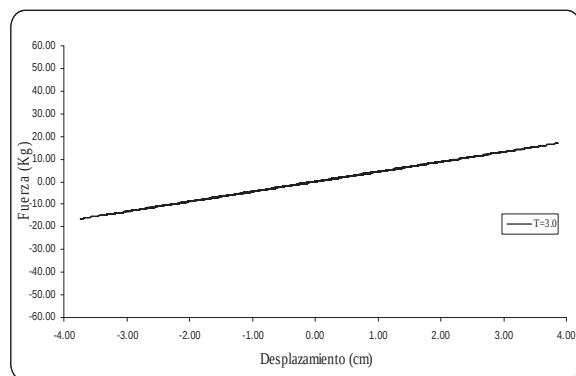
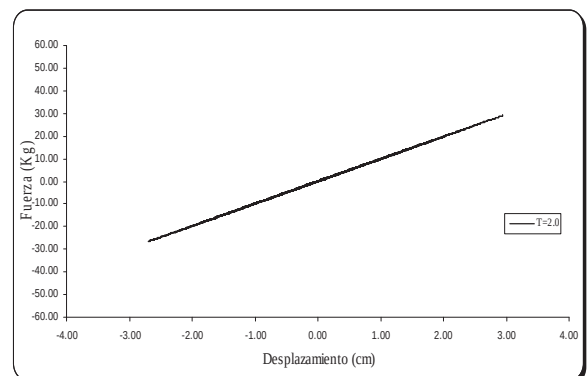
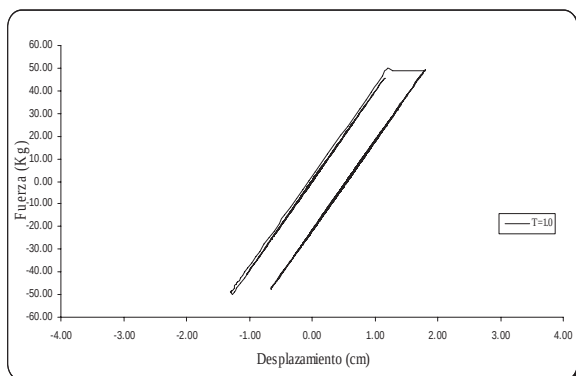
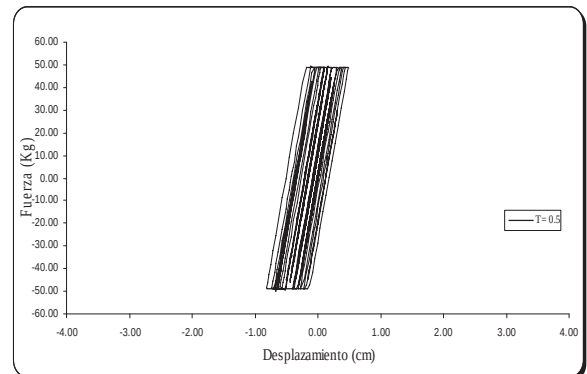
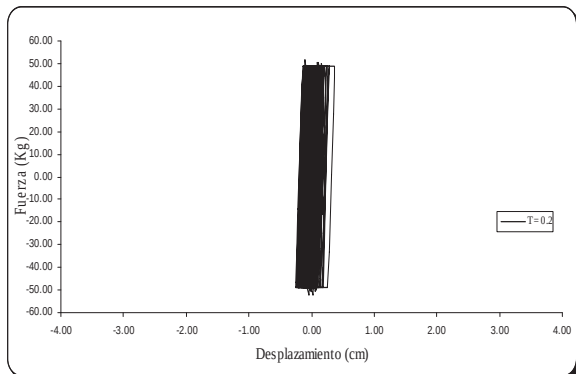
**Comportamiento Bilineal para la secuencia PAPN850919 $C_y = 0.01$
componente S90W.**



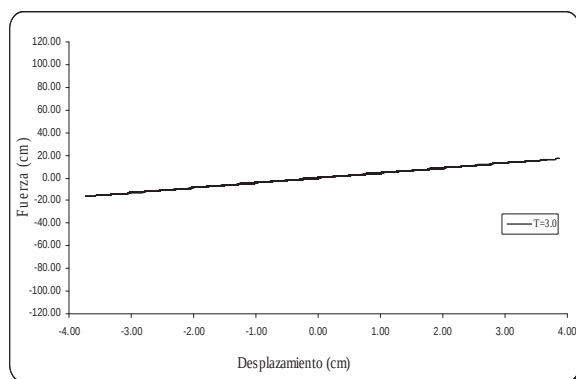
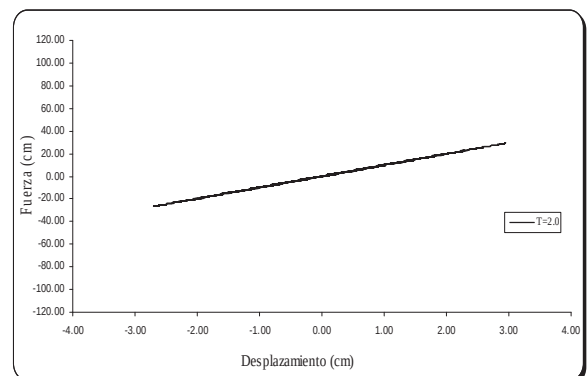
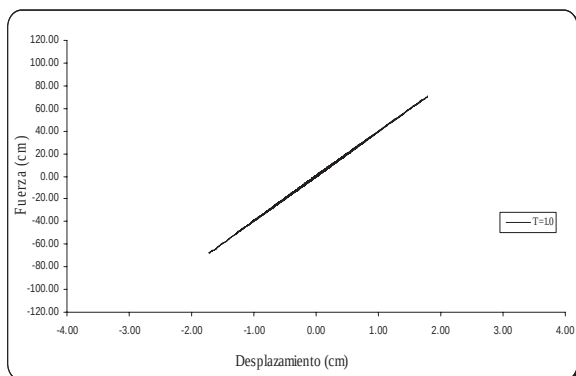
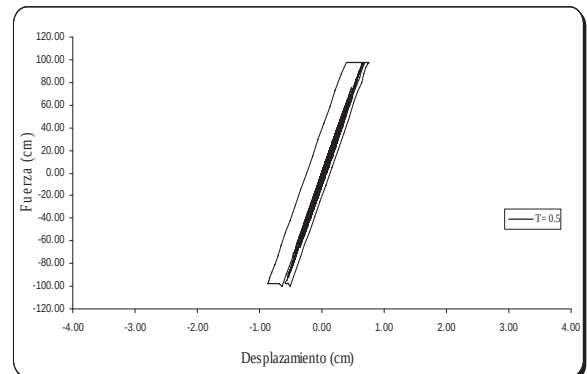
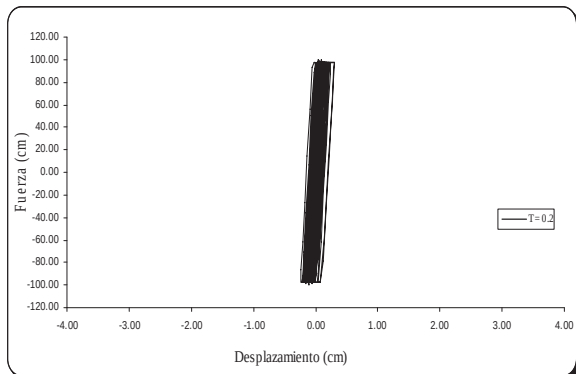
**Comportamiento Bilineal para la secuencia PAPN850919 $C_y = 0.02$
componente S90W.**



**Comportamiento Bilineal para la secuencia PAPN850919 $C_y = 0.05$
componente S90W.**



**Comportamiento Bilineal para la secuencia PAPN850919 $C_y = 0.1$
componente S90W.**



Cuando tenemos una secuencia como la CDAF850919, la cual fue colectada en terreno blando, la cual tiene una duración efectiva grande, el efecto en sistemas fuertes con valores de $C_y = 0.1$ el sistema tiende a comportarse de una manera favorable cuando el periodo toma valores menores que 1 seg. y cuando se toman valores menores de 0.5 seg. la replica resulta favorable para el sistema ya que recentra el sistema, esto dicho en otras palabras reduce el desplazamiento residual provocado por el evento principal.

Cuando se tiene un sistema débil con valores del orden de $C_y = 0.02$, cuando se tienen valores menores de 0.5 seg. el sistema tiene desplazamientos pequeños a los generados cuando se tienen sistemas con periodos de 3.0 seg. donde los desplazamientos son alrededor de 140 cm.

Algo que es importante comentar es el efecto de la duración efectiva del evento principal ya que este es el que reduce de manera importante la capacidad de resistencia del edificio.

Demandas de distorsión máxima y residual en SMGD

4.1 Introducción

Con la intención de conocer la respuesta inelástica de sistemas de varios grados de libertad, se empleo dos marcos de acero con diferente numero de niveles, los cuales fueron diseñados según la normatividad mexicana (A. Gómez Bernal y E. Sordo Zabay, 2005), los cuales fueron diseñados tomando en cuenta los desplazamientos horizontales del reglamento del Distrito Federal.

A los marcos mencionados anteriormente se les sometió a las secuencias sísmicas utilizadas para sistemas de un grado de libertad en el capitulo 3. Las cuales contienen características, que permiten obtener resultados comparables.

4.2 Descripción de los edificios estudiados

Se utilizaron dos modelos de marcos planos de acero, uno de 3 niveles y otro de 13 niveles los cuales fueron diseñados por A. Gómez Bernal y E. Sordo Zabay en el 2005. El criterio de diseño de los dos edificios, fue considerando requisitos de diseño por gravedad y por sismo con un coeficiente sísmico reducido (c/Q), de 0.20, y tomando en cuenta las consideraciones de los requisitos de desplazamientos horizontales del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal.

En cuanto a la perfilieria utilizada, estas fueron secciones IR (W) compactas, y además se considero una resistencia de fluencia nominal de vigas y columnas de acero A36 ($F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$). En cuanto al amortiguamiento critico, este se considero del 2 %. En las Figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran las plantas y elevaciones de los edificios de 3 y 13 niveles correspondientemente.

En las Tabla 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran los elementos de las estructuras con sus momentos plásticos, y los pesos utilizados por entrepiso para el edificio de 3 niveles.

Tabla 4.1 Elementos viga y sus momentos para edificio de tres niveles.

Piso	Vigas	M_p (kg-m)
1	W24x76	82908
2	W24x77	82909
3	W24x78	82910

Tabla 4.2 Elementos columna y sus momentos para edificio de tres niveles.

Piso	Columna	Mp (kN-m)
1	W24x131	153394
2	W24x132	153395
3	W24x133	153396

Tabla 4.3 Pesos de los entrepisos para edificio de tres niveles.

Pesos de entrepiso	
Entrepiso	Peso (kN)
1	492
2	492
3	492

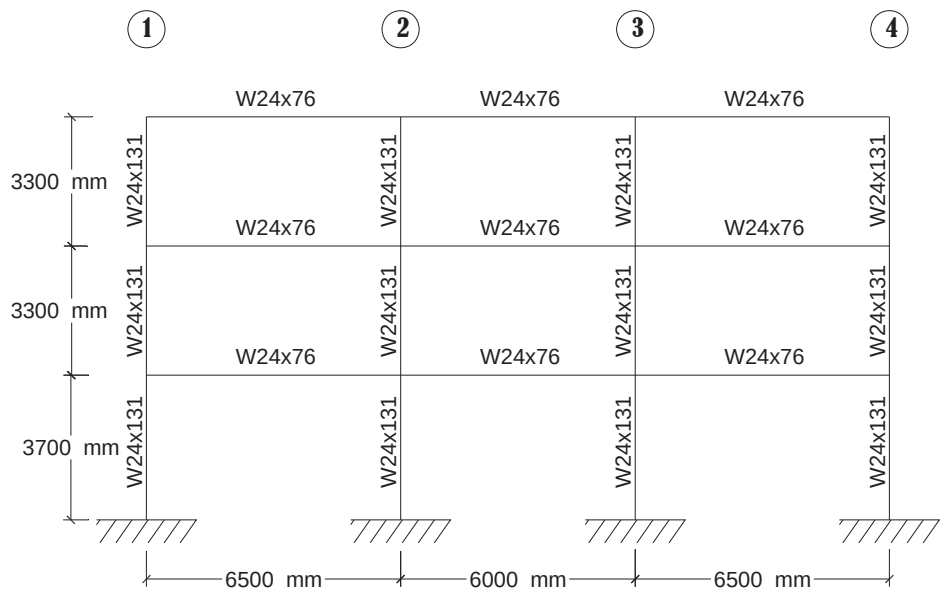


Figura 4.1 Alzado del marco analizado de 3 niveles.

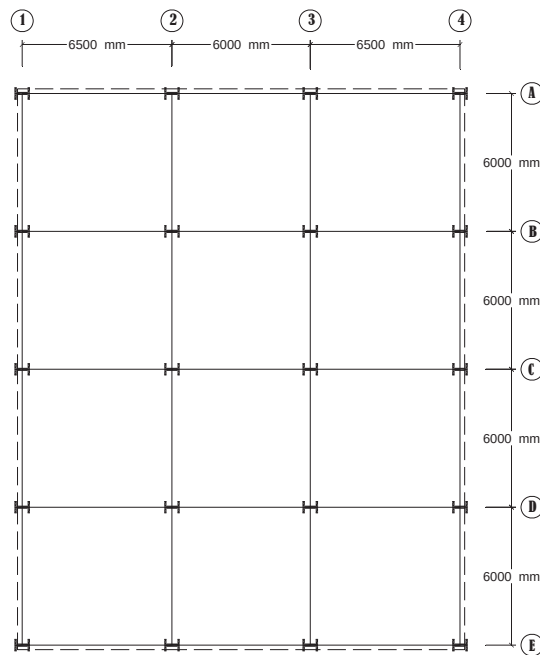


Figura 4.2 Planta del marco analizado de 3 niveles.

En las Tabla 4.4, 4.5 y 4.6 se muestran los elementos de las estructuras con sus momentos plásticos, y los pesos utilizados por entrepiso para el edificio de 13 niveles.

Tabla 4.4 Elementos viga y sus momentos para edificio de tres niveles.

Piso	Vigas	Mp (kg-m)
1	W18x130	120645
2	W18x130	120645
3	W18x130	120645
4	W18x130	120645
5	W18x130	120645
6	W18x130	120645
7	W18x130	120645
8	W18x119	108208
9	W18x119	108208
10	W18x119	108208
11	W18x119	108208
12	W18x119	108208
13	W18x119	108208

Tabla 4.5 Elementos columna y sus momentos para edificio de tres niveles.

Piso	Columna	Mp (kN-m)
1	W21x201	219734
2	W21x201	219734
3	W21x201	219734
4	W18x258	253316
5	W18x258	253316
6	W18x258	253316
7	W18x234	227611
8	W18x234	227611
9	W18x234	227611
10	W18x234	227611
11	W18x192	183250
12	W18x192	183250
13	W18x192	183250

Tabla 4.6 Pesos de los entrepisos para edificio de tres niveles.

Pesos de entrepiso	
Entrepiso	Peso (kN)
1	1200
2	1200
3	1200
4	1200
5	1200
6	1200
7	1200
8	1200
9	1200
10	1200
11	1200
12	1200
13	1200

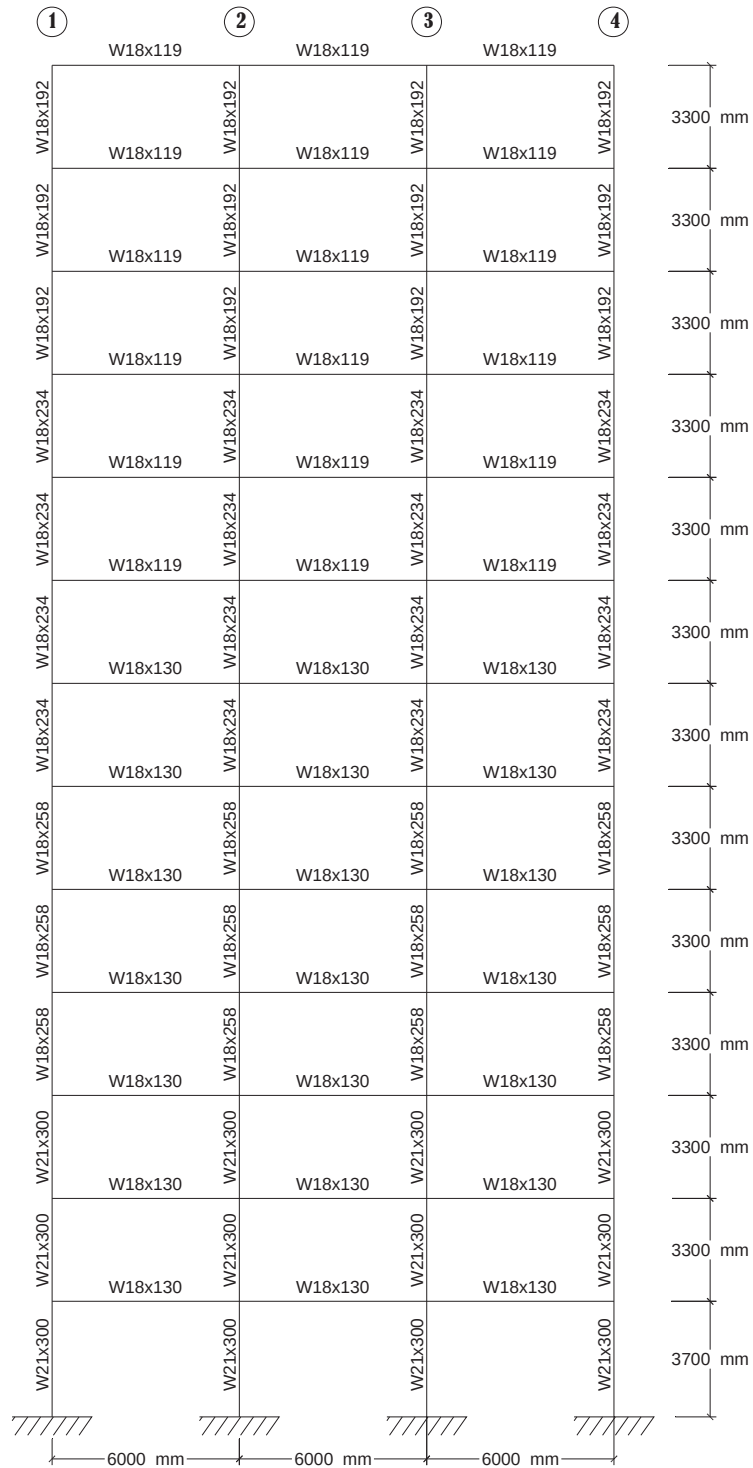


Figura 4.3 Alzado del marco analizado de 13 niveles

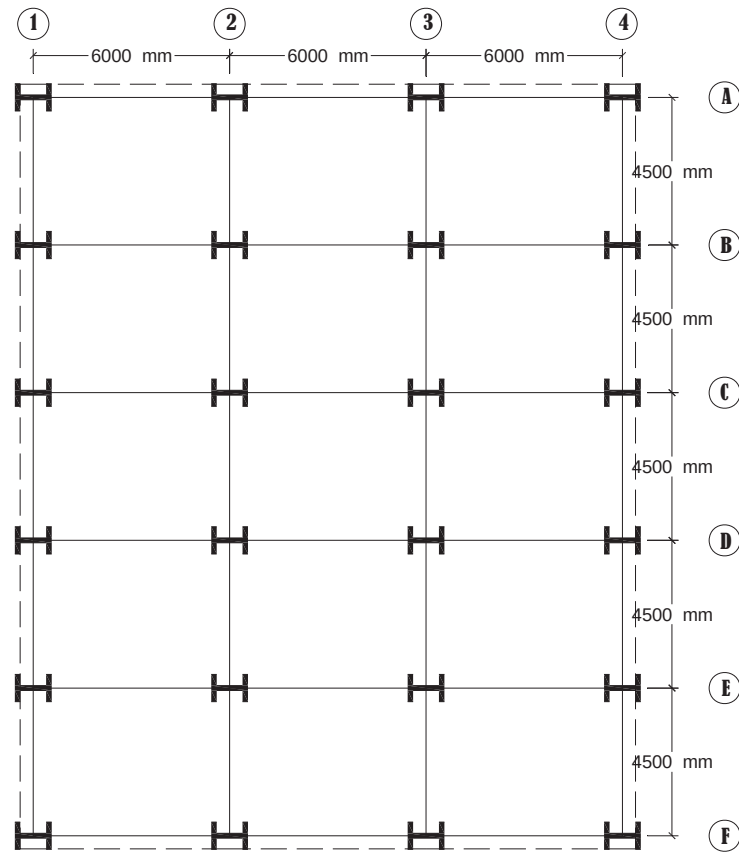


Figura 4.4 Planta del marco analizado de 13 niveles.

Conclusiones

Los registros generados en México claramente siguen la tendencia de la Ley de Omori, en cuanto a los registros gran parte de ellos se desecharon por no contener la información requerida, además de que cuando uno tiene registro de una estación es lógico pensar que todos tienen las mismas componentes, lo cual no es.

En cuanto a la aceleración de las replicas se pensaría que estas tienen unas menores aceleraciones a las registradas en el evento principal, lo cual no es cierto ya que se pudo observar secuencias en las que los valores de las aceleraciones son mayores a las del evento principal aun cuando estas se deriven de un evento con menor magnitud, tal es el caso de la secuencia PAPN850919.

La duración de los evento es importante conocerla mediante la intensidad de Arias ya que a simple vista resulta esto un poco engañoso y se puede pensar que un evento es de corta duración cuando no lo es o el caso contrario, el tener un evento el cual se piensa que es de larga duración cuando este no lo es.

Reconociendo la importancia de las demandas de deformación residual en la decisión de efectuar procesos para reforzamiento de estructuras existentes y en mitigar las deformaciones permanentes potenciales en el diseño de nuevas estructuras, investigadores han sugerido innovar el sistema estructural tal como puentes post-tensionados, columnas de puentes o muros y post-tensionar el acero al momento de las conexiones. Sin embargo existen sistemas estructurales de concreto o sistemas estructurales de acero débiles que son propensos a experimentar deformaciones excesivas permanentes bajo la carga sísmica y tienen un desempeño que no puede ser totalmente caracterizado solamente tomando en cuenta la máxima deformación lateral y descuidando las demandas de deformación permanente (residual) posibles. Además, conceptualmente el prediseño global se acerca al diseño de nuevas estructuras basado sobre el control de las demandas de máxima deformación lo cual no están completamente tomadas si la evaluación de la demanda de deformación permanente y si las restricciones no se incluyen.

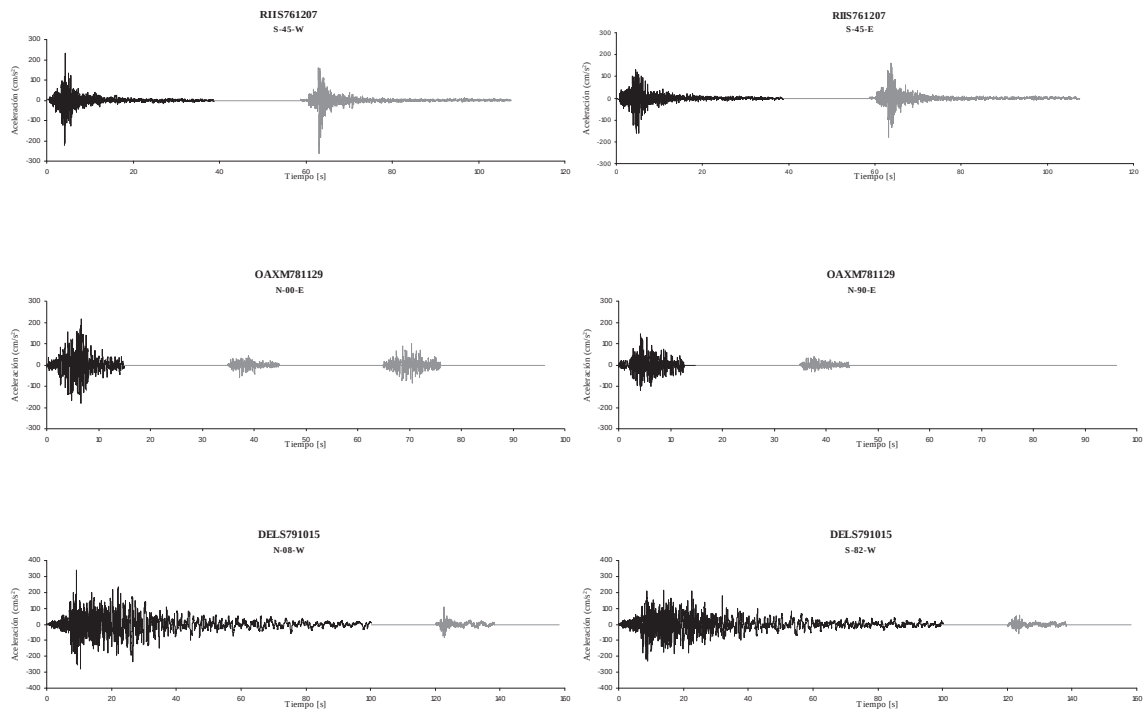
Por lo tanto, una evaluación confiable de las demandas de deformación residual tanto global como local deberían ser explícitamente incorporadas en las metodologías de diseño sísmico basado en desempeño por la valoración en estructuras existentes o en el diseño de nuevas estructuras.

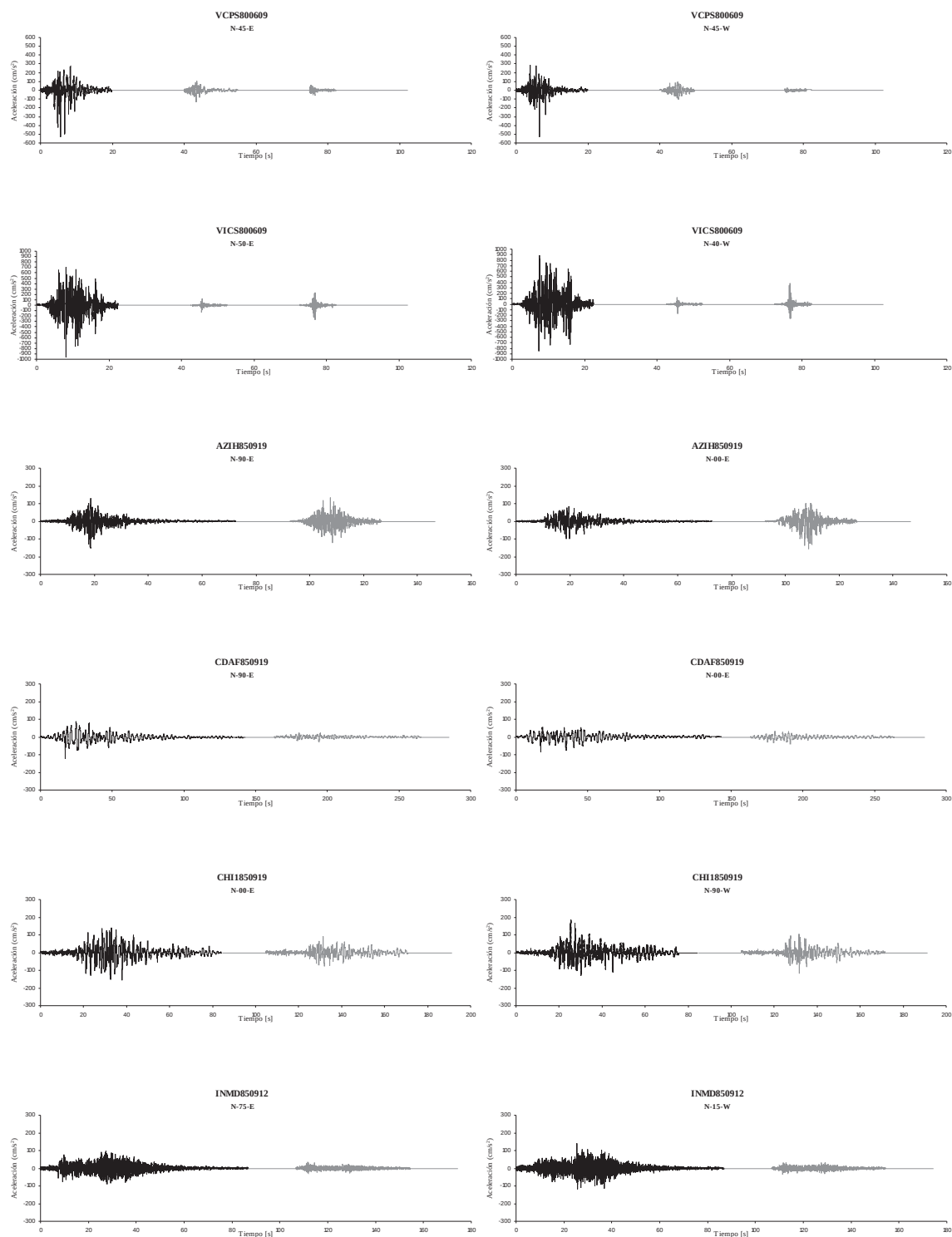
Por todo lo anterior es importante el considerar los eventos sísmicos no como eventos aislados, si no como secuencias, ya que tienen una gran influencia en el comportamiento estructural, como se pudo observar a lo largo de los cuatro capítulos anteriores en los cuales se demuestra que pocas ocasiones resulta benéfico para la estructura el ser expuesta a una replica, por el contrario es común observar que el desplazamiento lateral se incrementa de forma significativa.

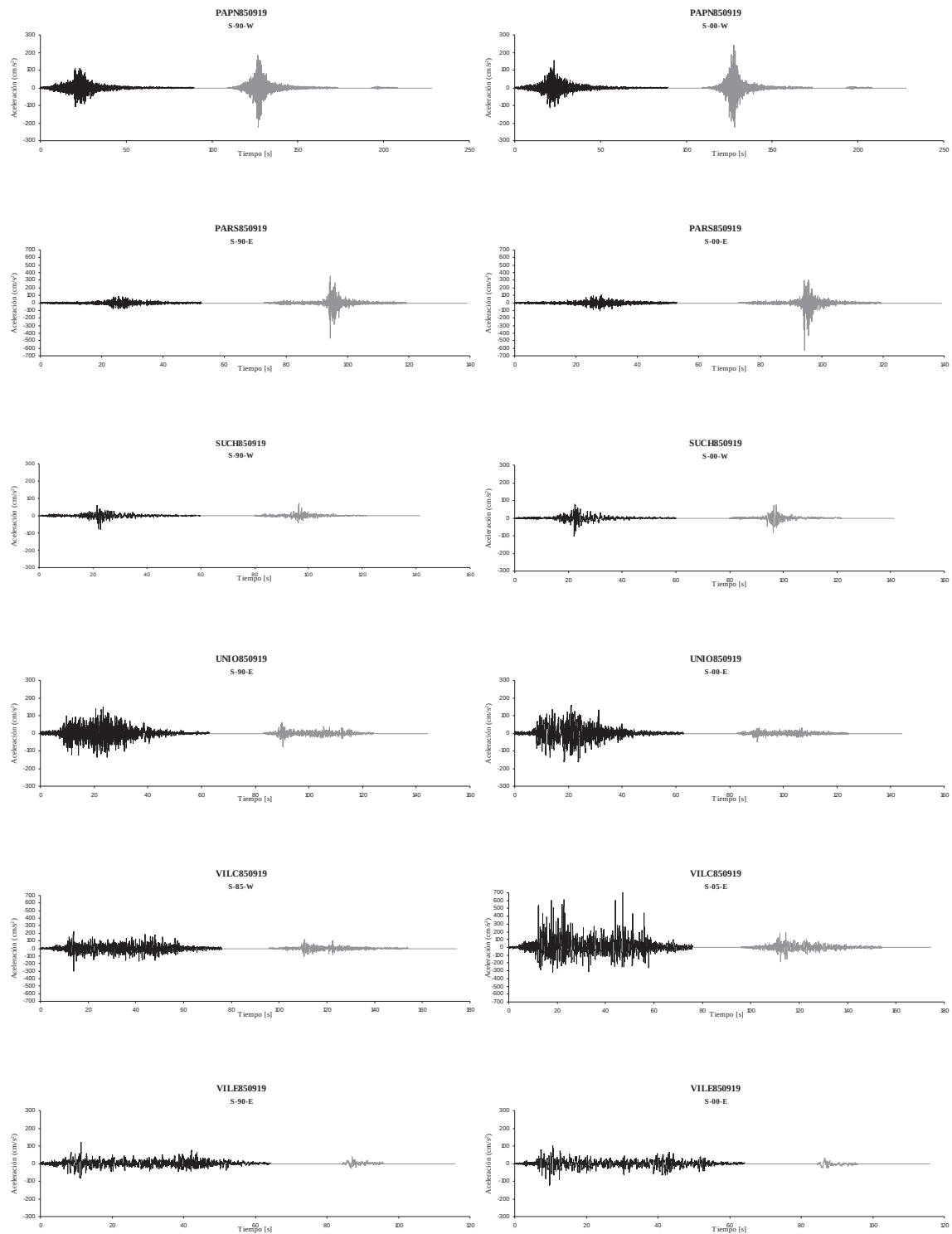
Apéndice

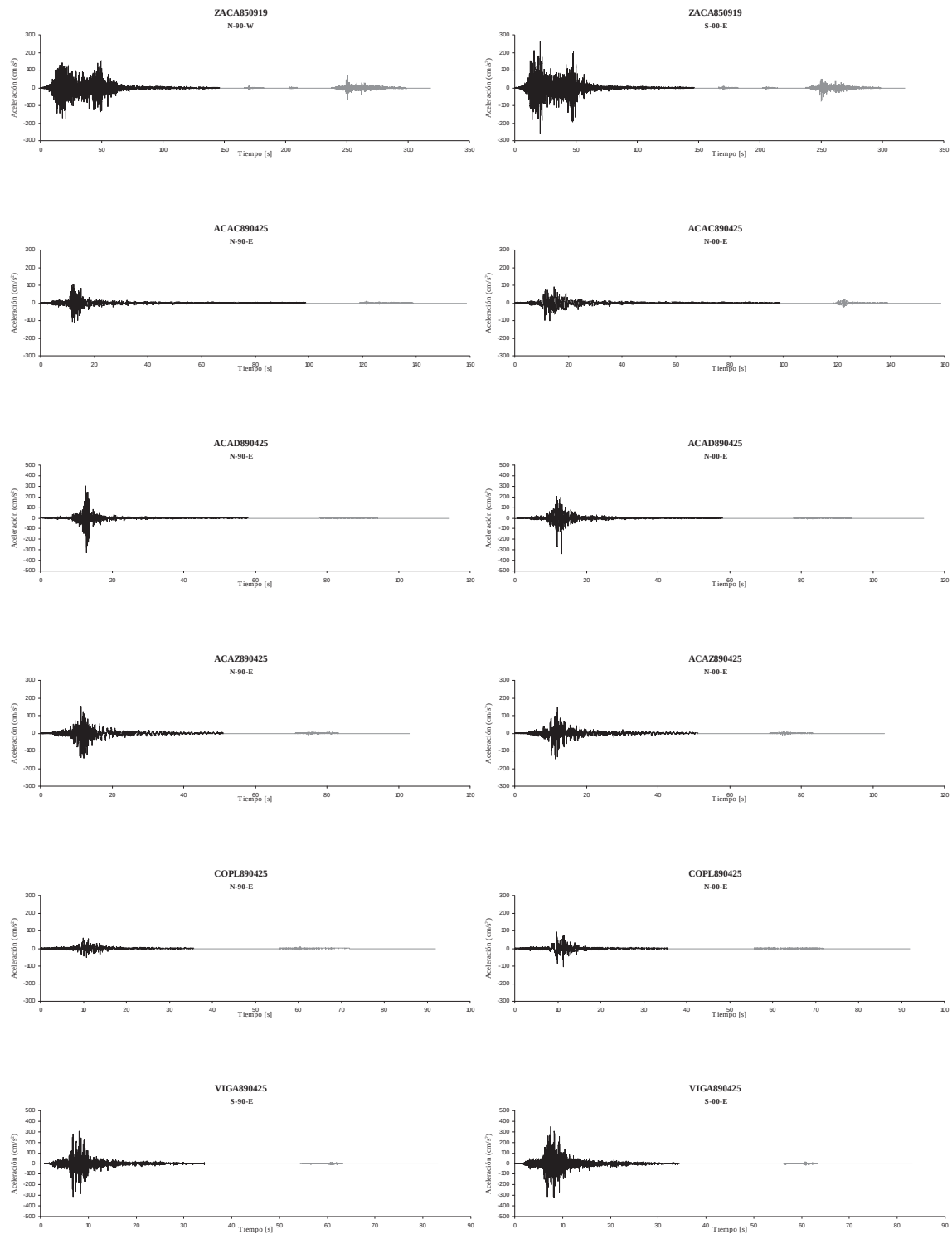


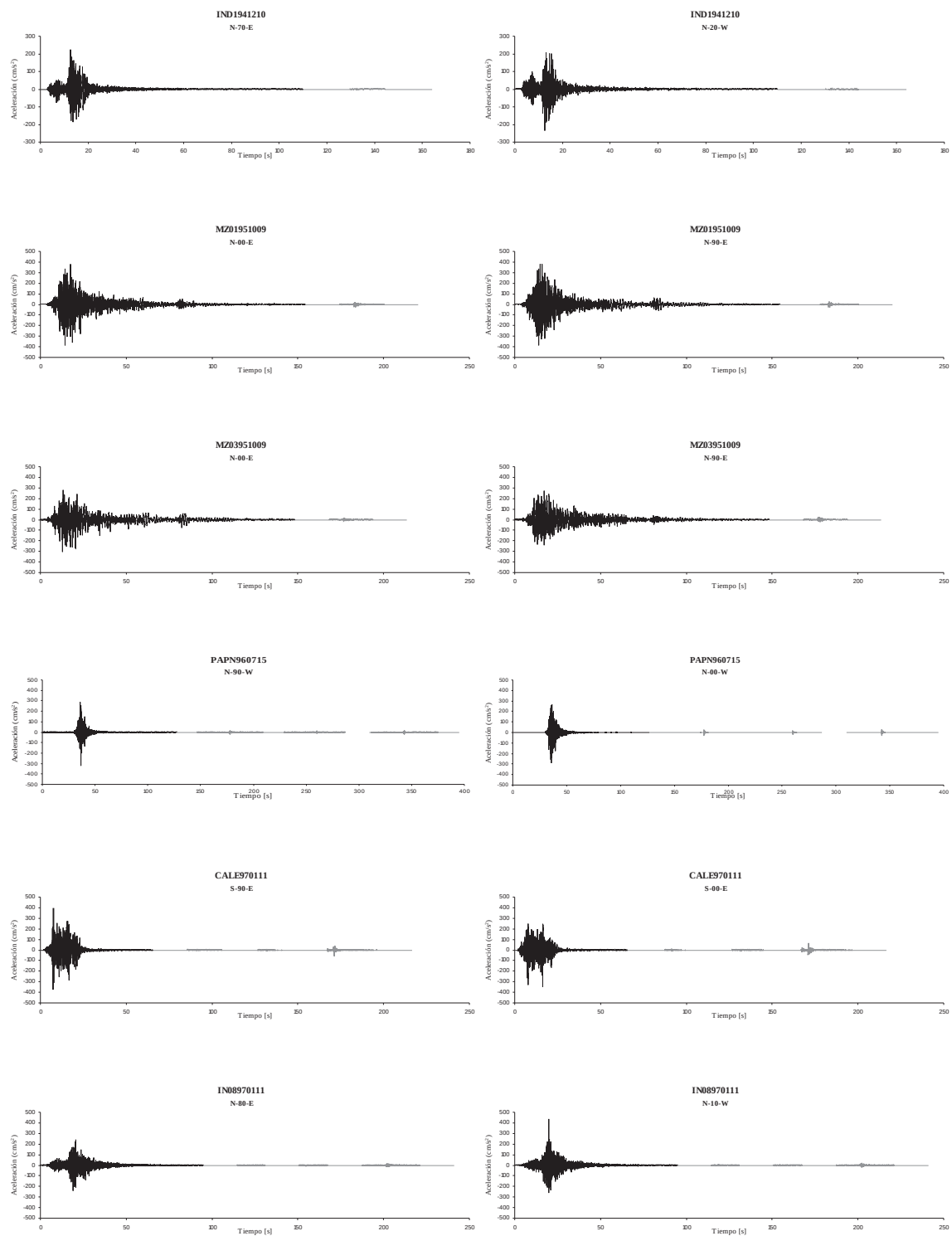
Catálogo de secuencias sísmicas.

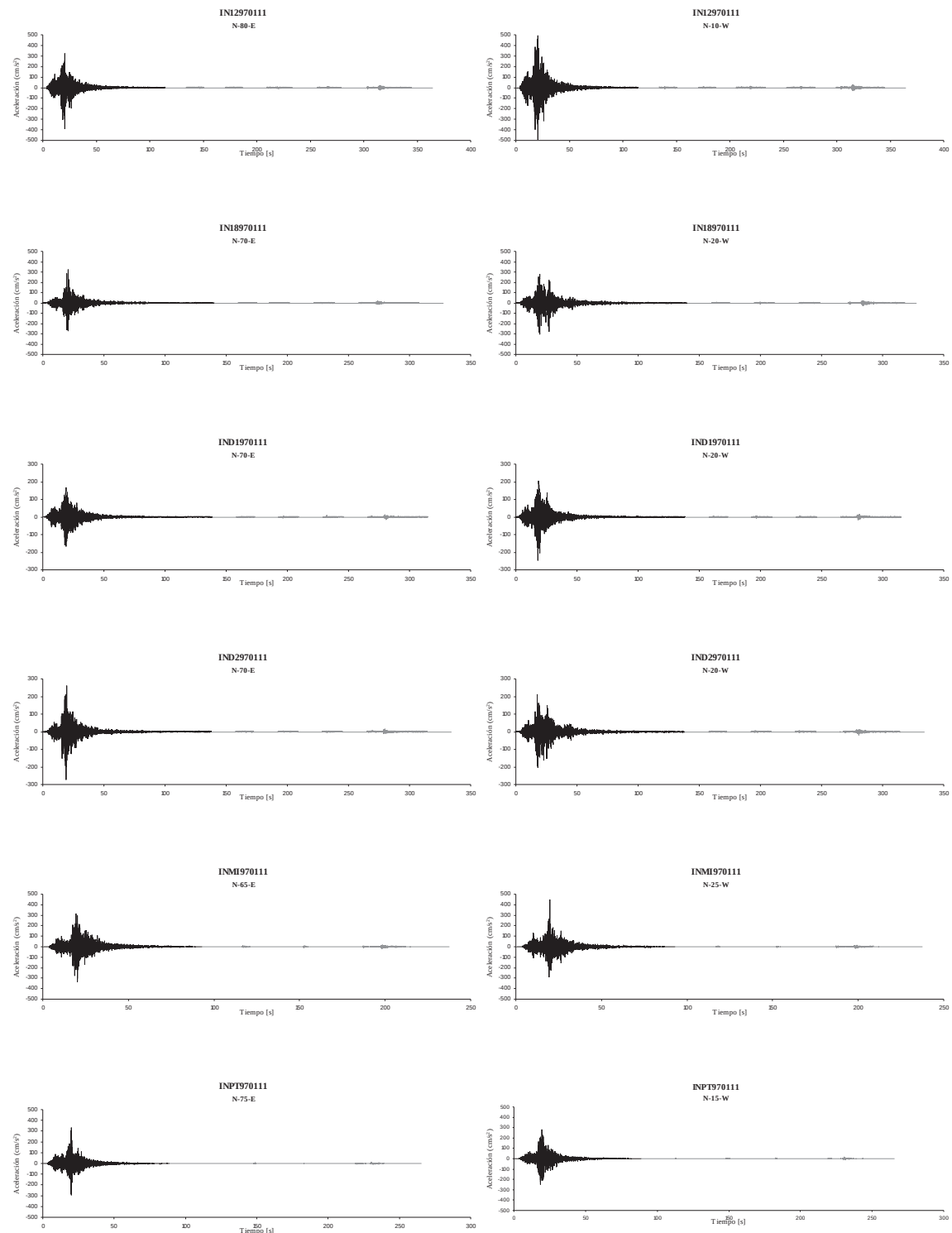


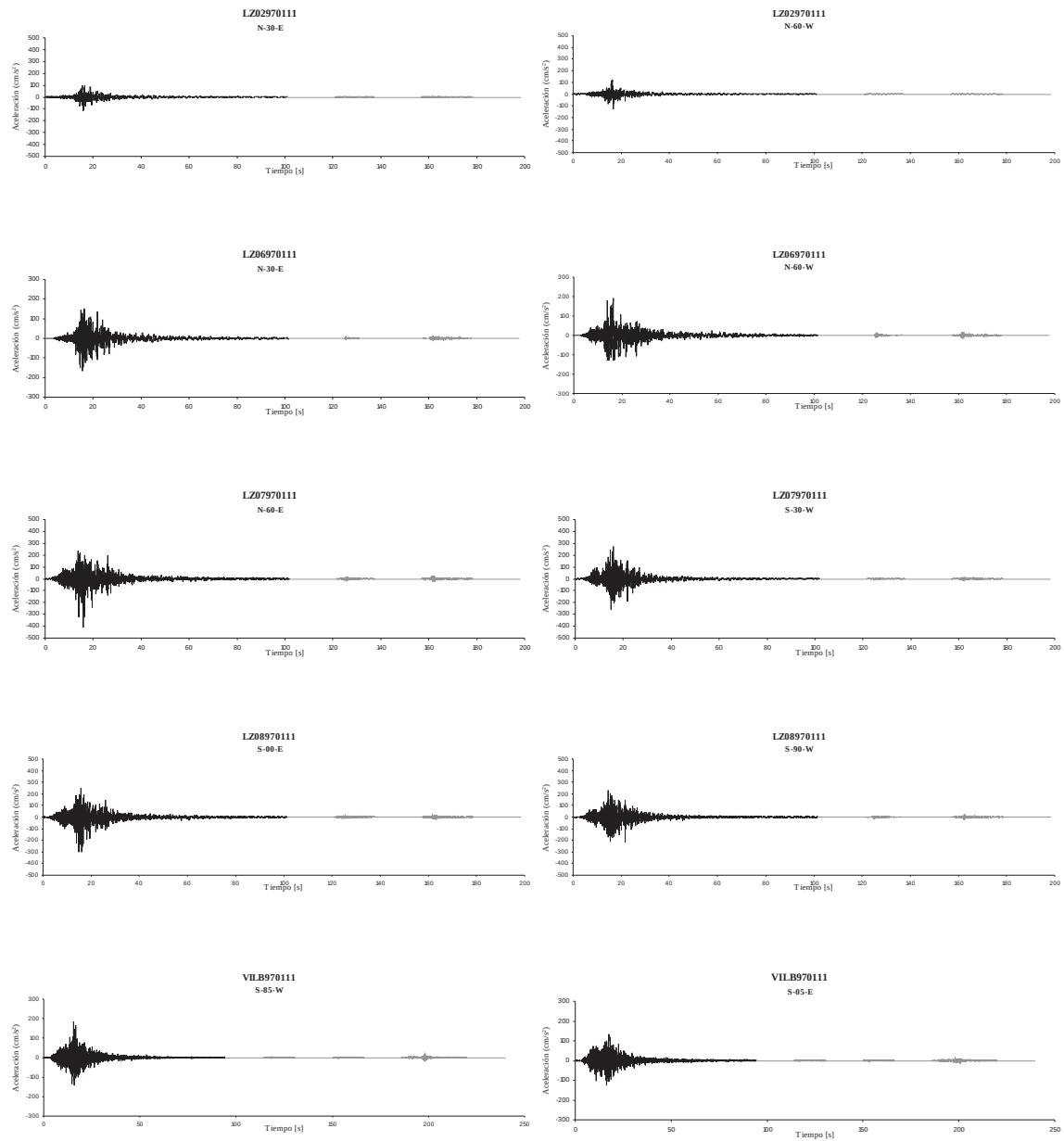


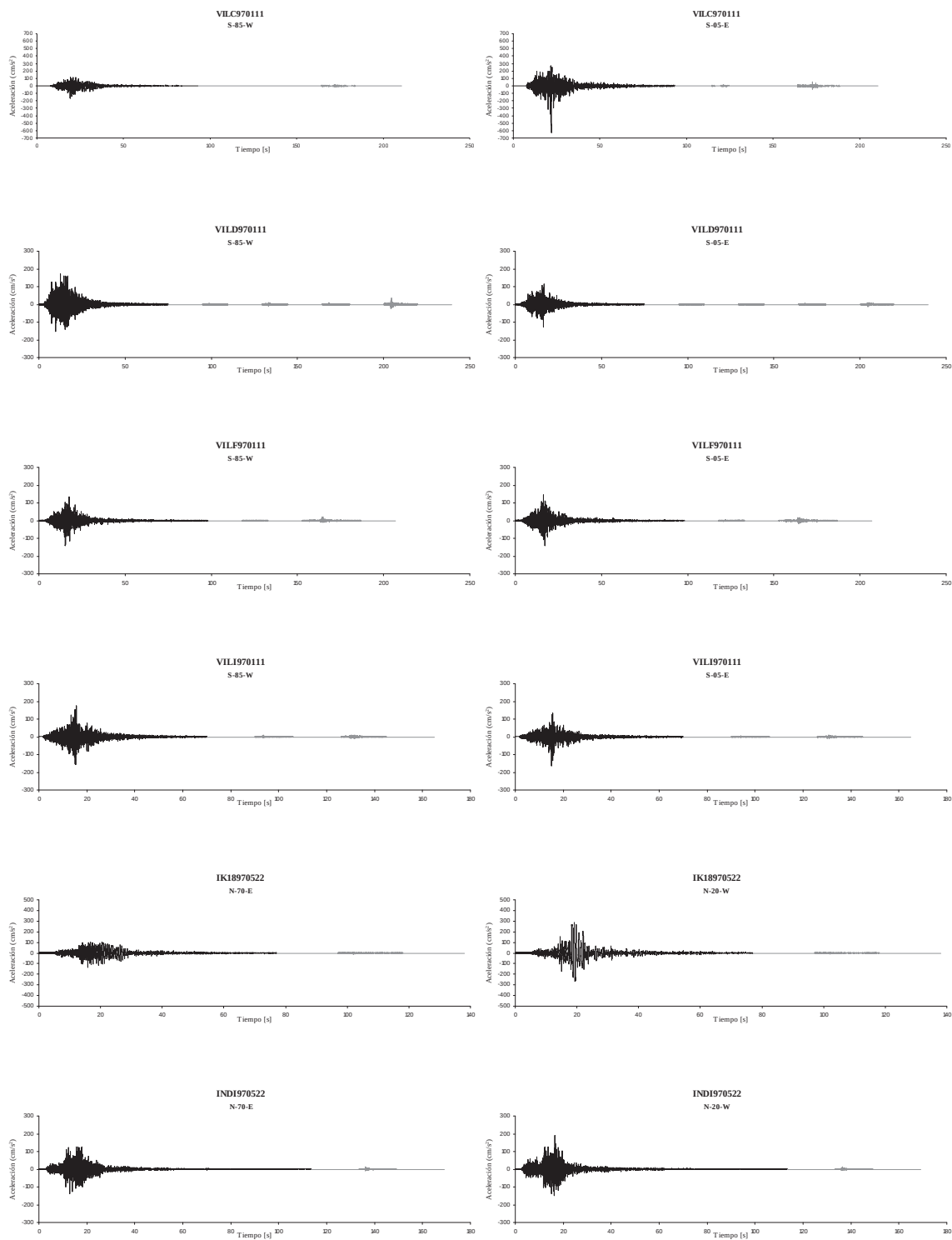


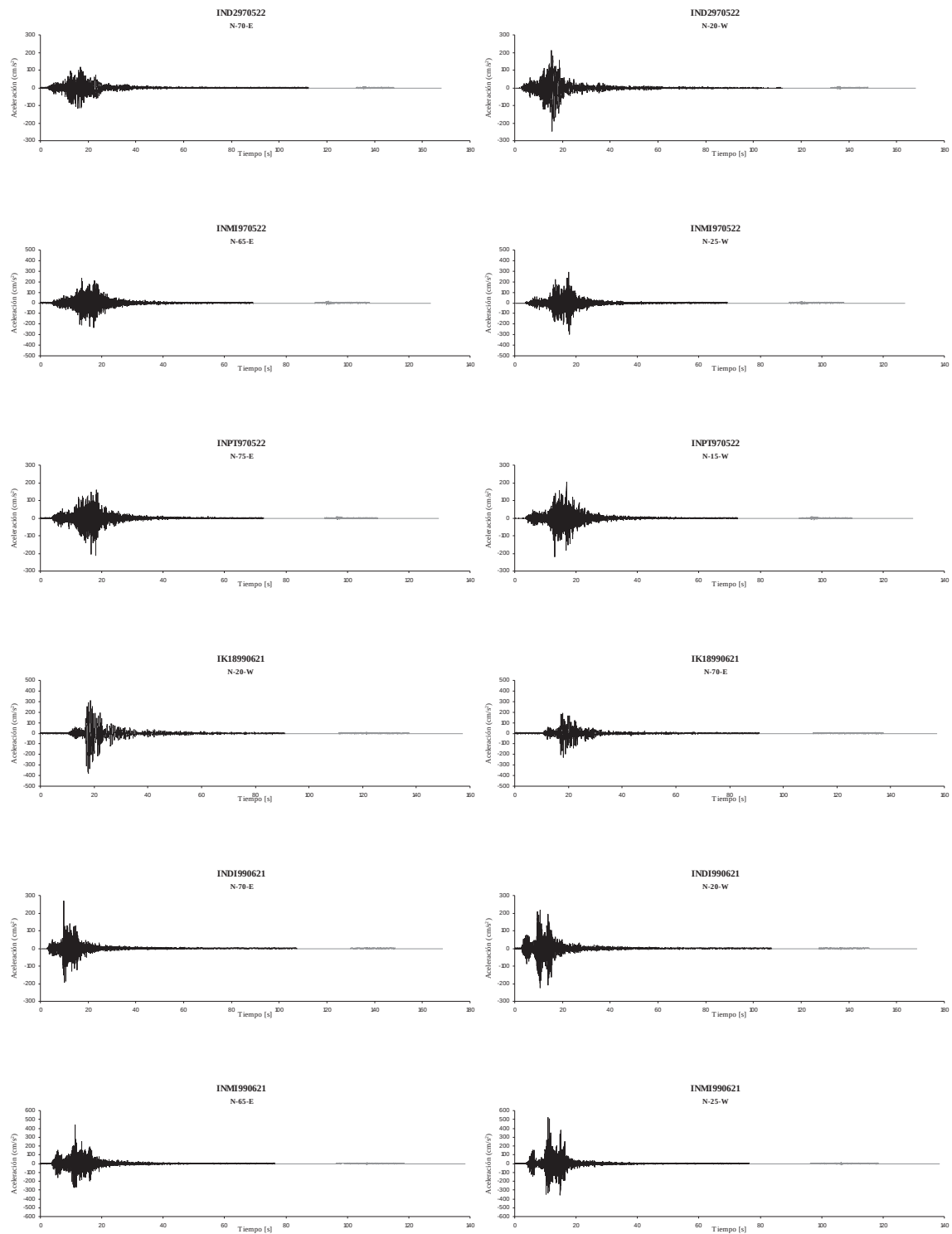


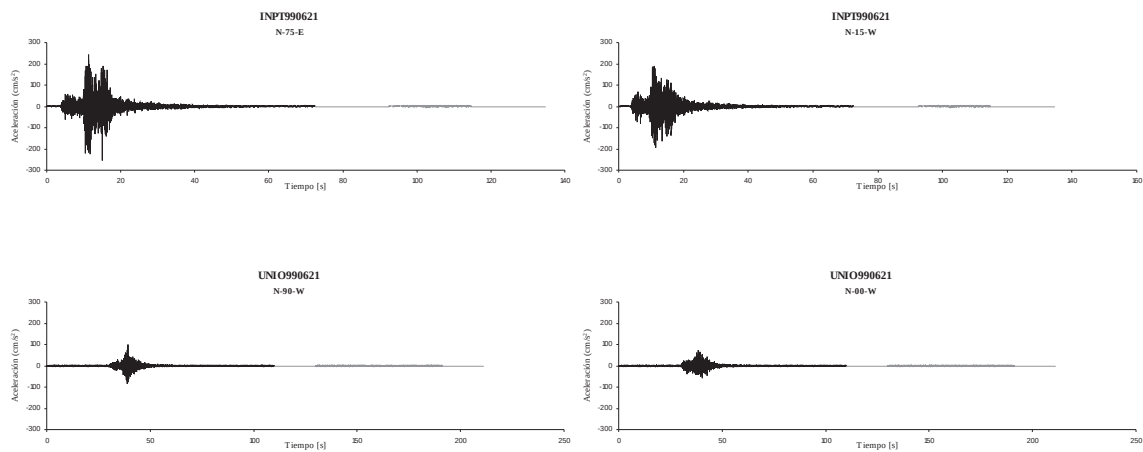












Bibliografía

Ruiz Garcia Jorge (December 2004). "PERFORMANCE-BASED ASSESSMENT OF EXISTING STRUCTURES ACCOUNTING FOR RESIDUAL DISPLACEMENTS"

Gee Like Yeo and C. Allin Cornell (April 2005). "STOCHASTIC CHARACTERIZATION AND DECISION BASES UNDER TIME-DEPENDT AFTERSHOCK RISK IN PERFORMANCE-BASE EARTHQUAKE ENGINEERING"

Lucile M. Jones and Paul A. Reasenberg " SOME FACTS ABOUT AFTERSHOCK TO LARGE EARTHQUAKES IN CALIFORNIA" Seismologists, US Geological Survey USGS Open-file Report 96-266

Catalogo de Acelerogramas 1960-1999 "BASE NACIONAL DE DATOS DE SISMOS FUERTES" Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C.

Wikipedia, enciclopedia "AFTERSHOCK" Octubre 2005.

T. Travararou, J. Bray and N. Abrahamson "EMPIRICAL ATTENUATION RELATIONSHIP FOR ARIAS INTENSITY"