



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL POST-SISMO DE SISTEMAS DE UN GRADO DE
LIBERTAD UBICADOS EN LA ZONA DEL LAGO DEL DISTRITO FEDERAL

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. GABRIEL SÁNCHEZ RODRÍGUEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. AMADOR TERÁN GILMORE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2015.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Bernardo Gómez González
Secretario: Dr. Juan José Pérez Gavilán Escalante
Vocal: Dr. Amador Terán Gilmore
1^{er}. Suplente: Dr. Eduardo Reinoso Angulo
2^{do}. Suplente: M. I. Octavio García Domínguez

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Departamento de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Cd.
Universitaria, Coyoacán, México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Amador Terán Gilmore

FIRMA

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* para la realización de los estudios de maestría que dan origen al presente documento.

Asimismo, se agradece al Dr. Bernardo Gómez González, Dr. Juan José Pérez Gavilán Escalante, Dr. Eduardo Reinoso Angulo y al M.I. Octavio García Domínguez por las observaciones y comentarios que hicieron sobre el mismo, y de manera especial se agradece al Dr. Amador Terán Gilmore, por compartir sus conocimientos, tiempo y atención que hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

“La armonía de las estructuras se rige por su concepción e ingenio aplicado bajo el dominio de leyes naturales”.

Evaluación estructural post-sismo de sistemas de un grado de libertad ubicados en la Zona del Lago del Distrito Federal.

Gabriel Sánchez Rodríguez

Septiembre 2015.

NOTACIÓN

A	Relación entre los periodos del sistema y del suelo
B	Relación entre los periodos del sistema y del suelo
c	Coefficiente de amortiguamiento
c_y	Coefficiente sísmico
c_{yA}	Coefficiente sísmico del primer sistema del modelo trilineal
c_{yB}	Coefficiente sísmico del primer sistema del modelo trilineal
D_y	Desplazamiento de fluencia
D_{MAX}	Desplazamiento máximo del sistema de un grado de libertad
D_{RES}	Desplazamiento residual del sistema de un grado de libertad
DMI_{PA}	Índice de daño de Park y Ang
d_{y1}	Desplazamiento de fluencia del primer sistema del modelo trilineal
d_{y2}	Desplazamiento de fluencia del segundo sistema del modelo trilineal
epd	Endurecimiento por deformación
E_E	Energía de entrada
E_k	Energía cinética que almacena la estructura
E_s	Energía de deformación elástica que almacena la estructura
E_v	Energía disipada por amortiguamiento viscoso
E_h	Energía disipada por comportamiento plástico
E_y	Energía elástica
$E_{h\mu}$	Energía plástica
f_s	Relación de fuerza-desplazamiento
$f_s(u, \dot{u})$	Fuerza restauradora en función del desplazamiento y velocidad
F_l	Carga de fluencia del modelo elastoplástico-perfecto, bilineal y trilineal
F_{Ay}	Fuerza de fluencia del primer sistema elastoplástico del modelo trilineal
F_{By}	Fuerza de fluencia del segundo sistema elastoplástico del modelo trilineal
F_{y1}	Fuerza de fluencia del primer sistema del modelo trilineal integrado
F_{y2}	Fuerza de fluencia del segundo sistema del modelo trilineal integrado
F_y	Fuerza a la primera fluencia
g	Valor de la aceleración de la gravedad igual a 981 cm/s^2
H	Rigidez post-fluencia como porcentaje de la elástica
k	Rigidez del sistema

k_1	Rigidez elástica
k_2	Rigidez post-elástica
k_A	Rigidez de fluencia del primer sistema elastoplástico del modelo trilineal
k_B	Rigidez post-elástica del segundo sistema elastoplástico del modelo trilineal
k_m	Rigidez que ajusta su valor al final del rango elástico para modelar la cedencia paulatina
$k_{elástica}$	Rigidez del sistema en su rango elástico
m	Masa del sistema
m_d	Pendiente de desplazamientos en función del periodo del sistema
m_e	Pendiente de energía plástica normalizada en función del periodo del sistema
N	Número de pisos de la estructura
$NE_{H\mu}$	Energía plástica normalizada
n	Exponente de evolución del sistema desde su comportamiento elástico a uno plástico
$p(t)$	Fuerza externa en el tiempo
R^2	Coefficiente de correlación
T	Periodo natural de vibración del sistema
T_s	Periodo dominante del terreno
u	Desplazamiento del sistema
\dot{u}	Velocidad del sistema
u^t	Desplazamiento total del sistema
\ddot{u}	Aceleración del sistema
$\ddot{u}_g(t)$	Aceleración del terreno en el tiempo
u_{res}	Desplazamiento residual
$ u_{max} $	Desplazamiento lateral máximo de azotea
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \lambda$	Parámetros de ajuste
β	Factor de cargas cíclicas de elementos de comportamiento dúctil
$\beta\Delta y$	Desplazamiento de fluencia del primer sistema del modelo trilineal
δ_y	Desplazamiento a la primera fluencia
Δy	Desplazamiento de fluencia del segundo sistema del modelo trilineal
μ	Ductilidad
μ_u	Capacidad dúctil del sistema
μ_{MAX}	Ductilidad máxima
ξ	Porcentaje de amortiguamiento crítico

ÍNDICE GENERAL

NOTACIÓN	v
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xvi
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivo	1
1.3. Estudios previos	1
1.4. Sistemas bajo consideración	2
1.5. Contravientos Restringidos Contra Pandeo	3
1.6. Zona del Lago del Distrito Federal	7
1.7. Contribución de la tesis	9
2. SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD	10
2.1. Introducción	10
2.2. Sistema de un grado de libertad	10
2.3. Modelo elastoplástico-perfecto	13
2.4. Modelo bilineal	15
2.5. Modelo trilineal	16
3. RELACIÓN ENTRE DESPLAZAMIENTO MÁXIMO Y RESIDUAL	19
3.1. Introducción	19
3.2. Registros Sísmicos	19
3.3. Historia de desplazamiento	21
3.4. Relación entre desplazamiento máximo y residual	22
3.5. Estimación del desplazamiento máximo a partir del residual	30
4. RELACIÓN ENTRE DUCTILIDAD MÁXIMA Y ENERGÍA PLÁSTICA NORMALIZADA	32
4.1. Introducción	32
4.2. Ductilidad	32
4.3. Energía de entrada y plástica	33

4.4.	Relación de ductilidad y energía plástica normalizada	35
4.5.	Estimación de la energía plástica normalizada a partir de la ductilidad máxima	43
5.	ANÁLISIS DE MODELOS BILINEAL Y TRILINEAL	45
5.1.	Introducción	45
5.2.	Efecto de la transición a la fluencia	45
5.3.	Efecto del endurecimiento por deformación en un modelo bilineal	47
5.4.	Efecto del endurecimiento por deformación en un modelo trilineal	52
6.	EVALUACIÓN ESTRUCTURAL POST-SISMO	57
6.1.	Introducción	57
6.2.	Índice de Park y Ang	57
6.3.	Evaluación estructural de sistemas de un grado de libertad	58
7.	CONCLUSIONES	62
	REFERENCIAS	64
	APÉNDICE A	67
	APÉNDICE B	75
	APÉNDICE C	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Parámetros del modelo elastoplástico, (Bouc 1967).	16
Tabla 2.2.	Parámetros del modelo bilineal (Bouc 1967).	17
Tabla 2.3.	Expresiones que definen el modelo trilineal de análisis inelástico.	19
Tabla 2.4.	Parámetros del modelo trilineal (Bouc 1967).	20
Tabla 3.1.	Eventos Sísmicos de estaciones ubicadas en Zona del Lago del Distrito Federal.	22
Tabla 3.2.	Sistemas de 1GL.	23
Tabla 3.3.	Pendientes de medianas de desplazamientos y datos de ajuste.	32
Tabla 3.4.	Comparativa de resultados del análisis de un sistema de un grado de libertad contra los obtenidos con la ecuación 3.5.	36
Tabla 4.1.	Pendientes de medianas de ductilidad y energía plástica normalizada.	48
Tabla 4.2.	Comparativa de resultados del análisis de un sistema de un grado de libertad contra los obtenidos con la ecuación 4.6.	52
Tabla 6.1.	Evaluación del nivel de daño de un sistema de 1GL de 1 segundo de periodo	79
Tabla 6.2.	Evaluación del nivel de daño de un sistema de 1GL de 2 segundos de periodo.	80
Tabla 6.3.	Evaluación del nivel de daño de un sistema de 1GL de 3 segundos de periodo.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Demandas de corte en vigas de crujía con contraviento Chevron a) Antes y b) Después del pandeo, Coeto G. (2008).	4
Figura 1.2.	Comportamiento histerético de contraviento restringido contra pandeo y contraviento tradicional.	4
Figura 1.3.	Contraviento desadherido restringido contra pandeo, Arroyo D. et al (2009).	5
Figura 1.4.	Geometría de contraviento restringido contra pandeo.	6
Figura 1.5.	Edificios con contravientos restringidos contra pandeo, a) Kaiser Vallejo Mediacar Center, California, b) Edificio de la Universidad de California UCSF, San Francisco, Cal. (CoreBrace).	7
Figura 1.6.	Proyecto de refuerzo estructural con contravientos restringidos contra pandeo del edificio G de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, montaje fotográfico.	7
Figura 1.7.	Zona del Lago del Distrito Federal y estaciones acelerométricas.	8
Figura 1.8.	Acelerogramas registrados el 19 de Septiembre de 1985 a) Zona Epicentral (estación Zacatula); b) Tacubaya (Zona de Lomas); c) SCT (Zona del Lago), Coeto (2008).	9
Figura 2.1.	Sistema de un grado de libertad: a) fuerza aplicada $p(t)$; b) movimiento del (sismo), Chopra (2014).	12
Figura 2.2.	Relación lineal fuerza-desplazamiento carga y descarga del sistema.	13
Figura 2.3.	Relación fuerza-deformación para un elemento estructural de acero, Chopra (2014).	14
Figura 2.4.	Modelos estructurales inelásticos: a) comportamiento plástico general, b) Idealización de comportamiento elastoplástico, Paz (1992).	14
Figura 2.5.	Relación fuerza-desplazamiento elastoplástica-perfecta.	15
Figura 2.6.	Modelo elástico y elastoplástico conectados en paralelo para formar el modelo bilineal.	17
Figura 2.7.	Sistemas elastoplásticos A y B, y sistema integrado trilineal.	18
Figura 2.8.	Modelos elastoplásticos conectados en paralelo para formar el modelo trilineal.	19

Figura 3.1.	Sismo 7, a) Registro sísmico S7-SCT850919EW-SCT, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.	23
Figura 3.2.	Historia de la respuesta de desplazamiento del sismo 7 SCT-EW.	24
Figura 3.3.	Comparativa de resultados con DEGTRA y EPPCONRESEPD del análisis de desplazamientos de un sistema de 1GL de T=2 s sometido al sismo 2.	25
Figura 3.4.	Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de T=2s sometido al sismo 7 y factor de escala de 0.025 para 100 iteraciones, y ajuste por interpolación.	26
Figura 3.5.	Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de T=1 s sometido a sismos de suelo blando y la curva con línea solida representa la mediana del desplazamiento residual.	27
Figura 3.6.	Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de T=2 s sometido a sismos de suelo blando y la curva con línea solida representa la mediana del desplazamiento residual.	27
Figura 3.7.	Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de T=3 s sometido a sismos de suelo blando y la curva con línea solida representa la mediana del desplazamiento residual.	28
Figura 3.8.	Medianas que relacionan D_{MAX} contra D_{RES} de diferentes S1GL sometidos sismos de suelo blando.	29
Figura 3.9.	Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de T=1.00 s.	31
Figura 3.10.	Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de T=2.00 s.	31
Figura 3.11.	Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de T=3.00 s.	32
Figura 3.12.	Datos dispersos y función de ajuste para md.	34
Figura 4.1.	Entrada de Energía Sísmica y Balance de Energía, Giunco y Mazolani (2002)	40
Figura 4.2.	Sistema de un grado de libertad de comportamiento elastoplástico al someterse a un sismo de suelo blando.	41

Figura 4.3.	Ductilidad contra Energía Histerética Normalizada, para un sistema de un grado de libertad de $T=2s$ sometido al sismo 8 y factor de escala de 0.088 para 100 iteraciones.	42
Figura 4.4.	Ductilidad contra energía histerética normalizada de un sistema de 1GL de $T=1$ s sometido a sismos de suelo blando y la curva solida representa la mediana de energía plástica normalizada.	43
Figura 4.5.	Ductilidad contra energía histerética normalizada de un sistema de 1GL de $T=2$ s sometido a sismos de suelo blando y la curva solida representa la mediana de energía plástica normalizada.	44
Figura 4.6.	Ductilidad contra energía histerética normalizada de un sistema de 1GL de $T=3$ s sometido a sismos de suelo blando y la curva solida representa la mediana de energía plástica normalizada.	44
Figura 4.7.	Medianas de ductilidad y energía histerética normalizada de diferentes sistemas de un grado de libertad sometidos a varios sismos de suelo blando.	45
Figura 4.8.	Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ de un sistema de 1GL de $T=1.00$ s.	46
Figura 4.9.	Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ de un sistema de 1GL de $T=2.00$ s.	47
Figura 4.10.	Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ de un sistema de 1GL de $T=3.00$ s.	47
Figura 4.11.	Datos dispersos y función de ajuste para m_e .	50
Figura 5.1.	Modelo elastoplástico-perfecto con y sin cedencia gradual.	55
Figura 5.2.	Tendencias de medianas con ajuste del punto de cedencia, a) Relación de D_{MAX} contra D_{RES} , b) Relación de Ductilidad μ contra $NE_{H\mu}$.	57
Figura 5.3.	Modelos de análisis de endurecimiento por deformación, a) Comportamiento bilineal y b) Comportamiento trilineal.	58
Figura 5.4.	Comparativa de medianas de desplazamientos máximos y residuales para diferentes valores de epd del modelo bilineal. a) Sistema de 1GL de $T=1s$ y b) Sistema de 1GL de $T=1.5s$.	58
Figura 5.5.	Comparativa de medianas de desplazamientos máximos y residuales para diferentes valores de epd del modelo bilineal. a) Sistema de 1GL	60

de T=2s y b) Sistema de 1GL de T=3s.

- Figura 5.6.** Comparativa de medianas de desplazamientos máximos y residuales para diferentes valores de epd del modelo bilineal para un sistema de 1GL de T=4s. 61
- Figura 5.7.** Comparativa de medianas de ductilidad y energía histerética normalizada para diferentes valores de epd del modelo bilineal. a) Sistema de 1GL de T=1s y b) Sistema de 1GL de T=1.5s. 62
- Figura 5.8.** Comparativa de medianas de ductilidad y energía histerética normalizada para diferentes valores de epd del modelo bilineal. a) Sistema de 1GL de T=2s y b) Sistema de 1GL de T=3s. 63
- Figura 5.9.** Comparativa de medianas de ductilidad y energía histerética normalizada para diferentes valores de epd del modelo bilineal para un sistema de 1GL de T=4s. 64
- Figura 5.10.** Tendencia de medianas de desplazamientos con diferentes valores de endurecimiento por deformación, a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de T=1s y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de T=1s. 65
- Figura 5.11.** Tendencia de medianas de desplazamientos con diferentes valores de endurecimiento por deformación, a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de T=2s y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de T=2s. 65
- Figura 5.12.** Tendencia de medianas de desplazamientos con diferentes valores de endurecimiento por deformación, a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de T=3s y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de T=3s. 66
- Figura 5.13.** Tendencia de medianas de desplazamientos con diferentes valores de endurecimiento por deformación, a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de T=4s y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de T=4s. 67
- Figura 5.14.** Tendencia de medianas de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ para: a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de T=1s y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de T=1s. 67
- Figura 5.15.** Tendencia de medianas de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ para: a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de T=2s y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de T=2s. 68
- Figura 5.16.** Tendencia de medianas de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ para: a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de T=3s y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de T=3s. 69
- Figura 5.17.** Tendencia de medianas de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ para: a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de T=4s y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de T=4s. 70

El objetivo de este trabajo de investigación consiste en sentar las bases para la formulación de una metodología de evaluación estructural post-sismo, que permita conocer el nivel de daño estructural en contravientos restringidos contra pandeo usados para rigidizar sistemas estructurales conformados por marcos de acero resistentes a momento. A sugerencia del comité que evaluó el informe del avance del tema de tesis, se decidió limitar el estudio a sistemas de un grado de libertad ubicados en la Zona del Lago del Distrito Federal.

Del estudio de la respuesta dinámica de sistemas de un grado de libertad, se estudia la relación que existe entre el desplazamiento máximo experimentado por una estructura de acero durante una excitación sísmica, y el desplazamiento residual que exhibe después del sismo. Se analiza además la relación que existe entre la demanda máxima de ductilidad desarrollada por el sistema, y la energía plástica que disipa durante la excitación. A partir de ella, se establecen expresiones que estiman las demandas de desplazamiento máximo y de energía plástica a partir del desplazamiento residual. Se incluyen estudios realizados en sistemas de un grado de libertad con tres tipos de comportamientos histeréticos: A) elastoplástico-perfecto; B) bilineal con endurecimiento por deformación; y C) trilineal. Los comportamientos se consideran representativos de la respuesta dinámica no lineal de sistemas estructurales de acero con diferentes características, incluido el caso de marcos de acero rigidizados con contravientos restringidos contra pandeo.

Esta tesis se organiza en 7 capítulos conforme a lo siguiente:

El **capítulo 1** describe brevemente los antecedentes y objetivo del trabajo de investigación. Para ello discute el comportamiento de sistemas estructurales de acero, y el uso de contravientos restringidos contra pandeo. Además, se describen las características de la Zona del Lago del Distrito Federal, y de los movimientos del terreno que ahí se generan. Finalmente, se menciona la contribución de la tesis.

El **capítulo 2** discute el concepto de sistema de un grado de libertad, y la manera en que se establece su respuesta dinámica cuando se le sujeta a la acción de un movimiento del terreno. Se contemplan en la discusión los diferentes comportamientos histeréticos bajo consideración en la tesis.

El **capítulo 3** propone una expresión matemática que relaciona la demanda máxima de desplazamiento con el desplazamiento residual en sistemas de un grado de libertad con comportamiento elastoplástico-perfecto y sujetos a la acción de movimientos del terreno

registrados en la Zona del Lago. En un contexto similar, el **capítulo 4** establece una expresión que relaciona la máxima demanda de ductilidad con la energía plástica.

El **capítulo 5** estudia cómo influye el tipo de comportamiento histerético en las relaciones existentes entre las demandas sísmicas bajo consideración en los capítulos 3 y 4.

El **capítulo 6** introduce una metodología para evaluar el nivel de daño en sistemas de un grado de libertad de acero, e ilustra su uso mediante varios ejemplos. Por último, el **capítulo 7** presenta las conclusiones del trabajo.

ABSTRACT

The objective of this research is to establish the basis for the formulation of a methodology for post-earthquake structural assessment, which allows to know the level of structural damage on buckling-restrained braces that are used to stiffen structural systems comprised of moment-resistant steel frames. From the study of the dynamic response of one degree of freedom systems, the relationship between the maximum displacement experienced by a steel structure during a seismic excitation, and the residual displacement that occurs after the earthquake is studied. The relationship between the maximum ductility demand developed by the system, and the plastic energy dissipated during arousal was also analyzed. From these, expressions are established to estimate the maximum displacement and plastic energy from residual displacement. It includes studies in systems with one degree of freedom with three types of hysteretic behaviors: A) perfect elasto-plastic; B) with bilinear strain hardening; and C) trilinear. The behaviors are considered representative of the nonlinear dynamic response of steel structural systems with different characteristics, including the case of stiffened steel frames with bracings restricted against buckling.

ANTECEDENTES

1.1. Introducción

El presente capítulo aporta al lector un panorama general del trabajo de investigación. En principio se da a conocer el objetivo general. Entre otras cosas se introduce el concepto de contraviento restringido contra pandeo y se discute su uso en edificios. Además, se comentan las características de los suelos ubicados en la Zona del Lago del D.F., y se discute la contribución de esta tesis.

1.2. Objetivo

Sentar las bases que permitan formular una metodología de evaluación estructural post-sismo que aplique al caso de estructuras de acero, y que permita establecer, a partir de las deformaciones residuales medidas en campo, el nivel de daño en contravientos restringidos contra pandeo.

1.3. Estudios Previos

A raíz de los elevados niveles de pérdidas económicas y humanas observados después de la ocurrencia de eventos sísmicos intensos, como los de Michoacán 1985, Northridge 1994 y Kobe 1995; se ha planteado la necesidad de proveer a los sistemas estructurales dispositivos capaces de disipar grandes cantidades de energía histerética de manera estable (Wada et al. 2004). Un planteamiento promisorio es el uso de sistemas de control, que pueden clasificarse, según el tipo de control que ofrecen, en: A) Activos, B) Semi-activos y C) Pasivos. En este trabajo de investigación se hace consideración de dispositivos de control pasivo; en particular de contravientos restringidos contra pandeo.

Una de las tendencias actuales de la ingeniería sísmica se da alrededor de plantear enfoques de diseño y evaluación basados en desplazamiento, y dentro de este contexto, esta tesis propone sentar las bases que permitan más adelante formular una metodología de evaluación post-sismo para sistemas de acero rigidizados con contravientos restringidos contra pandeo. El planteamiento se centra en estimar en el sistema estructural de acero, a partir de las deformaciones residuales medidas en campo después de la excitación sísmica, el desplazamiento máximo y la energía plástica disipada por los contravientos durante dicha excitación, y en función de estas demandas, determinar su probable nivel de daño. Vale la pena mencionar que a la fecha, no se han hecho propuestas en esta dirección.

Entre los muy pocos estudios realizados con el fin de estimar las demandas máximas de distorsión en función de las distorsiones residuales, se encuentra el llevado a cabo por Christidis *et al.* (2013). En él se proponen expresiones para determinar el desplazamiento máximo de azotea a partir del desplazamiento residual medido en sistemas estructurales de acero. La propuesta considera lo siguiente:

- En marcos de acero resistentes a momento, el desplazamiento máximo de azotea puede determinarse como:

$$|u_{\max}| = (-0.053 + 0.109 \ln(N) + 1.61 |u_{\text{res}}|) (1 + 2.0H) \quad (1.1)$$

- En marcos de acero rigidizados con contravientos concéntricos dispuestos en X , el desplazamiento máximo de azotea se puede estimar como:

$$|u_{\max}| = (-0.071 + 0.076 \ln(N) + 0.865 |u_{\text{res}}|) (1 + 0.04H) \quad (1.2)$$

donde u_{\max} es el desplazamiento lateral máximo de azotea; u_{res} , el correspondiente desplazamiento residual; N , el número de pisos de la estructura; y H , la rigidez post fluencia como porcentaje de la elástica.

1.4. Sistemas bajo consideración

El planteamiento de las bases para la metodología de evaluación requiere establecer la respuesta dinámica de sistemas de un grado de libertad (1GL) que modelen el comportamiento no lineal de sistemas estructurales de acero cuando se les sujeta a la acción de movimientos del terreno registrados en la Zona del Lago del Distrito Federal.

Dado que la tesis se enfoca al comportamiento de sistemas de acero, los ciclos histéricos bajo consideración son: A) elastoplástico-perfecto; B) bilineal con endurecimiento por deformación; y C) Trilineal. Las particularidades en cuanto al comportamiento de estos sistemas se discute en detalle en el capítulo 2.

1.5. Contravientos Restringidos Contra Pandeo

Aunque los sistemas de contraviento tradicionales aportan resistencia y rigidez lateral a los sistemas estructurales resistentes a sismo, hasta la fecha no ha sido posible detallarlos para estabilizar su respuesta no lineal una vez que se pandean (Bertero *et al.* 1994). La debilidad estructural de un contraviento tradicional se presenta cuando debe acomodar esfuerzos o deformaciones importantes de compresión. Por lo general, las relaciones de esbeltez usadas en la práctica resultan en el pandeo del contraviento, de tal manera que su resistencia a compresión suele ser mucho menor que aquella correspondiente a tensión. Además de la degradación inaceptable de los ciclos de histéresis de los contravientos, su pandeo puede resultar, como muestra la figura 1.1, en la inducción de fuerzas cortantes excesivas en las vigas de un marco.

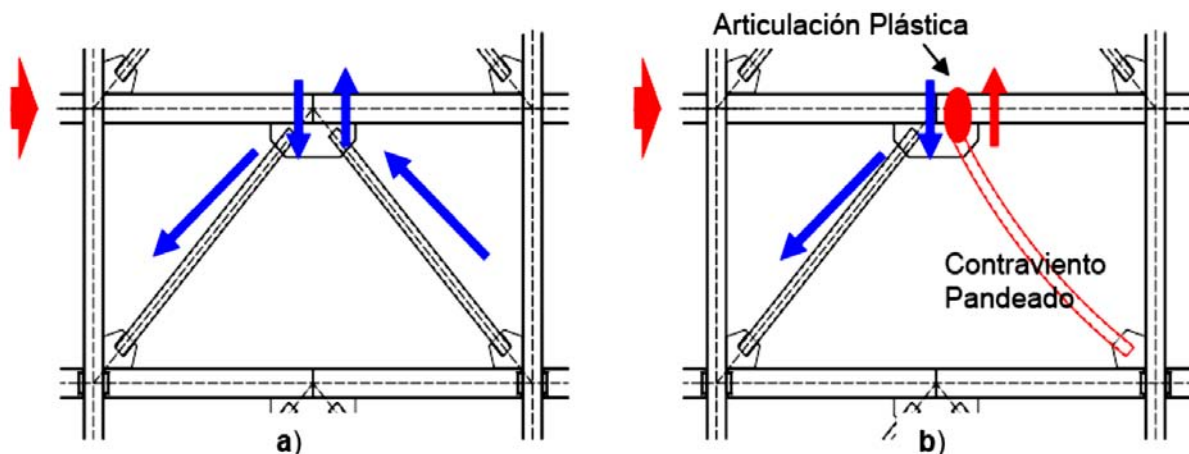


Figura 1.1. Demandas de corte en vigas de crujía con contraviento Chevron a) Antes y b) Después del pandeo, Coeto G. (2008).

Desde principios de los años ochenta se han desarrollado contravientos restringidos contra pandeo (buckling restrained braces), capaces de exhibir un comportamiento plástico estable a compresión y tensión. Debido a lo anterior, dichos contravientos son capaces, conforme a lo

mostrado en la figura 1.2, de desarrollar ductilidades muy altas, y exhibir ciclos histeréticos amplios, estables y simétricos.

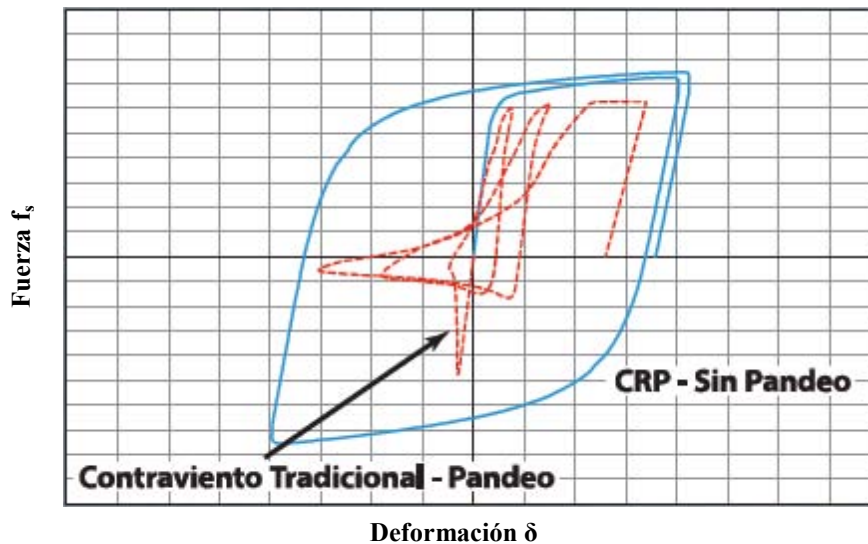


Figura 1.2. Comportamiento histerético de contraviento restringido contra pandeo y contraviento tradicional.

Conforme a lo mostrado en la figura 1.3, el trabajo de un contraviento restringido contra pandeo queda basado en la restricción que a la deformación fuera del plano del núcleo aporta un perfil tubular de acero relleno de un material confinante (mortero o concreto). Para evitar que la capacidad de compresión del contraviento sea mayor que su capacidad a tensión, se aplica un material desadherente al núcleo para eliminar o reducir la transferencia de esfuerzos de fricción con el material confinante. Con este fin se han usado diferentes materiales, tal como pinturas asfálticas, vinilos, caucho, silicón, teflón y combinación de los anteriores. El agente desadherente debe: A) evitar la transferencia de esfuerzos por fricción; B) proporcionar suficiente espacio libre para la expansión del núcleo cuando éste trabaje a compresión; C) evitar el deslizamiento de la camisa y material confinante cuando el núcleo trabaje a tensión; y D) ser de fácil adquisición y aplicación.

Vale la pena resaltar que a pesar de que se logre una desadherencia completa, la resistencia a compresión del contraviento desadherido siempre es un poco mayor que la correspondiente a tensión. En la figura 1.3 se ilustra esquemáticamente un contraviento restringido contra pandeo.

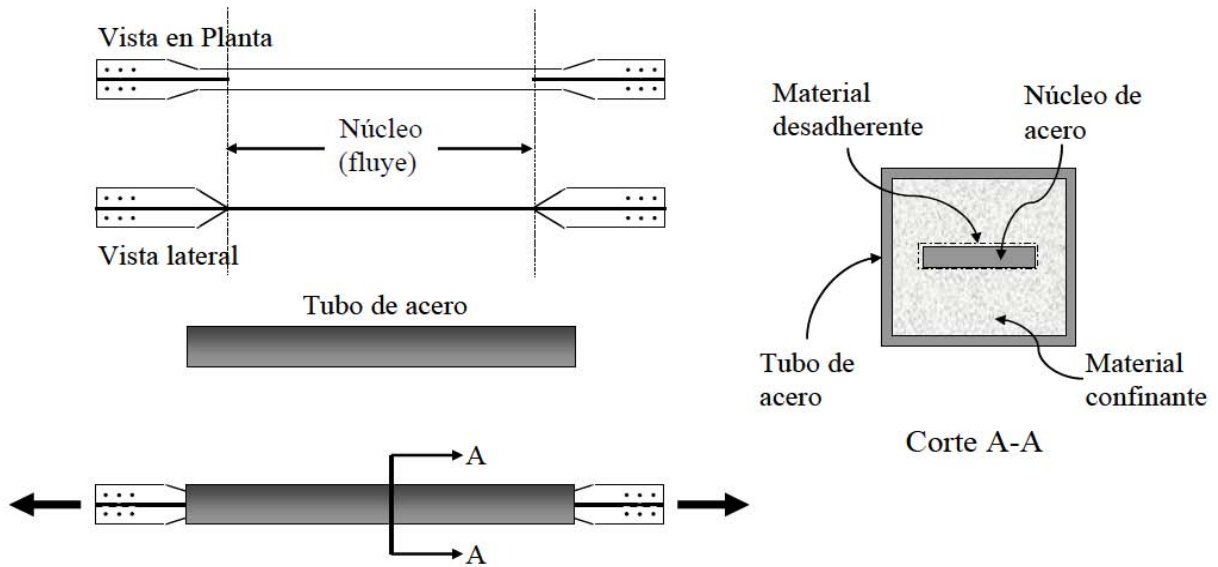


Figura 1.3. Contraviento desadherido restringido contra pandeo, Arroyo D. et al (2009).

En la figura 1.4 se ofrece un detalle típico de las tres zonas presentes en la geometría de un contraviento restringido contra pandeo. La primera, denotada *de no fluencia sin soportar* se ubica en la zona de conexión del contraviento con la placa de soporte del marco. Esta zona no se restringe contra pandeo mediante la camisa, de tal manera que debe diseñarse para que no pandee a compresión ni fluya a tensión. La segunda zona, denotada *de no fluencia soportada*, constituye una transición entre la zona de conexión y el núcleo del contraviento, de tal manera que su área transversal es mayor que la del núcleo para evitar su fluencia. La tercera zona, denotada *zona de fluencia* debe concentrar la plasticidad del contraviento, de tal manera que se encuentra totalmente restringida por la camisa y desadherida del material confinante (Uang y Nakashima 2004).

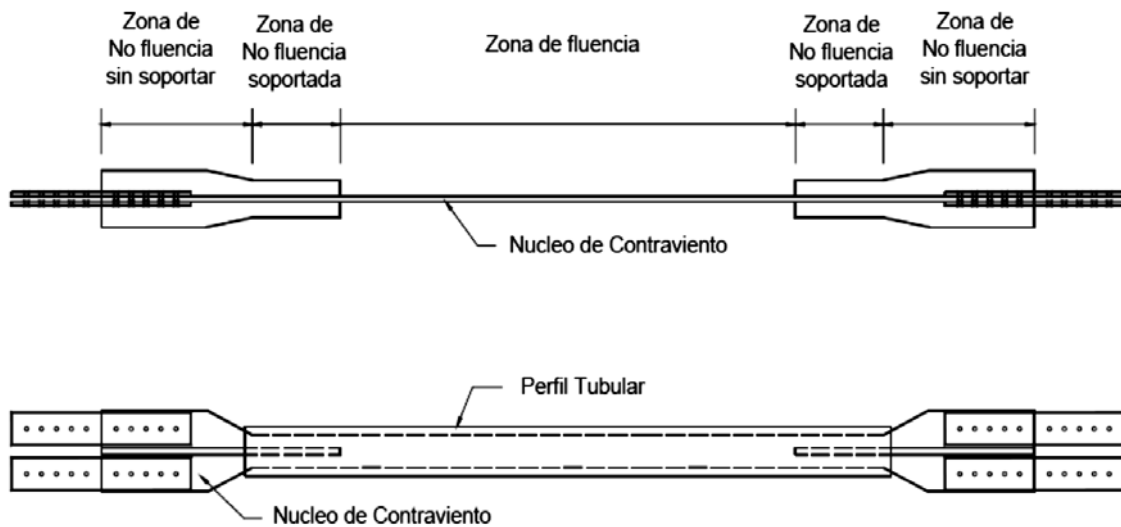


Figura 1.4. Geometría de contraviento restringido contra pandeo

La fabricación de un contraviento restringido contra pandeo requiere de un control estricto de la calidad del acero del núcleo, de tal manera de lograr un esfuerzo de fluencia controlado. Dado que se usa una camisa de acero para restringir el pandeo, no es posible establecer visualmente el nivel de daño en el contraviento después de un sismo intenso, y por tanto, es difícil definir, sin abrir la camisa de acero, cuando debe reemplazarse (Uang y Nakashima 2004). Se espera que los resultados presentados en esta tesis constituyan una base que haga posible evaluar dicho daño sin dañar las camisas, y por tanto, eliminen uno de los inconvenientes que usualmente se citan cuando se discute la posibilidad de rigidizar un sistema estructural con contravientos restringidos contra pandeo.

En países como Japón y los Estados Unidos, se ha hecho un uso extenso de contravientos restringidos contra pandeo para mejorar el desempeño estructural de marcos de acero resistentes a momento. La figura 1.5 muestra algunos ejemplos. En México se han desarrollado estudios académicos y experimentales, y algunos despachos empiezan a contemplar el uso de estos dispositivos para proyectos de refuerzo estructural y en estructuras nuevas. Un ejemplo de esto es el refuerzo estructural del edificio de concreto reforzado de cuatro pisos mostrado en la figura 1.6 (Terán 2014, García y González 2013).

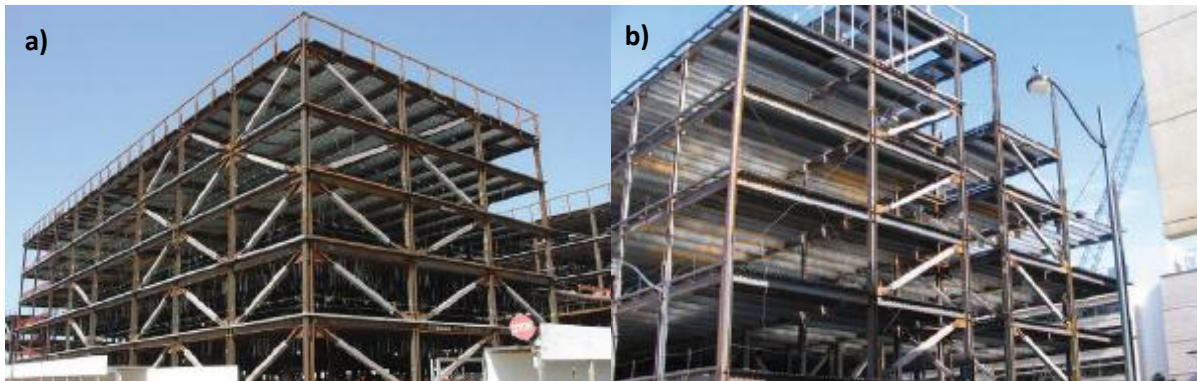


Figura 1.5. Edificios con contravientos restringidos contra pandeo, a) Kaiser Vallejo Medical Center, California, b) Edificio de la Universidad de California UCSF, San Francisco, California. (CoreBrace).



Figura 1.6. Proyecto de refuerzo estructural con contravientos restringidos contra pandeo del edificio G de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, montaje fotográfico.

1.6. Zona del Lago del Distrito Federal

A raíz de los daños causados por el evento sísmico del 19 de septiembre de 1985, la ingeniería estructural mexicana tuvo que reconsiderar muchos de los requerimientos en los que se basaba su diseño sismorresistente. Los movimientos registrados tuvieron intensidades mucho mayores que las que contemplaba la normatividad vigente en ese año, y esto se debió en parte a las grandes amplificaciones y duraciones observadas en los movimientos del terreno generados en los suelos blandos ubicados en la Zona del Lago del Distrito Federal. Esta zona se resalta con color rojo en la figura 1.7.

En la figura 1.8 se grafican algunos acelerogramas registrados el 19 de septiembre de 1985 en la estación: A) Zacatula (zona epicentral); B) Tacubaya (Zona de Lomas); y C) SCT (Zona del Lago). Se observa claramente la diferente naturaleza de los movimientos del terreno y, sobre todo, la amplificación y larga duración de las aceleraciones asociadas al movimiento registrado en suelo blando. Es importante resaltar que esta amplificación se presentó a pesar de que las ondas sísmicas habían viajado cerca de 300 km para llegar al Distrito Federal.

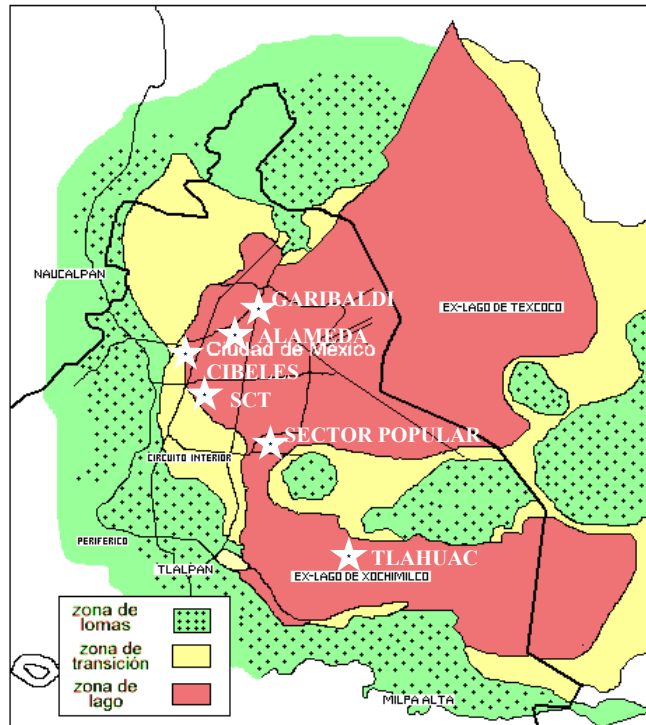


Figura 1.7. Zona del Lago del Distrito Federal y estaciones acelerométricas.

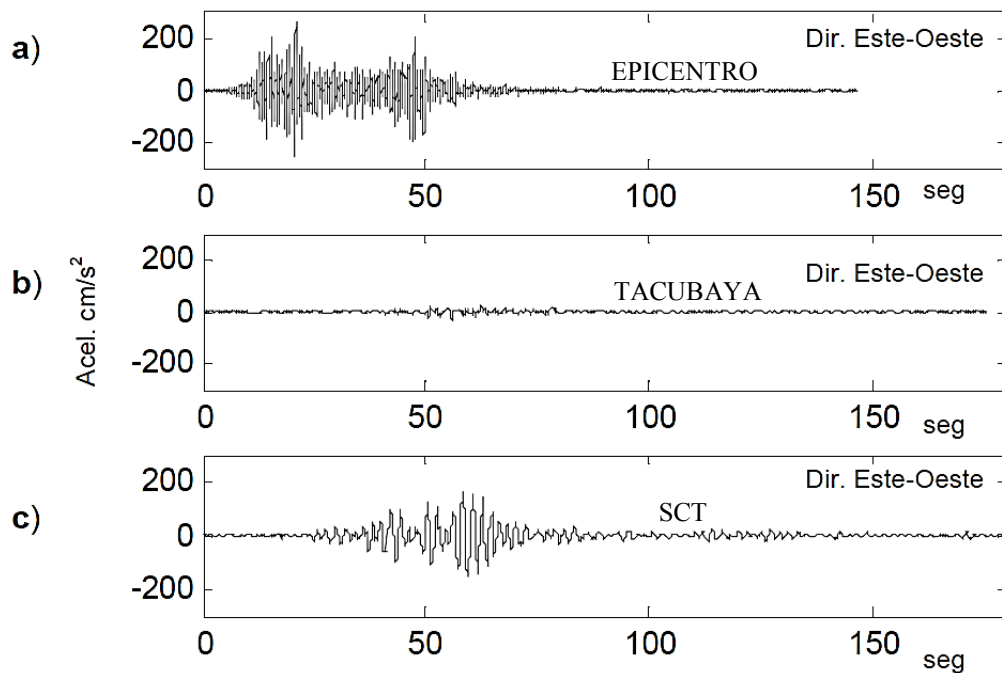


Figura 1.8. Acelerogramas registrados el 19 de Septiembre de 1985 a) Zona Epicentral (estación Zacatula); b) Tacubaya (Zona de Lomas); c) SCT (Zona del Lago), Coeto (2008).

Las particularidades de los movimientos del terreno generados en la Zona del Lago hacen atractivo para los edificios de acero ahí desplantados el uso de dispositivos innovadores para el control de la respuesta sísmica. En algunos casos, el uso de contravientos restringidos contra pandeo resulta muy atractivo. Ejemplo de esto es el uso de este tipo de contravientos en un edificio de 24 pisos diseñado por Coeto (2008), el cual exhibió un peso mucho menor que el que habría tenido si se hubiera diseñado con un sistema estructural tradicional.

El presente trabajo de investigación usa movimientos del terreno registrados en las estaciones indicadas en la figura 1.7. Nótese que todos los acelerogramas bajo consideración se registraron en la Zona de Lago del Distrito Federal, particularmente en sitios que exhiben un periodo dominante de 2 s.

1.7. Contribución de la tesis

La presente tesis aporta elementos que permiten plantear una metodología de evaluación que establezca el nivel de daño en sistemas estructurales de acero rigidizados con contravientos restringidos contra pandeo. La evaluación se hace a partir de las estimaciones de las demandas de desplazamiento lateral máximo y de disipación de energía plástica estimadas a partir del desplazamiento residual medido en campo. Para ello, se establecen relaciones entre las demandas de desplazamiento máximo y residual; y entre la demanda máxima de ductilidad y de energía plástica. A petición del comité evaluador de posgrado, se consideró para esta tesis el caso de sistemas de 1GL.

SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

2.1. Introducción

Los sistemas de un grado de libertad, que consideran una masa concentrada, un resorte y un amortiguador, pueden usarse para entender la respuesta dinámica de edificios de baja altura cuyo comportamiento queda dominado por su modo fundamental de vibración. En este capítulo se discute de manera general la respuesta dinámica de modelos de un grado de libertad con tres tipos de comportamiento histerético, que aspiran a modelar la respuesta cíclica de sistemas estructurales de acero: A) elastoplástico-perfecto, B) bilineal, y C) trilineal. Se contempla el uso de estos sistemas para estudiar cómo se relaciona el desplazamiento residual en las estructuras de acero con sus demandas máximas y acumuladas de deformación lateral. Es importante aclarar que ninguno de los modelos histeréticos bajo consideración contempla la degradación de rigidez o resistencia en ciclos subsecuentes, ya que de alguna manera se usan para modelar la respuesta dinámica de estructuras de acero.

2.2. Sistema de un grado de libertad

En dinámica estructural, el número de coordenadas independientes necesario para especificar la configuración o posición de un sistema en cualquier instante de tiempo se conoce como número de grados de libertad (Paz 1992). Conforme a lo mostrado en la figura 2.1, puede usarse un sistema de 1GL para modelar el comportamiento de una estructura que se compone de una masa (m) concentrada en el nivel de piso, un marco sin masa que proporciona rigidez lateral (k) al sistema, y un amortiguador viscoso que disipa energía de vibración. Cada una de estas propiedades se concentra en tres componentes puros distintos: una masa concentrada, un resorte y un amortiguador. Los sistemas de 1GL pueden exhibir una respuesta lineal o no lineal, y es posible establecer la ecuación de equilibrio dinámico que considera el caso de un sistema sujeto a la acción de un movimiento del terreno.

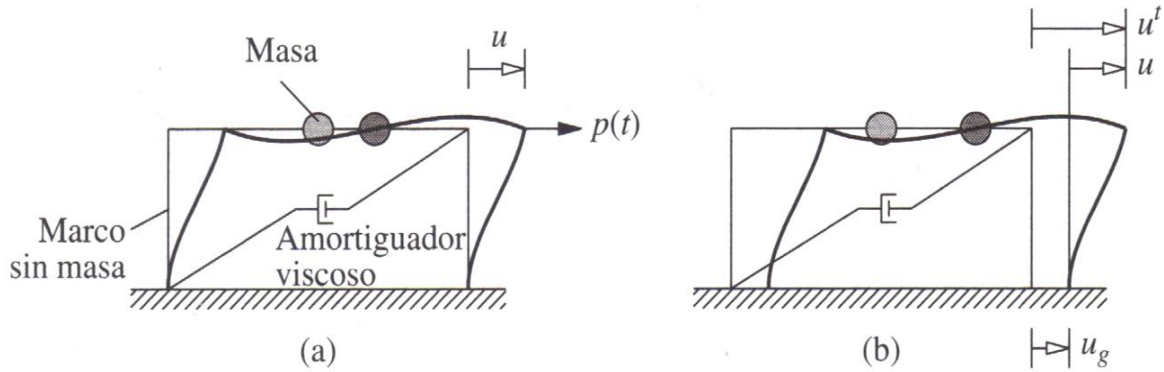


Figura 2.1. Sistema de un grado de libertad: a) fuerza aplicada $p(t)$; b) movimiento del terreno (sismo), Chopra (2014).

La relación fuerza-desplazamiento de un sistema es lineal cuando se le sujeta a deformaciones pequeñas, y es capaz de regresar a su posición no deformada cuando se le descarga. Para un sistema lineal, la relación entre la fuerza lateral (f_s) y la deformación resultante (u) es:

$$f_s = ku \quad (2.1)$$

donde k es la rigidez lateral del sistema, que tiene unidades de fuerza/longitud. En la ecuación (2.1) queda implícito que la relación lineal es válida para cualquier deformación. Tal como se ilustra en la Figura 2.2, la relación lineal implica que las curvas de carga y descarga del sistema son idénticas. Se dice que el sistema es elástico, y se utiliza el término sistema elástico-lineal.

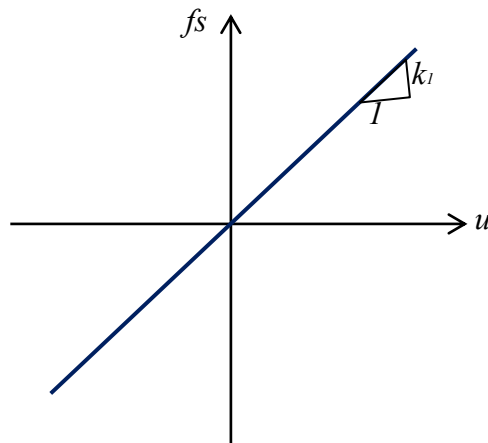


Figura 2.2. Relación lineal fuerza-desplazamiento carga y descarga del sistema.

En el análisis de un sistema elástico-lineal es importante considerar el valor del periodo de vibración (T), que es un parámetro muy relevante para caracterizar el comportamiento del sistema, y que se encuentra relacionado con su rigidez y masa conforme a lo siguiente:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1}} \quad (2.2)$$

Es posible demostrar que la ecuación de movimiento para un sistema de 1GL elástico-lineal sujeto a la acción de una aceleración del terreno que varía con el tiempo ($\ddot{u}_g(t)$) está dada por:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.3)$$

Tal como lo muestra la figura 2.3, los sistemas inelásticos exhiben curvas carga-deformación que exhiben comportamiento no lineal. En particular, el nivel de fuerza desarrollado por el sistema depende no solo del desplazamiento, sino de la historia de desplazamientos y de si el sistema está en una etapa de carga o de recarga:

$$f_s = f_s(u, \dot{u}) \quad (2.4)$$

Bajo la consideración de la ecuación 2.4, la ecuación de movimiento resultante es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.5)$$

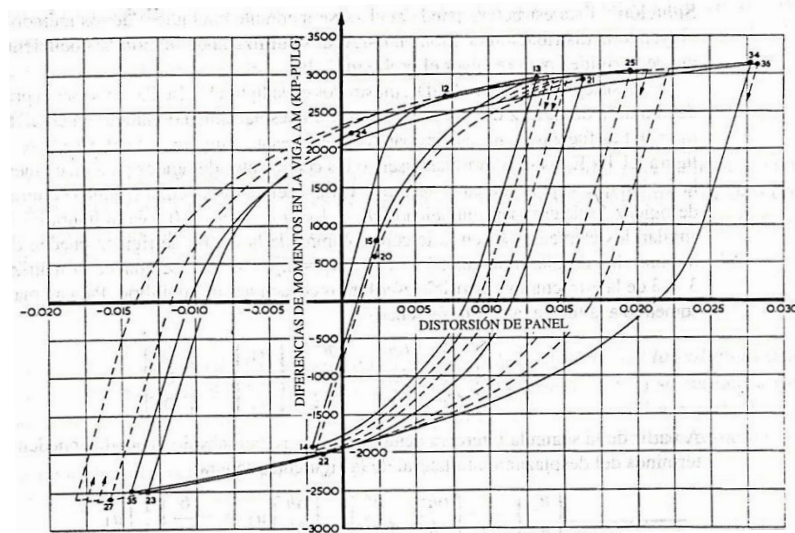


Figura 2.3. Relación fuerza-deformación para un elemento estructural de acero, Chopra (2014).

Para estudiar el comportamiento no lineal de un sistema de 1GL, suele idealizarse su curva fuerza-deformación. La figura 2.4 muestra la relación de fuerza-deformación en un ciclo de carga, descarga y recarga de un sistema plástico, y su idealización con fines de análisis.

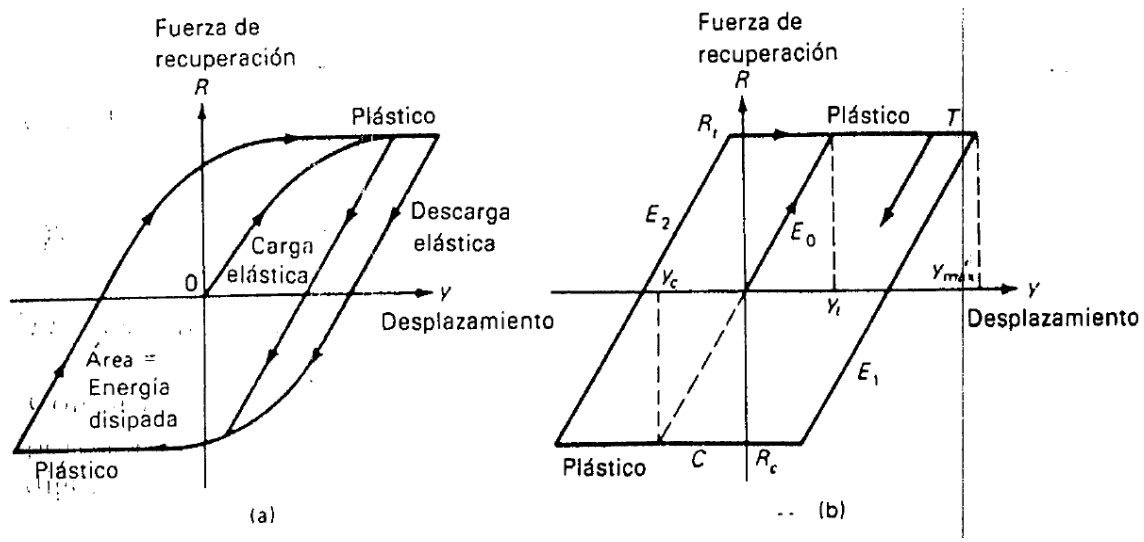


Figura 2.4. Modelos estructurales inelásticos: a) comportamiento plástico general, b) Idealización de comportamiento elastoplástico, Paz (1992).

2.3. Modelo elastoplástico-perfecto

Un modelo elastoplástico-perfecto queda definido por una rigidez elástica (k) y una fuerza de fluencia (F_l). Al inicio de la carga, el sistema exhibe un comportamiento lineal con rigidez k hasta que alcanza la fuerza F_l . En la Figura 2.5 se muestra la relación fuerza-desplazamiento de un sistema elastoplástico-perfecto sujeto a la acción de un movimiento del terreno registrado en suelo blando. La deformación para la cual inicia la fluencia se denota D_y . Una vez que el sistema fluye, la fuerza se mantiene constante e igual a F_l . Para el análisis de este tipo de modelo se programó una rutina en FORTRAN, cuyo código fuente se presenta en el Apéndice B de esta tesis.

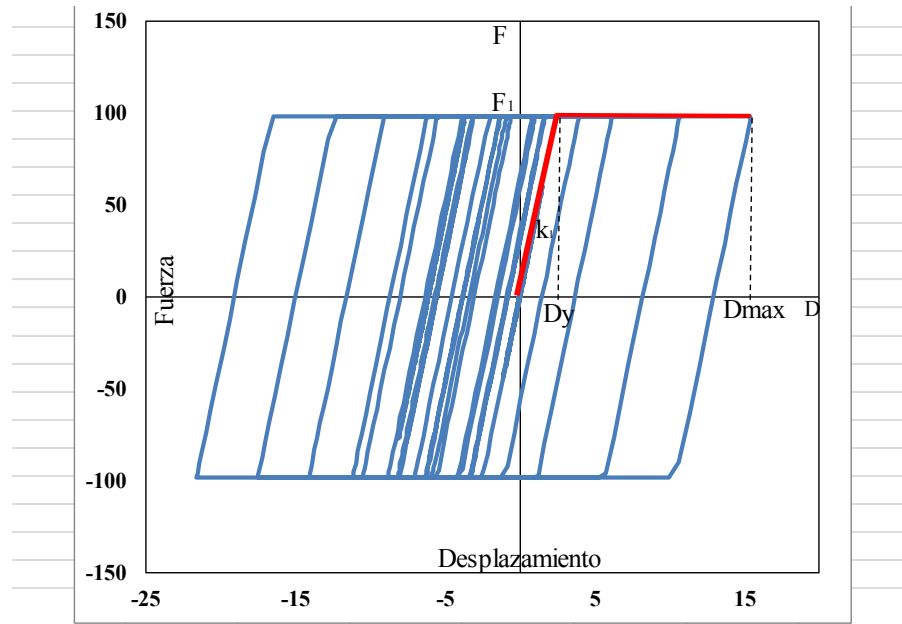


Figura 2.5. Relación fuerza-desplazamiento elasto-plástica-perfecta.

La figura 2.5 muestra varios ciclos de carga, descarga y recarga para un sistema elasto-plástico-perfecto. Las cargas y descargas se producen siempre con la rigidez k . Note además que en ambos sentidos, el elemento fluye con la misma fuerza (Cáceres 2001). La tabla 2.1 incluye los parámetros que definen el ciclo histérico de un modelo elasto-plástico-perfecto.

Tabla 2.1. Parámetros del modelo elasto-plástico (Bouc 1967).

Parámetro	Descripción	Ecuación
T	Periodo (s)	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1}}$
c_y	Coefficiente sísmico	$c_y = \frac{F_1}{mg}$

2.4. Modelo bilineal

A diferencia del modelo elastoplástico-perfecto, un modelo bilineal exhibe endurecimiento por deformación en su rango plástico de comportamiento. En la Figura 2.6 se muestra la respuesta de un sistema bilineal sujeto a la acción de un movimiento del terreno registrado en suelo blando. Nótese que las rigideces de las ramas de descarga y recarga son paralelas a la rama elástica de carga, y que el endurecimiento por deformación en ambos sentidos es igual a una misma fracción de la rigidez elástica. Conforme muestra la figura, es posible idealizar el comportamiento de un sistema bilineal a partir de un sistema de 1GL con dos resortes en paralelo: uno que permanece elástico y que tiene una rigidez igual a la asociada al endurecimiento por deformación, y otro que exhibe comportamiento elastoplástico-perfecto. Para el análisis de este tipo de modelo se programó una rutina en FORTRAN, cuyo código fuente se presenta en el Apéndice B. Para validar los resultados arrojados por la subrutina, se compararon favorablemente para varios sistemas de 1GL los resultados obtenidos a partir de ella con aquellos obtenidos con el programa PRISM (S. H. Jeong, K. H. Lee and W. S. Jang, 2010).

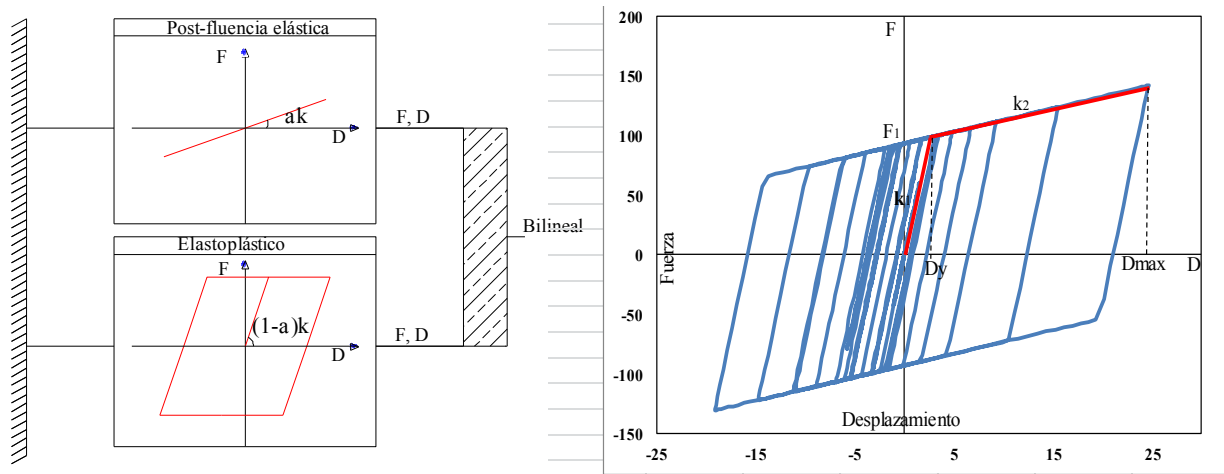


Figura 2.6. Modelo elástico y elastoplástico conectados en paralelo para formar el modelo bilineal.

En la tabla 2.2 se resumen los parámetros requeridos para definir el ciclo histerético asociado al modelo bilineal. En ella k_1 y k_2 denotan las rigideces elástica y post-elástica, respectivamente; F_1 , la carga de fluencia; y c_y , el coeficiente sísmico.

Tabla 2.2. Parámetros del modelo bilineal (Bouc 1967).

Parámetro	Descripción	Ecuación
T	Periodo (s)	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1}}$
c_y	Coefficiente sísmico	$c_y = \frac{F_1}{mg}$
α	Relación de rigideces	$\alpha = \frac{k_2}{k_1}$

2.5. Modelo trilineal

Este modelo matemático ha sido usado en el pasado por varios autores para estimar de una manera más realista el comportamiento de sistemas estructurales complejos. En esta tesis y tal como se ilustra en la figura 2.7, el modelo trilineal se define a partir de sumar en paralelo la contribución de dos sistemas elastoplástico-perfectos (denotados A y B).

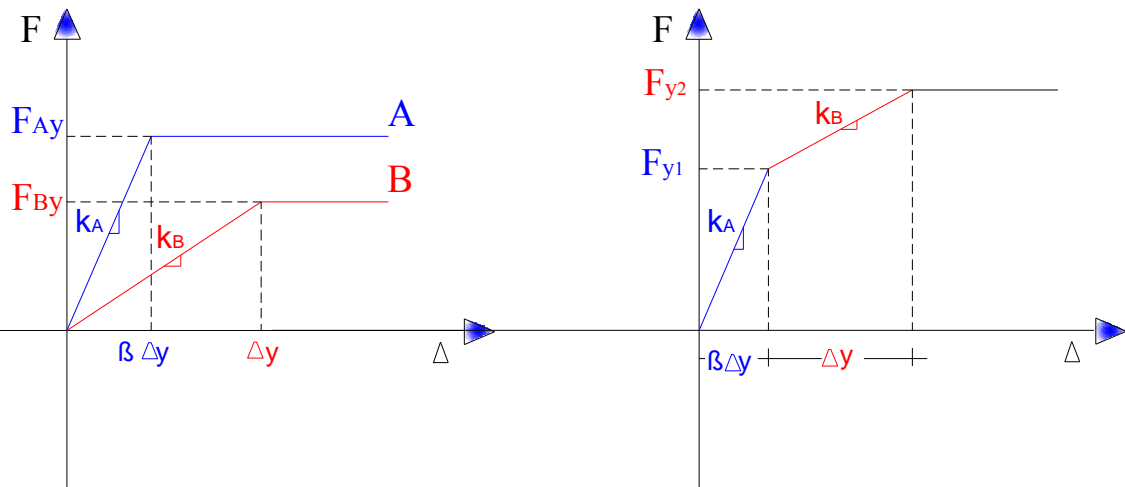


Figura 2.7. Sistemas elastoplásticos A y B, y sistema integrado trilineal.

En la tabla 2.3 se deduce a partir de los comportamientos y notación incluidos en la figura 2.7, expresiones para describir el comportamiento del modelo trilineal. Dichas expresiones

consideran la rigidez, y los desplazamientos y fuerzas que desarrolla el sistema integrado en función de las propiedades de los sistemas individuales. La figura 2.8 muestra la respuesta de un sistema trilineal a la acción de un movimiento del terreno registrado en suelo blando. Conforme a lo mostrado, el trabajo integrado de dos resortes con comportamiento elastoplástico-perfecto dispuestos en paralelo da lugar a un comportamiento trilineal para un sistema de 1GL.

Tabla 2.3. Expresiones que definen el modelo trilineal de análisis inelástico.

Sistema A	Sistema B	Sistema Integrado AB
$m = 1$	$m = 1$	$\Delta_y \rightarrow F_{y1}$ $\Delta_y \rightarrow F_y$
$k_A = \frac{4\pi^2}{T^2}$	$k_B = \alpha \frac{4\pi^2}{T^2}$	$\therefore F_{y1} = F_y + \Delta_y \frac{F_y}{\Delta_y}$ $F_{y2} = F_y + F_y$
$\beta \Delta_y = \frac{F_{Ay} T^2}{4\pi^2}$	$\Delta_y = \beta \Delta_y + \frac{(F_{y2} - F_{y1}) T^2}{\alpha 4\pi^2}$	Si $\beta \Delta_y = \Delta_y$ $\Delta_y = \Delta_y$
$F_{Ay} = \beta \Delta_y \frac{4\pi^2}{T^2}$	$F_{By} = F_{y2} - F_{y1} = \alpha \frac{4\pi^2}{T^2} \Delta_y (1 - \beta)$	$F_{y1} = F_y + \beta \Delta_y \frac{F_y}{\Delta_y} = F_y + \beta F_y$ $F_{y2} = F_y + F_y$
		Resistencia del sistema B $c_{yB} = F_{y2} - F_{y1}$ $c_{yB} = (1 - \beta) F_y = (1 - \beta) \alpha \frac{4\pi^2}{T^2} \Delta_y$ $c_{yB} = F_y = \alpha \frac{4\pi^2}{T^2} \Delta_y$
		Resistencia del sistema A $\beta \Delta_y \frac{4\pi^2}{T^2} = F_y + \beta F_y$ $F_y = \beta \Delta_y \frac{4\pi^2}{T^2} - \beta \alpha \frac{4\pi^2}{T^2} \Delta_y$ $F_y = \beta \Delta_y \frac{4\pi^2}{T^2} (1 - \alpha)$ $c_{yA} = F_y = \beta \Delta_y \frac{4\pi^2}{T^2} (1 - \alpha)$

Para el análisis de este tipo de modelo se programó una rutina en FORTRAN, cuyo código fuente se presenta en el Apéndice B. Para validar los resultados arrojados por la subrutina, se

compararon favorablemente para varios sistemas de 1GL los resultados obtenidos a partir de ella con aquellos obtenidos con el programa DRAIN 2DX (Prakash V., Powell G H, Campbell S, 1993). Conforme a lo indicado en la tabla 2.4, se requieren establecer los valores de cuatro parámetros para definir el ciclo histerético del modelo trilineal. Note que el modelo consta de una primera rama con rigidez elástica k_1 , una segunda con rigidez post-fluencia k_2 , y una tercera rama de cedencia con rigidez cero. El valor de las fuerzas F_1 (elástica) y F_2 (post-elástica) delimitan las tres ramas.

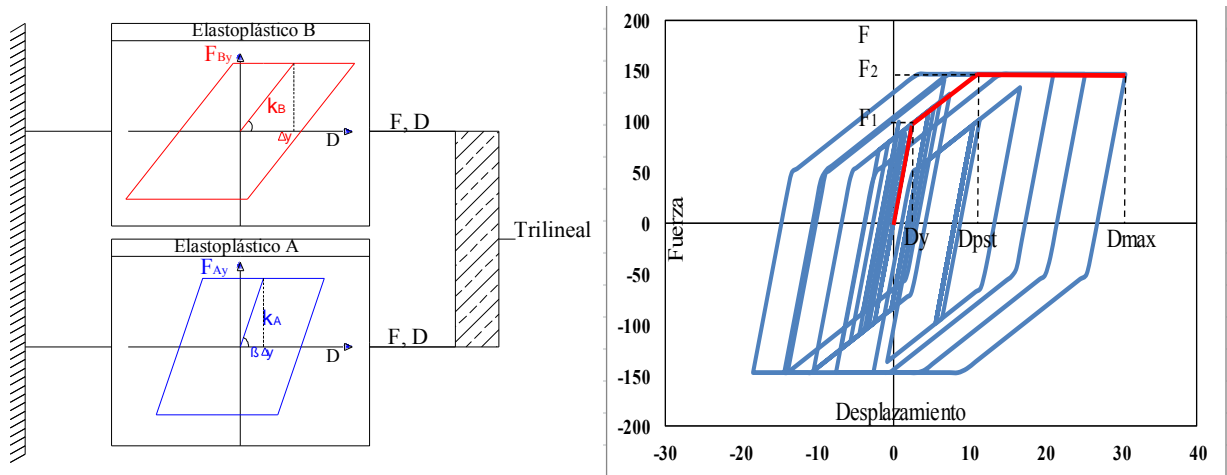


Figura 2.8. Modelos elasto-plásticos conectados en paralelo para formar el modelo trilineal.

Tabla 2.4. Parámetros del modelo trilineal (Bouc 1967).

Parámetro	Descripción	Ecuación
T	Periodo (s)	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1}}$
c_{y1}	Coefficiente sísmico asociado a F_1	$c_{y1} = \frac{F_1}{mg}$
c_{y2}	Coefficiente sísmico asociado a F_2	$c_{y2} = \frac{F_2}{mg}$
α_1	Relación de rigideces para la segunda rama	$\alpha_1 = \frac{k_2}{k_1}$

RELACIÓN ENTRE DESPLAZAMIENTO MÁXIMO Y RESIDUAL

3.1. Introducción

A partir de la respuesta dinámica no lineal de sistemas de 1GL con comportamiento elastoplástico-perfecto, sujetos a la acción de movimientos del terreno registrados en la Zona del Lago del Distrito Federal, se establecen una serie de expresiones que relacionan la demanda máxima de desplazamiento lateral con el desplazamiento residual que exhiben los sistemas al final de la excitación sísmica.

3.2. Registros Sísmicos

Los movimientos del terreno bajo consideración en esta tesis fueron registrados en la Zona del Lago del Distrito Federal. La tabla 3.1 contiene información relevante de los diferentes movimientos, los cuales fueron registrados en estaciones sismológicas ubicadas en la Alameda, Garibaldi, Tláhuac, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la fuente de las Cibeles y Sector Popular. Vale la pena mencionar que estos registros exhiben unas de las mayores aceleraciones máximas del terreno registradas en el periodo que va de 1985 a la fecha, y que todos exhiben un periodo dominante de movimiento cercano a los 2 s. La figura 3.1 muestra la historia de aceleraciones, y respectivos espectros de pseudo-aceleración y desplazamiento para 5% de amortiguamiento crítico, de la componente este-oeste del movimiento registrado en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes durante el evento principal de 1985. La historia de aceleraciones y espectros de los demás movimientos del terreno se incluyen en el Apéndice A. Vale la pena mencionar que para estimar con mayor precisión los desplazamientos residuales en los sistemas de 1GL, se añadieron al final de cada registro 50 segundos de aceleración nula con el objetivo de que los sistemas tuvieran la posibilidad de alcanzar su posición de reposo absoluto.

Tabla 3.1. Eventos Sísmicos de estaciones ubicadas en Zona del Lago del Distrito Federal.

No	Registro	Estación	Fecha	Magnitud esc. de Richter	Aceleración del terreno (cm/s ²)	T _s (s)
1	AL018904.251EW	ALAMEDA	25/04/1989	6.9	45.90	2.1
2	AL018904.251NS	ALAMEDA	25/04/1989	6.9	37.50	2.1
3	GA628904.251EW	GARIBALDI	25/04/1989	6.9	52.40	2.1
4	TLHB8509.191EW	TLAHUAC	19/09/1985	8.1	118.00	1.9
5	TLHB8509.211NS	TLAHUAC	21/09/1985	7.6	49.40	2.0
6	TLHB8509.211EW	TLAHUAC	21/09/1985	7.6	51.60	2.0
7	SCT850919EW	SCT	19/09/1985	8.1	169.00	2.0
8	CI05120320N00E	CIBELES(CI05)	20/03/2012	7.5	53.40	1.9
9	SCT1990615N00E	SCTB-1 (SCT1)	15/06/1999	6.9	30.90	1.9
10	SCT2120320N00W	SCTB-2 (SCT2)	20/03/2012	7.5	33.90	1.9
11	SCT2890425N90E	SCTB-2 (SCT2)	25/04/1989	6.9	37.50	2.1
12	SP51890425N00E	SECT POP (SP51)	25/04/1989	6.9	43.00	2.2
13	SP51950914N00E	SECT POP (SP51)	14/09/1995	7.3	36.00	2.0
14	TH35120320N90W	TLAHUAC(TH35)	20/03/2012	7.5	62.60	2.6

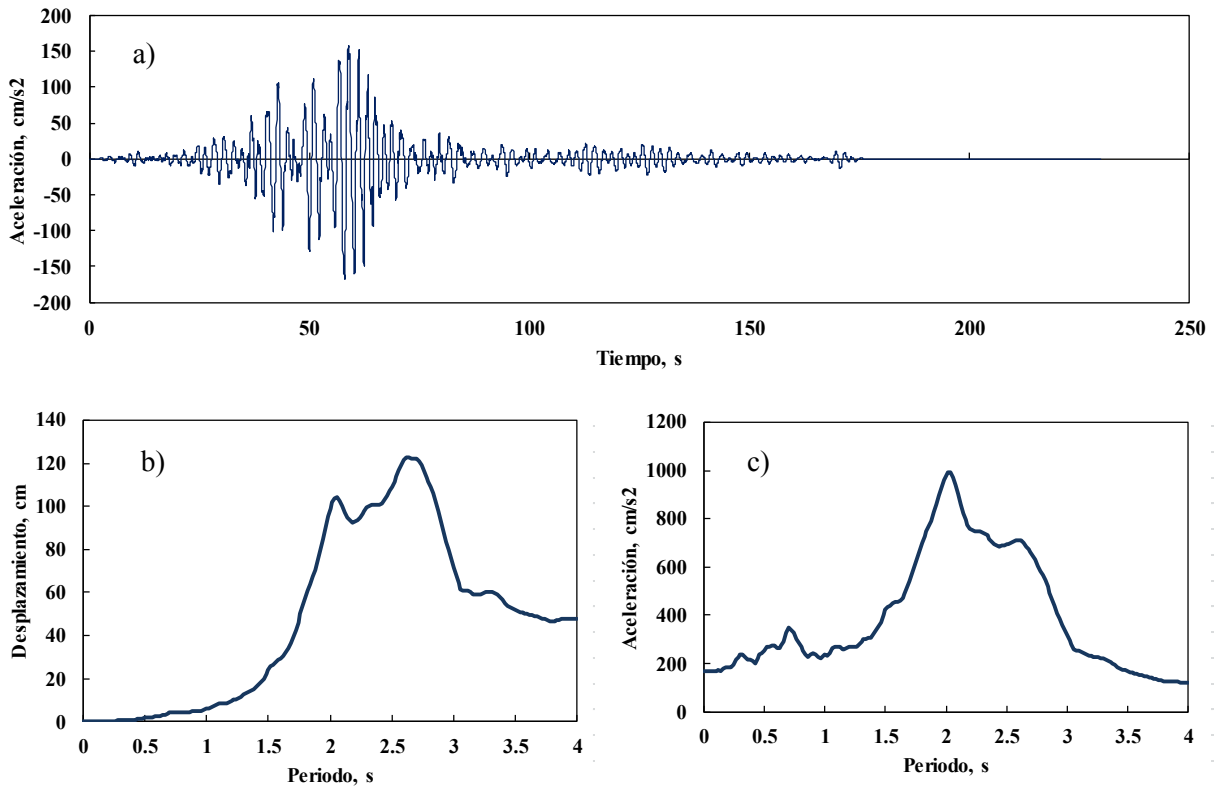


Figura 3.1. Sismo 7, a) Registro sísmico S7-SCT850919EW-SCT, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

3.3. Historia de desplazamientos

La determinación de la respuesta inelástica de un sistema de IGL sujeto a la acción de una excitación sísmica, permite estimar sus demandas de desplazamiento máximo y residual. En este capítulo se consideraron las siguientes propiedades para los sistemas de IGL: A) comportamiento elastoplástico-perfecto; B) masa unitaria ($m=1$); C) porcentaje de amortiguamiento crítico (ξ) de 5%; y D) coeficiente sísmico (c_y) de 0.1. Es importante mencionar que las tendencias y resultados discutidos en este capítulo no dependen del valor particular de masa y coeficiente sísmico que se asigne a los sistemas, y que los valores elegidos en esta tesis son arbitrarios.

La figura 3.2 presenta la historia de desplazamientos para un sistema de IGL con periodo de 2 s, sujeto a la acción de la componente este-oeste del movimiento registrado en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes durante el evento principal de 1985. Nótese que a partir de la historia de desplazamientos es posible establecer que el sistema exhibe un desplazamiento residual (D_{RES}) de 6.98 cm; y que alcanza una demanda máxima de desplazamiento (D_{MAX}) de 43.50 cm. Dentro de un contexto similar, podría considerarse escalar linealmente varias veces (de manera sucesiva) el movimiento del terreno para establecer una curva en que el eje de las abscisas considere la demanda máxima de desplazamiento, y en el eje de las ordenadas, el correspondiente desplazamiento residual. A través de estudiar dicha curva, sería posible entender la relación que existe entre ambas demandas. En esta tesis se consideró escalar 100 veces cada registro en intervalos uniformes de tal manera que el centésimo escalado (o el mayor factor de escala) resultará en una demanda máxima de ductilidad (μ) de 10.

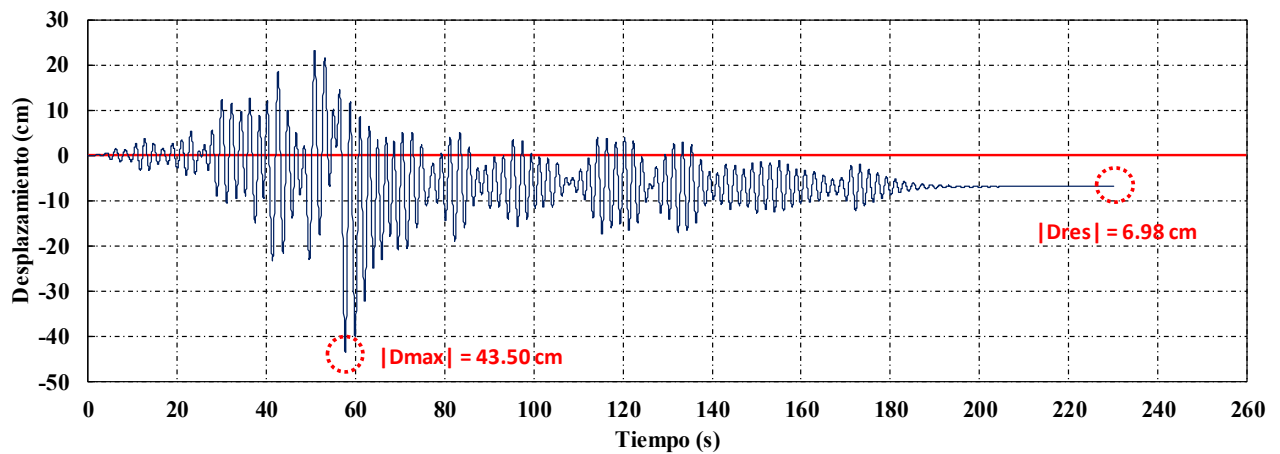


Figura 3.2. Historia de la respuesta de desplazamiento del sismo 7 SCT-EW.

Debido a la gran cantidad de análisis por realizar y datos por procesar, se decidió escribir el programa EPPCONRESEPD.FOR. Dicho programa usa el lenguaje FORTRAN, y su código fuente se incluye en el Apéndice B.

3.4. Relación entre desplazamientos máximo y residual

A partir de estudiar las curvas de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual, es posible entender la relación que existe entre estos dos parámetros de respuesta. En la figura 3.3 se ilustra esta relación para un sistema de 1GL con periodo de 2 s, comportamiento elastoplástico-perfecto y resistencia lateral igual a un décimo de su peso, sujeto a la acción de registro 2 indicado en la tabla 3.1. Para tener seguridad en cuanto a la pertinencia de usar el programa EPPCONRESEPD.FOR, los resultados obtenidos con él se compararon con los establecidos con el programa *DEGTRA V. 9.1.0* (Ordaz y Montoya, 2012). Se compararon las demandas correspondientes a 100 escalados y, como se ilustra en la figura 3.3, se observó una excelente coincidencia.

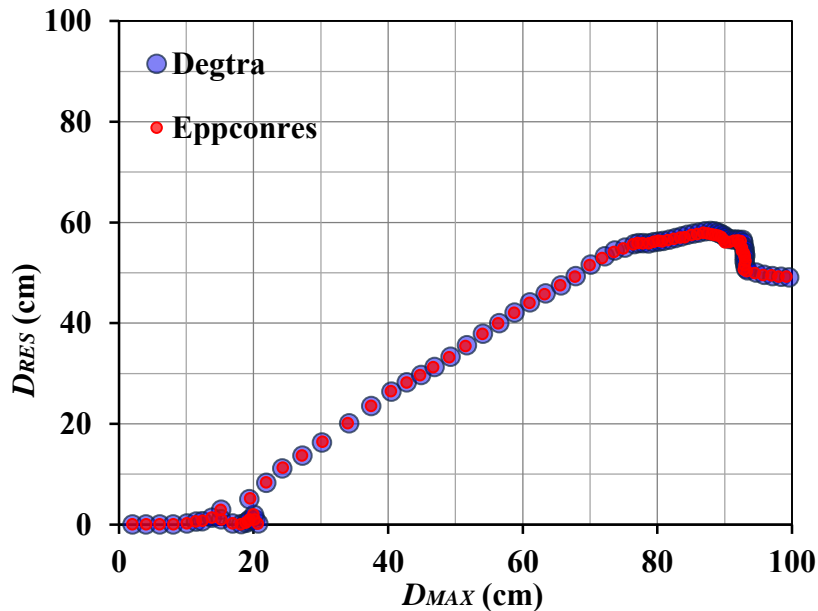


Figura 3.3. Comparativa de resultados con DEGTRA y EPPCONRESEPD del análisis de desplazamientos de un sistema de 1GL de $T=2$ s sometido al sismo 2.

Una vez validado el software desarrollado para esta tesis para el caso de comportamiento elastoplástico-perfecto, se recurrió a estudiar la relación de las demandas máxima y residual de desplazamiento para los sistemas de 1GL contenidos en la tabla 3.2. Para ello se consideraron todos los movimientos del terreno incluidos en la tabla 3.1. Para poder establecer medidas estadísticas, se fijaron valores dados de desplazamiento máximo, y por interpolación se

establecieron a partir de las curvas inicialmente obtenidas, los correspondientes valores de desplazamiento residual. De esta manera y para cada sistema de 1GL, se establecieron varias demandas (una por cada registro) de desplazamiento residual para los valores dados de desplazamiento máximo. En la figura 3.4 se ilustra este proceso; en particular se usa la curva que se obtiene inicialmente (que corresponde a los círculos rojos) para obtener por interpolación una curva donde se consideran valores de desplazamiento máximo que se van incrementando en 1 centímetro.

Tabla 3.2. Sistemas de 1GL.

No.	Periodo (s)	No.	Periodo (s)	No.	Periodo (s)	No.	Periodo (s)
1	0.25	7	1.00	13	2.00	19	3.50
2	0.40	8	1.10	14	2.25	20	3.75
3	0.50	9	1.25	15	2.50	21	4.00
4	0.70	10	1.40	16	2.75	-	-
5	0.75	11	1.50	17	3.00	-	-
6	0.90	12	1.75	18	3.25	-	-

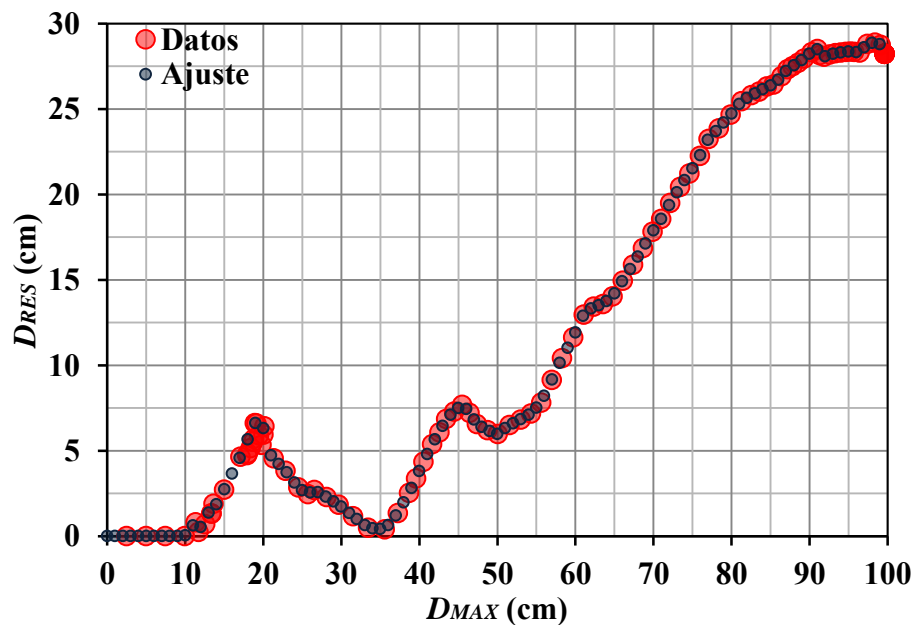


Figura 3.4. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de $T=2s$ sometido al sismo 7 y factor de escala de 0.025 para 100 iteraciones, y ajuste por interpolación.

Para un sistema de 1GL dado y los registros bajo consideración, es posible establecer una familia de curvas interpoladas de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual y, para cada valor de desplazamiento máximo considerado para la interpolación, establecer medidas estadísticas para el desplazamiento residual. Esto se ilustra en las figuras 3.5 a 3.7 para sistemas de 1GL con periodos de 1, 2 y 3 s, respectivamente. Para darle al estudio un alcance suficiente, se consideraron los sistemas de 1GL incluidos en la tabla 3.2. Para mayor documentación del trabajo realizado, en el Apéndice C se muestran las gráficas correspondientes a los sistemas de 1GL no contemplados en las figuras 3.5 a 3.7.

Para hacer posible el planteamiento de una función matemática que relacione las demandas de desplazamiento máximo y residual, fue necesario considerar una curva asociada a un percentil dado del desplazamiento residual. Para alcanzar los fines de esta tesis, se eligió la mediana. Las líneas negras continuas mostradas en las figuras 3.5 a 3.7 corresponden a las curvas mediana. La figura 3.8 compara y contrapone las curvas medianas correspondientes a todos los sistemas bajo consideración en la tabla 3.2. Vale la pena mencionar que de considerarse importante, sería posible contemplar otros percentiles, y que esto no implicaría ni cuantitativamente ni cualitativamente un problema.

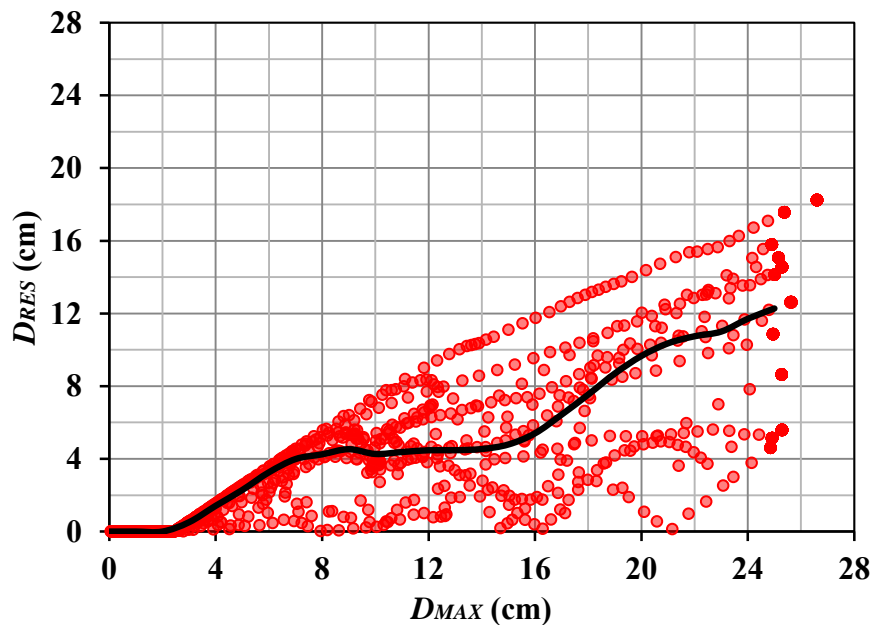


Figura 3.5. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de $T=1$ s sometido a sismos de suelo blando y la curva con línea sólida representa la mediana del desplazamiento residual.

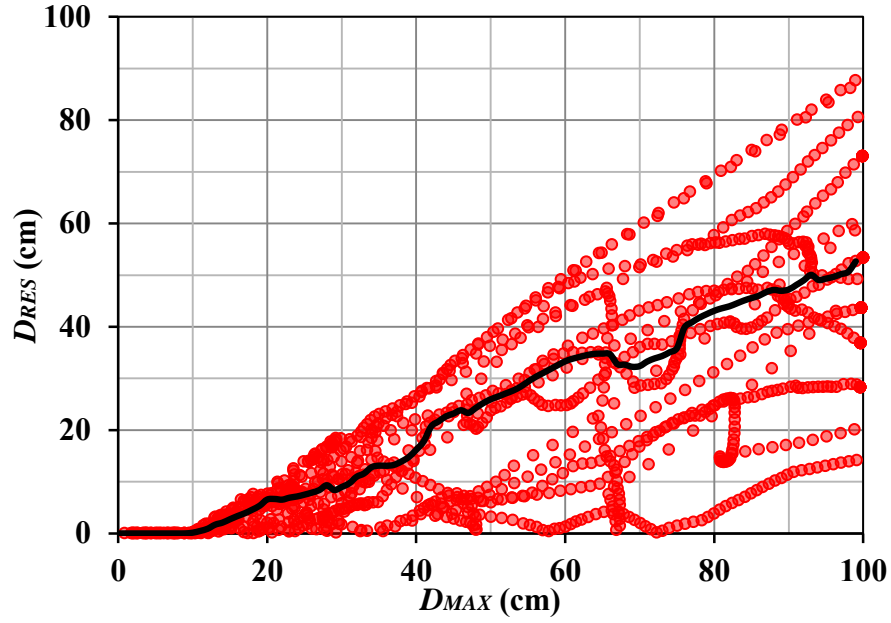


Figura 3.6. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de $T=2$ s sometido a sismos de suelo blando y la curva con línea sólida representa la mediana del desplazamiento residual.

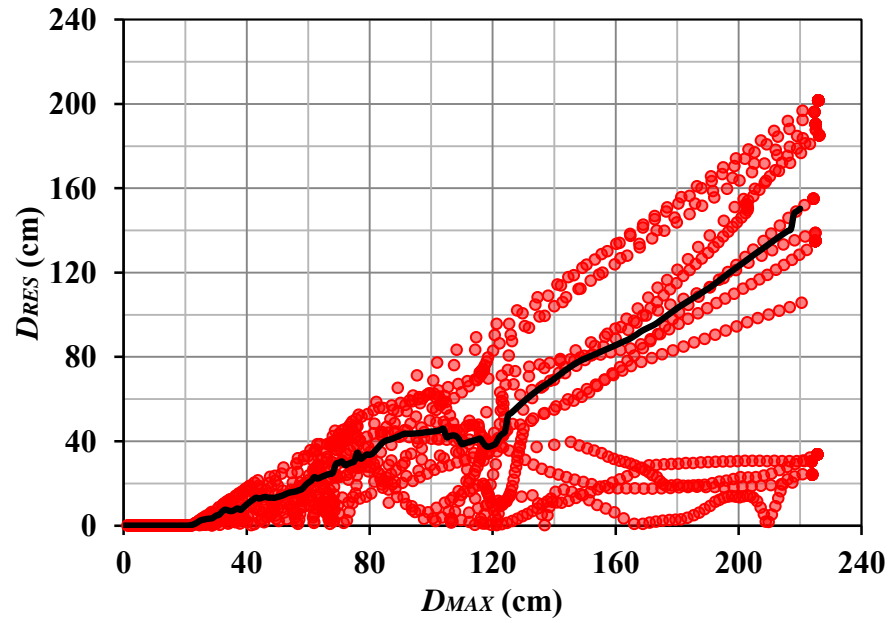


Figura 3.7. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de $T=3$ s sometido a sismos de suelo blando y la curva con línea sólida representa la mediana del desplazamiento residual.

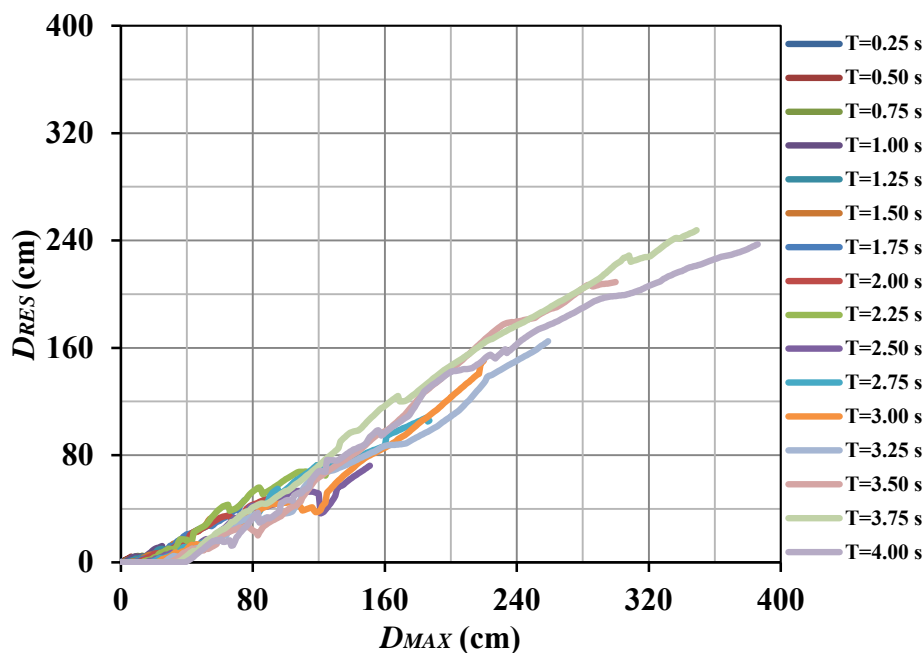


Figura 3.8. Medianas que relacionan D_{MAX} contra D_{RES} de diferentes S1GL sometidos sismos de suelo blando.

La mediana representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados. Para valores fijos de desplazamiento máximo, se determinó la demanda mediana de desplazamiento residual. Puede notarse en la figura 3.8 que una vez que los sistemas de 1GL incurren en comportamiento plástico, la mediana del desplazamiento residual se incrementa de manera lineal con respecto a un incremento en el desplazamiento máximo. Debido a esta tendencia lineal es posible plantear, mediante un ajuste de mínimos cuadrados, la ecuación de una recta para describir la relación mediana entre los desplazamientos máximo y residual.

La figura 3.9 muestra el ajuste para un sistema de 1GL con periodo de 1 s . Note que se tiene un desplazamiento residual igual a cero hasta que el desplazamiento máximo alcanza el desplazamiento de fluencia (que en este caso es de 2.48 cm). A partir de ahí, el desplazamiento residual crece con una tendencia lineal cuya pendiente es igual a 0.52 . El coeficiente de correlación correspondiente al ajuste lineal es de 0.93 . Las figuras 3.10 y 3.11 muestran los ajustes hechos para sistemas con periodos de 2 y 3 s . El desplazamiento de fluencia (D_y) de los sistemas de 1GL puede estimarse como:

$$D_y = \frac{f_y T^2}{4m\pi^2} \quad (3.1)$$

donde f_y es la resistencia a la fluencia. En las figuras 3.9 a 3.11, el desplazamiento de fluencia calculado con la ecuación 3.1 se remarca con una flecha roja.

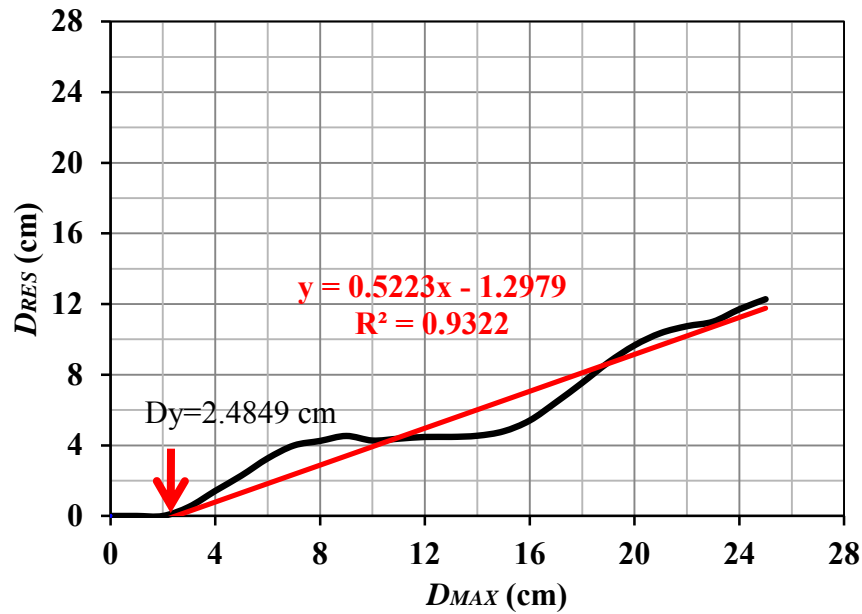


Figura 3.9. Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de $T=1.00$ s.

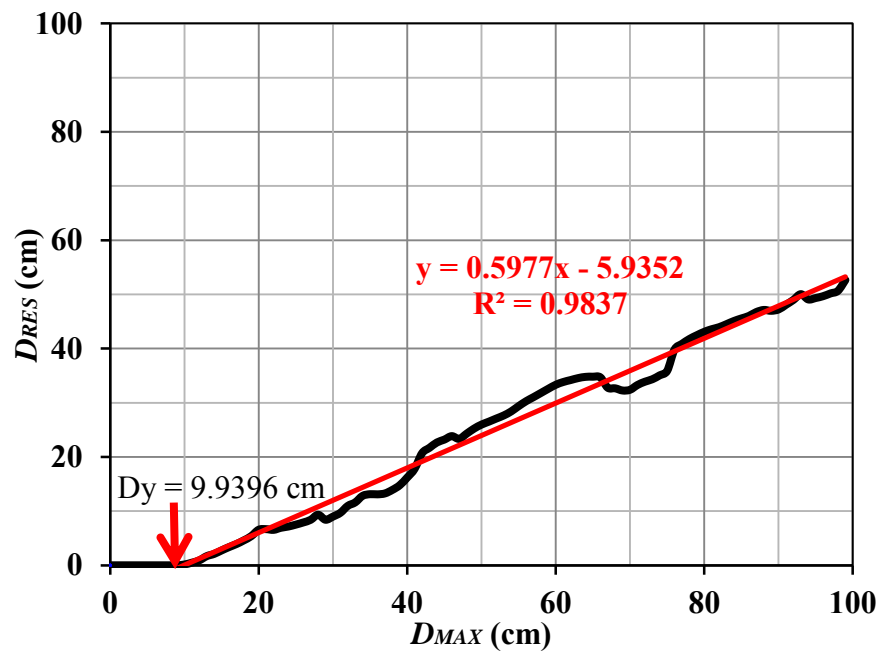


Figura 3.10. Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de $T=2.00$ s.

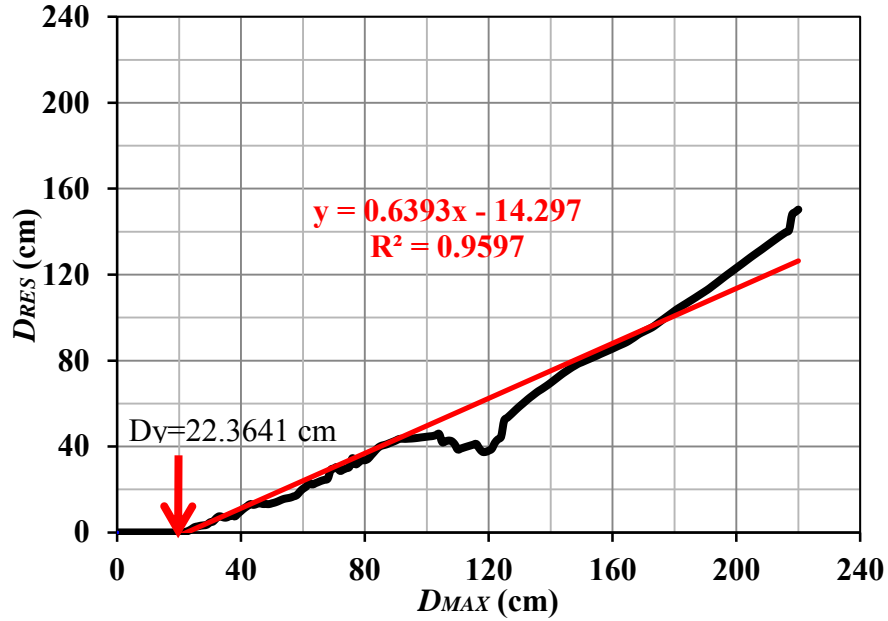


Figura 3.11. Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de D_{MAX} contra D_{RES} de un sistema de 1GL de $T=3.00$ s.

En el Apéndice C se incluyen los ajustes correspondientes a los sistemas de 1GL no contemplados por las figuras 3.9 a 3.11.

En la Tabla 3.3 se resume las pendientes (m_d) establecidas para relacionar las demandas de desplazamiento máximo y residual de los diferentes sistemas de 1GL. La figura 3.12 grafica los valores de m_d en función de T . En una segunda etapa se buscó ajustar una expresión que estimará el valor de m_d en función del periodo del sistema. Se consideró la siguiente forma funcional:

$$m_d = \left[\frac{\gamma + \left| \frac{T}{\lambda T_s} - 1 \right|}{\alpha \left(\frac{T}{\lambda T_s} \right)^\beta} \right]^\delta = \left[\frac{\gamma + |A - 1|}{\alpha A^\beta} \right]^\delta \quad (3.2)$$

donde $A = \frac{T}{\lambda T_s}$ es una relación entre los periodos del sistema y del suelo (T_s es el periodo dominante del terreno); y $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ y λ , parámetros de ajuste.

Tabla 3.3. Pendientes de medianas de desplazamientos y datos de ajuste.

Periodo T (s)	Pendiente m_d	Ajuste m_d
0.25	0.9165	0.9496
0.40	0.8492	0.8266
0.50	0.7289	0.7649
0.70	0.7599	0.6643
0.75	0.6466	0.6420
0.90	0.6132	0.5796
1.00	0.5820	0.5405
1.10	0.4099	0.5026
1.25	0.4123	0.4472
1.40	0.4512	0.4167
1.50	0.3721	0.4404
1.75	0.5193	0.4930
2.00	0.5840	0.5387
2.25	0.7458	0.5794
2.50	0.5266	0.6163
2.75	0.6084	0.6502
3.00	0.5611	0.6816
3.25	0.6203	0.7110
3.50	0.6954	0.7386
3.75	0.8983	0.7648
4.00	0.8362	0.7897

Los siguientes valores para los parámetros de ajuste se obtuvieron a partir de un análisis de regresión que usó el método de los mínimos cuadrados para ajustar las porciones de las curvas que abarcan hasta un ductilidad máxima de 5: $\alpha = 2.63$, $\beta = 0.33$, $\gamma = 0.56$, $\delta = 0.58$ y $\lambda = 0.68$. Bajo la consideración de estos valores, la ecuación 3.2 resulta en:

$$m_d = \left[\frac{0.56 + \left| \frac{T}{0.68T_s} - 1 \right|}{2.63 \left(\frac{T}{0.68T_s} \right)^{0.33}} \right]^{0.58} = \left[\frac{0.56 + |A - 1|}{2.63 A^{0.33}} \right]^{0.58} \quad (3.3)$$

donde $A = \frac{T}{0.68T_s}$.

La tabla 3.3 y la figura 3.12 comparan los valores reales de m_d con estimaciones hechas con la ecuación 3.3 (línea roja continua). A partir de la comparación, puede concluirse que la expresión 3.3 ofrece buenas aproximaciones al valor de m_d .

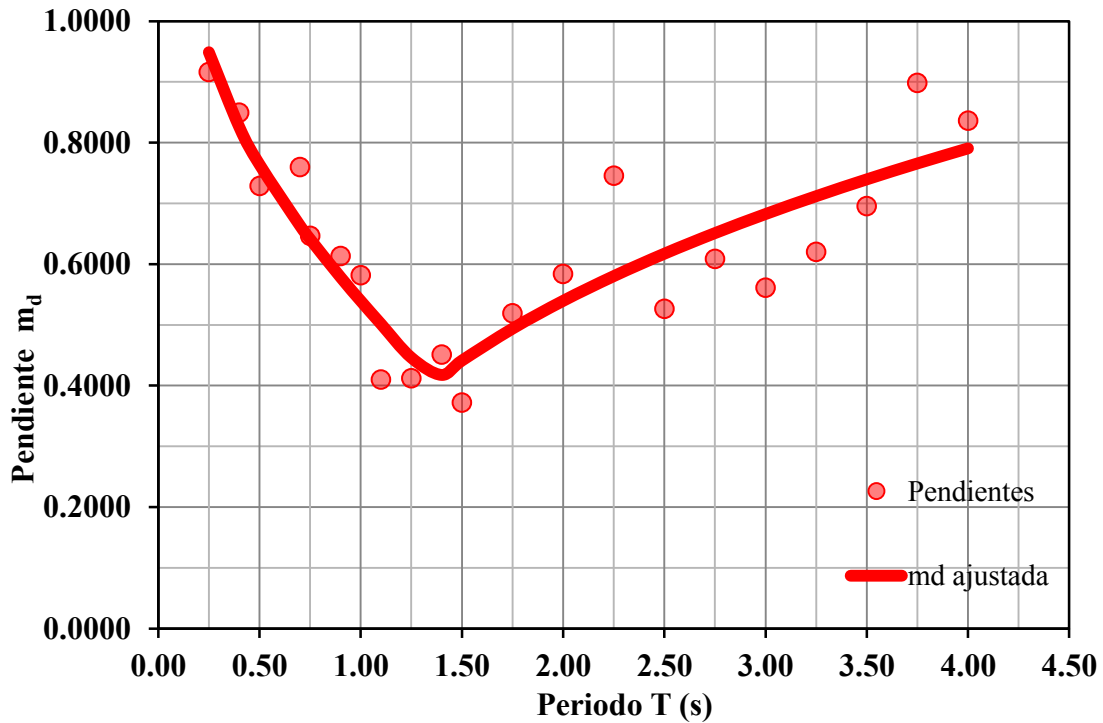


Figura 3.12. Datos dispersos y función de ajuste para m_d .

3.5. Estimación del desplazamiento máximo a partir del residual

El desplazamiento residual es igual a cero para demandas máximas de desplazamiento que sean menores o iguales al desplazamiento de fluencia del sistema. Una vez que un sistema con comportamiento elastoplástico-perfecto incurre en demandas no lineales, en términos de mediana su desplazamiento máximo (D_{MAX}) puede estimarse a partir del desplazamiento residual (D_{RES}) conforme a lo siguiente:

$$D_{MAX} = \frac{D_{RES}}{m_d} + D_y \quad (3.4)$$

Para ejemplificar la pertinencia de establecer el desplazamiento máximo a partir de la ecuación 3.4, se usa dicha ecuación para el caso de un sistema de 1GL con 2 s y una resistencia de fluencia igual a un décimo de su peso. Para el ejemplo se considera un desplazamiento residual de 20 cm, para el cual la ecuación 3.4 arroja un desplazamiento máximo de 43.8 cm. En términos de juzgar lo razonable de esta estimación, se llevaron a cabo análisis paso a paso no lineales del sistema de 1GL para todos los movimientos del terreno contemplados en la tabla 3.1. Dichos movimientos del terreno se escalaron de tal manera que al final de cada análisis, el desplazamiento residual del sistema fuera igual a 20 cm. La tabla 3.4 resume el desplazamiento máximo de cada corrida e indica una mediana para este desplazamiento de 42.1 cm. A partir de la comparación de las demandas mediana de desplazamiento máximo obtenido con la ecuación 3.4 y de los análisis no lineales paso a paso (43.8 y 42.1, respectivamente), es posible decir que dicha ecuación arroja estimaciones razonables de la demanda mediana de desplazamiento máximo.

Tabla 3.4. Comparativa de resultados del análisis de un sistema de un grado de libertad contra los obtenidos con la ecuación 3.4.

Sismo	T=2 s	
	D_{RES}	D_{MAX}
1	20.00	39.42
2	20.00	34.04
3	20.00	43.32
4	20.00	34.55
5	20.00	42.85
6	20.00	36.60
7	20.00	70.11
8	20.00	35.65
9	20.00	61.06
10	20.00	41.35
11	20.00	32.66
12	20.00	137.69
13	20.00	67.04
14	20.00	73.61
Mediana real		42.1
Mediana estimada		43.8
Diferencia en %		4

RELACIÓN ENTRE DUCTILIDAD MÁXIMA Y ENERGÍA PLÁSTICA NORMALIZADA

4.1. Introducción

Este capítulo usa el procedimiento usado en el capítulo 3, pero esta vez para establecer la relación entre la demanda máxima de ductilidad en sistemas de 1GL con comportamiento elastoplástico-perfecto, y su demanda de energía plástica normalizada.

4.2. Ductilidad

La ductilidad máxima es una medida de que tanto incurre un sistema estructural en su rango plástico de comportamiento. En particular, la ductilidad máxima (μ) se estima al normalizar la demanda máxima de desplazamiento (D_{MAX}) entre el correspondiente desplazamiento de fluencia (D_y):

$$\mu = \frac{D_{MAX}}{D_y} \quad (4.1)$$

La demanda máxima de ductilidad sobrepasa la unidad cuando el sistema incurre en comportamiento plástico.

4.3. Energía de entrada y plástica

La energía de entrada que una excitación sísmica introduce a un sistema sismorresistente puede almacenarse y disiparse de cuatro formas conforme a lo siguiente (Uang y Bertero 1999):

$$E_E = E_k + E_s + E_v + E_h \quad (4.2)$$

donde E_E es la energía de entrada que la excitación introduce en la estructura; E_k y E_s , las energías cinética y de deformación elástica, respectivamente, que almacena la estructura; y E_v y E_h , las energías disipadas por amortiguamiento viscoso y comportamiento plástico, respectivamente.

Al inicio de la excitación sísmica, la estructura almacena un alto porcentaje de la energía de entrada a través de su deformación elástica y movimiento (energía cinética); y disipa el resto a partir de su amortiguamiento. Conforme aumenta la intensidad de la excitación sísmica, la energía disipada por amortiguamiento resulta insuficiente, de tal manera que empieza a disiparse energía a través del comportamiento plástico de los elementos estructurales (lo que produce daño estructural). La Figura 4.1 ilustra la evolución del balance energético de una estructura sismorresistente conforme transcurre la excitación sísmica.

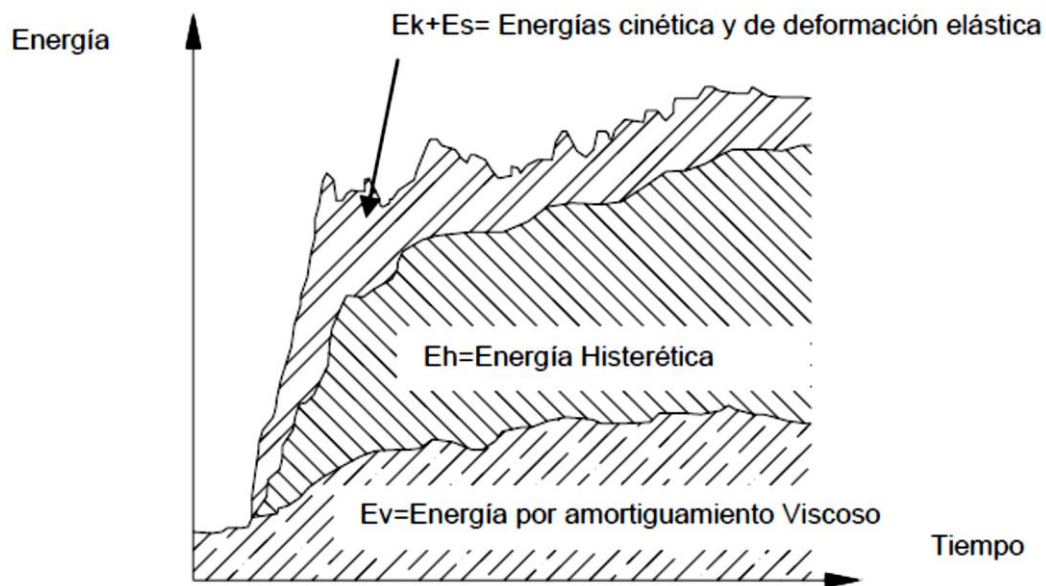


Figura 4.1. Entrada de Energía Sísmica y Balance de Energía, Giunco y Mazolani (2002).

Un diseño sísmico que fomente que las estructuras disipen la totalidad de la energía de entrada a través de su amortiguamiento natural resulta antieconómico, ya que un elevado porcentaje de la energía debe almacenarse de manera elástica. Debido a lo anterior, tradicionalmente se ha recurrido a utilizar el comportamiento plástico de los elementos estructurales para disipar energía, lo que resulta en daños estructurales que pueden llegar a poner en riesgo la estabilidad del sistema estructural y en elevados costos de reparación. Vale la pena mencionar que en

algunos casos, un alto porcentaje de energía almacenada a través del movimiento de la estructura puede resultar en daños excesivos en elementos no estructurales y contenidos y, por tanto, en la inoperabilidad de la estructura por largo tiempo después de la ocurrencia del fenómeno sísmico.

La energía plástica resulta del comportamiento no lineal del sistema. Conforme a lo mostrado en la figura 4.2, un sistema incurre en varios ciclos de comportamiento plástico durante una excitación sísmica, y en este caso, la energía plástica disipada se establece como la suma del área contenida en todos los lazos histeréticos que desarrolla el sistema durante dicha excitación.

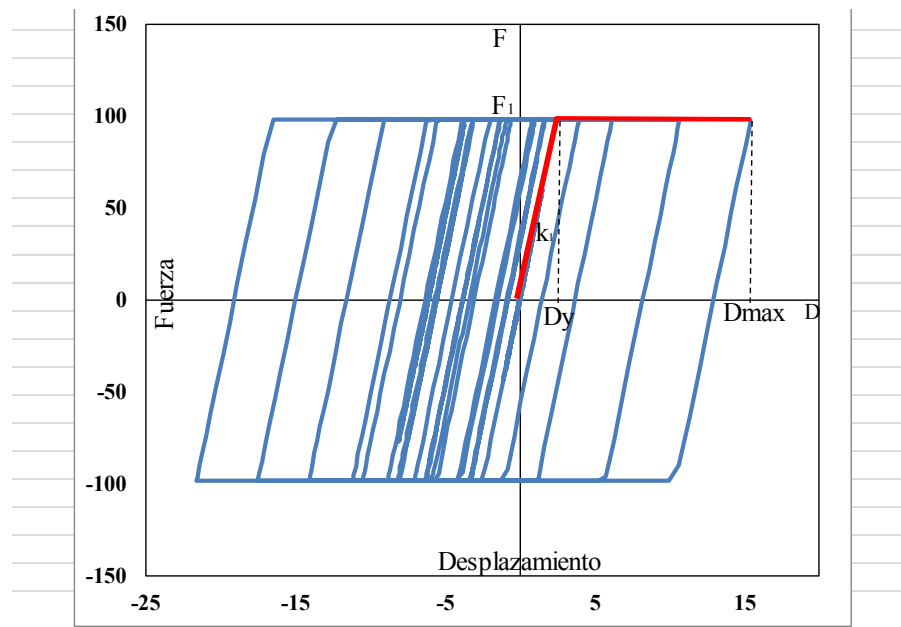


Figura 4.2. Sistema de un grado de libertad de comportamiento elasto-plástico al someterse a un sismo de suelo blando.

Sea E_y una medida de la energía elástica almacenada en el sistema cuando se le lleva a la fluencia, y $E_{h\mu}$ la energía plástica disipada durante la excitación sísmica. Se define la energía histerética normalizada como:

$$NE_{H\mu} = \frac{E_{h\mu}}{E_y} = \frac{E_{h\mu}}{F_y \delta_y} \quad (4.3)$$

donde F_y y δ_y son la fuerza y el desplazamiento a la primera fluencia.

4.4. Relación de ductilidad y energía plástica normalizada

Al igual que se hizo para establecer una relación entre las demandas de desplazamiento máximo y residual, se usó el programa EPPCONRESEPD.FOR para establecer la relación entre las demandas de ductilidad máxima y energía plástica normalizada para diferentes sistemas de 1GL con comportamiento elastoplástico-perfecto. La figura 4.3 muestra una curva de ductilidad máxima contra energía plástica normalizada para un sistema de 1GL con periodo de 2 s y resistencia de fluencia igual a un décimo de su peso.

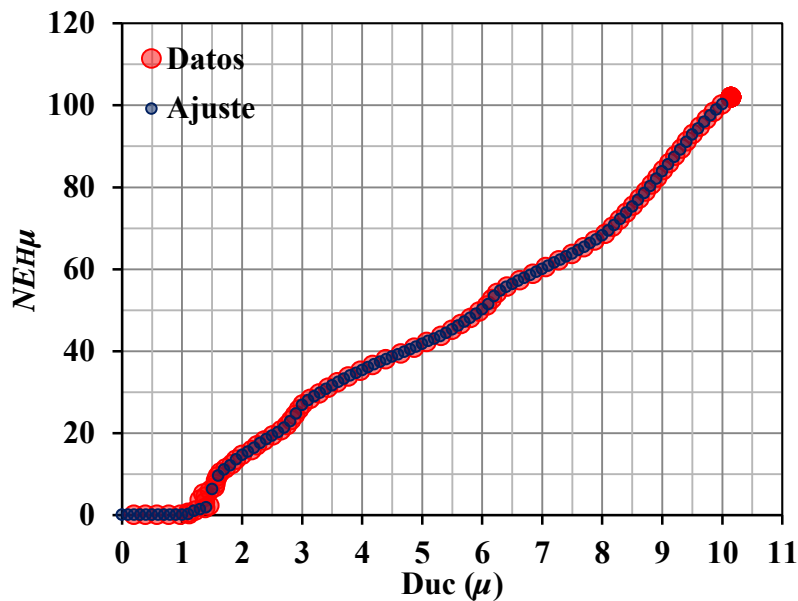


Figura 4.3. Ductilidad contra Energía Histerética Normalizada, para un sistema de un grado de libertad de $T=2$ s sometido al sismo 8 y factor de escala de 0.088 para 100 iteraciones.

Las figuras 4.4 a 4.6 muestran para sistemas de 1GL con periodos de 1, 2 y 3 s, comportamiento elastoplástico-perfecto y una resistencia lateral igual a un décimo de su peso, curvas de ductilidad máxima contra energía plástica normalizada. El apéndice C incluye gráficas similares para todos los sistemas de 1GL no contemplados por las figuras 4.4 a 4.6. Las líneas negras continuas indican las curvas mediana, obtenidas de manera similar a las curvas mediana de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual.

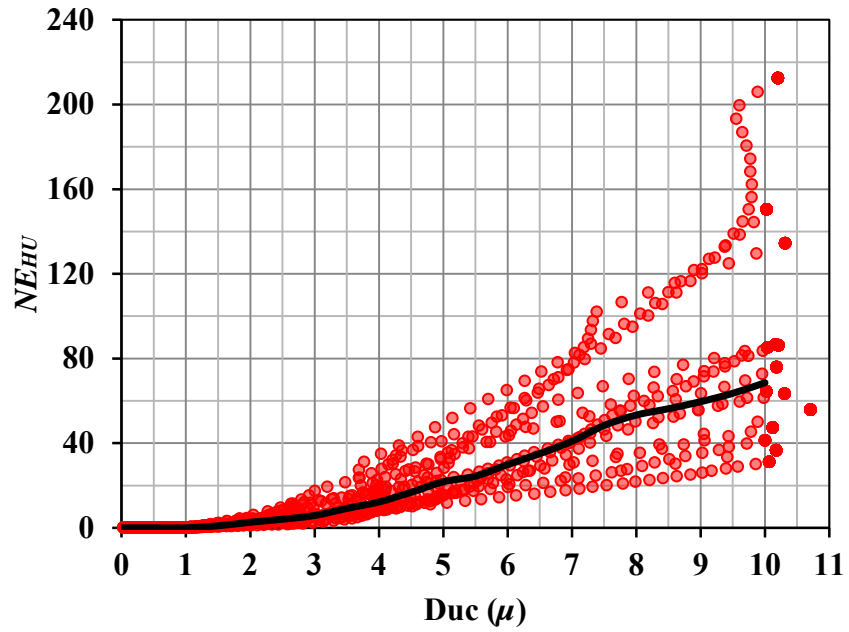


Figura 4.4. Ductilidad contra energía histerética normalizada de un sistema de 1GL de T=1 s sometido a sismos de suelo blando y la curva solida representa la mediana de energía plástica normalizada.

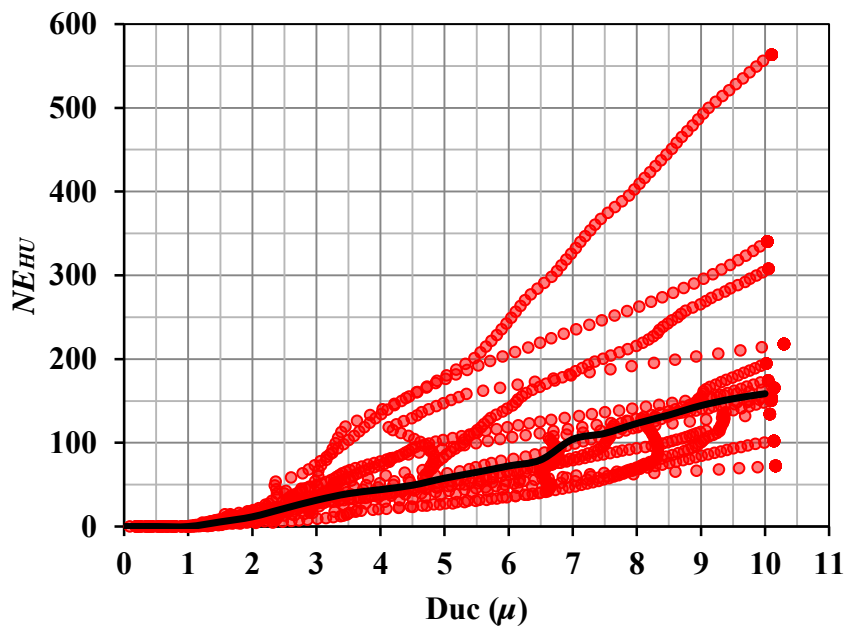


Figura 4.5. Ductilidad contra energía histerética normalizada de un sistema de 1GL de T=2 s sometido a sismos de suelo blando y la curva solida representa la mediana de energía plástica normalizada.

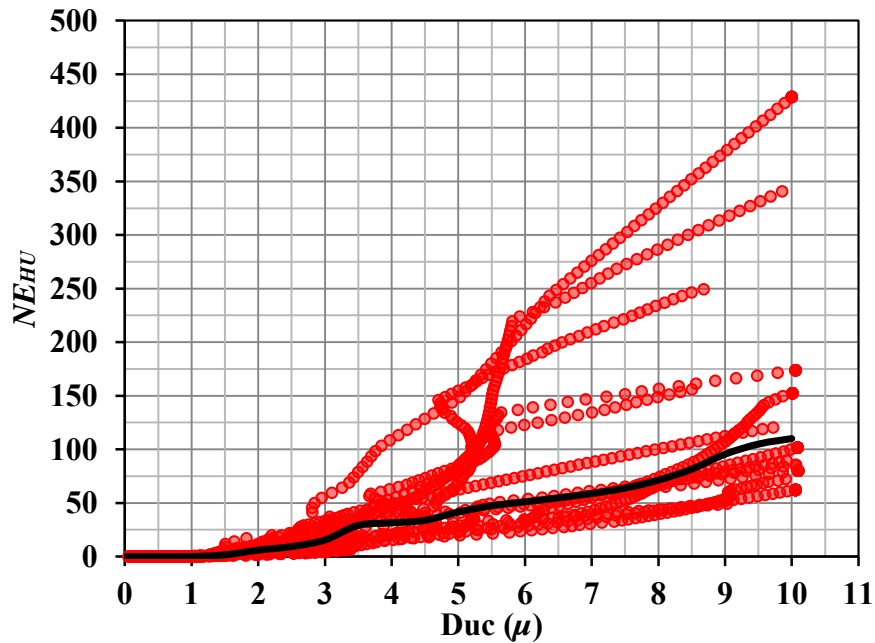


Figura 4.6. Ductilidad contra energía histerética normalizada de un sistema de 1GL de $T=3$ s sometido a sismos de suelo blando y la curva sólida representa la mediana de energía plástica normalizada.

La figura 4.7 superpone las curvas mediana para todos los sistemas de 1GL bajo consideración. De manera similar a lo observado para la relación mediana entre los desplazamientos máximo y residual, en la figura se muestra que la relación mediana entre la ductilidad máxima y la energía plástica normalizada sigue una tendencia bilineal. En una primera etapa, se tiene una energía plástica normalizada igual a cero para valores de ductilidad máxima que van de cero a uno. Una vez que la ductilidad máxima alcanza el valor de uno, se observa una segunda etapa donde se ve un incremento lineal en la energía plástica normalizada con respecto a un incremento en la ductilidad máxima. La pendiente de la segunda etapa lineal depende de manera importante del periodo del sistema de 1GL.

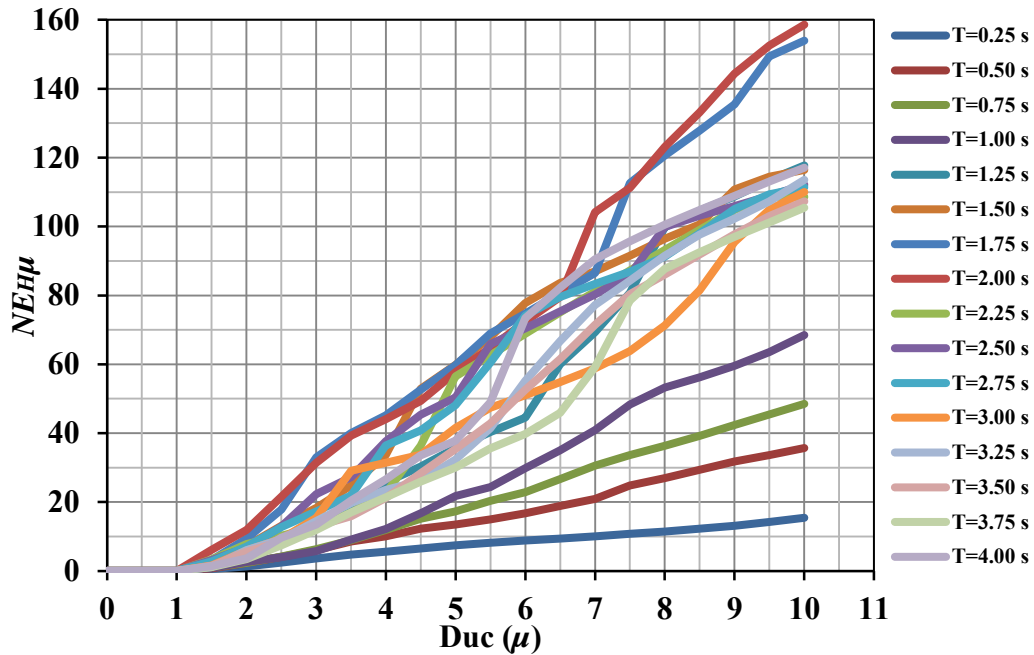


Figura 4.7. Medianas de ductilidad y energía histerética normalizada de diferentes sistemas de un grado de libertad sometidos a varios sismos de suelo blando.

Es posible hacer un ajuste de mínimos cuadrados para establecer la pendiente de la segunda etapa de cada curva mediana. Esto se ilustra en las figuras 4.8 a 4.10 para el caso de sistemas de 1GL con periodo de 1, 2 y 3 s. Se presentan en el apéndice C figuras similares para los sistemas de 1GL no considerados en las figuras 4.8 a 4.10. En las figuras, el círculo dibujado con líneas punteadas indica el punto donde los sistemas alcanzan una ductilidad máxima de uno.

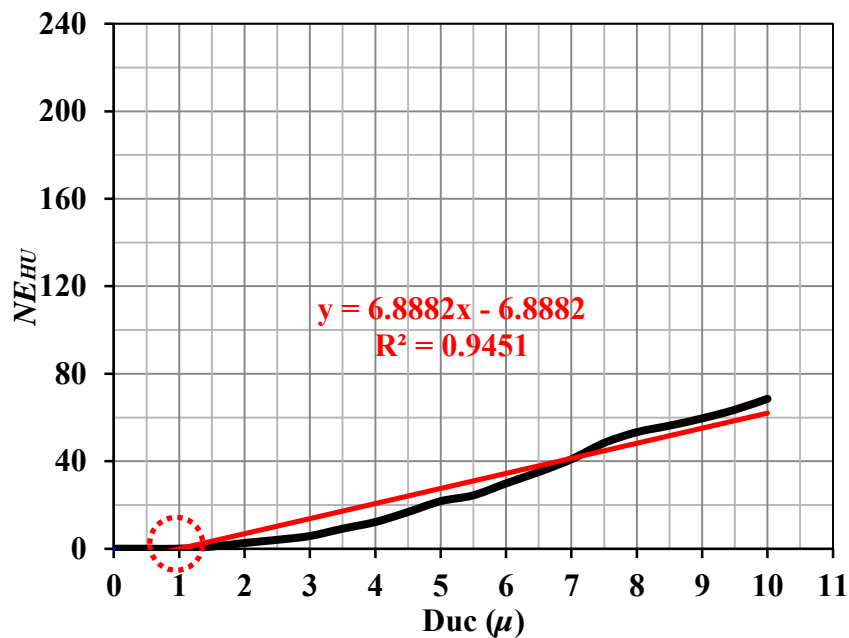


Figura 4.8. Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de $Duc(\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de un sistema de 1GL de $T=1.00$ s.

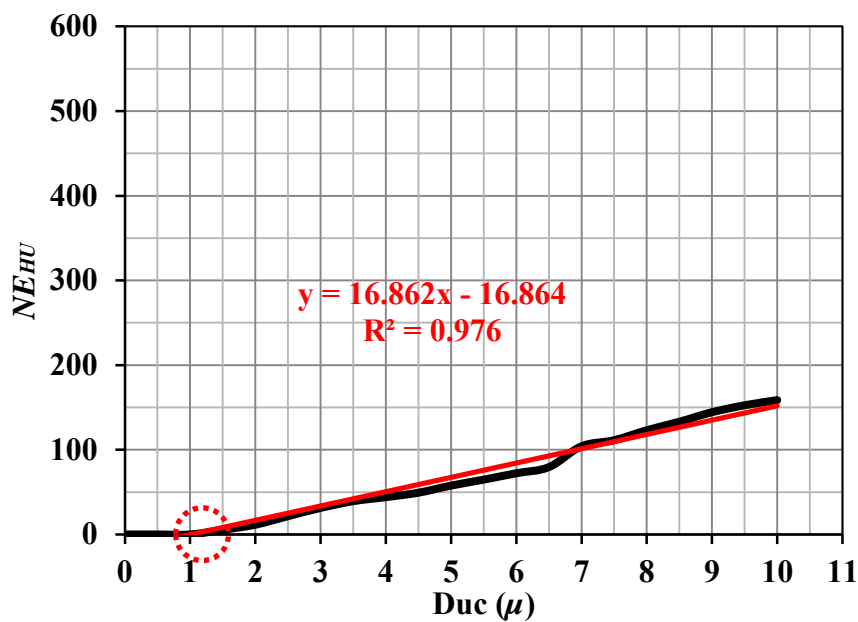


Figura 4.9. Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de $Duc(\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de un sistema de 1GL de $T=2.00$ s.

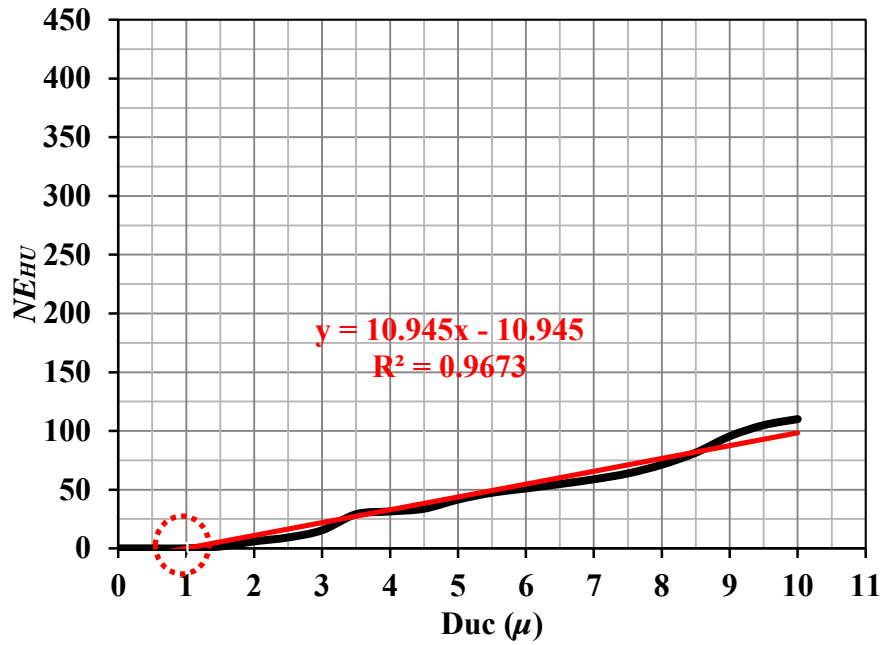


Figura 4.10. Ajuste lineal por mínimos cuadrados de mediana de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de un sistema de 1GL de $T=3.00$ s.

En la tabla 4.1 se resume los valores de las pendientes de la segunda etapa lineal de la relación mediana entre la ductilidad máxima y la energía plástica normalizada. La pendiente se denota m_e . La figura 4.11 muestra la manera en que los valores estimados para m_e varían en función del periodo de los sistemas de 1GL.

Tabla 4.1. Pendientes de medianas de ductilidad y energía plástica normalizada

Periodo T (s)	Pendiente m_e	Ajuste m_e
0.25	1.8379	1.4630
0.40	2.2580	2.1433
0.50	3.3056	2.6094
0.70	4.3759	3.6195
0.75	3.9148	3.8951
0.90	3.3748	4.7975
1.00	4.3520	5.4771
1.10	5.9875	6.2364
1.25	8.0528	7.5684
1.40	8.1836	9.2157
1.50	12.5760	10.5570
1.75	14.8880	15.2910
2.00	14.6300	14.7361

2.25	12.5220	12.5568
2.50	12.1610	11.1131
2.75	10.8950	10.0791
3.00	9.7616	9.2975
3.25	7.6105	8.6828
3.50	7.5440	8.1846
3.75	6.9074	7.7710
4.00	8.6163	7.4212

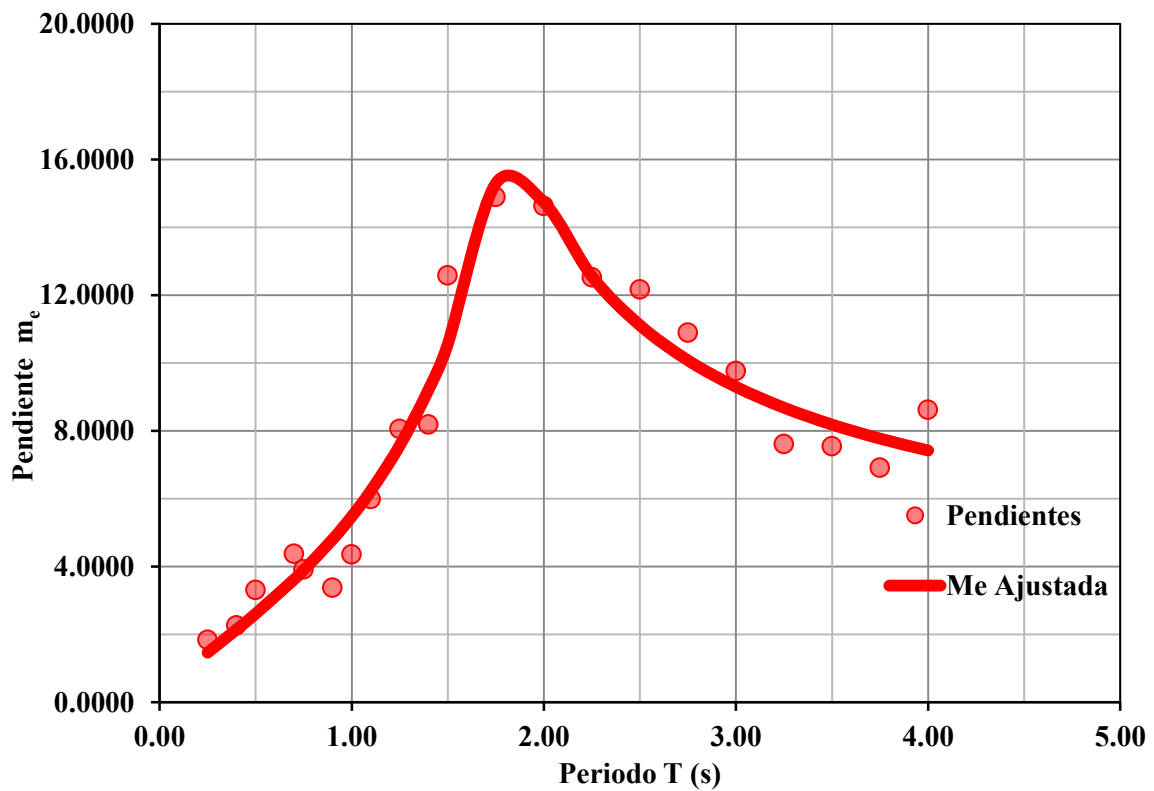


Figura 4.11. Datos dispersos y función de ajuste para m_e .

En un segundo paso, se propone una expresión para estimar m_e en función del periodo del sistema de 1GL. Para ello se usa la siguiente ecuación:

$$m_e = \frac{\alpha \left(\frac{T}{\delta T_s} \right)^\beta}{\gamma + \left| \frac{T}{\delta T_s} - 1 \right|} = \frac{\alpha B^\beta}{\gamma + |B - 1|} \quad (4.4)$$

donde $B = \frac{T}{\delta T_s}$; T_s es el periodo dominante del terreno; y α , β , γ y δ , parámetros de ajuste.

Los siguientes valores para los parámetros de ajuste se obtuvieron a partir de un análisis de regresión que usó el método de los mínimos cuadrados para ajustar la porción de las curvas que va hasta una ductilidad máxima de 5: $\alpha = 7.04$, $\beta = 0.67$, $\gamma = 0.41$ y $\delta = 0.91$. Bajo la consideración de los valores anteriores, la ecuación 4.4 resulta en:

$$m_e = \frac{7.04 \left(\frac{T}{0.91 T_s} \right)^{0.67}}{0.41 + \left| \frac{T}{0.91 T_s} - 1 \right|} = \frac{7.04 B^{0.67}}{0.41 + |B - 1|} \quad (4.5)$$

donde $B = \frac{T}{0.91 T_s}$

Tanto en la tabla 4.1 como en la figura 4.11 (línea roja continua) se comparan los valores reales de m_e con las estimaciones hechas con la ecuación 4.5. Puede concluirse que la ecuación 4.5 ofrece estimaciones muy razonables de m_e .

4.5. Estimación de la energía plástica normalizada a partir de la ductilidad máxima

A partir de lo discutido con anterioridad, es posible decir que para sistemas de 1GL con comportamiento elastoplástico-perfecto y ductilidades máximas iguales o menores que 1, la energía plástica normalizada es igual a cero; y que una vez que el valor de la ductilidad máxima excede el valor de 1, la energía plástica normalizada puede estimarse como:

$$NE_{H\mu} = m_e (\mu - 1) \quad (4.6)$$

Para ejemplificar la pertinencia de estimar la demanda mediana de energía plástica normalizada a partir de la ecuación 4.6, se usa dicha ecuación para el caso de un sistema de 1GL con 2 s y una resistencia de fluencia igual a un décimo de su peso. Para el ejemplo se considera un desplazamiento residual de 20 cm, para el cual la ecuación 3.4 arroja un desplazamiento máximo de 43.82 cm. En términos de juzgar lo razonable de esta estimación, se llevaron a cabo análisis paso a paso no lineales del sistema de 1GL para todos los movimientos del terreno contemplados en la tabla 3.1. Dichos movimientos del terreno se escalaron de tal manera que al final de cada análisis, el desplazamiento residual del sistema fuera igual a 20 cm. La tabla 4.2 resume las demandas de energía plástica normalizada de cada corrida e indica una mediana para esta energía de 54.83. La demanda mediana de energía plástica normalizada obtenida con la ecuación 4.6 una vez que se estima la ductilidad máxima con la mediana de desplazamiento máximo establecido con la ecuación 3.4 (43.82 cm), resulta igual a 57.47. La comparación de las demandas medianas indica que la ecuación 4.6 ofrece estimaciones razonables de la demanda de energía plástica normalizada.

Tabla 4.2. Comparativa de resultados del análisis de un sistema de un grado de libertad contra los obtenidos con la ecuación 4.6.

Sismo	T=2 s	
	D_{RES}	$NE_{H\mu}$
1	20.00	46.59
2	20.00	25.67
3	20.00	83.16
4	20.00	47.68
5	20.00	43.21
6	20.00	34.05
7	20.00	64.86
8	20.00	32.37
9	20.00	169.02
10	20.00	81.33
11	20.00	57.09
12	20.00	332.47
13	20.00	108.17
14	20.00	52.56
Mediana real		54.83
Mediana estimada		57.97
Diferencia en %		5.7

ANÁLISIS DE MODELOS BILINEAL Y TRILINEAL

5.1. Introducción

En este capítulo se decidió estudiar cómo cambian las relaciones medianas de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual, y de ductilidad máxima contra energía plástica normalizada, cuando el comportamiento hysterético de los sistemas de acero cambia con respecto al elastoplástico-perfecto. Para ello se obtuvieron curvas medianas para estas dos relaciones para sistemas de IGL con comportamiento distinto al elastoplástico-perfecto, y se comparan con aquellas obtenidas para este tipo de comportamiento. A partir de esto, se identifican y discuten los cambios, y se establece la influencia del comportamiento hysterético en las demandas sísmicas de sistemas de acero.

5.2. Efecto de la transición a la fluencia

Los materiales dúctiles, como el acero estructural, se caracterizan por su capacidad de fluir y, una vez que ingresan al rango plástico de comportamiento, por desarrollar deformaciones no lineales de importancia (Beer et al. 2007). Aunque como material puede considerarse que el acero fluye de una manera prácticamente instantánea, lo cierto es que los elementos, ensamblajes y estructuras de acero pueden llegar a exhibir una transición suavizada cuando abandonan su rango elástico de comportamiento. En otras palabras, es posible que la cedencia del elemento o estructura se dé por etapas, donde algunas fibras o elementos fluyan progresivamente hasta que se alcanza el mecanismo plástico. En la figura 5.1 se presenta una gráfica y el contraste de los comportamientos elastoplástico-perfectos con y sin cedencia gradual.

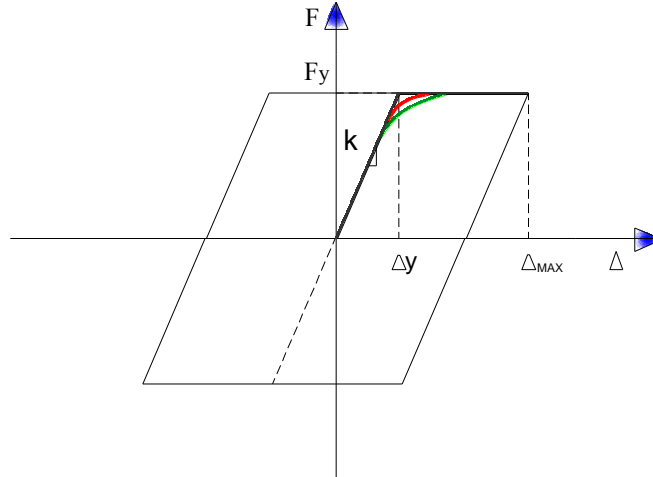


Figura 5.1 Modelo elastoplástico-perfecto con y sin cedencia gradual.

Para modelar distintos tipos de evolución hacia la cedencia, se modificó la rigidez de los sistemas de 1GL cuando se acercan a su fuerza de fluencia con el siguiente modelo matemático:

$$k_m = k_{elástica} \left(1 - \left(\frac{f}{f_y} \right)^n \right) \quad (5.1)$$

donde $k_{elástica}$ es la rigidez que correspondería al sistema en su rango elástico si tuviera un comportamiento elastoplástico-perfecto con fluencia instantánea; k_m , una rigidez que ajusta su valor al final del rango elástico para modelar la cedencia paulatina; f , la fuerza que desarrolla el sistema; f_y , la correspondiente fuerza de fluencia; y n un exponente que establece que tan rápido evoluciona el sistema desde su comportamiento elástico a uno plástico. En cuanto al uso de este modelo, note que por definición f no puede ser mayor que f_y , y que cuando el sistema se acerca a la etapa de cedencia, el cociente f/f_y tiende a uno y por tanto, de acuerdo a la ecuación 5.1, k_m tiende a cero. Cuando k_m alcanza un valor de cero, se considera que el sistema ha cedido. Mientras mayor sea el valor de n , el sistema transita de una manera más brusca desde el rango elástico al rango plástico. En cuanto a la figura 5.1, la curva verde corresponde al caso en que n es igual a 2, y la roja a un valor de 4.

Para estudiar cómo influye la transición hacia la fluencia las relaciones mediana de desplazamiento máximo y residual, y de ductilidad máxima contra energía plástica normalizada, la figura 5.2 compara, para un sistema de 1GL con periodo de 2 s y una resistencia lateral igual a un décimo de su peso, las curvas de sistemas con comportamiento elastoplástico-perfecto con fluencia instantánea con aquellas derivadas de sistemas cuya fluencia gradual queda caracterizada por valores de n de 2 y 4. A partir de resultados similares

obtenidos para una variedad de sistemas de 1GL, puede concluirse que la fluencia gradual de los sistemas de acero tiene muy poca influencia en sus relaciones de desplazamiento máximo y residual, y de ductilidad máxima contra energía plástica normalizada.

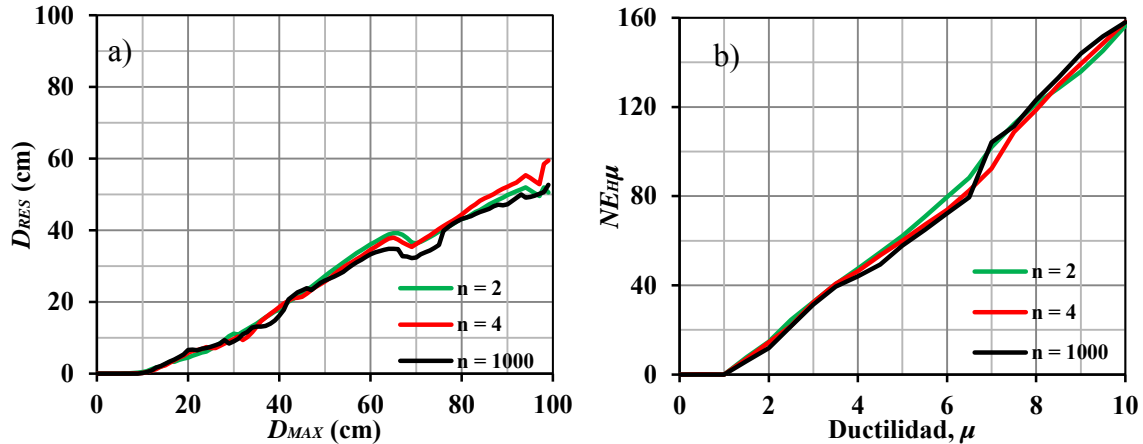


Figura 5.2. Tendencias de medianas con ajuste del punto de cedencia, a) Relación de D_{MAX} contra D_{RES} , b) Relación de Ductilidad μ contra $NE_{H\mu}$.

5.3. Efecto del endurecimiento por deformación en un modelo bilineal

El estudio experimental del comportamiento a deformación axial de los elementos de acero indica que a partir de cierta deformación plástica, el acero desarrolla una zona de endurecimiento por deformación (Beer et al. 2007). En función del tipo de estructura que se pretenda modelar y de sus demandas esperadas de deformación plástica, es posible usar comportamientos histeréticos bilineal o trilineal para modelar el endurecimiento por deformación. Este tipo de comportamientos se discutieron en detalle en el capítulo 2, y se ilustran con la ayuda de la figura 5.3.

Para entender el efecto del endurecimiento por deformación en la relación que existe entre los desplazamientos máximo y residual, las figuras 5.4 a 5.6 comparan para sistemas de 1GL con diferente periodo y una resistencia lateral igual a un décimo de su peso, las curvas mediana derivadas de comportamiento elastoplástico-perfecto con aquellas obtenidas para comportamientos bilineales con endurecimiento por deformación (denotado *epd* en las figuras) de 1, 5 y 10%. En el apéndice C se presentan las gráficas que dan origen a las figuras 5.4 a 5.6.

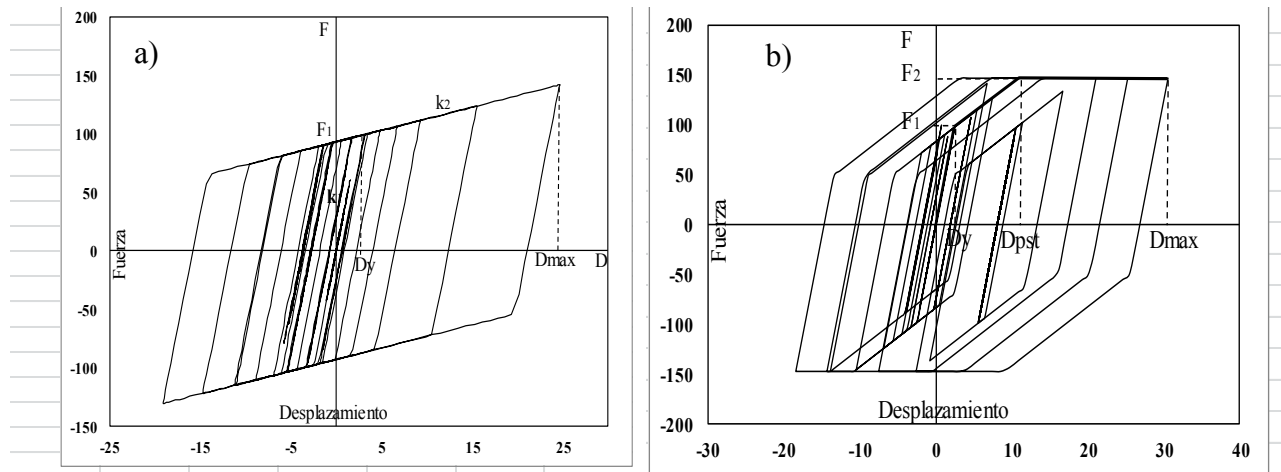


Figura 5.3. Modelos de análisis de endurecimiento por deformación, a) Comportamiento bilineal y b) Comportamiento trilineal.

A partir de las gráficas presentadas en las figuras 5.4 a 5.6 puede observarse que el endurecimiento por deformación tiene una influencia muy importante para la relación mediana que existe entre los desplazamientos máximo y residual. En cuanto a los detalles, puede observarse que el endurecimiento por deformación reduce considerablemente el desplazamiento residual, y que esta reducción es más importante en términos relativos conforme el periodo del sistema de IGL se aproxima al periodo dominante de la excitación (que en este caso es de 2 s). Conforme el periodo del sistema se aleja del periodo dominante de la excitación, ya sea porque se incrementa o reduce el valor de T , el efecto del endurecimiento por deformación tiende a decrecer. Note que basta incrementar la pendiente post-elástica de un valor de 0 al 1% para reducir el desplazamiento residual de manera importante, y que aunque un incremento de esta pendiente siempre tiene un efecto positivo en términos de controlar el desplazamiento residual, un incremento de su valor del 5 al 10% no representa un beneficio importante.

Otra tendencia que se observa es que un incremento en el endurecimiento por deformación hace que su efecto se note desde desplazamientos cada vez menores. En particular, note que las curvas correspondientes a comportamiento bilineal tienden a separarse de las de comportamiento elastoplástico-perfecto a deformaciones máximas menores conforme se incrementa el valor del endurecimiento por deformación. Finalmente, note que una vez que las curvas con endurecimiento por deformación tienden a separarse de las de comportamiento elastoplástico-perfecto, el desplazamiento residual de las primeras tiende a mantenerse

constante con respecto a un incremento del desplazamiento máximo. Lo anterior hace pensar que el endurecimiento por deformación es particularmente benéfico en términos del control del desplazamiento residual para sistemas que desarrollan demandas importantes de deformación plástica.

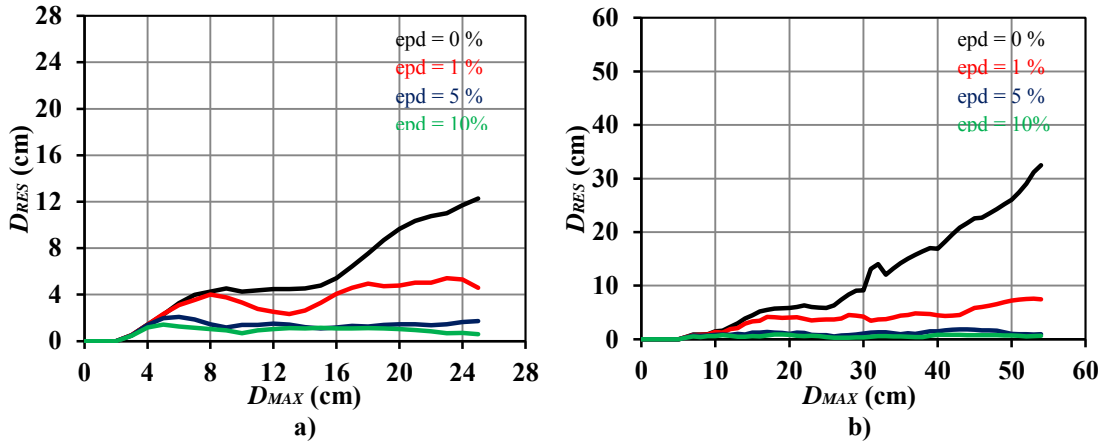


Figura 5.4. Comparativa de medianas de desplazamientos máximos y residuales para diferentes valores de epd del modelo bilineal. a) Sistema de 1GL de $T=1s$ y b) Sistema de 1GL de $T=1.5s$.

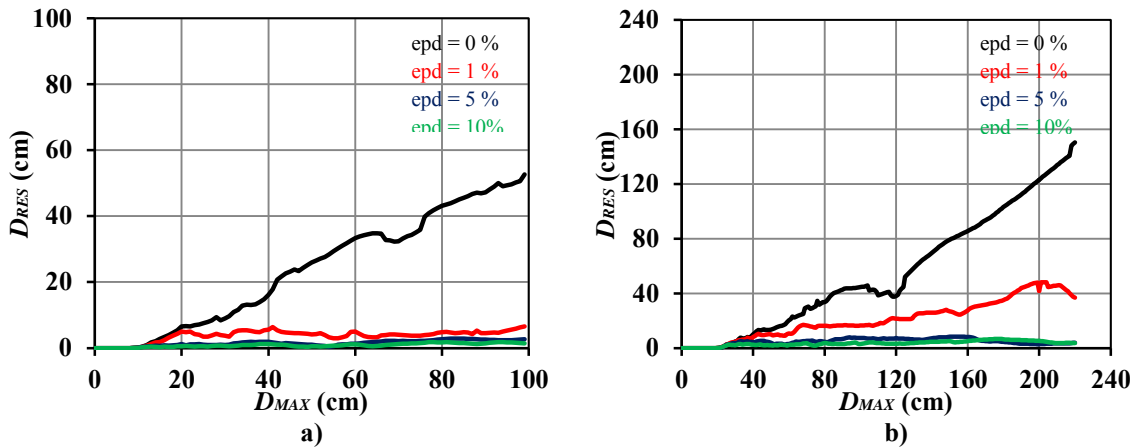


Figura 5.5. Comparativa de medianas de desplazamientos máximos y residuales para diferentes valores de epd del modelo bilineal. a) Sistema de 1GL de $T=2s$ y b) Sistema de 1GL de $T=3s$.

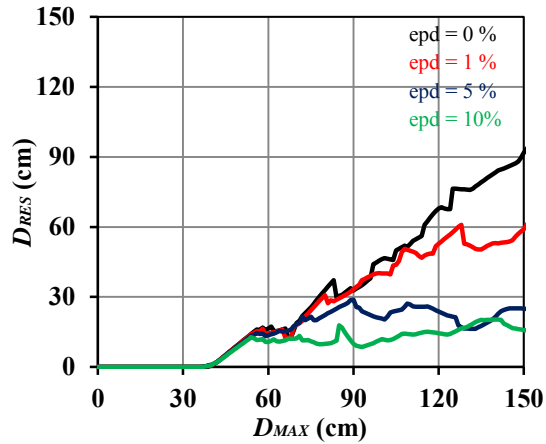


Figura 5.6. Comparativa de medianas de desplazamientos máximos y residuales para diferentes valores de epd del modelo bilineal para un sistema de 1GL de $T=4s$.

Para entender el efecto del endurecimiento por deformación en la relación que existe entre la ductilidad máxima y la energía plástica normalizada, las figuras 5.7 a 5.9 comparan para sistemas de 1GL con diferente periodo y una resistencia lateral igual a un décimo de su peso, las curvas mediana derivadas de comportamiento elastoplástico-perfecto con aquellas obtenidas para comportamientos bilineales con endurecimiento por deformación de 1, 5 y 10%. En el apéndice C se presentan las gráficas que dan origen a las figuras 5.7 a 5.9.

A partir de las gráficas presentadas en las figuras 5.7 a 5.9 puede observarse que el endurecimiento por deformación tiene una influencia muy importante para la relación mediana que existe entre la ductilidad máxima y la energía plástica normalizada. En cuanto a los detalles, puede observarse que el endurecimiento por deformación incrementa de manera considerable la demanda de energía plástica normalizada, y que en términos generales este incremento es sensiblemente independiente del valor del periodo del sistema de 1GL. En particular, el incremento en la demanda de energía se incrementa con el valor del endurecimiento por deformación, y tiende a saturarse para endurecimientos mayores que 5% (note que el valor de la energía plástica normalizada es prácticamente igual para endurecimientos del 5 y 10%). Finalmente note que el endurecimiento por deformación puede llegar a incrementar entre 100 y 150% el valor de la demanda de energía plástica normalizada.

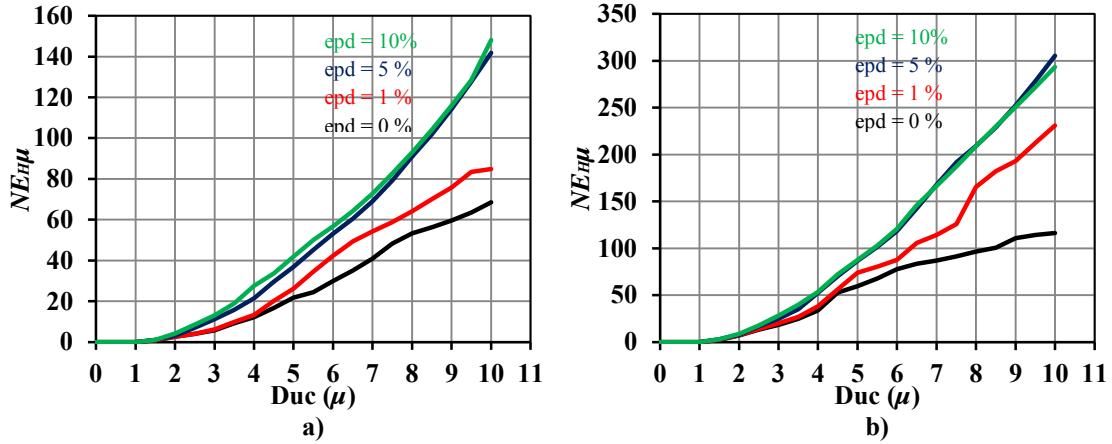


Figura 5.7. Comparativa de medianas de ductilidad y energía histerética normalizada para diferentes valores de epd del modelo bilineal. a) Sistema de 1GL de $T=1s$ y b) Sistema de 1GL de $T=1.5s$.

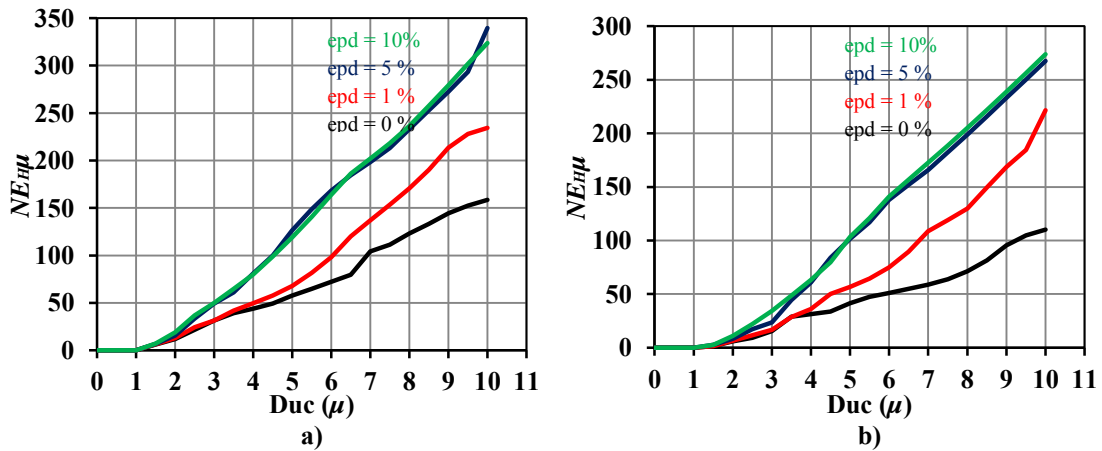


Figura 5.8. Comparativa de medianas de ductilidad y energía histerética normalizada para diferentes valores de epd del modelo bilineal. a) Sistema de 1GL de $T=2s$ y b) Sistema de 1GL de $T=3s$.

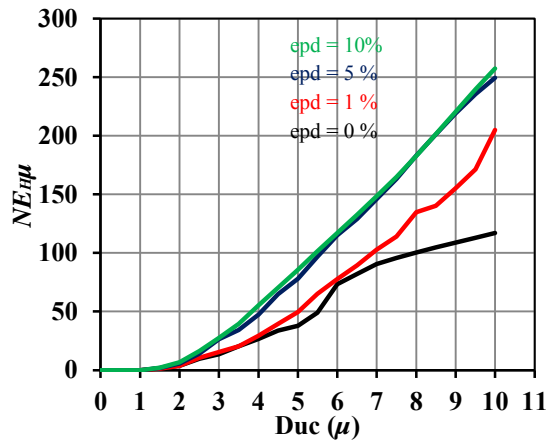


Figura 5.9. Comparativa de medianas de ductilidad y energía histerética normalizada para diferentes valores de epd del modelo bilineal para un sistema de 1GL de $T=4s$.

5.4. Efecto del endurecimiento por deformación en un modelo trilineal

Para estudiar cómo un comportamiento histerético trilineal cambia las relaciones entre los desplazamientos máximo y residual, y entre la demanda máxima de ductilidad y la energía plástica normalizada, se determinaron las curvas mediana para estas relaciones y varios tipos de comportamiento trilineal. En particular, para el primer punto de fluencia de los sistemas trilineales se consideró una resistencia de un décimo de su peso. Se consideraron además varios valores de endurecimiento por deformación para la segunda rama, y cocientes entre los desplazamientos que delimitan las primeras dos ramas y las dos últimas ramas de 3 y 5. Las figuras 5.10 a 5.13 muestran curvas mediana de desplazamientos máximo y residual para sistemas con periodos de 1, 2, 3 y 4 s. En estas figuras, las curvas asociadas a un *epd* de cero corresponden a comportamiento elastoplástico-perfecto; y las dos líneas punteadas corresponden a los desplazamientos d_{y1} y d_{y2} , que delimitan las tres zonas de respuesta de los modelos trilineales (primero la zona elástica; segundo la zona con endurecimiento por deformación; y tercero la zona de cedencia plástica). El apéndice C incluye las gráficas que dan origen a las figuras 5.10 a 5.13.

Curiosamente, las tendencias observadas para las curvas trilineales se muestran intermedias entre aquellas observadas para sistemas con comportamiento elastoplástico-perfecto y sistemas con comportamiento bilineal. En particular, mientras el desplazamiento máximo del sistema no excede el valor de d_{y1} , los sistemas permanecen elásticos y su desplazamiento residual es igual a cero. Una vez que los sistemas trilineales incurren en su segunda rama de comportamiento, donde exhiben endurecimiento por deformación, su comportamiento es exactamente igual al de un sistema bilineal siempre y cuando su desplazamiento máximo sea tal que permanezcan en esta segunda rama (note que un sistema trilineal no exhibe diferencia alguna con respecto a un sistema bilineal si no abandona su segunda rama de comportamiento). En esta segunda rama de comportamiento, el efecto del endurecimiento por deformación es exactamente igual al discutido para un sistema con comportamiento bilineal. Una vez que el desplazamiento máximo en los sistemas trilineales alcanza el desplazamiento a partir del cual ingresan a su tercer rama de comportamiento (d_{y2}), ceden totalmente y el desplazamiento residual tiende a crecer de manera lineal con respecto a un incremento de desplazamiento máximo, con una pendiente prácticamente igual a la que se observa cuando un sistema elastoplástico-perfecto incurre en comportamiento no lineal (esta pendiente se denotó m_d en el capítulo 3). Lo anterior es importante, porque implica que la cuantificación que se

hizo para la pendiente m_d para sistemas con comportamiento elastoplástico-perfecto podría aprovecharse para establecer el desplazamiento residual en un sistema con comportamiento trilineal.

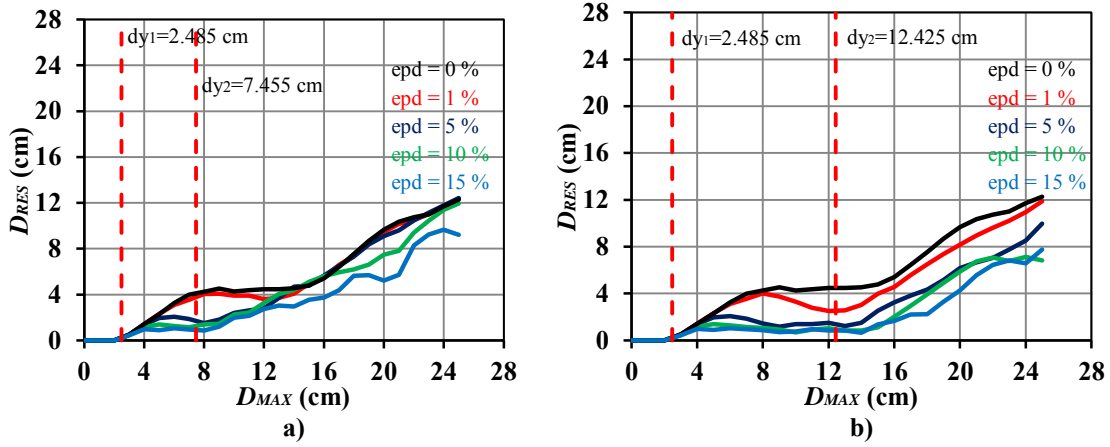


Figura 5.10. Tendencia de medianas de desplazamientos con diferentes valores de endurecimiento por deformación, a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de T=1s y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de T=1s.

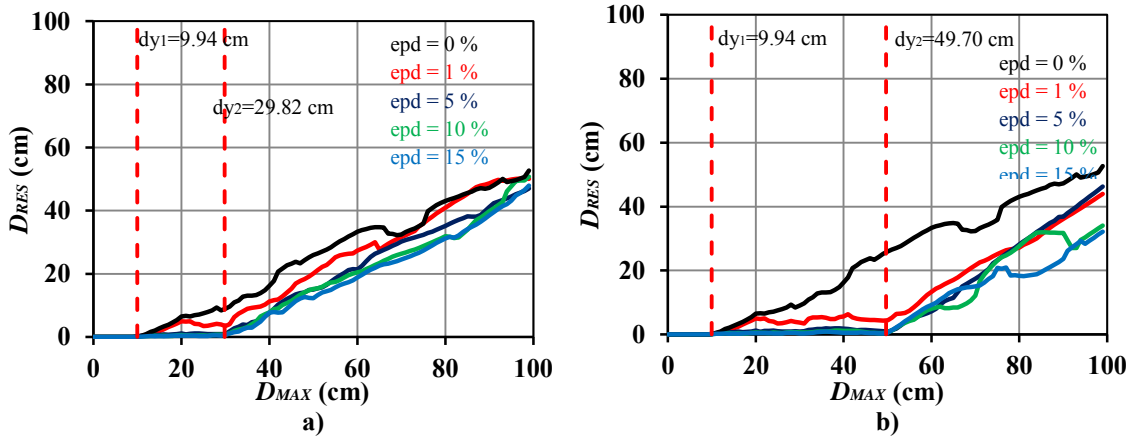


Figura 5.11. Tendencia de medianas de desplazamientos con diferentes valores de endurecimiento por deformación, a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de T=2s y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de T=2s.

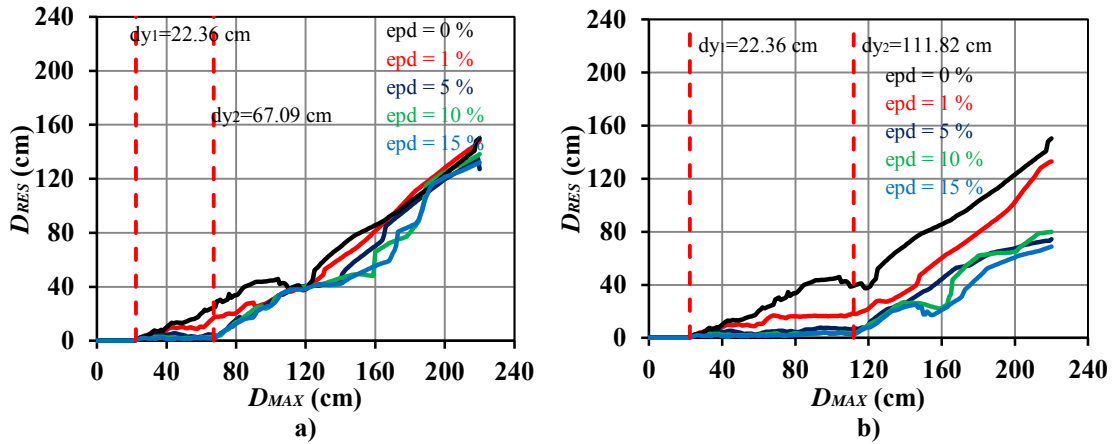


Figura 5.12. Tendencia de medianas de desplazamientos con diferentes valores de endurecimiento por deformación, a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=3s$ y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=3s$.

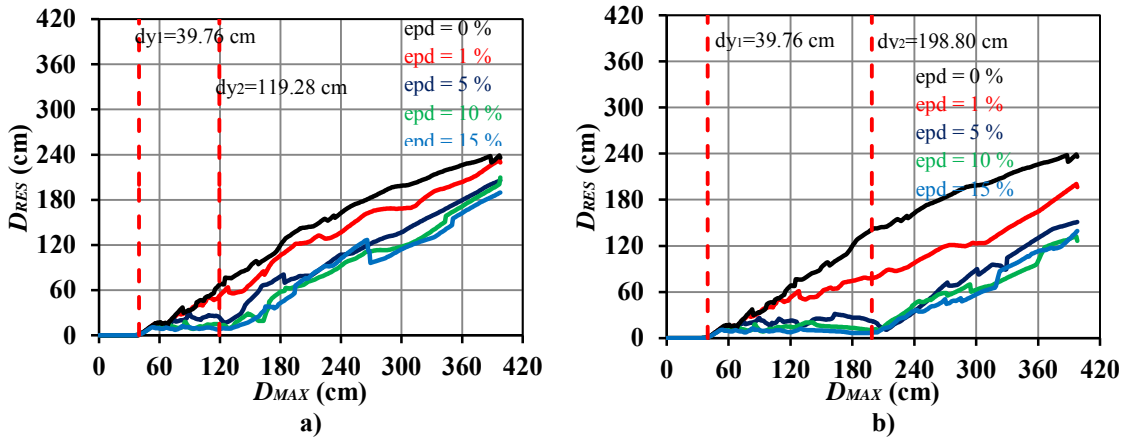


Figura 5.13. Tendencia de medianas de desplazamientos con diferentes valores de endurecimiento por deformación, a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=4s$ y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=4s$.

Las figuras 5.14 a 5.17 muestran curvas mediana de ductilidad máxima contra energía plástica normalizada para sistemas con periodos de 1, 2, 3 y 4 s. El apéndice C incluye las gráficas que dan origen a las figuras 5.14 a 5.17. De manera similar a lo observado para la relación entre los desplazamientos máximo y residual, las tendencias observadas para las curvas trilineales se muestran intermedias entre aquellas observadas para sistemas con comportamiento elastoplástico-perfecto y sistemas con comportamiento bilineal. En particular, mientras el desplazamiento máximo del sistema no excede el valor de d_{y1} , los sistemas permanecen elásticos y su demanda de energía plástica normalizada es igual a cero. Una vez que los sistemas trilineales incurrir en su segunda rama de comportamiento, donde exhiben endurecimiento por deformación, sus demandas de energía plástica normalizada tienden a duplicarse con respecto a las observadas para sistemas con comportamiento elasto-plástico

perfecto para valores de endurecimiento por deformación mayores que 5%. En esta segunda rama de comportamiento, el efecto del endurecimiento por deformación es exactamente igual al discutido para un sistema con comportamiento bilineal. Una vez que el desplazamiento máximo en los sistemas trilineales alcanza el desplazamiento a partir del cual ingresan a su tercer rama de comportamiento (d_{y2}), ceden totalmente y la energía plástica normalizada tiende a crecer de manera lineal con respecto a un incremento de ductilidad máxima, con una pendiente similar a la que se observa cuando un sistema elastoplástico-perfecto incurre en comportamiento no lineal (esta pendiente se denotó m_e en el capítulo 4). Lo anterior es importante, porque implica que la cuantificación que se hizo para la pendiente m_e para sistemas con comportamiento elastoplástico-perfecto podría aprovecharse para establecer la demanda de energía plástica en un sistema con comportamiento trilineal.

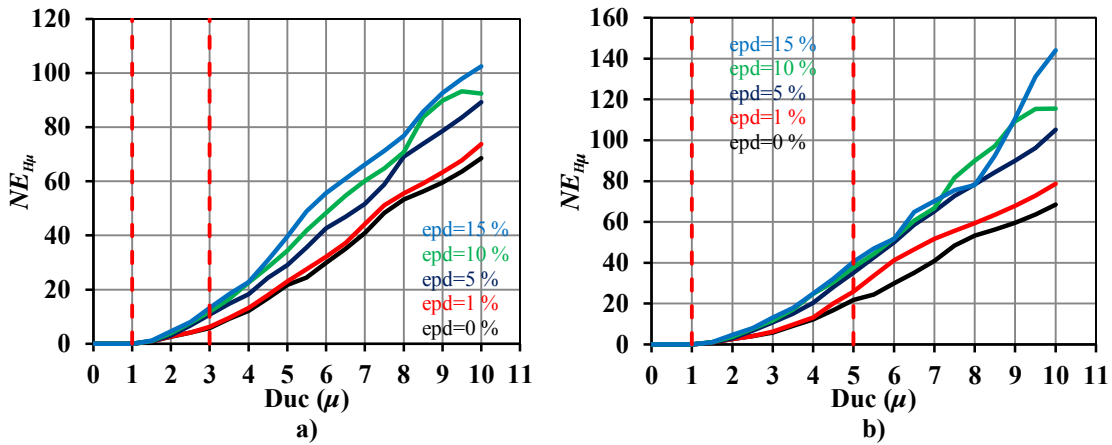


Figura 5.14. Tendencia de medianas de $Duc(\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ para: a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=1s$ y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=1s$.

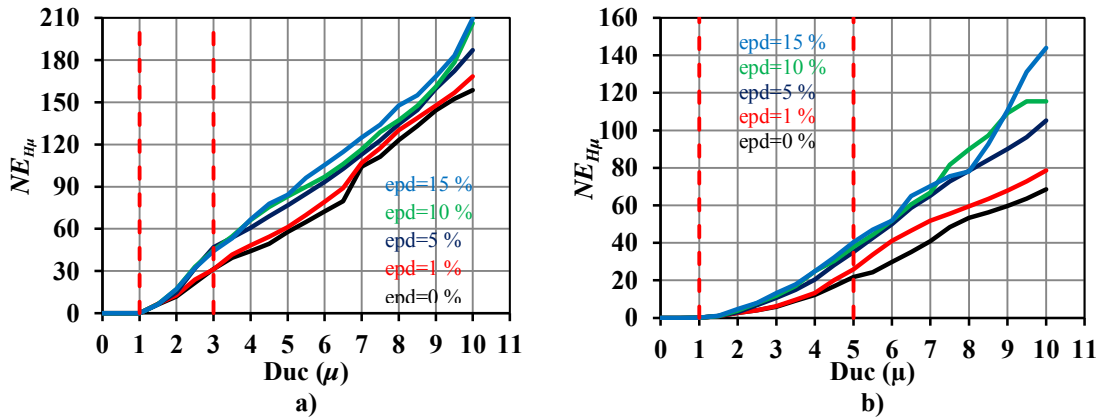


Figura 5.15. Tendencia de medianas de $Duc(\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ para: a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=2s$ y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=2s$.

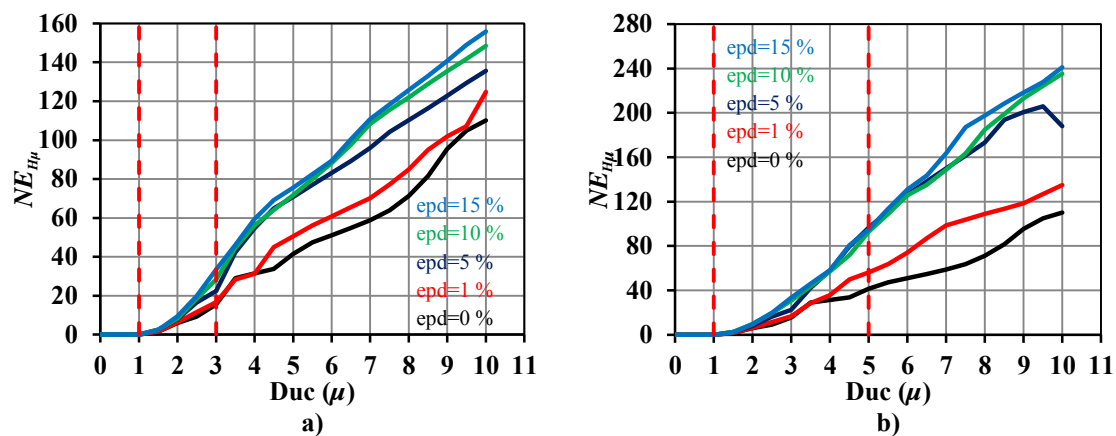


Figura 5.16. Tendencia de medianas de $Duc(\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ para: a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=3s$ y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=3s$.

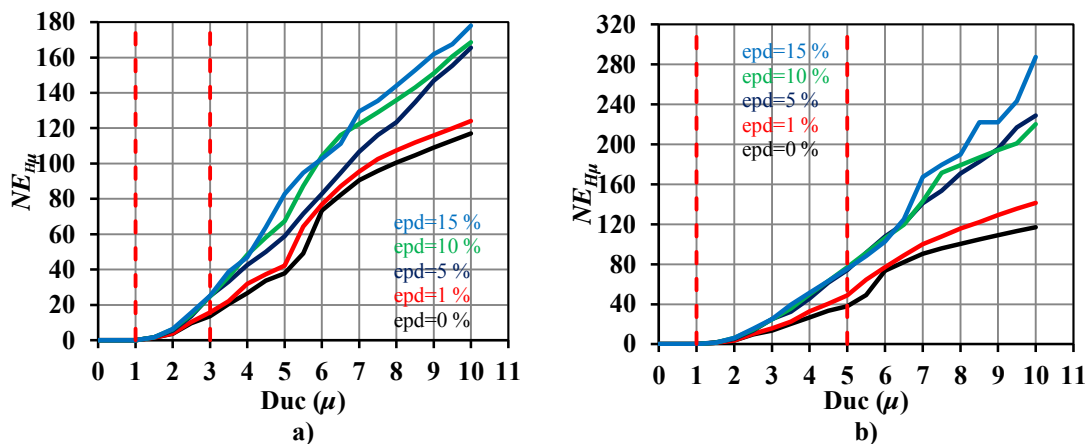


Figura 5.17. Tendencia de medianas de $Duc(\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ para: a) $dy_2=3dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=4s$ y b) $dy_2=5dy_1$ de un sistema de 1GL de $T=4s$.

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL POST-SISMO

6.1. Introducción

En este capítulo se ilustran las bases que harían posible la formulación de una metodología para evaluar el nivel de daño post-sismo en sistemas estructurales de acero. Para ello se usan las expresiones establecidas en los Capítulos 3 y 4 para estimar, a partir de un valor dado del desplazamiento residual, las demandas de desplazamiento máximo y energía plástica para tres sistemas de 1GL.

6.2. Índice de daño de Park y Ang

En este trabajo se usa el índice de Park y Ang (1984) para evaluar el nivel de daño en sistemas de 1GL con comportamiento elastoplástico-perfecto. En particular, este índice establece una combinación lineal del daño producto de las demandas máxima y acumulada de deformación:

$$DMI_{PA} = \frac{\mu_{MAX}}{\mu_u} + \beta \frac{NE_{H\mu}}{\mu_u} \quad (6.1)$$

donde DMI_{PA} es el índice de daño de Park y Ang; μ_{MAX} la demanda máxima de ductilidad; μ_u , la ductilidad última que el sistema es capaz de desarrollar cuando se le sujeta un estado de desplazamiento monótonamente creciente; β , un parámetro que cuantifica el daño producto de las demandas acumuladas de deformación; y $NE_{H\mu}$, la energía plástica normalizada.

Aunque el índice de Park y Ang ha sido desarrollado para evaluar el nivel de daño estructural en elementos de concreto reforzado, se considera de utilidad para ejemplificar los conceptos desarrollados en esta tesis.

En esta tesis se utiliza una escala normalizada que varía entre el valor cero en ausencia de daño, y el valor de uno en presencia de las condiciones de falla. De forma práctica, se propone valores de índices para evaluar el nivel de daño en elementos estructurales de acero como son los contravientos restringidos contra pandeo; para valores comprendidos entre 0.00 a 0.40, indica ocupación inmediata, de 0.40 a 0.70, indica realizar una evaluación detallada del sistema sismorresistente, y valores entre 0.70 a 1.00 indica pérdida de la capacidad de los elementos sismorresistentes y requieren reemplazo para no comprometer la seguridad de los ocupantes.

6.3. Evaluación estructural

La evaluación estructural consiste en determinar el nivel de daño en sistemas de un grado de libertad con comportamiento elastoplástico-perfecto a partir del desplazamiento residual que se mediría en campo después de la ocurrencia de la excitación sísmica. Tan solo con fines ilustrativos, se considera, dentro del contexto de la ecuación 6.1, una ductilidad última (μ_u) de 10 y un valor de 0.15 para el parámetro β .

En términos de entender lo razonable que resulta evaluar el nivel de daño en un sistema estructural a partir del uso de las ecuaciones 3.4 y 4.6, se llevó a cabo una serie de análisis paso a paso no lineales de tres sistemas de 1GL (con periodos de 1, 2 y 3 segundos) sujetos a la acción de los movimientos del terreno bajo consideración en la tabla 3.1. Para este ejercicio se consideró una resistencia de fluencia de un décimo del peso de los sistemas, y los movimientos del terreno se escalaron de tal manera que al final de cada análisis de los sistemas de 1, 2 y 3 s; el desplazamiento residual fuera igual a 10, 20 y 30 cm, respectivamente. A partir de estos análisis se determinaron las demandas de desplazamiento máximo (D_{MAX}) y energía plástica normalizada ($NE_{h\mu}$), los cuales se usaron para evaluar el índice de Park y Ang.

En la tabla 6.1 se resume, para el sistema de un 1GL con periodo de 1s, las demandas reales de desplazamiento máximo y energía plástica normalizada, y el valor que para el índice de daño de Park y Ang se estima con ellas. En particular, se tienen valores medianos de 20.32 cm, 56.27 y 1.86, respectivamente. De igual forma, se resumen las medianas estimadas a partir del desplazamiento residual de 10 cm con las ecuaciones 3.4, 4.6 y 6.1. Se estiman valores medianos de 20.96, 40.72 y 1.45 para el desplazamiento máximo, la energía plástica normalizada, y el índice de Park y Ang, respectivamente. Note que la evaluación hecha con las

ecuaciones desarrolladas en esta tesis resulta muy razonable en relación a lo indicado por los análisis no lineales paso a paso.

Tabla 6.1. Evaluación del nivel de daño de un sistema de 1GL de 1 segundo de periodo.

Sismo	T=1 s				
	D_{RES} (cm)	D_{MAX} (cm)	μ	$NE_{h\mu}$	DMI_{PA}
1	10.00	23.31	9.38	77.58	2.10
2	10.00	19.87	8.00	50.07	1.55
3	10.00	17.34	6.98	17.85	0.97
4	10.00	29.84	12.01	53.87	2.01
5	10.00	18.02	7.25	31.07	1.19
6	10.00	19.23	7.74	44.92	1.45
7	10.00	28.24	11.37	95.27	2.57
8	10.00	13.17	5.30	17.73	0.80
9	10.00	34.14	13.74	324.30	6.24
10	10.00	51.10	20.56	605.89	11.14
11	10.00	19.81	7.97	36.44	1.34
12	10.00	19.34	7.78	106.53	2.38
13	10.00	20.76	8.36	58.67	1.72
14	10.00	43.78	17.62	105.22	3.34
Mediana real		20.32	8.18	56.27	1.86
Mediana estimada		20.96	8.43	40.72	1.45
Diferencia en %		3	3	28	22

La tabla 6.2 resume, para el sistema de un 1GL con periodo de 2s, las demandas reales de desplazamiento máximo y energía plástica normalizada, y el valor que para el índice de daño de Park y Ang se estima con ellas. En particular, se tienen valores medianos de 42.10 cm, 54.83 y 1.36, respectivamente. De igual forma, se resumen las medianas estimadas a partir del desplazamiento residual de 20 cm con las ecuaciones 3.4, 4.6 y 6.1. Se estiman valores medianos de 47.01, 54.97 y 1.30 para el desplazamiento máximo, la energía plástica normalizada, y el índice de Park y Ang, respectivamente. Una vez más, es notorio que la evaluación hecha con las ecuaciones desarrolladas en esta tesis resulta muy razonable en relación a lo indicado por los análisis no lineales paso a paso.

Tabla 6.2. Evaluación del nivel de daño de un sistema de 1GL de 2 segundo de periodo.

Sismo	T=2 s				
	D_{RES} (cm)	D_{MAX} (cm)	μ	$NE_{h\mu}$	DMI_{PA}
1	20.00	39.42	3.97	46.59	1.10
2	20.00	34.04	3.42	25.67	0.73
3	20.00	43.32	4.36	83.16	1.68
4	20.00	34.55	3.48	47.68	1.06
5	20.00	42.85	4.31	43.21	1.08
6	20.00	36.60	3.68	34.05	0.88
7	20.00	70.11	7.05	64.86	1.68
8	20.00	35.65	3.59	32.37	0.84
9	20.00	61.06	6.14	169.02	3.15
10	20.00	41.35	4.16	81.33	1.64
11	20.00	32.66	3.29	57.09	1.19
12	20.00	137.69	13.85	332.47	6.37
13	20.00	67.04	6.74	108.17	2.30
14	20.00	73.61	7.41	52.56	1.53
Mediana real		42.10	4.24	54.83	1.36
Mediana estimado		47.01	4.73	54.97	1.30
Diferencia en %		12	12	0.25	4

Finalmente, en la tabla 6.3 se resume, para el sistema de un 1GL con periodo de 3s, las demandas reales de desplazamiento máximo y energía plástica normalizada, y el valor que para el índice de daño de Park y Ang se estima con ellas. En particular, se tienen valores medianos de 68.05 cm, 19.61 y 0.62, respectivamente. De igual forma, se resumen las medianas estimadas a partir del desplazamiento residual de 30 cm con las ecuaciones 3.4, 4.6 y 6.1. Se estiman valores medianos de 66.34, 18.28 y 0.57 para el desplazamiento máximo, la energía plástica normalizada, y el índice de Park y Ang, respectivamente. Una vez más, es notorio que la evaluación hecha con las ecuaciones desarrolladas en esta tesis resulta muy razonable en relación a lo indicado por los análisis no lineales paso a paso.

Tabla 6.3. Evaluación del nivel de daño de un sistema de 1GL de 3 segundo de periodo.

Sismo	T=3 s				
	D_{RES} (cm)	D_{MAX} (cm)	μ	$NE_{h\mu}$	DMI_{PA}
1	30.00	68.02	3.04	28.93	0.74
2	30.00	60.75	2.72	4.09	0.33
3	30.00	56.02	2.51	7.67	0.37
4	30.00	56.25	2.52	1.77	0.28
5	30.00	55.18	2.47	2.41	0.28
6	30.00	67.68	3.03	11.44	0.47
7	30.00	91.35	4.08	21.97	0.74
8	30.00	360.23	16.11	290.79	5.97
9	30.00	74.24	3.32	14.67	0.55
10	30.00	79.17	3.54	17.26	0.61
11	30.00	68.09	3.04	32.15	0.79
12	30.00	61.78	2.76	22.73	0.62
13	30.00	128.15	5.73	197.27	3.53
14	30.00	71.05	3.18	35.83	0.86
Mediana real		68.05	3.04	19.61	0.62
Mediana estimada		66.34	2.97	18.28	0.57
Diferencia en %		3	3	7	7

CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos en esta tesis, se concluye lo siguiente:

- Cuando un sistema de un grado de libertad incurre en comportamiento plástico, la mediana de su desplazamiento residual tiende a incrementarse de manera lineal con respecto a un incremento en el desplazamiento máximo. Esto hace posible plantear la ecuación de una recta para predecir la demanda máxima de desplazamiento a partir del desplazamiento residual medido en campo.
- Cuando un sistema de un grado de libertad incurre en comportamiento plástico, la mediana de su energía plástica normalizada tiende a incrementarse de manera lineal con respecto a un incremento en la demanda máxima de ductilidad. Esto hace posible plantear la ecuación de una recta para predecir la demanda de energía plástica normalizada a partir de la demanda máxima de ductilidad, la que a su vez se estima a partir de la demanda máxima de desplazamiento.
- La fluencia gradual de un modelo elasto-plástico tiene poca influencia en sus relaciones de desplazamiento máximo y residual, y de ductilidad máxima y energía plástica normalizada.
- En un sistema bilineal el endurecimiento por deformación tiene una influencia muy importante para la relación mediana que existe entre la ductilidad máxima y la energía plástica normalizada.
- Los sistemas trilineales que incurren en comportamiento plástico en su tercer rama de comportamiento exhiben un desplazamiento residual que tiende a crecer de manera lineal con respecto a un incremento en el desplazamiento máximo, con una pendiente prácticamente igual a la que se observa cuando un sistema elastoplástico-perfecto incurre en comportamiento no lineal. Lo anterior es importante, porque implica que la cuantificación que se hizo para la pendiente m_d para sistemas con comportamiento elastoplástico-perfecto podría aprovecharse para establecer el desplazamiento máximo en un sistema con comportamiento trilineal.

- Las expresiones propuestas para estimar el nivel de daño estructural en sistemas de 1GL a partir de su desplazamiento residual arrojan estimaciones razonables en relación a lo estimado a partir de análisis detallados paso a paso no lineales.

REFERENCIAS

1. Bertero V, J Anderson, H Krawinkler, (1994) UCB/EERC-94/09 **“Performance of Steel Building Structures During the Northridge Earthquake”**, August 1994, PB95-112025(A10).
2. Uang y Nakashima, (2004), **“Earthquake engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering”**, Chapter 16th, **“Steel Buckling-Restrained Braced Frames”**.
3. Coeto, G. (2008), **“Control de la Respuesta Sísmica de Edificios Altos por Medio de un Sistema de Contravientos Restringidos Contra Pandeo”**, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana.
4. Terán, A. (2014), **“La sustentabilidad y el Diseño Sísmico de Edificios de Acero y de Concreto”**, Revista Vector de la Ingeniería Civil, 62, PP. 21-28.
5. García, M. y González, B. (2013), **“Refuerzo de edificio de concreto de la UAM unidad Azcapotzalco-edificio G-con contravientos restringidos contra pandeo”**, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Boca del Rio, Veracruz.
6. Arroyo D, Terán A, Gama E y Guerrero J.J. (2009), **“Estudio Experimental de Contravientos Restringidos Contra Pandeo: Desarrollo Conceptual y Detalles de Implementación”**, Reporte UAM-A/DMAE-2009-04, Universidad Autónoma Metropolitana, México.
7. Paz M. (1992), **“Dinámica Estructural”**, Reverte.
8. Chopra Anil K., 2014, **“Dinámica de Estructuras”**, Cuarta Edición, Pearson.
9. Cáceres J. (2001), **“Modelación, análisis no lineal y disipación de energía de estructuras planas sometidas a terremotos”**, Memoria para título, Universidad Católica de Chile.
10. R. Bouc, (1967), **“Forced Vibration of mechanical systems with hysteresis”**, Proceedings of the Fourth Conference on Non-linear Oscillation, Prague, Czechoslovakia.
11. Y. K. Wen, (1976), **“Method for Random Vibration of Hysteretic Systems”**, Journal of the Engineering Mechanics Division, V. 102, No. 2, 249-263.

12. Meli R. (1979), **“Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería”**, 2ª edición corregida y aumentada, informe No. 352, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
13. Bazán, Meli, 2011, **“Diseño Sísmico de Edificios”**, Limusa.
14. Terán-Gilmore A. Ruiz-García J. y Bejórquez-Mora E. **“Flexible Gravitational Frames as Self-Centering Mechanisms for Buildings Having Bucking-Restrained Braces”**.
15. Bertero V, J Anderson, H. Krawinkler, E Miranda, (1991), **“Design Guidelines for Ductility and Drift Limits”** report No. UCB/EERC-91/15 July 1991, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California at Berkeley.
16. Miranda E, (2001), **“Estimation of Inelastic Deformation Demands of SDOF Systems”**, Journal of Structural Engineering, Vol. 127, No. 9, September 2001. ASCE.
17. New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE, 2006). **“Assessment and Improvement of the Structural Performance Buildings in Earthquakes”**, junio 2006.
18. A. A. Christidis, E. G. Dimitroudi, G. D. Hatzigeorgiou y D. E. Beskos (2013), **“Maximum seismic displacements evaluation of steel frames from their post-earthquake residual deformation”** Department of Environmental Engineering, Democritus University of Thrace, Xanthi, Greece.
19. Wada, Huang, Bertero, (2004), **“Earthquake engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering”**, Chapter 10th, “Innovative Strategies in Earthquake Engineering”
20. Base de datos acelerométricos de la Ciudad de México <http://mexcityad.azc.uam.mx/principal/home.aspx>
21. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 2004 (NTCS del RCDF 2004).
22. Beer F., Johnston R., DeWolf J. (2007), **“Mecánica de Materiales”**, Capítulo 2, Cuarta Edición, McGraw-Hill, México D.F.
23. S. H. Jeong, K. H. Lee and W. S. Jang (2010), **PRISM for Earthquake Engineering V. 2.0.0**, Software for Seismic Response Analysis of Single-Degree-of-Freedom-Systems, Department of Architectural Engineering, INHA University.
24. Ordaz M. y Montoya C. (2012), **Degtra V. 9.1.0**, Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM) y Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

25. Singhal, Ajay y Kiremidjian, Anne (1997), **A method for earthquake motion-damage relationships with application to reinforced concrete frames**. Stanford University. September 10, 1997.
26. Y. J. Park and Y. K. Ang (1984), **Seismic Damage Analysis and Damage-Limiting Design of R. C. Buildings**, Chapter 2, University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois.
27. N. M. Newmark and A. S. Veletsos (1960). **Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions**, University of Illinois, Urbana, 111.
28. Applied Technology Council. FEMA 306 (1998), **Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings**. Report no. ATC-43, Redwood City, CA.
29. Terán-Gilmore A. (2004), **On the use of spectra to establish damage control inn regular frames during global predesign**, Earthquake Spectra; 20(3):1-26.
30. Terán-Gilmore A. and Ruiz-García J. (2010), **Comparative seismic performance of steel frames retrofitted with buckling- restrained braces through the application of Force-Based and Displacement-Based approaches**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 31 (2011) 478-490.
31. American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI 41-13), **Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings**, Chapter 9. Steel, table 9-7, P. 156.
32. Prakash V., Powell G H, Campbell S (1993), **“DRAIN-2DX Base program description and user guide”**, Report UCB/SEMM-93/17, University of California at Berkeley.

REGISTROS SÍSMICOS DE LA ZONA DEL LAGO DEL DISTRITO FEDERAL

El material incluido en este apéndice es presentado para complementar la información del capítulo 3.

A.1. Acelerogramas, espectros de respuesta de desplazamiento y de aceleración para cada sismo de la Zona del Lago.

A continuación se presentan los registros sísmicos de la Zona del Lago del Distrito Federal utilizados para el desarrollo del trabajo de investigación. Se calcularon los espectros elásticos de cada sismo con 5 % de amortiguamiento crítico, agregándole al final 50 segundos de aceleración cero para identificar el desplazamiento residual con claridad, ver figuras A.1 a A.14.

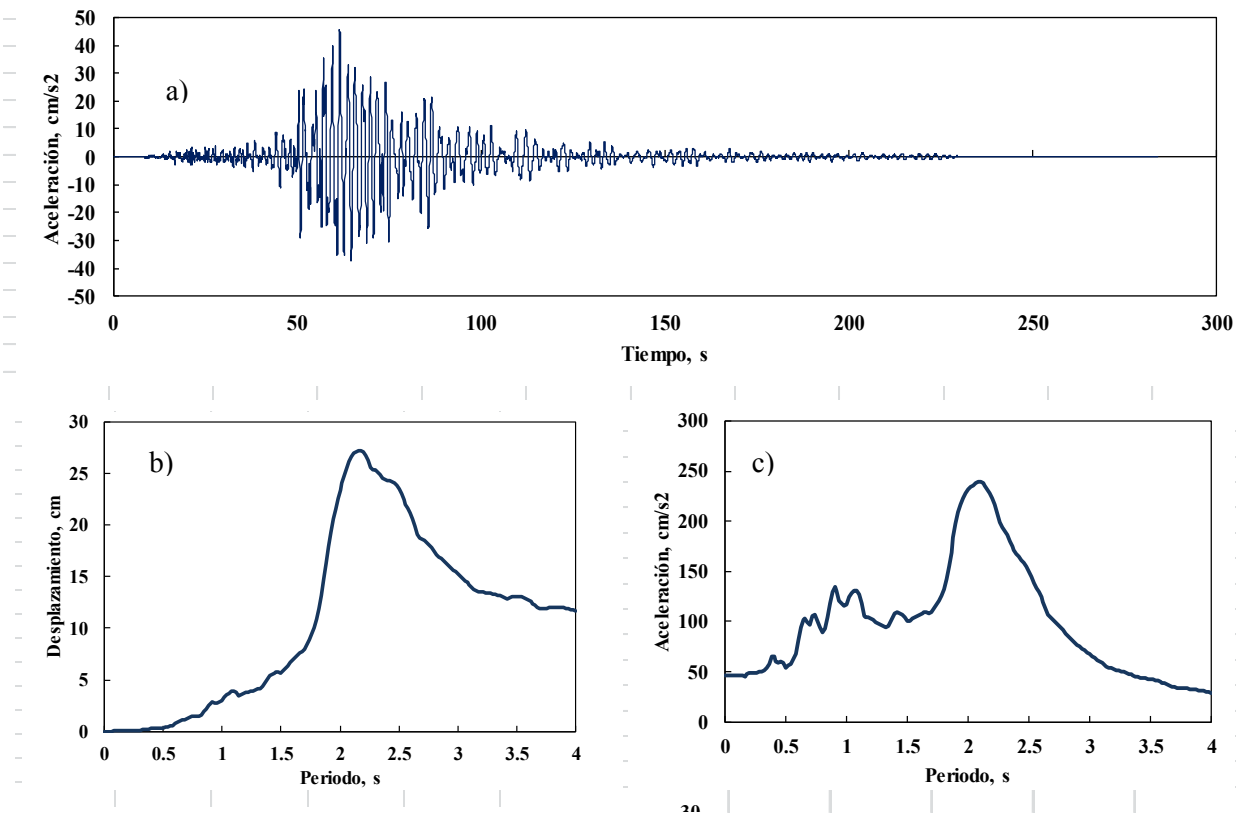


Figura A.1. a) Registro sísmico S1-AL018904.251EW-ALAMEDA, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

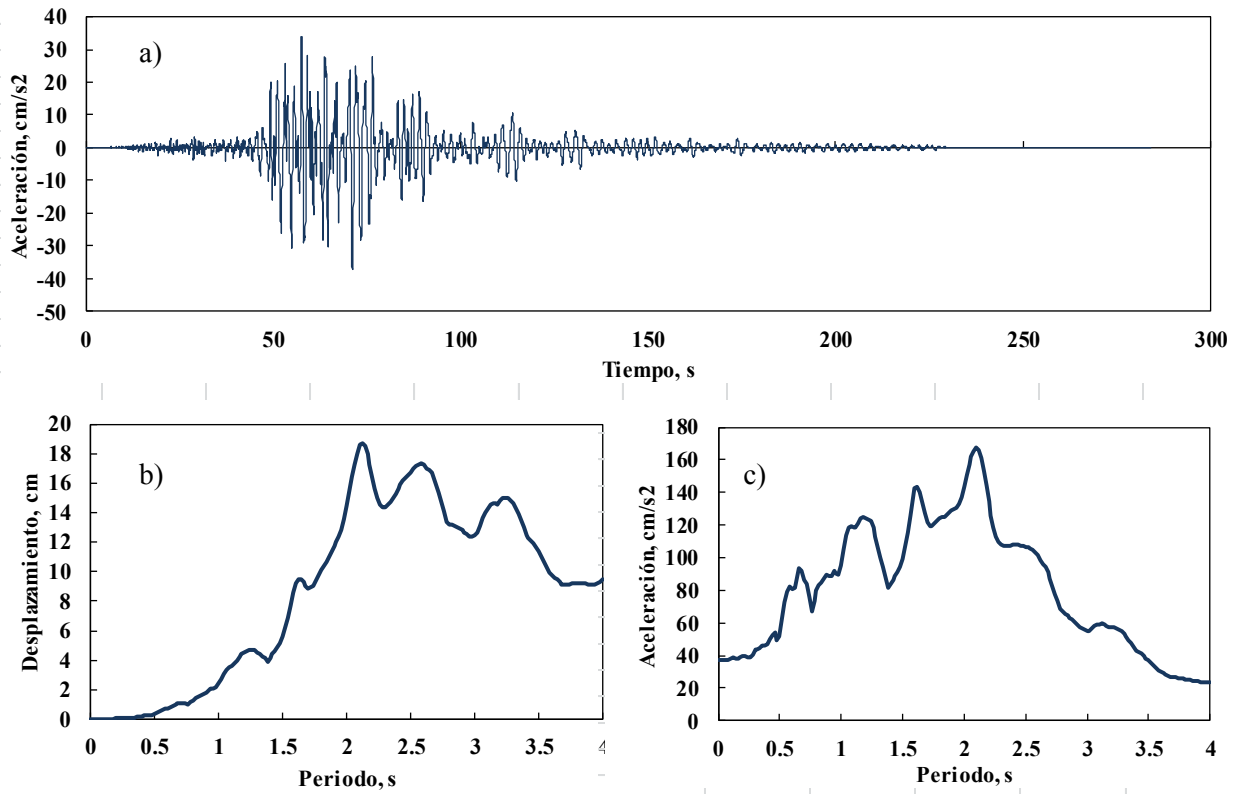


Figura A.2. a) Registro sísmico S2-AL018904.251NS-ALAMEDA, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

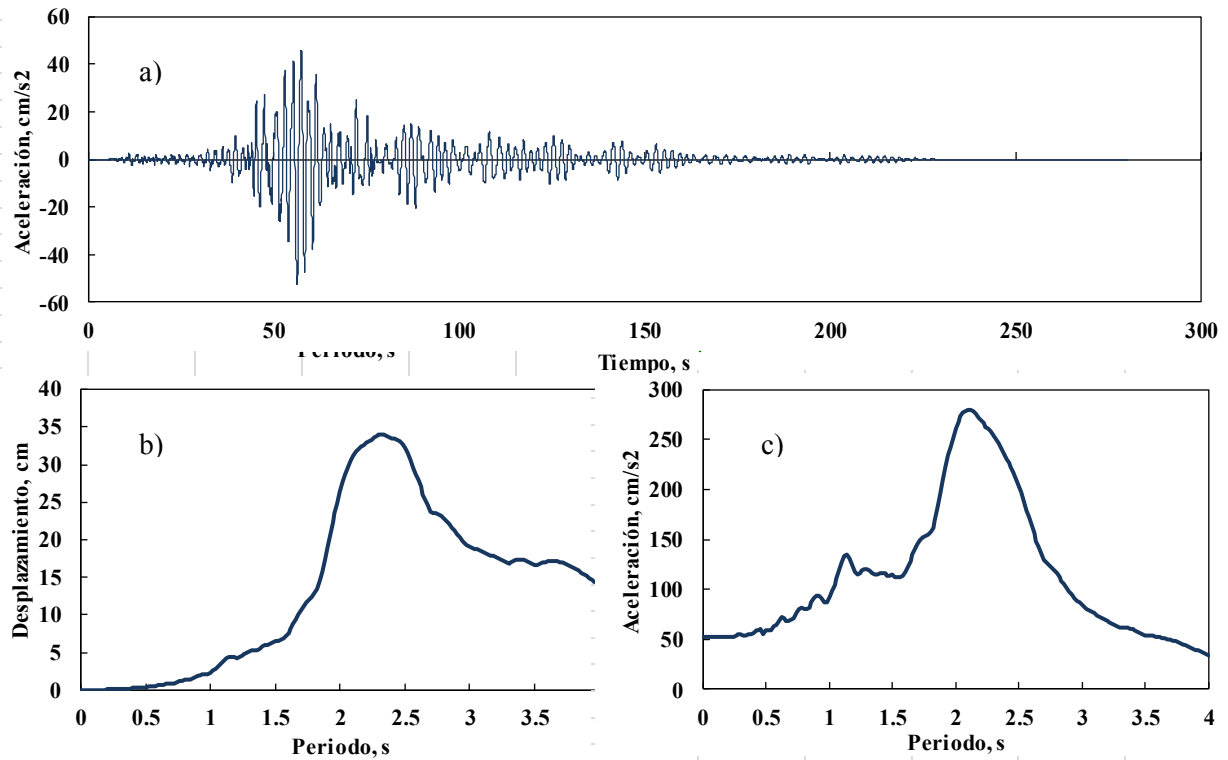


Figura A.3. a) Registro sísmico S3-GA628904.251EW-GARIBALDI, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

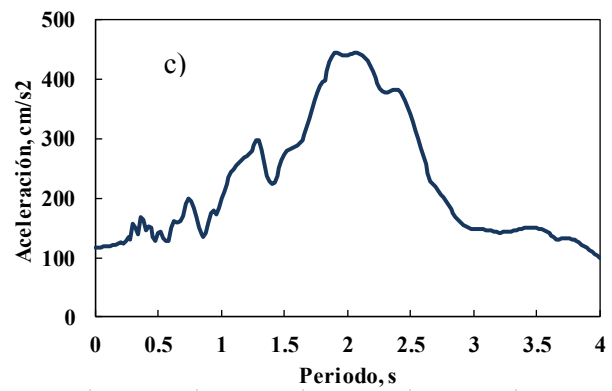
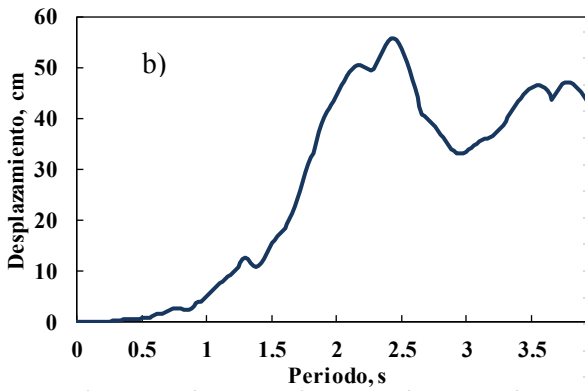
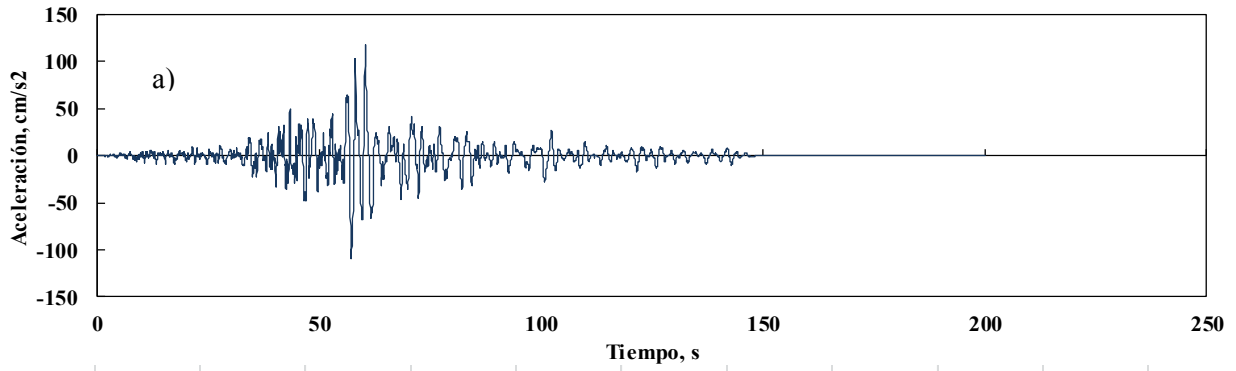


Figura A.4. a) Registro sísmico S4-TLHB8509.191EW-TLAHUAC, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

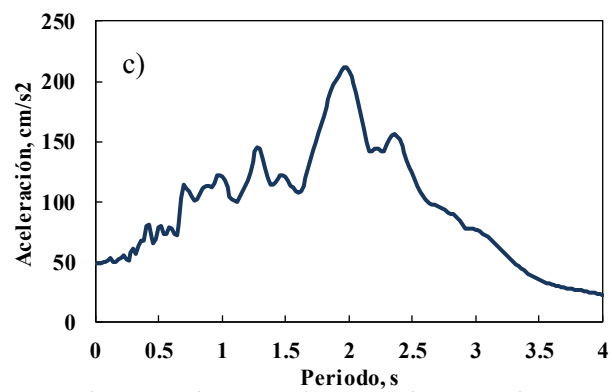
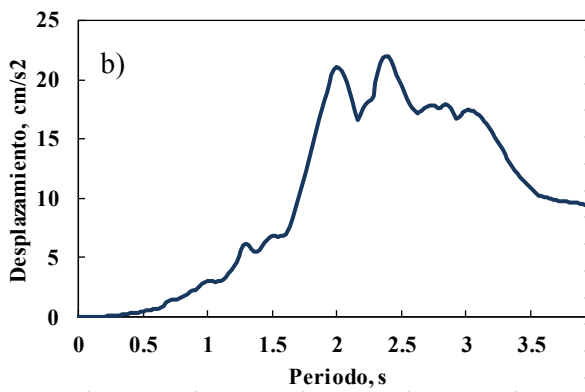
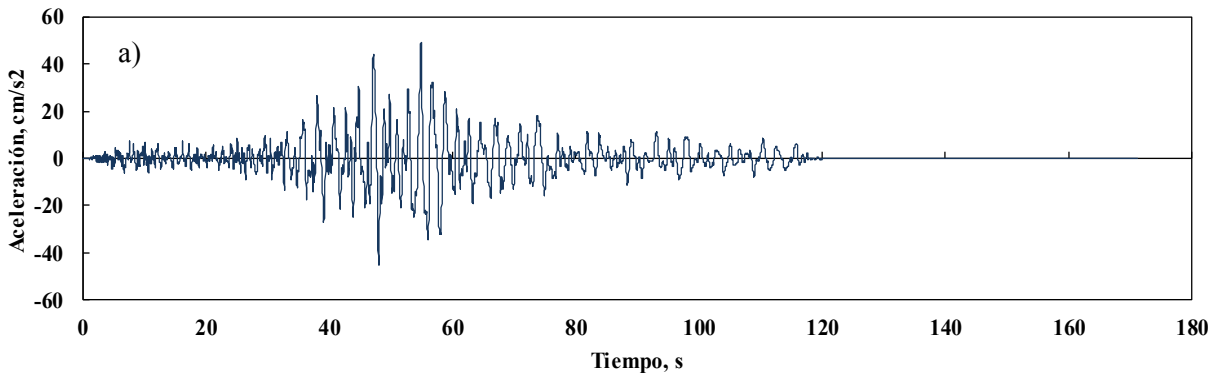


Figura A.5. a) Registro sísmico S5-TLHB8509.211NS-TLAHUAC, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

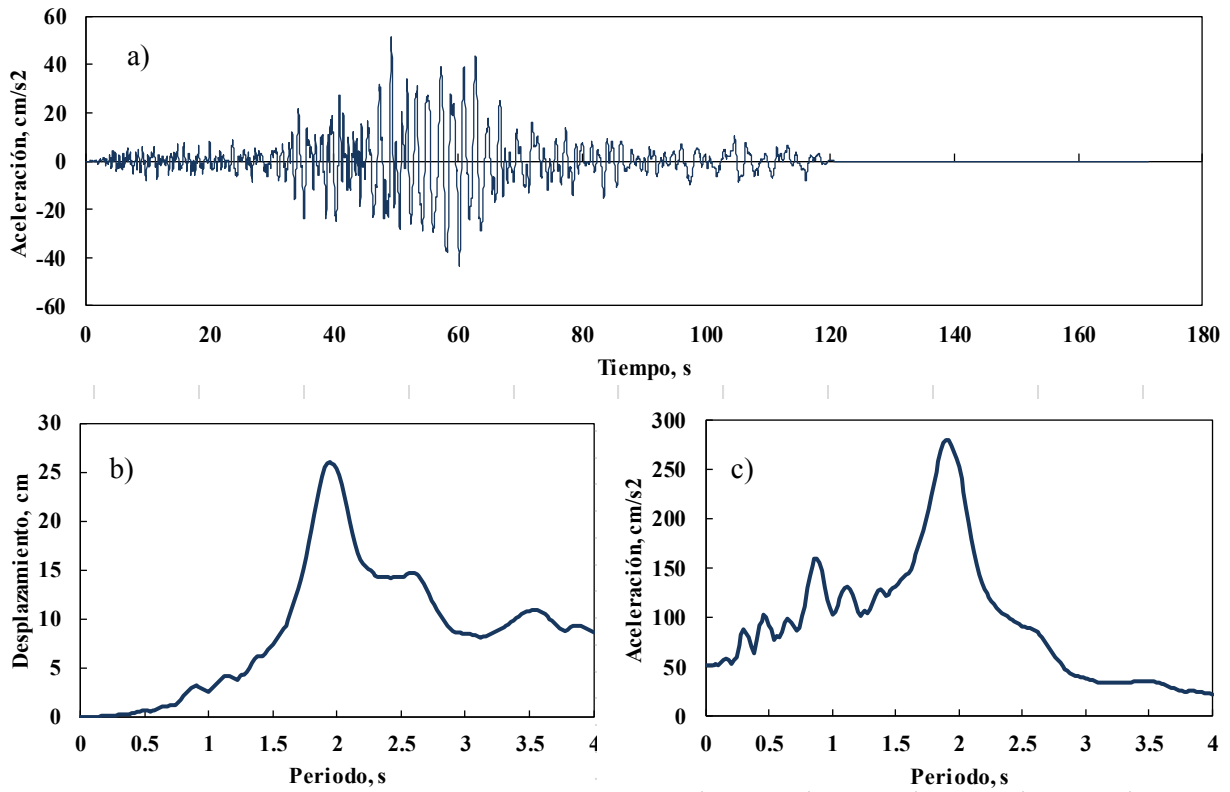


Figura A.6. a) Registro sísmico S6-TLHB8509.211EW-TLAHUAC, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

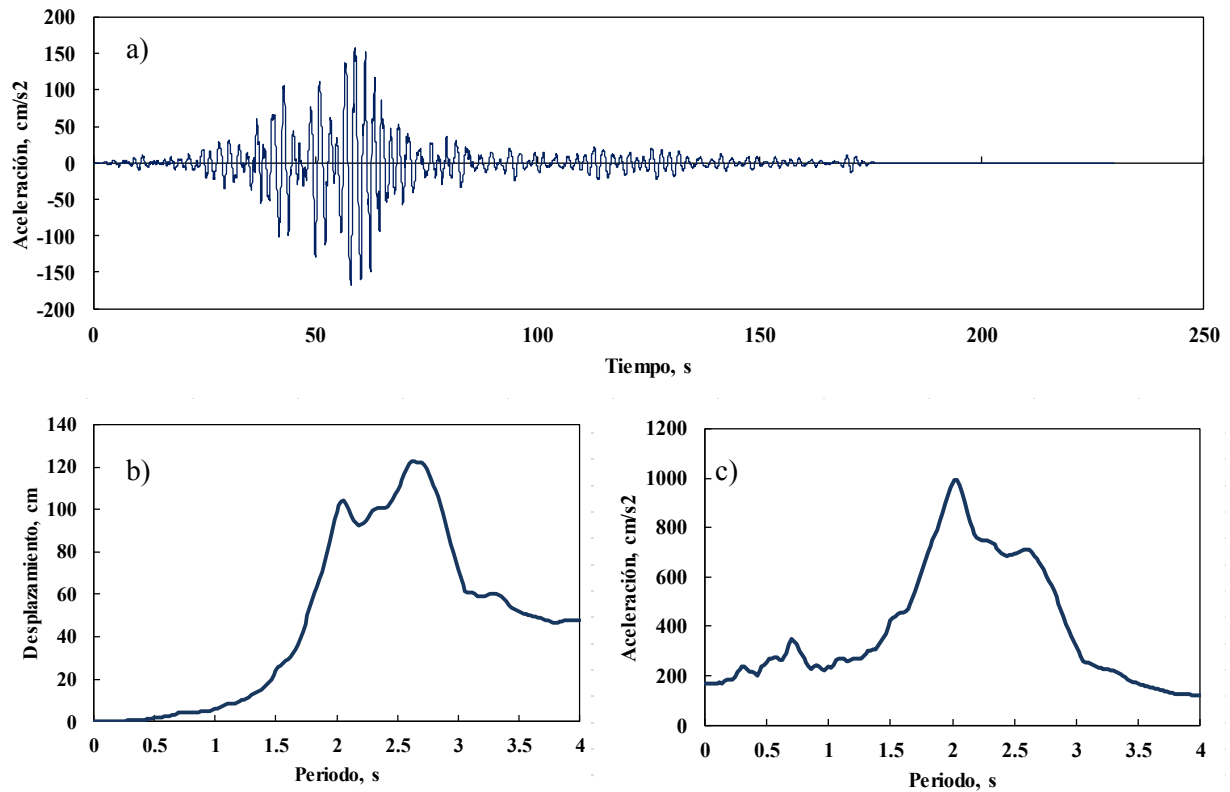


Figura A.7. a) Registro sísmico S7-SC1850919EW-SC1, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

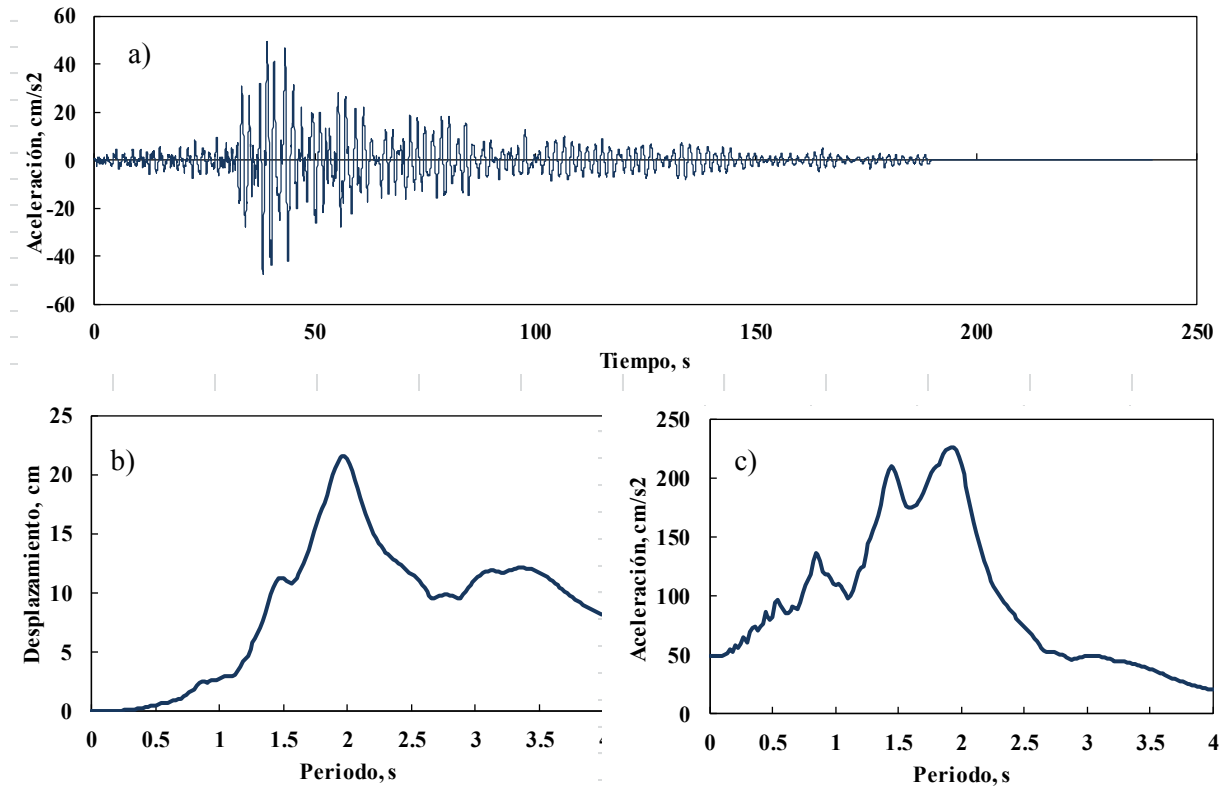


Figura A.8. a) Registro sísmico S8-CI05120320N00E-CIBELES, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

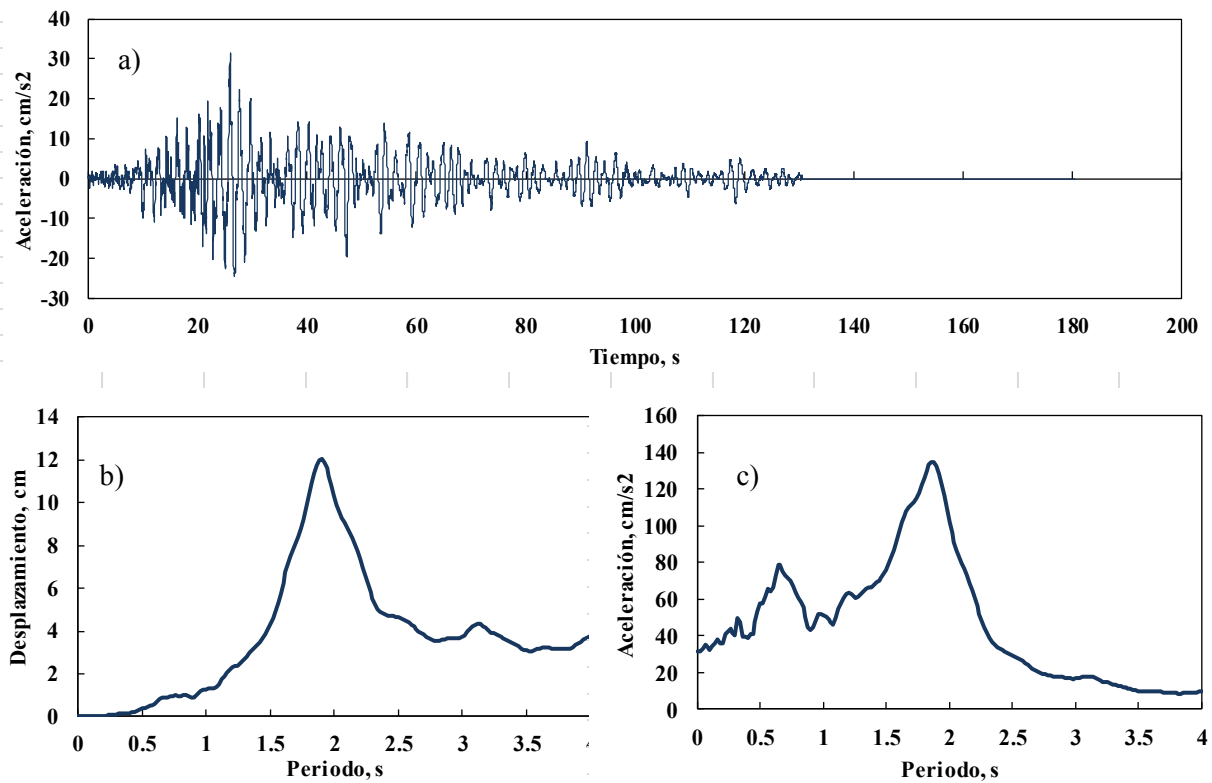


Figura A.9. a) Registro sísmico S9-SCT1990615N00E-SCTB-1, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

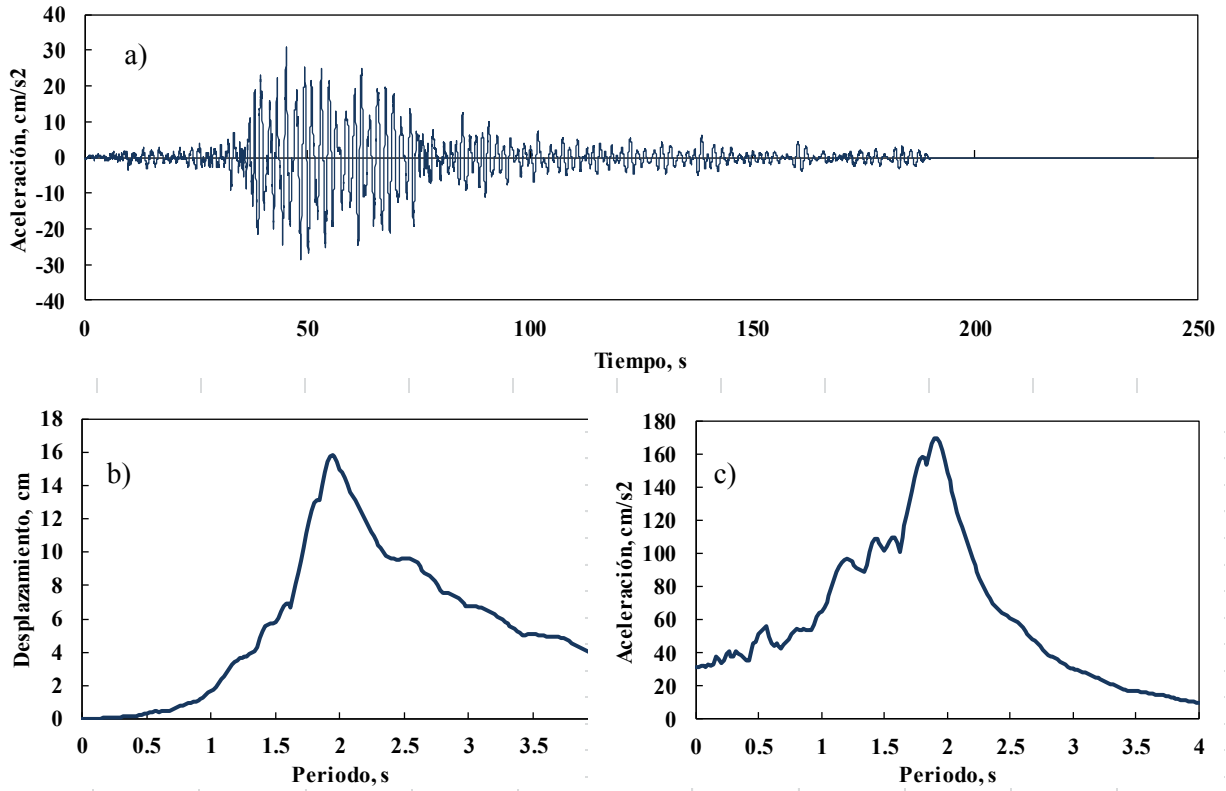


Figura A.10. a) Registro sísmico S10-SCT2120320N00W-SCTB-2, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

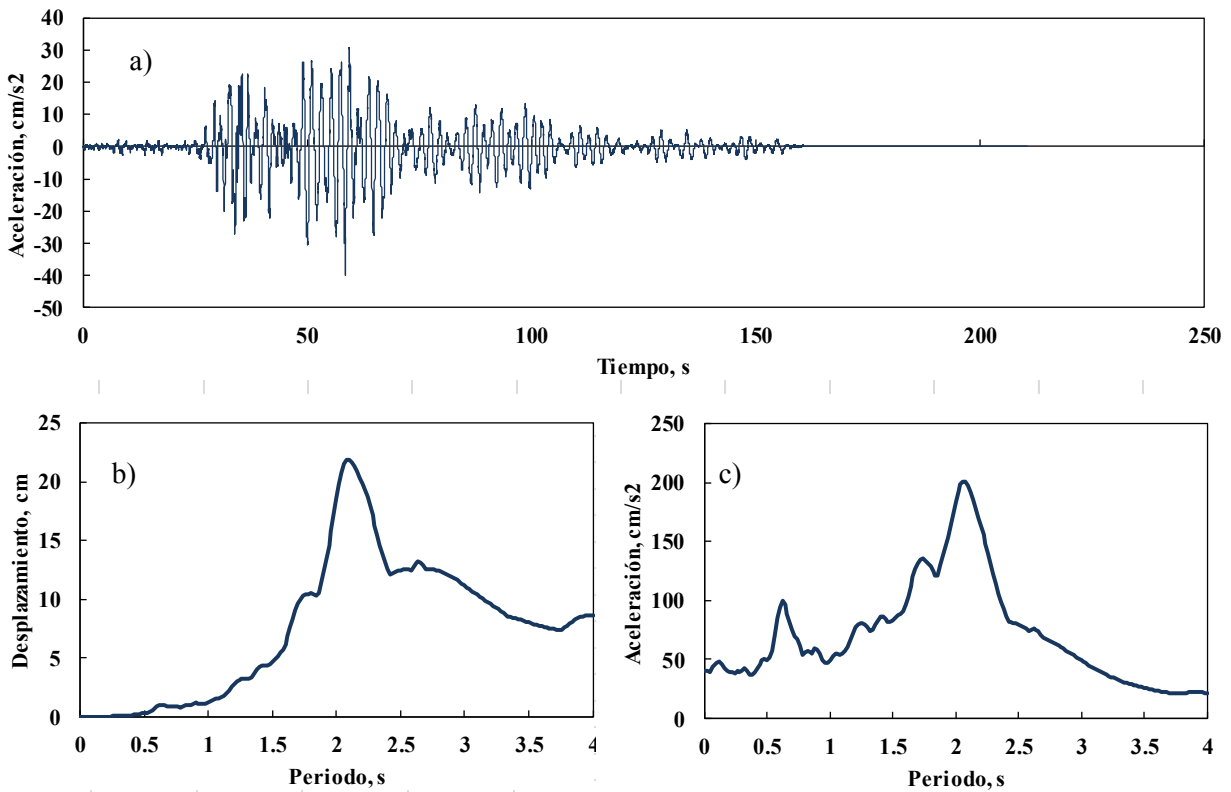


Figura A.11. a) Registro sísmico S11-SCT2890425N90E-SCTB-2, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

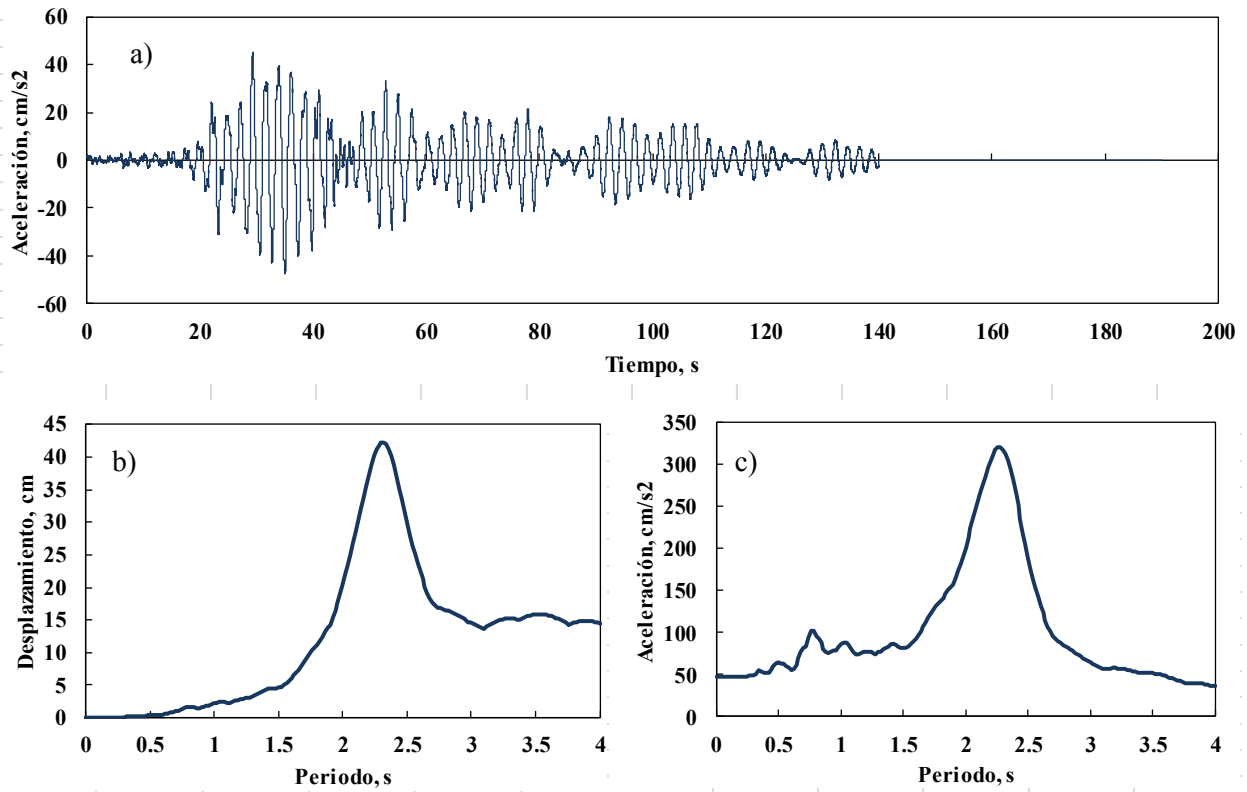


Figura A.12. a) Registro sísmico S12-SP51890425N00E-SECTOR POPULAR, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

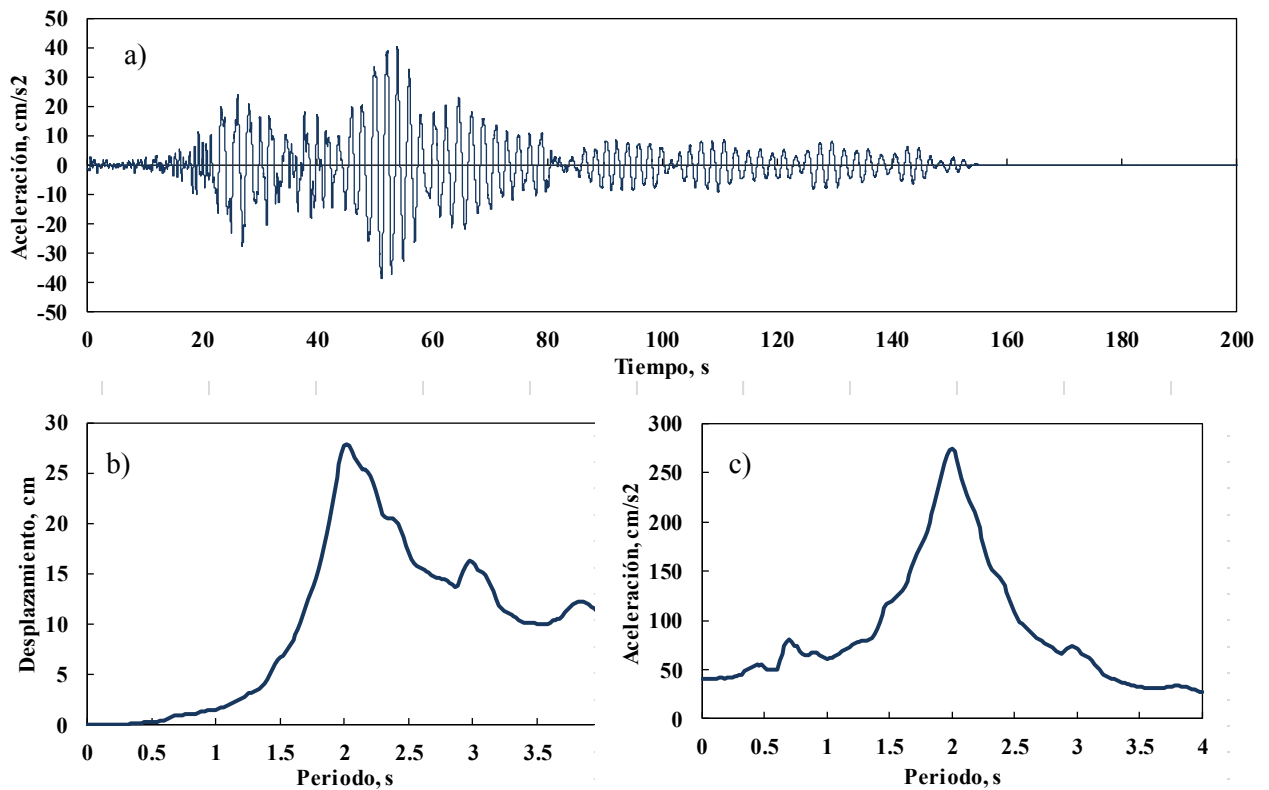


Figura A.13. a) Registro sísmico S13-SP51950914N00E-SECTOR POPULAR, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

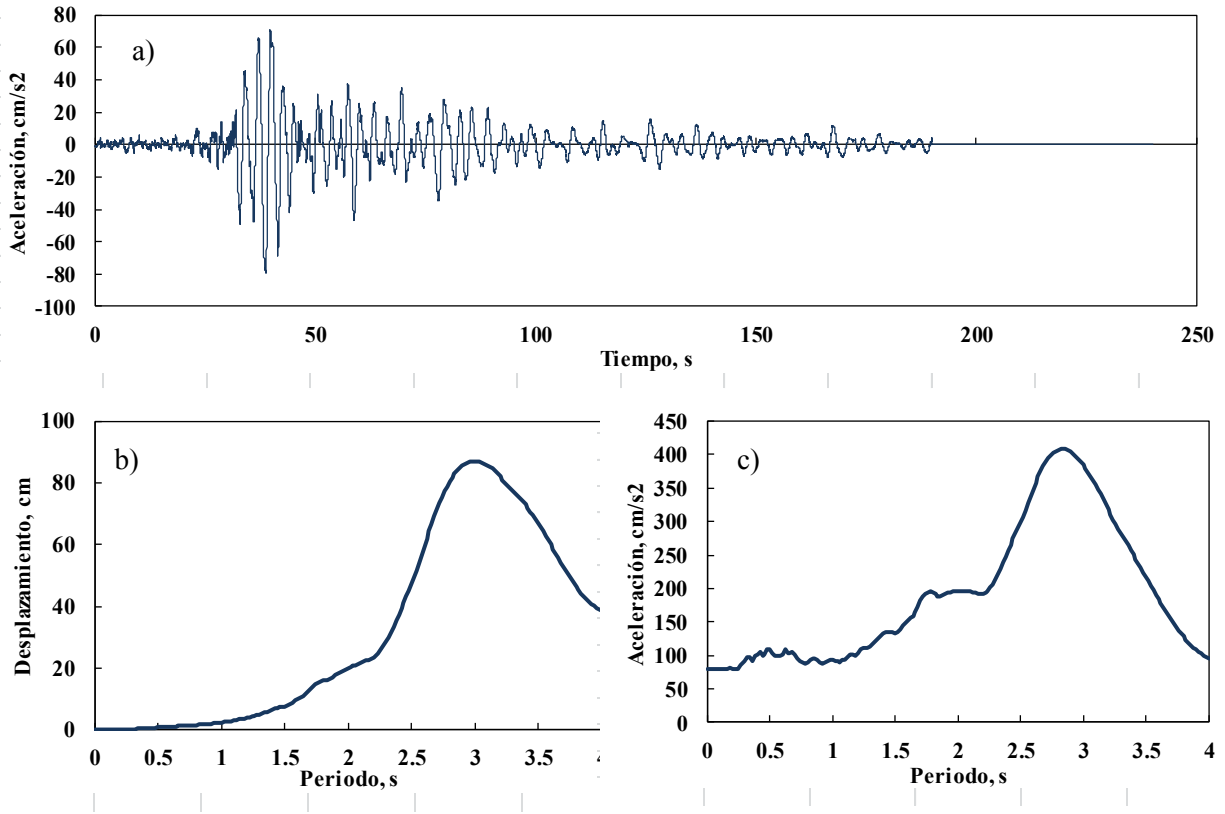


Figura A.14. a) Registro sísmico S14-TH35120320N90W-TLAHUAC, b) Espectro elástico de desplazamiento, c) Espectro elástico de aceleración.

PROGRAMAS EJECUTADOS EN FORTRÁN PARA ANÁLISIS DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

El material incluido en este apéndice es presentado para complementar la información del capítulo 2 Y 3.

B.1. Programa para análisis de modelo elasto-plástico perfecto (epd=0) y bilineal (epd=0.1)

```

$DEBUG
C
C time history de un SDOF que considere los efectos de cargas
C gravitacionales
C
C   Entrada:
C
C   n = número de puntos en la excitación sísmica
C   T = periodo inicial
C   psi= factor de amortiguamiento
C   at = intervalo de tiempo entre puntos del acelerograma
C   cy = resistencia lateral
C   ug = excitación sísmica
C
C   Salida:
C
C   sp = respuesta paso a paso
C   sp(:,1) = fuerza lateral
C   sp(:,2) = desplazamiento
C   sp(:,3) = relative input energy
C   sp(:,4) = hysteretic plastic energy
C   sp(:,5) = viscous damping energy
C   sp(:,6) = relative kinetic energy
C   sp(:,7) = absolute kinetic energy
C   sp(:,8) = absolute acceleration
C   sp(:,9) = NYR
C
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C   dimension ug(20000),sp(20000,2)
C   real*8 ki,kieff,mu,m
C   OPEN(5,file=' ',status='old')
C   OPEN(6,file=' ',status='new')
C   read(5,*)n,at,T,psi,cy,fsc,epd
C   read(5,*)(ug(i),i=1,n)
C   do 30 i = 1,n
30  ug(i) = -ug(i)*fsc
C   pi = 3.1416
C   m = 1
C   nn = 1000
C   do 300 i = 1,4000
C   do 300 j = 1,2
300  sp(i,j) = 0
C
C
C   310 gamma = 1./2.
C   beta = 1./4.
C
C   T = T/sqrt(1-epd)
C
C   w = 2*pi/T

```

```

rk = w**2*m
C
C
teta = epd*rk/(1-epd)
C
C
c = 2*m*psi*w/sqrt(1-epd)
a = m/(beta*at) + gamma*c/beta
b = m/(2*beta) + at*(gamma/(2*beta)-1)*c
C
C
cy = 981.*cy*(1-epd)
C
C
dy = cy/rk
a1 = ug(1)/m
v1 = 0.
d1 = 0.
f1 = 0.
desmax = 0.
he = 0
dmi = 0
hecyc = 0
ftrack = 0
f2track = 0
C
C
mu = 0.
do 10 i = 2,n
api = (ug(i)-ug(i-1)) + a*v1 + b*a1
ki = 1
if ((f1*v1).ge.0) ki = 1-f1**nn
C
C
C
OJO, se incluye teta
C
C
C
C
kieff = rk*ki+teta + gamma/(beta*at)*c + 1/(beta*at**2)*m
ades = api/kieff
avel = gamma/(beta*at)*ades-gamma/beta*v1+at*(1-gamma/(2*beta))*a1
C
C
if((ades*v1).lt.0.and.abs(f1).ge.1)goto 62
goto 61
62 ki = 1
kieff = rk*ki+teta + gamma/(beta*at)*c + 1/(beta*at**2)*m
ades = api/kieff
avel = gamma/(beta*at)*ades-gamma/beta*v1+at*(1-gamma/(2*beta))*a1
C
C
61 f2 = ki*ades/dy + f1
f2aux = f2
if (abs(f2).gt.1) f2 = f2/abs(f2)
d2 = d1+ades
v2 = v1+avel
C
C
ftot = f2*cy + teta*d2
C
C
a2 = (ug(i) - c*v2 - ftot)/m
he2 = 0
if (abs(f1).ge.1.and.abs(f2aux).ge.1)he2=0.5*cy*(f1+f2)*(d2-d1)
if (abs(f1).lt.1.and.abs(f2aux).ge.1)goto 420
goto 430
420 daux = d1 + ades*(1-abs(f1))/(abs(f2aux)-abs(f1))
he2 = 0.5*cy*(f1+f2)*(d2-daux)
430 ftrack = f2
if((ftrack*ftrack2).le.-1.or.i.eq.n)goto 440
hecyc = hecyc+he2
goto 450
440 dinel = hecyc/cy/dy
dN = 1.403/(dinel+1-0.676) + 0.676
dN = 4*dN
if (dinel.gt.4) dinel = 4
dmi = dmi + dinel/dN
hecyc = he2
450 he = he + he2
if (abs(d2).le.desmax)goto 80
desmax = abs(d2)

```

```

mu = desmax/dy
80 d1 = d2
v1 = v2
a1 = a2
f1 = f2
if(he2.gt.0)ftrack2 = ftrack
sp(i,2) = f1*cy + teta*d1
sp(i,1) = d1
10 continue
do 20 i = 1,n
20 write(6,1)(sp(i,j),j=1,2)
1 format(2f15.6)
stop
end
.
```

B.2. Programa para análisis de modelo trilineal.

```

$DEBUG
C
C time history de un SDOF que considere los efectos de cargas
C gravitacionales
C
C Entrada:
C
C n = número de puntos en la excitación sísmica
C T = periodo inicial
C psi = factor de amortiguamiento
C at = intervalo de tiempo entre puntos del acelerograma
C cy = resistencia lateral
C ug = excitación sísmica
C
C Salida:
C
C sp = respuesta paso a paso
C sp(:,1) = fuerza lateral
C sp(:,2) = desplazamiento
C sp(:,3) = relative input energy
C sp(:,4) = hysteretic plastic energy
C sp(:,5) = viscous damping energy
C sp(:,6) = relative kinetic energy
C sp(:,7) = absolute kinetic energy
C sp(:,8) = absolute acceleration
C sp(:,9) = NYR
C
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C dimension ug(20000), sp(20000,3)
C real*8 kia, kieff, mu, m, kib
C OPEN(5, file=' ', status='old')
C OPEN(6, file=' ', status='new')
C read(5, *) n, at, T, psi, cy1, cy2, fsc, epd1
C read(5, *) (ug(i), i=1, n)
C do 30 i = 1, n
30 ug(i) = -ug(i)*fsc
C pi = 3.141592654
C m = 1
C nn = 1000
C do 300 i = 1, 4000
C do 300 j = 1, 2
300 sp(i, j) = 0
C
C
C 310 gamma = 1./2.
C beta = 1./4.
C
C
C w = 2*pi/T
C rk = w**2*m
C
C
C c = 2*m*psi*w
C a = m/(beta*at) + gamma*c/beta
C b = m/(2*beta) + at*(gamma/(2*beta)-1)*c
C
```

```

C
cy1 = 981.*cy1
cy2 = 981.*cy2
C
C
bdy = cy1*(T**2)/4/(pi**2)
dy = bdy + (T**2)*(cy2-cy1)/epd1/4/(pi**2)
cya = bdy*(4*pi**2/T**2)*(1-epd1)
rka = cya/bdy
dya = cya/rka
cyb = cy2-cya
rkb = rk-rka
dyb = cyb/rkb
write (*,*) 'cya, cyb=',cya, cyb
write (*,*) 'rka, rkb=',rka, rkb
write (*,*) 'dya, dyb=',dya, dyb
pause
C
C
a1 = ug(1)/m
v1 = 0.
d1 = 0.
fla = 0.
flb = 0.
C
C
mu = 0.
do 10 i = 2,n
api = (ug(i)-ug(i-1)) + a*v1 + b*a1
kia = 1
if ((fla*v1).ge.0) kia = 1-fla**nn
kib = 1
if ((flb*v1).ge.0) kib = 1-flb**nn
C
C
kieff = rkb*kib + rka*kia + gamma/(beta*at)*c + 1/(beta*at**2)*m
ades = api/kieff
avel = gamma/(beta*at)*ades-gamma/beta*v1+at*(1-gamma/(2*beta))*a1
C
C
if((ades*v1).lt.0.and.abs(fla).ge.1)goto 62
goto 64
62 kia = 1
64 if((ades*v1).lt.0.and.abs(flb).ge.1)goto 63
goto 65
63 kib = 1
65 kieff = rkb*kib + rka*kia + gamma/(beta*at)*c + 1/(beta*at**2)*m
ades = api/kieff
avel = gamma/(beta*at)*ades-gamma/beta*v1+at*(1-gamma/(2*beta))*a1
C
C
f2a = kia*ades/dya + fla
f2auxa = f2a
if (abs(f2a).gt.1) f2a = f2a/abs(f2a)
f2b = kib*ades/dyb + flb
f2auxb = f2b
if (abs(f2b).gt.1) f2b = f2b/abs(f2b)
d2 = d1+ades
v2 = v1+avel
C
C
ftot = f2a*cya + f2b*cyb
C
C
a2 = (ug(i) - c*v2 - ftot)/m
d1 = d2
v1 = v2
a1 = a2
fla = f2a
flb = f2b
sp(i,2) = fla*cya
sp(i,3) = flb*cyb
sp(i,1) = d1
10 continue
do 20 i = 1,n
20 write(6,1) (sp(i,j),j=1,3)
1 format(3f15.6)
stop
end
.
```

B.3. Programa general para análisis de muchos sistemas de un grado libertad sometida a varios movimientos de terreno.

```

C Nombre: EPPCONRESEPD1.FOR
C
C Version con Rainflow
C Febrero 20, 2015.
C
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      dimension ug(50000), sp(70,6), dmax(70,100), ug2(50000)
      dimension ehnueva(70,100)
      dimension dres(70,100), ehnnueva(70,100), eh(70,100), ducmax(70,100)
      open(5,file = ' ',status='old')
      open(6,file = ' ',status='new')
      open(7,file = ' ',status='new')
      open(8,file = ' ',status='new')
      open(9,file = ' ',status='new')
      open(10,file = ' ',status='new')
      open(11,file = ' ',status='new')
      write(*,*) 'Cuanto vale el delta del factor de escala =?'
      read(*,*)afesc
      read(5,*)n
      read(5,*)fact,at,epd
      zn = n
      zper1 = 1
      zper2 = 70
      zduct = 1
      read(5,*) (ug(i),i=1,n)

C
C   Se considera 5% de amortiguamiento crítico
C
      psi = 0.05

C
C   do 10 j = 1,100
C
C   Se escala el movimiento del terreno
C
      write(*,2)j
      do 20 k = 1,n
20  ug2(k) = ug(k) * j * afesc

C
C   call fepp (zn,zper1,zper2,zduct,psi,at,epd,ug2,sp)
C
C
      do 30 i = 1,70
      ducmax(i,j) = sp(i,1)
      dmax(i,j) = sp(i,2)
      dres(i,j) = sp(i,3)
      ehnnueva(i,j) = sp(i,4)
      eh(i,j) = sp(i,5)
30  ehnueva(i,j) = sp(i,6)

C
10  continue

C
      do 40 i=1,70
      write( 6,1) ( ducmax(i,j),j=1,100)
      write( 7,1) ( dmax(i,j),j=1,100)
      write( 8,1) ( dres(i,j),j=1,100)
      write( 9,1) ( ehnnueva(i,j),j=1,100)
      write(10,1) ( eh(i,j),j=1,100)
40  write(11,1) ( ehnueva(i,j),j=1,100)

C
1  format (100f12.4)
2  format (' Vamos en el escalado =',i3)
      stop
      end

C
C   subroutine fepp (zn,zper1,zper2,zduct,psi,at,epd,ug,sp)
C
C   subrutina fepp: calcula espectros, ductilidad constante
C
C   Entrada:
C
C   zn = n = numero de puntos en la excitacion sismica
C   zper1 = nper1 = periodo inicial

```



```

C     zper2 = nper2 = periodo final (maximo 70)
C     zduct = nduct = # de ductilidades para las que se desea el espectro
C     psi = factor de amortiguamiento
C     at = intervalo de tiempo entre puntos del acelerograma
C     ug = excitacion sismica
C
C     Salida:
C
C     sp = espectros
C     sp (1:70,1) = ductilidad
C     sp (1:70,2) = desplazamiento máximo
C     sp (1:70,3) = desplazamiento residual
C     sp (1:70,4) = hysteretic plastic energy normalizada
C     sp (1:70,5) = hysteretic plastic energy
C
C     IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C     real*8 ki,kieff,m
C     real*8 sp(70,6),ug(*)
C     real*4 tt(70)
C     data tt /0.05,0.10,0.15,0.20,0.25,0.30,0.35,0.40,0.45,0.50,
1         0.55,0.60,0.65,0.70,0.75,0.80,0.85,0.90,0.95,1.00,
2         1.05,1.10,1.15,1.20,1.25,1.30,1.35,1.40,1.45,1.50,
3         1.55,1.60,1.65,1.70,1.75,1.80,1.85,1.90,1.95,2.00,
4         2.10,2.20,2.30,2.40,2.50,2.60,2.70,2.80,2.90,3.00,
5         3.10,3.20,3.30,3.40,3.50,3.60,3.70,3.80,3.90,4.00,
6         4.25,4.50,4.75,5.00,5.50,6.00,6.50,7.00,7.50,8.00/
C     n = zn
C     nper1 = zper1
C     nper2 = zper2
C     nduct = zduct
C     pi = 3.1416
C     m = 1
C     nn = 1000
C     do 300 i = 1,70
C     do 300 j = 1,5
300    sp(i,j) = 0
C
C
C     310 gamma = 1./2.
C     beta = 1./4.
C     do 210 iper = nper1,nper2
C     T = tt(iper)
C
C
C     T=T/sqrt(1-epd)
C
C
C     w = 2*pi/T
C     rk = w**2*m
C
C
C     teta = epd*rk/(1-epd)
C
C
C     c = 2*m*psi*w/sqrt(1-epd)
C     a = m/(beta*at) + gamma*c/beta
C     b = m/(2*beta) + at*(gamma/(2*beta)-1)*c
C     do 210 j = 1,1
C     cy = .1
C
C
C     cy = 981.*cy*(1-epd)
C
C
C     dy = cy/rk
C     gd1 = 0.
C     gv1 = 0.
C     a1 = ug(1)/m
C     v1 = 0.
C     d1 = 0.
C     f1 = 0.
C     desmax = 0.
C     ain = 0.
C     rin = 0.
C     rke = 0.
C     se = 0.
C     he = 0.
C     henueva = 0.
C     de = 0.
C     hecyc = 0

```

```

ftrack = 0
f2rack = 0
C
C
do 215 i = 2,n
api = (ug(i)-ug(i-1)) + a*v1 + b*a1
ki = 1
if ((f1*v1).ge.0) ki = 1-f1**nn
C
C
kieff = rk*ki+teta + gamma/(beta*at)*c + 1/(beta*at**2)*m
ades = api/kieff
avel = gamma/(beta*at)*ades-gamma/beta*v1+at*(1-gamma/(2*beta))*a1
C
C
if((ades*v1).lt.0.and.abs(f1).ge.1)goto 162
goto 161
162 ki = 1
kieff = rk*ki +teta + gamma/(beta*at)*c + 1/(beta*at**2)*m
ades = api/kieff
avel = gamma/(beta*at)*ades-gamma/beta*v1+at*(1-gamma/(2*beta))*a1
C
C
161 f2 = ki*ades/dy + f1
f2aux = f2
if (abs(f2).gt.1) f2 = f2/abs(f2)
d2 = d1+ades
v2 = v1+avel
C
C
ftot = f2*cy + teta*d2
C
C
a2 = (ug(i) - c*v2 - ftot)/m
aabs = (c*v2 + ftot)/m
gv2 = gv1 - 0.5*(ug(i-1)+ug(i))*at/m
gd2 = gd1 + at*(gv1 - (at/m)*(0.5*ug(i-1) + (ug(i)-ug(i-1))/6.))
ain = ain - 0.5*at*(gv1*(f1*cy + c*v1) + gv2*(f2*cy + c*v2))
rin = ain - 0.5*m*(gv1**2/2. + v1*gv1 + gv2**2/2. + v2*gv2)
he2 = 0
henueva = henueva + 0.5*cy*(f1+f2)*(d2-d1)
if (abs(f1).ge.1.and.abs(f2aux).ge.1)he2=0.5*cy*(f1+f2)*(d2-d1)
if (abs(f1).lt.1.and.abs(f2aux).ge.1)goto 220
goto 230
220 daux = d1 + ades*(1-abs(f1))/(abs(f2aux)-abs(f1))
he2 = 0.5*cy*(f1+f2)*(d2-daux)
230 ftrack = f2
if((ftrack*f2rack).le.-1)goto 240
hecyc = hecyc+he2
goto 250
240 hecyc = he2
C
C
versión modificada para calcular velocidad absoluta y relativa
C
en vez de strain energy y kinetic energy
C
250 se = abs(gv2+v2)
he = he + he2
de = de + 0.5*c*(v1*v1 + v2*v2)*at
rke = abs(v2)
if (abs(d2).le.desmax)goto 280
desmax = abs(d2)
280 d1 = d2
v1 = v2
a1 = a2
f1 = f2
gv1 = gv2
gd1 = gd2
if (he2.gt.0)f2rack = ftrack
215 continue
sp (iper,1) = desmax/dy
sp (iper,2) = desmax
sp (iper,3) = abs(d2)
sp (iper,4) = henueva/cy/dy
sp (iper,5) = he
sp (iper,6) = henueva
210 continue
return
end

```

GRÁFICAS DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD SOMETIDOS A SISMOS DE SUELO BLANDO

El material incluido en este apéndice es presentado para complementar la información de los capítulos 3, 4 y 5.

C.1. Gráficas de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual y mediana con ajuste lineal de cada sistema de 1GL

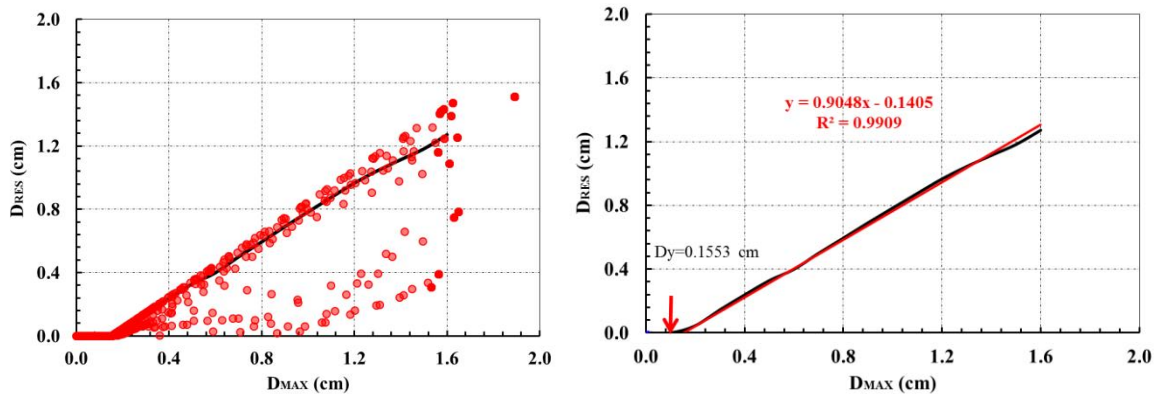


Figura C.1.1. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 0.25$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

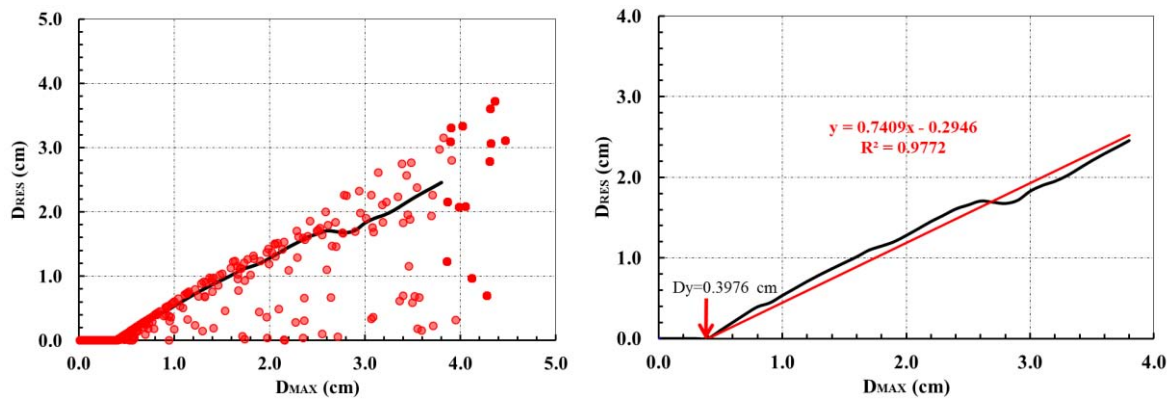


Figura C.1.2. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 0.40$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

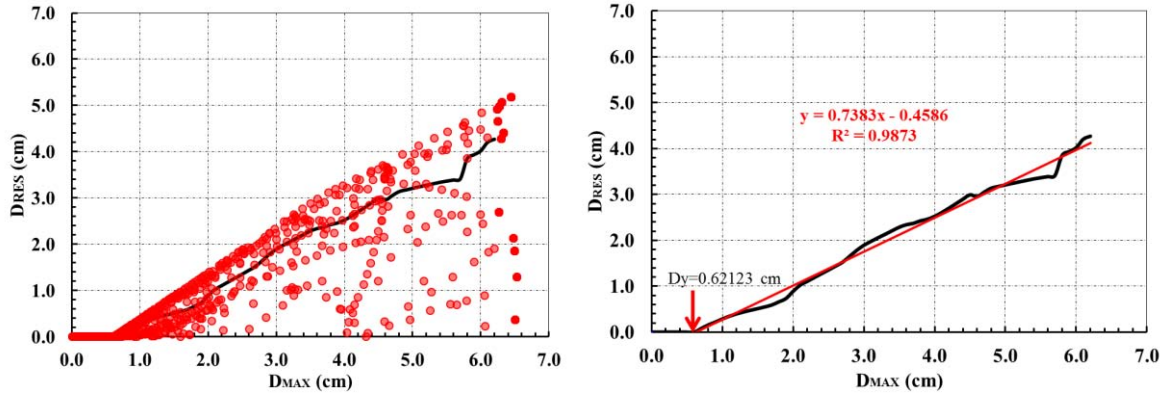


Figura C.1.3. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 0.50$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

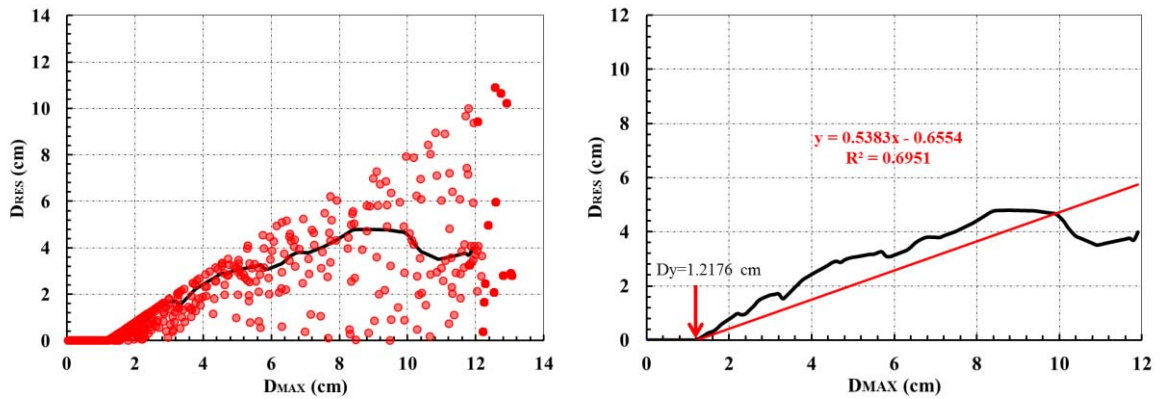


Figura C.1.4. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 0.70$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

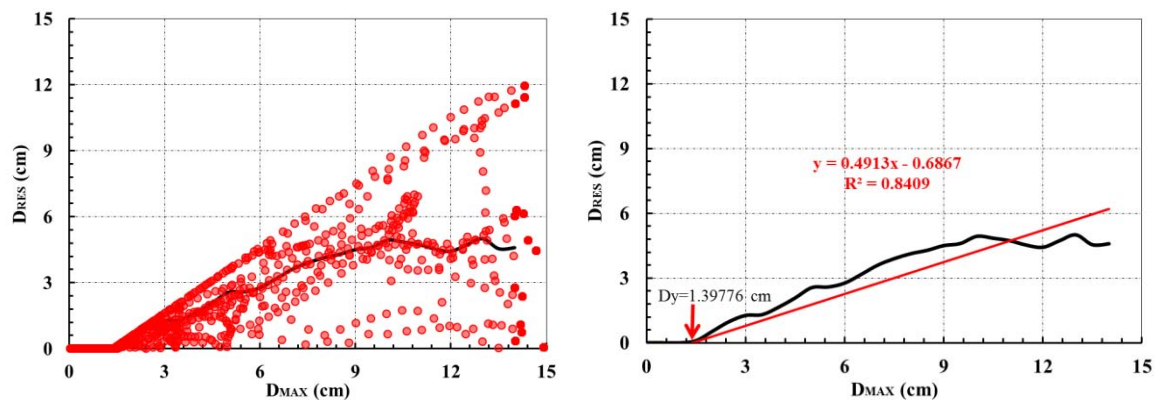


Figura C.1.5. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 0.75$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

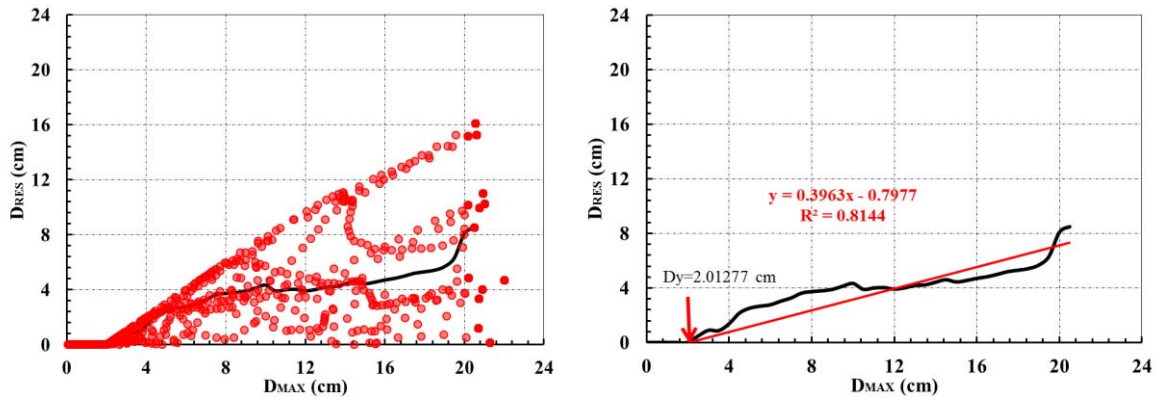


Figura C.1.6. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 0.90$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

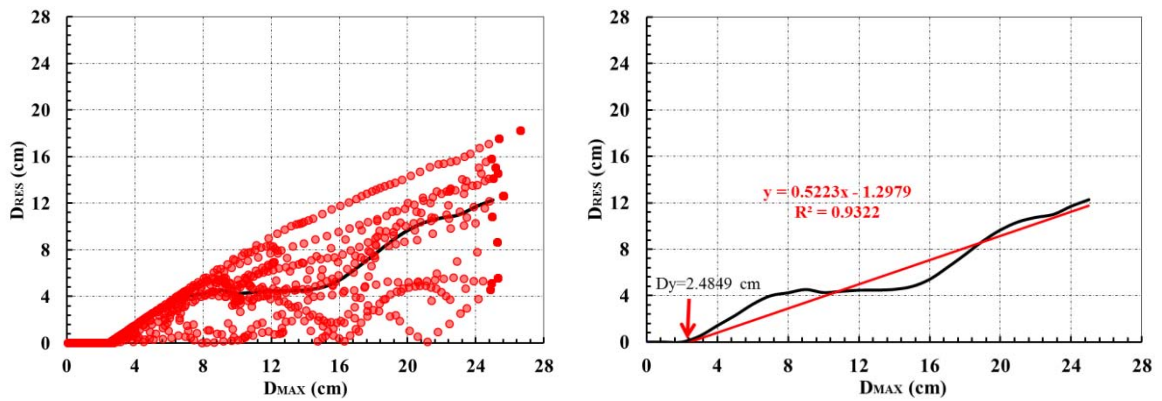


Figura C.1.7. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

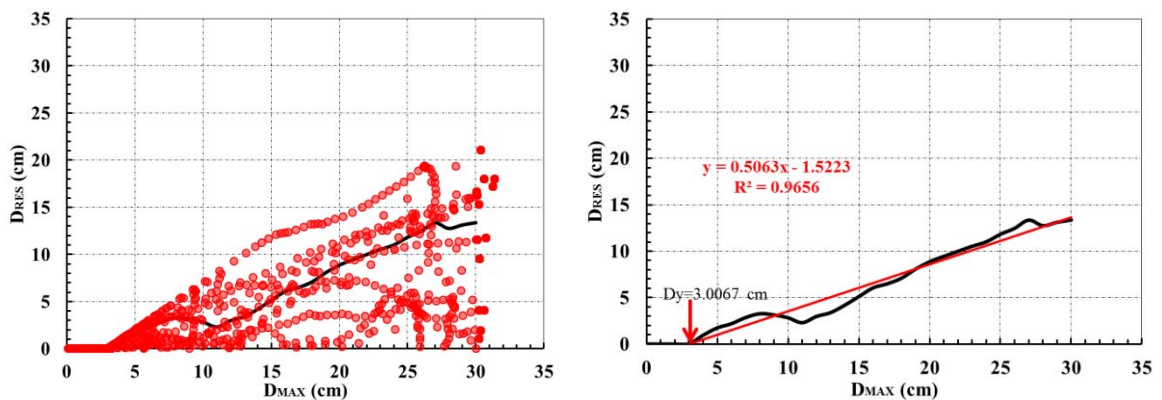


Figura C.1.8. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 1.10$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

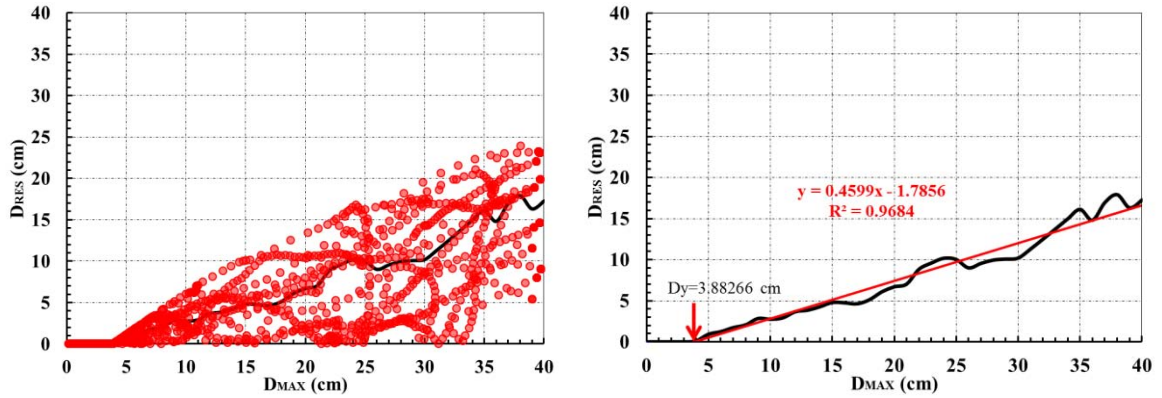


Figura C.1.9. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 1.25$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

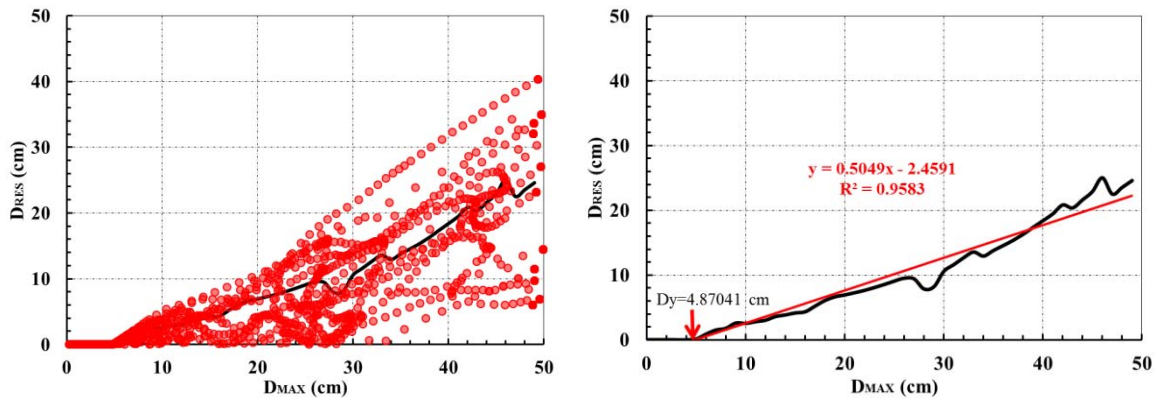


Figura C.1.10. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 1.40$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

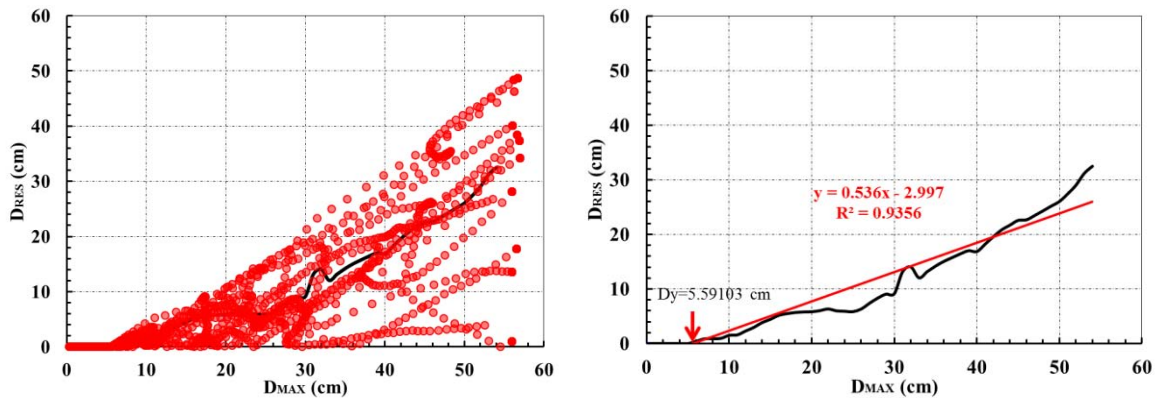


Figura C.1.11. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 1.50$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

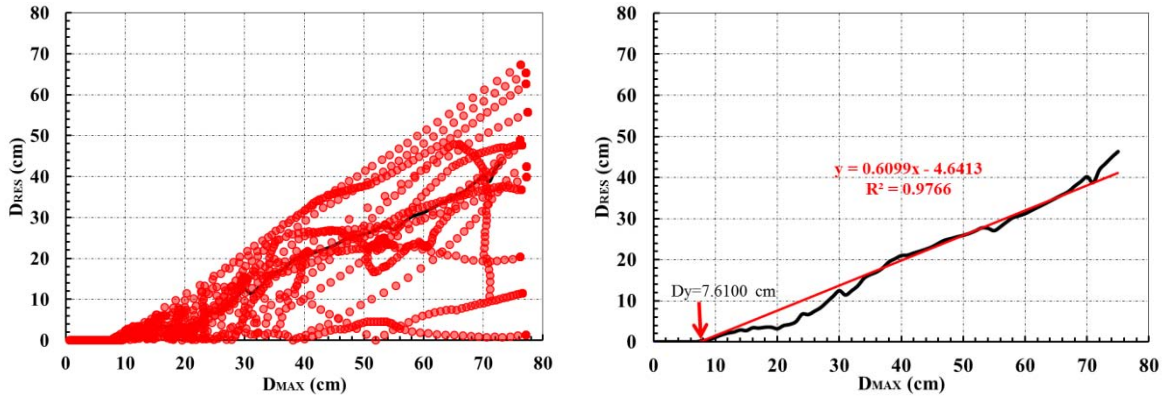


Figura C.1.12. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 1.75$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

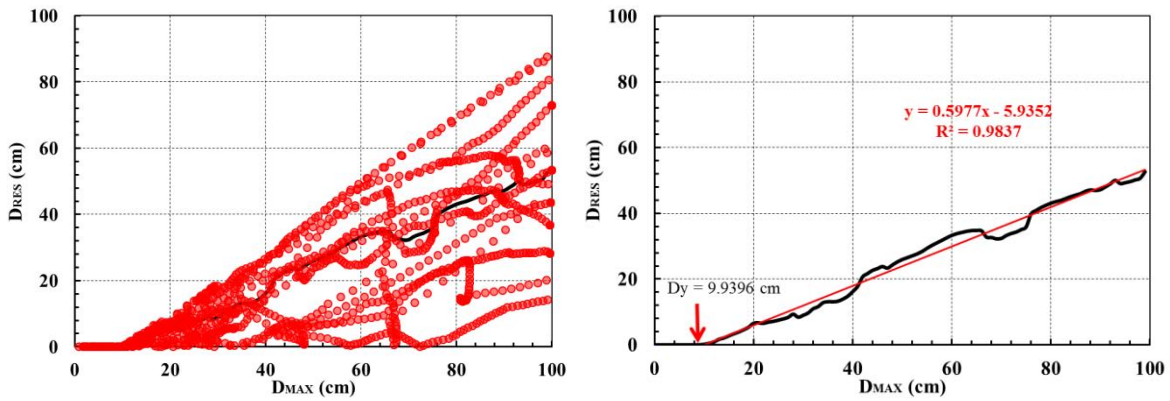


Figura C.1.13. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

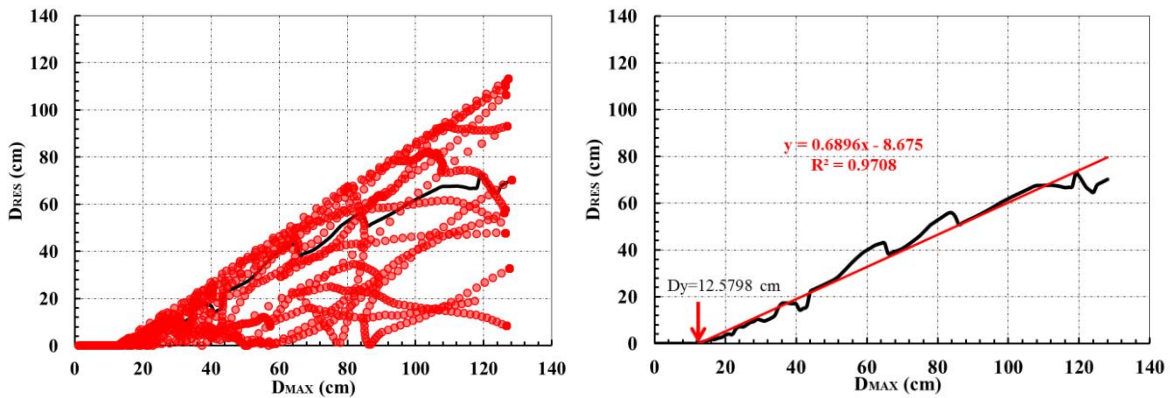


Figura C.1.14. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 2.25$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

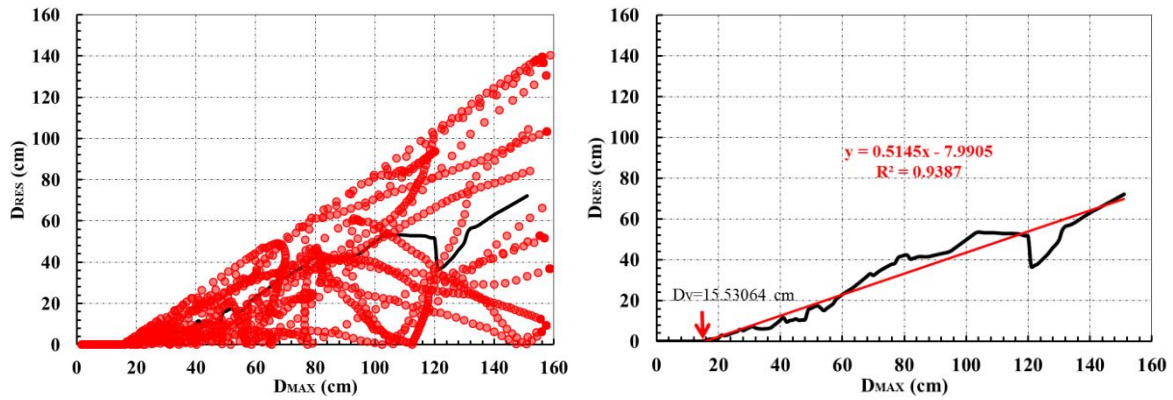


Figura C.1.15. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 2.50$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

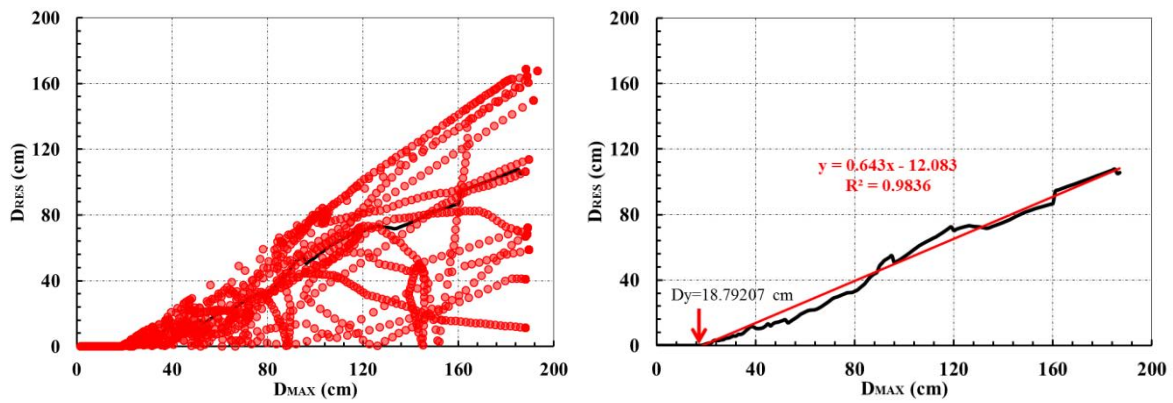


Figura C.1.16. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 2.75$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

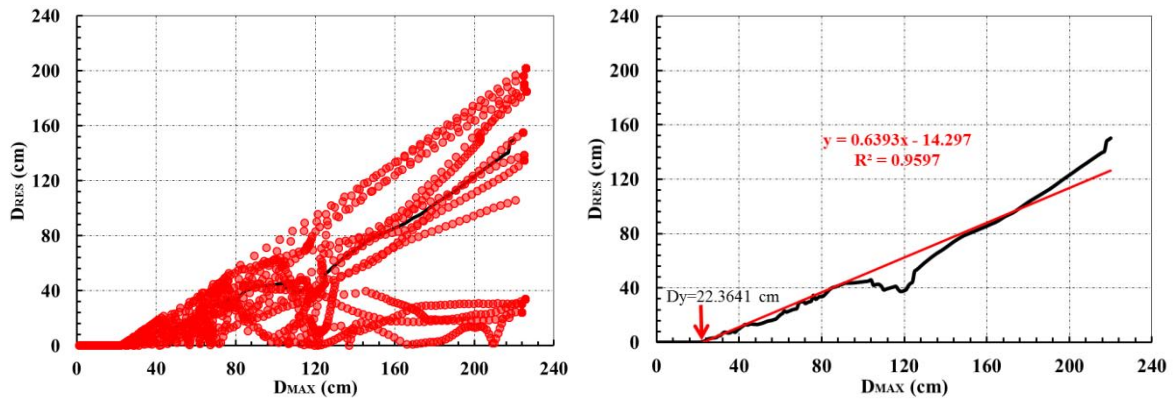


Figura C.1.17. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 3.00$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

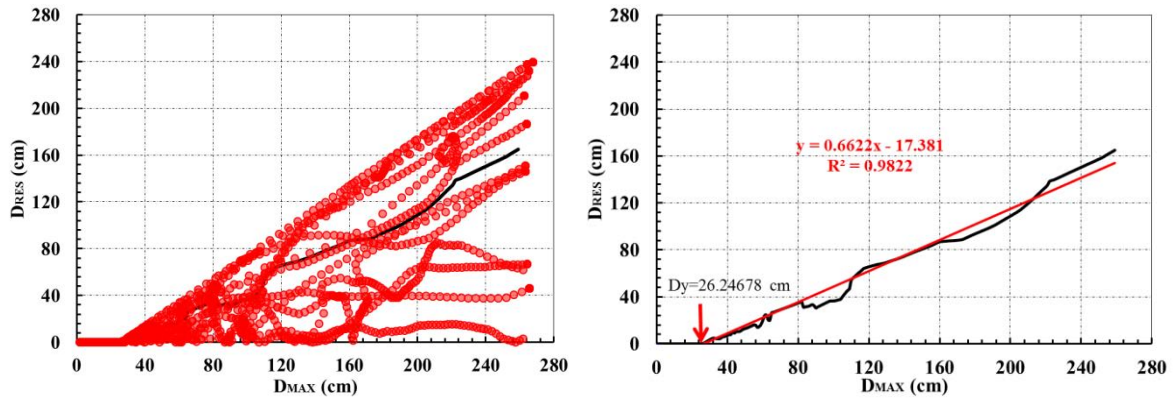


Figura C.1.18. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 3.25$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

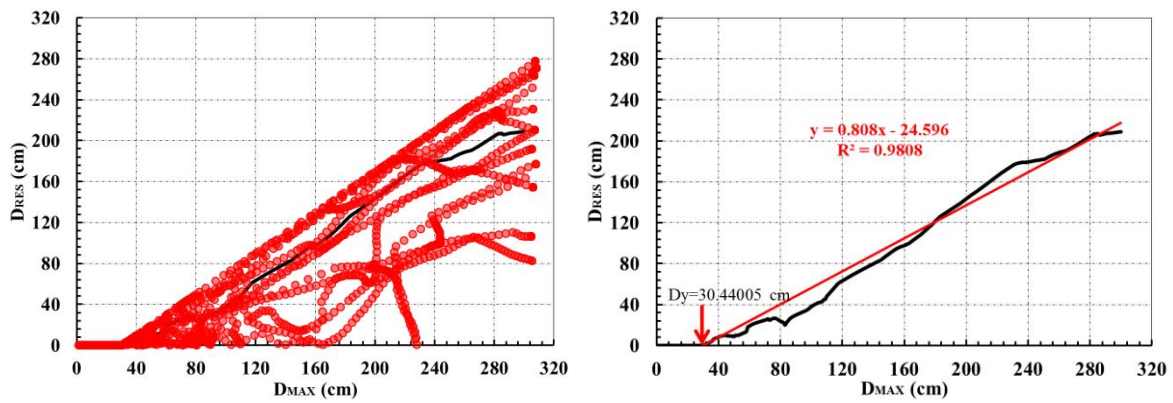


Figura C.1.19. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 3.50$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

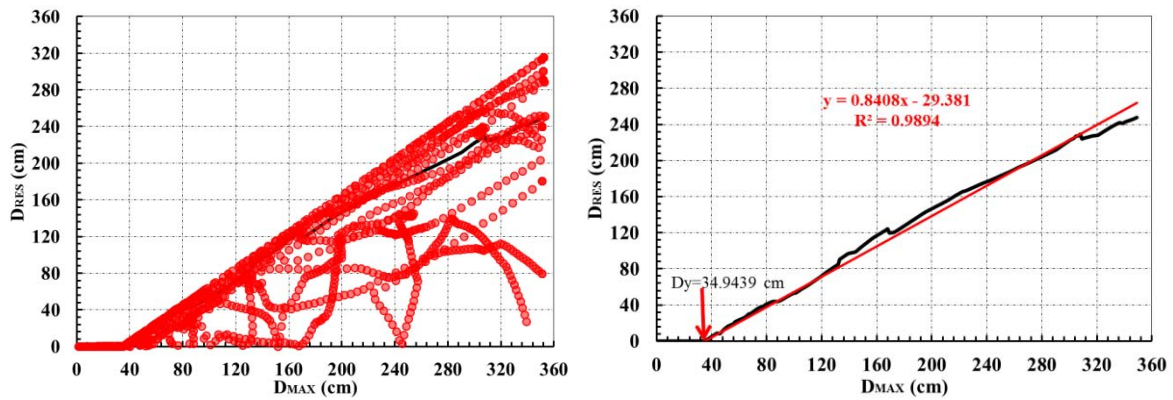


Figura C.1.20. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 3.75$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

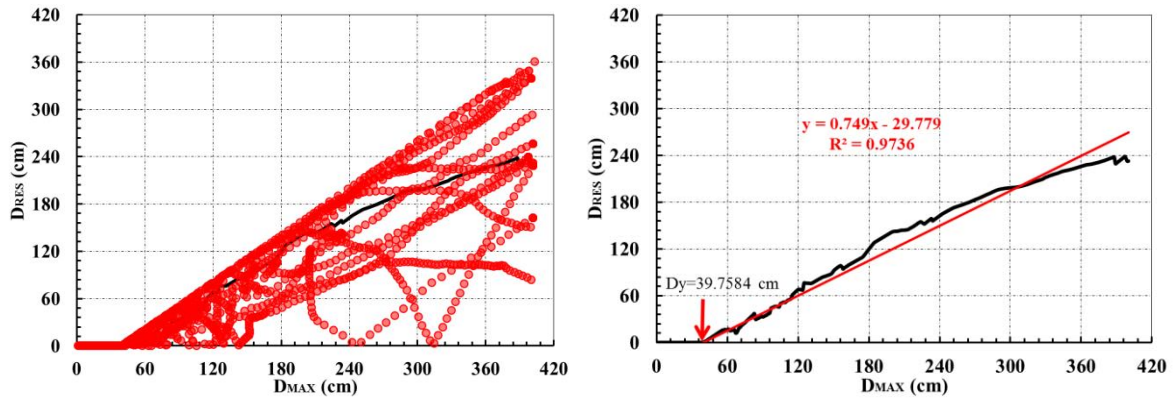


Figura C.1.21. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

C.2. Gráficas de ductilidad contra energía histerética normalizada y mediana con ajuste lineal de cada S1GL.

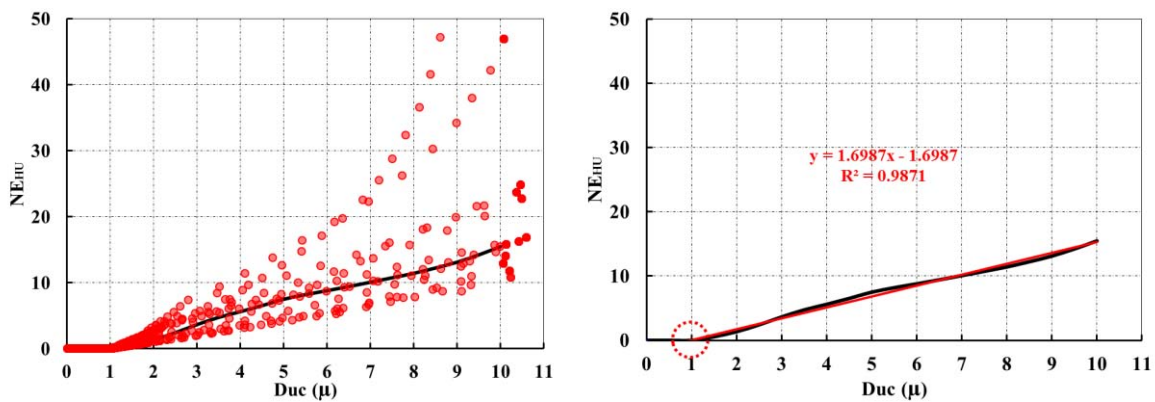


Figura C.2.1. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 0.25$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

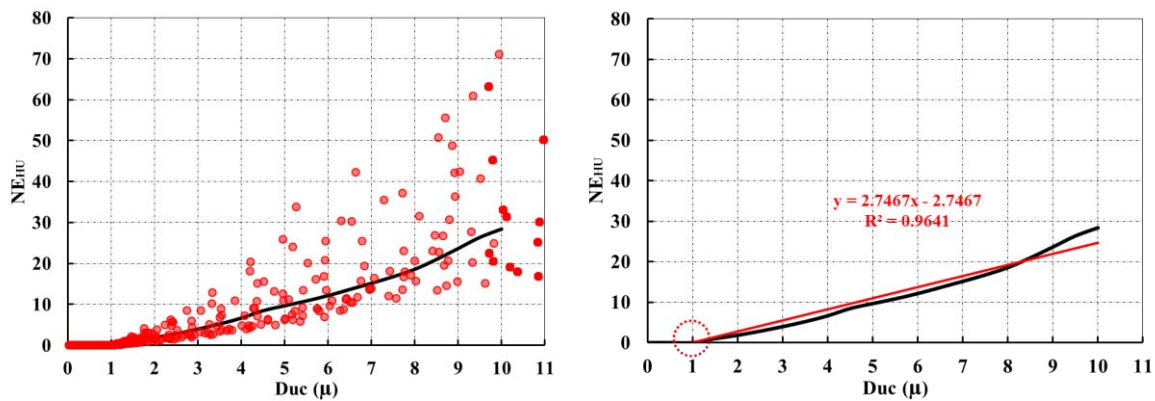


Figura C.2.2. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 0.40$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

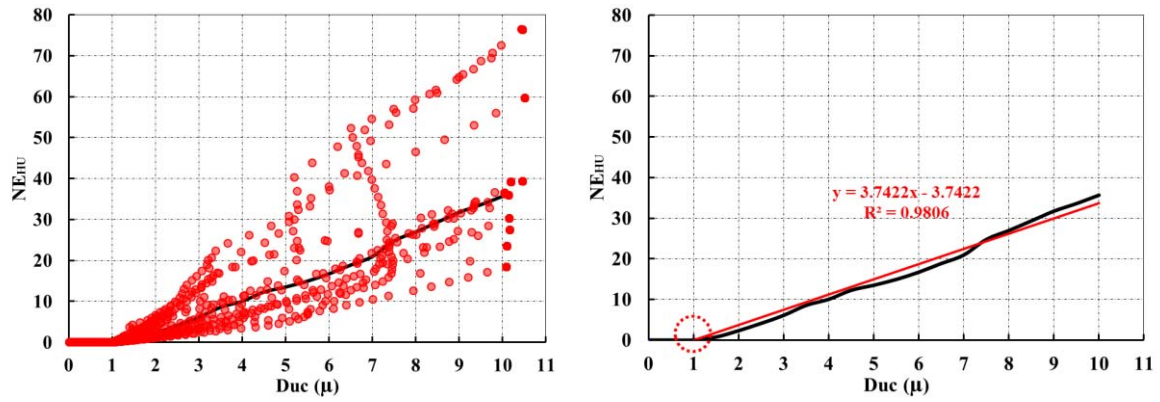


Figura C.2.3. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 0.50$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

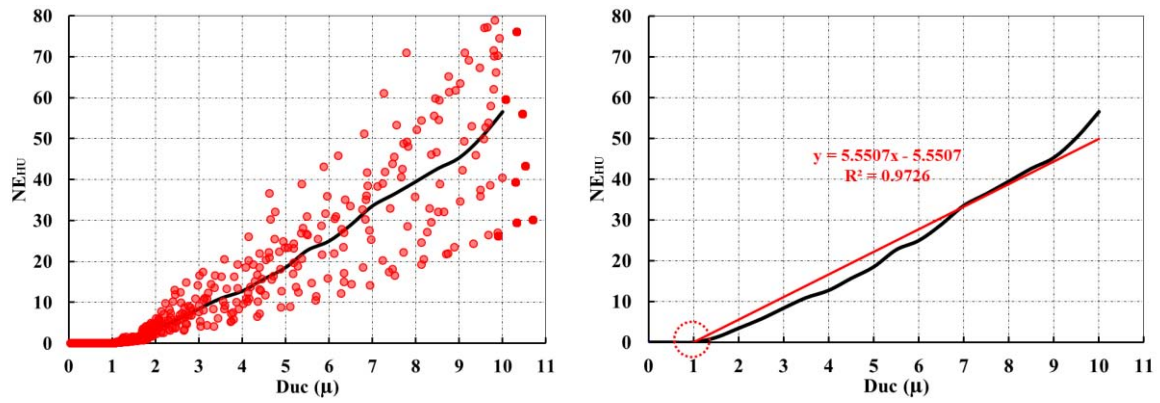


Figura C.2.4. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 0.70$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

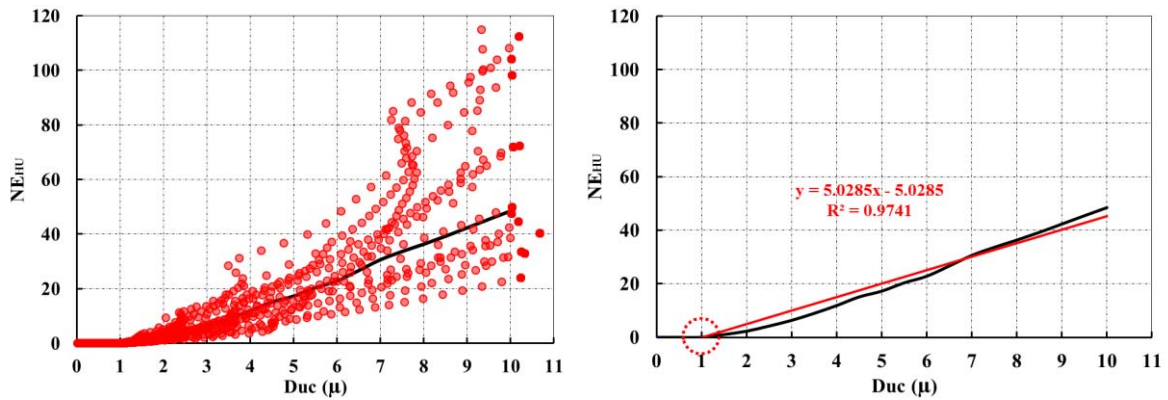


Figura C.2.5. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 0.75$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

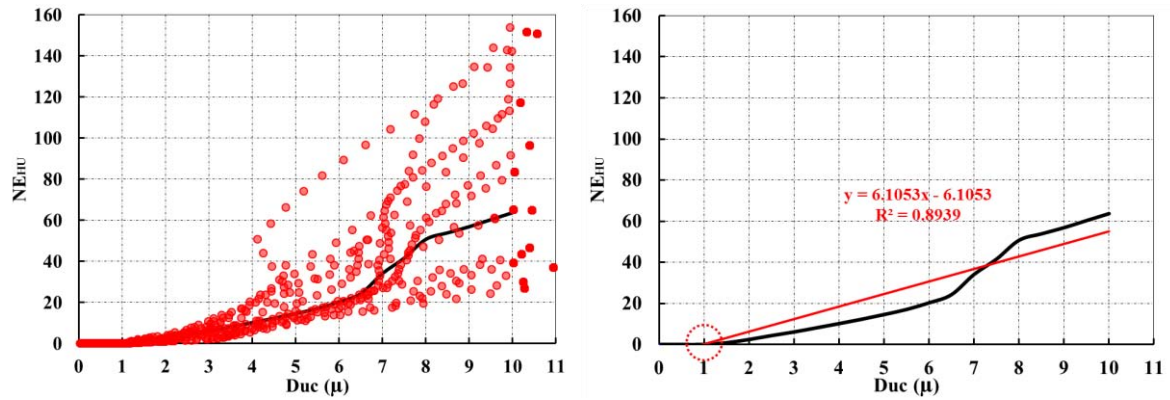


Figura C.2.6. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 0.90$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

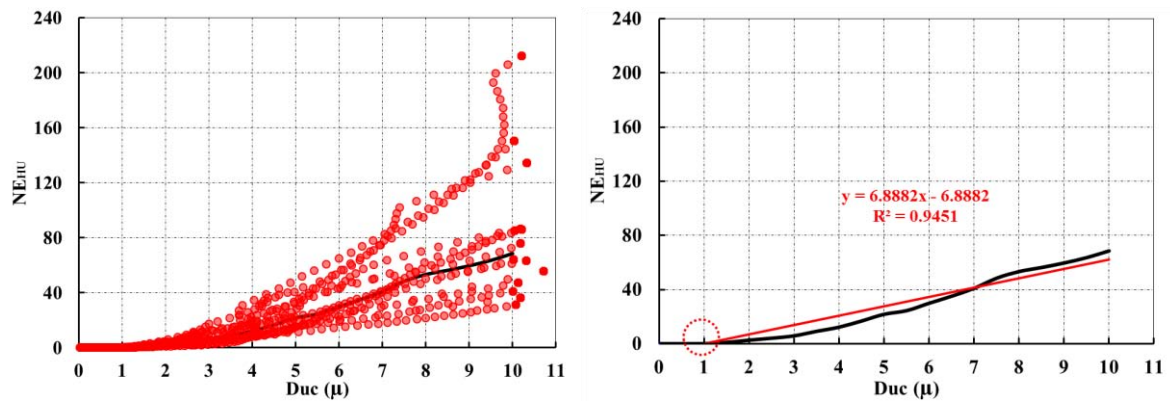


Figura C.2.7. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

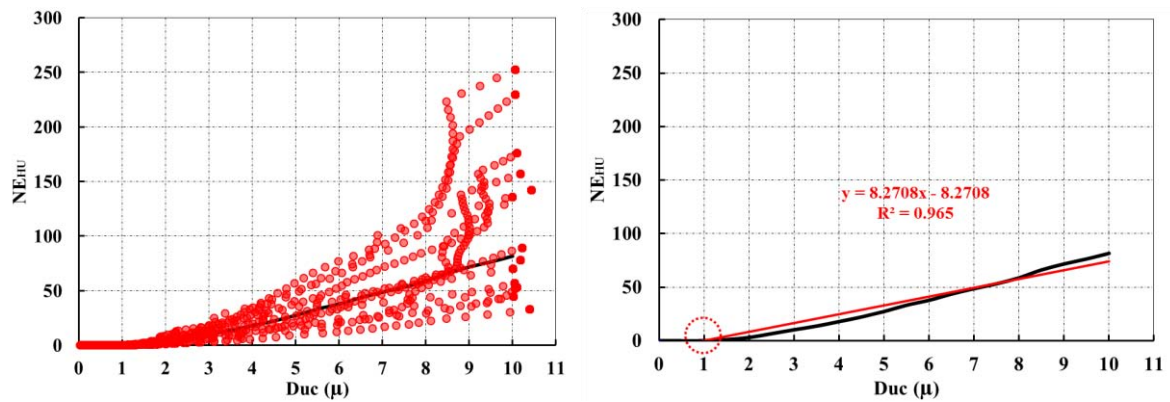


Figura C.2.8. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 1.10$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

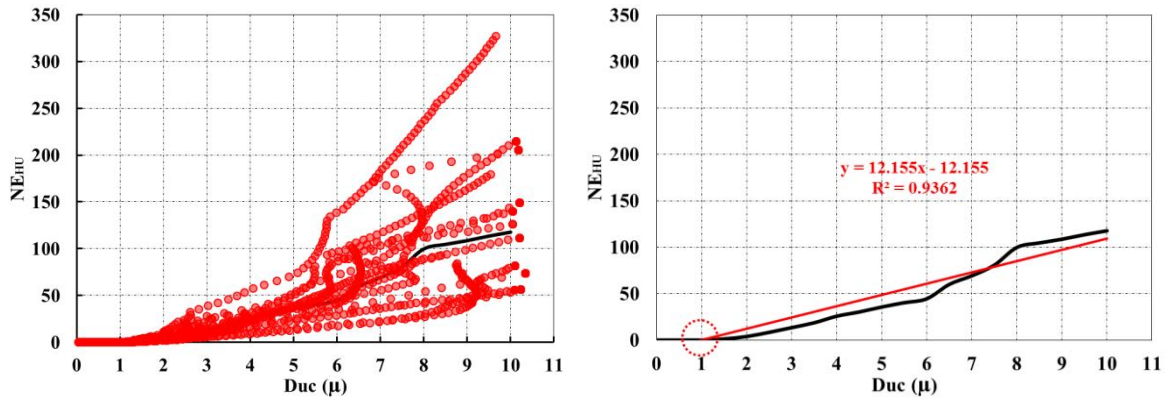


Figura C.2.9. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de T = 1.25 s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

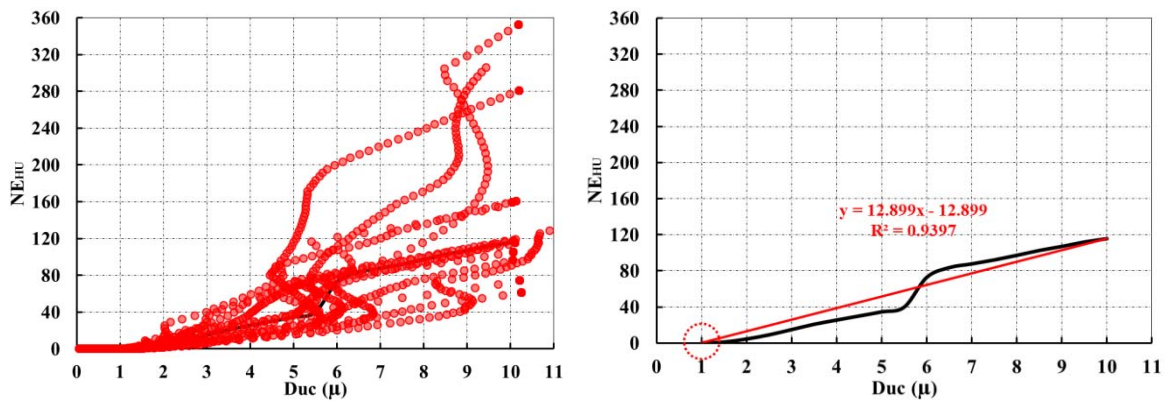


Figura C.2.10. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de T = 1.40 s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

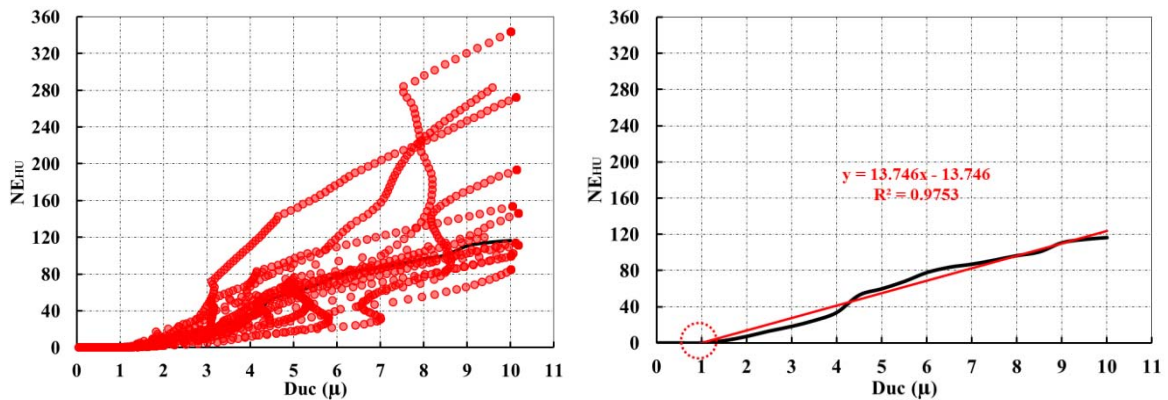


Figura C.2.11. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de T = 1.50 s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

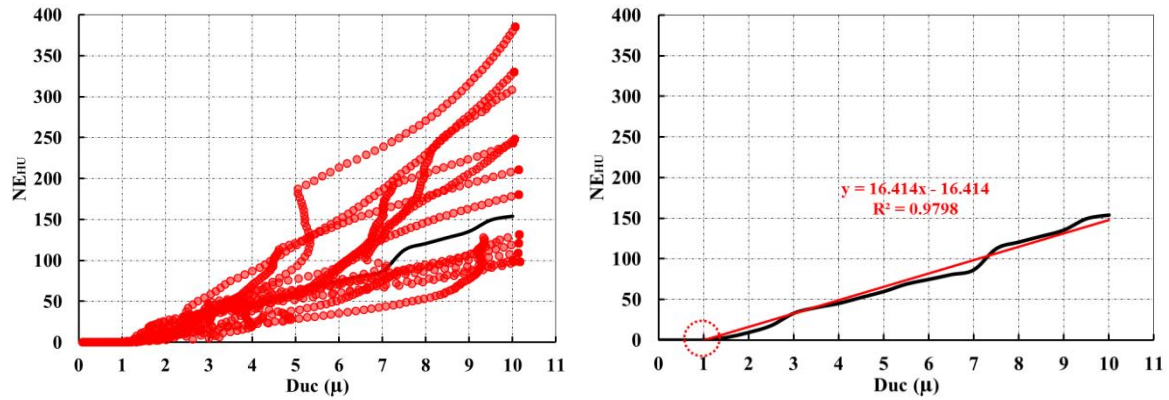


Figura C.2.12. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de IGL de $T = 1.75$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

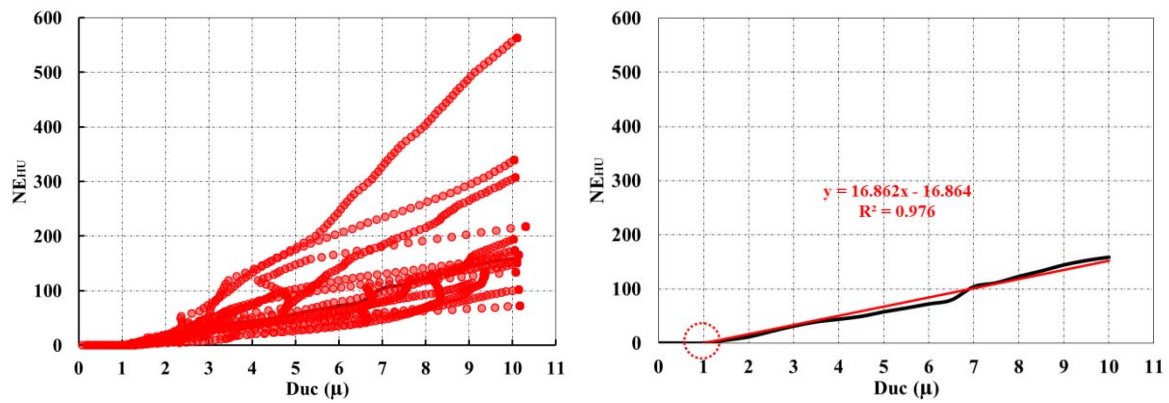


Figura C.2.13. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de IGL de $T = 2.00$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

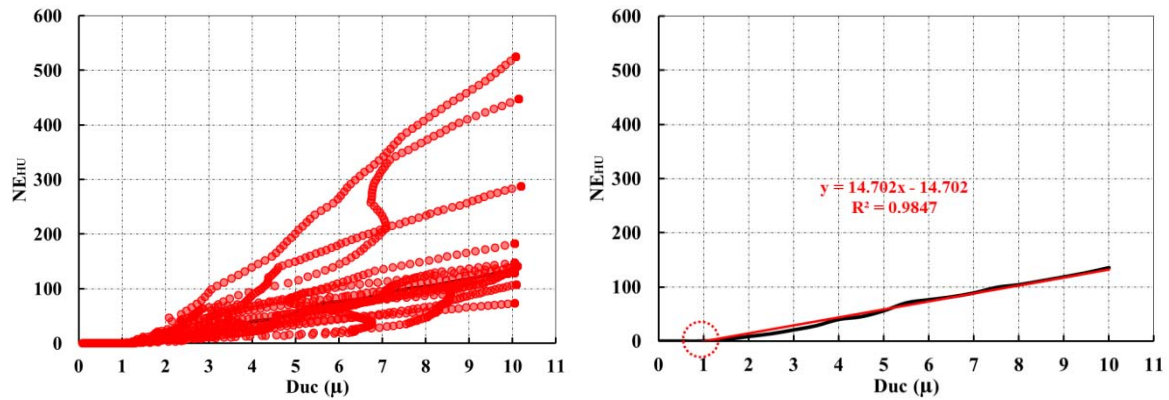


Figura C.2.14. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de IGL de $T = 2.25$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

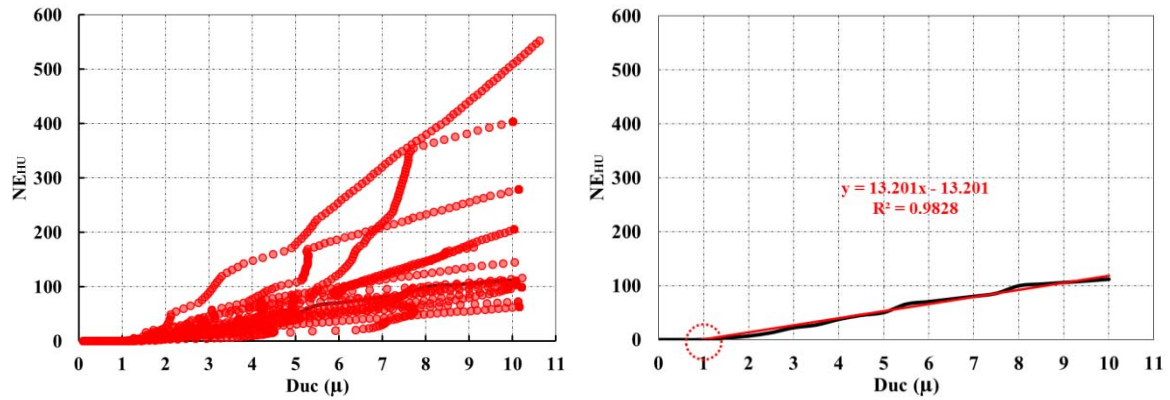


Figura C.2.15. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de T = 2.50 s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

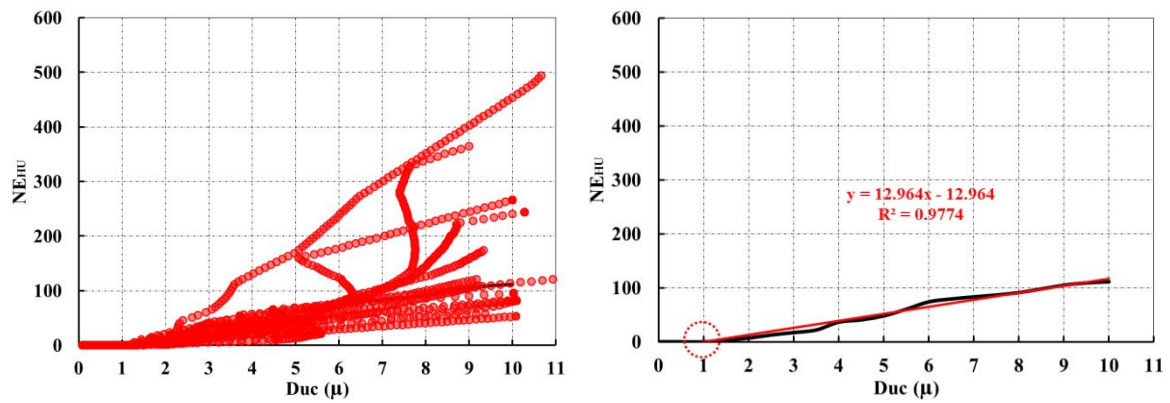


Figura C.2.16. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de T = 2.75 s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

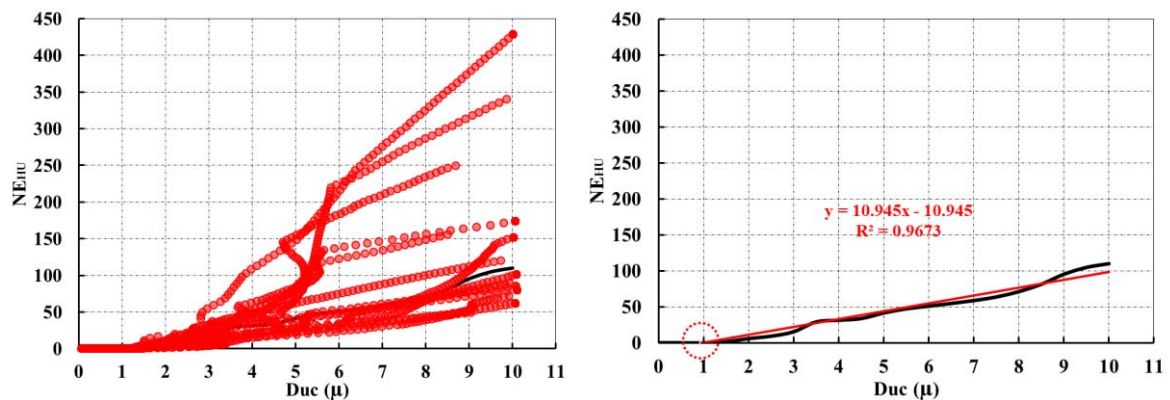


Figura C.2.17. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de T = 3.00 s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

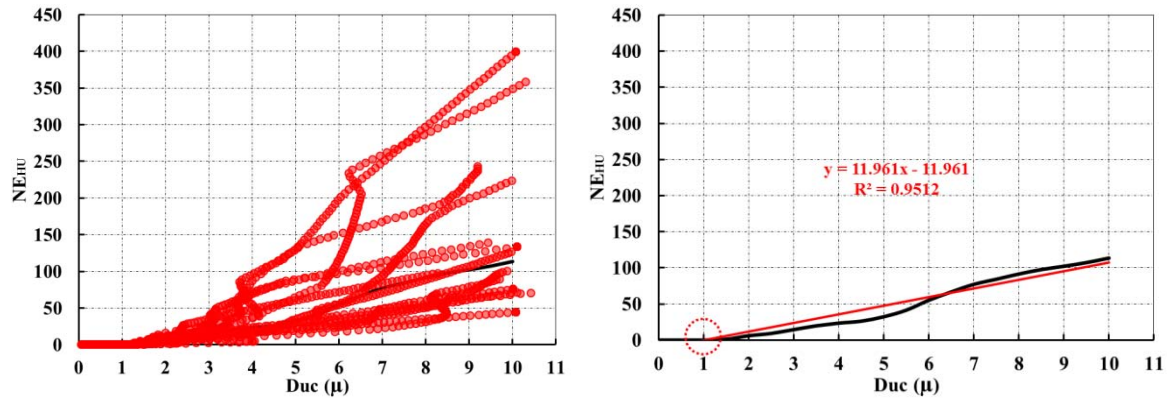


Figura C.2.18. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 3.25$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

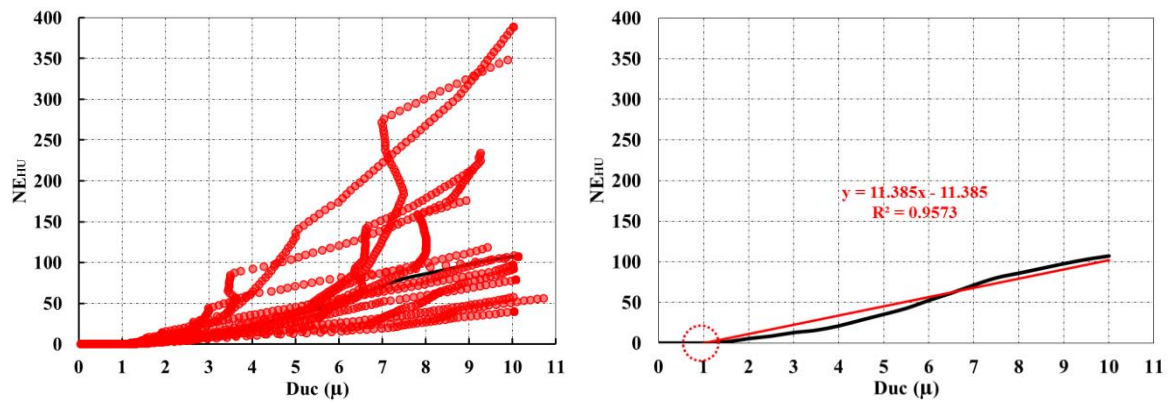


Figura C.2.19. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 3.50$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

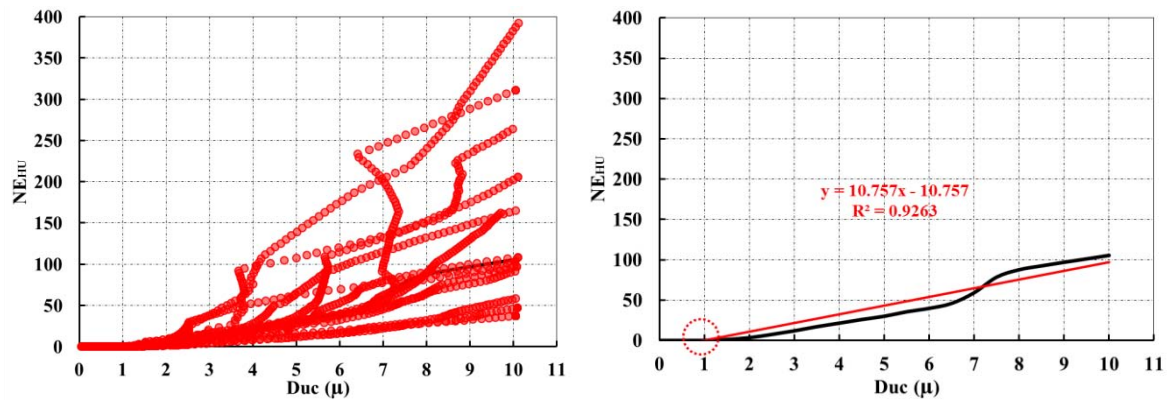


Figura C.2.20. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 3.75$ s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

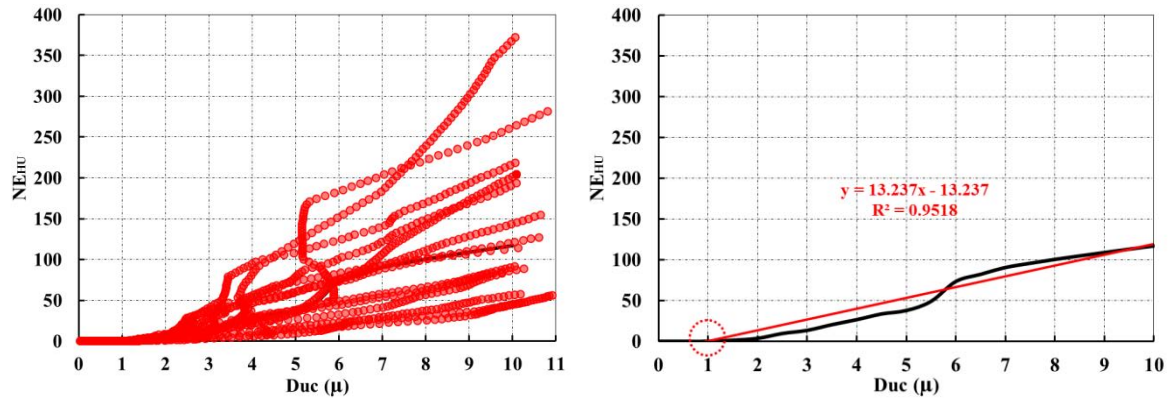
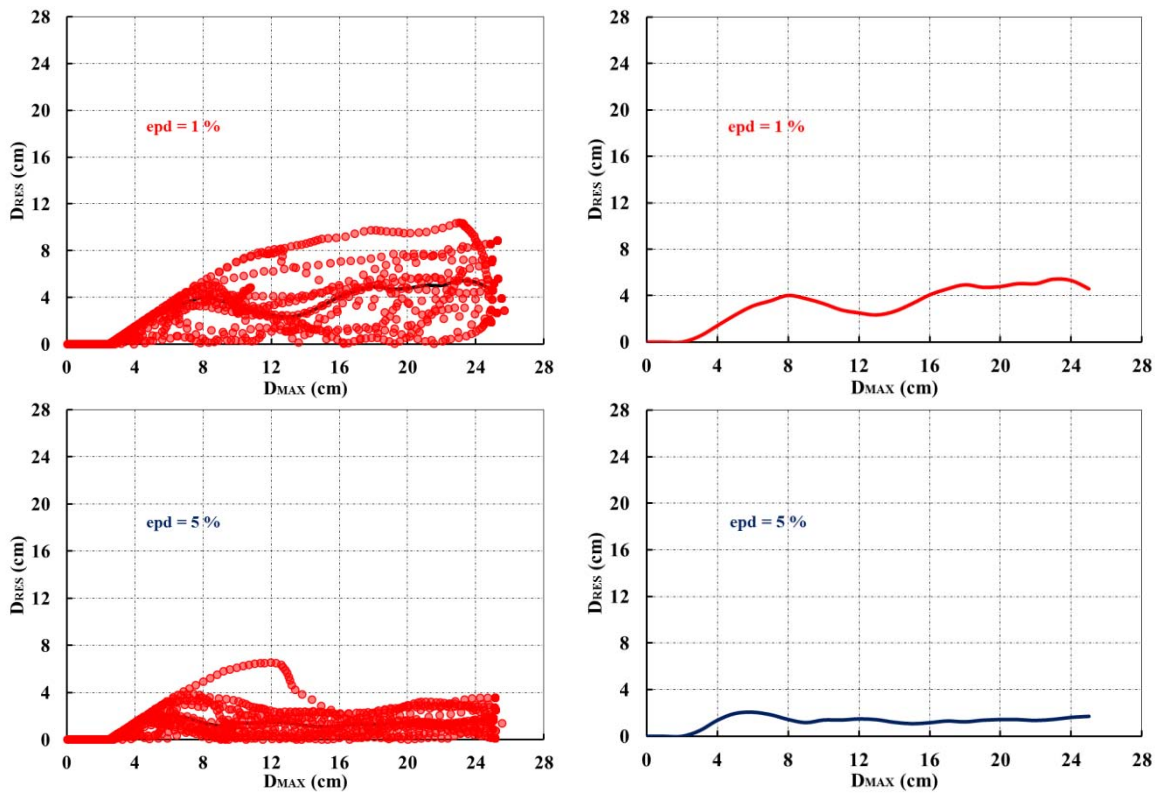


Figura C.2.21. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de IGL de T = 4.00 s sometido a sismos de suelo blando y mediana con ajuste lineal.

C.3. Gráficas de análisis de D_{MAX} contra D_{RES} para diferentes valores de epd del modelo bilineal y mediana resultante



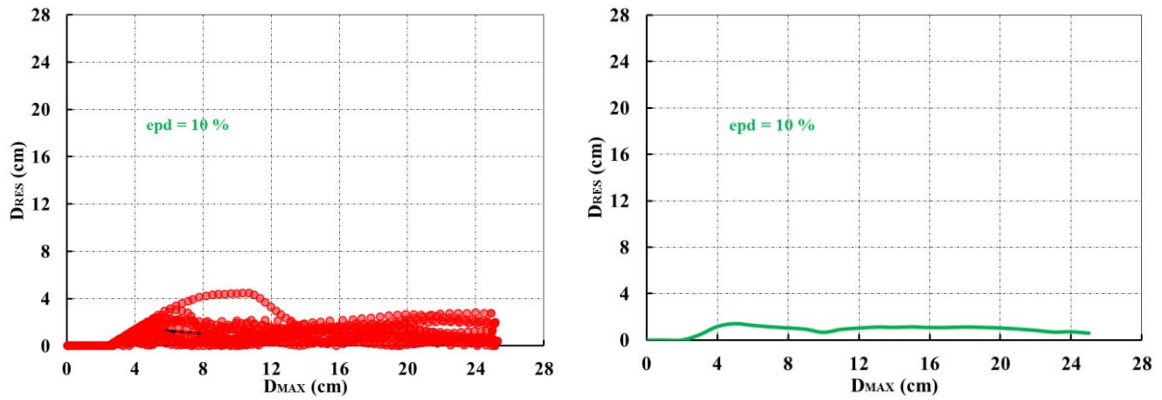


Figura C.3.1. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% y 10% y mediana resultante.

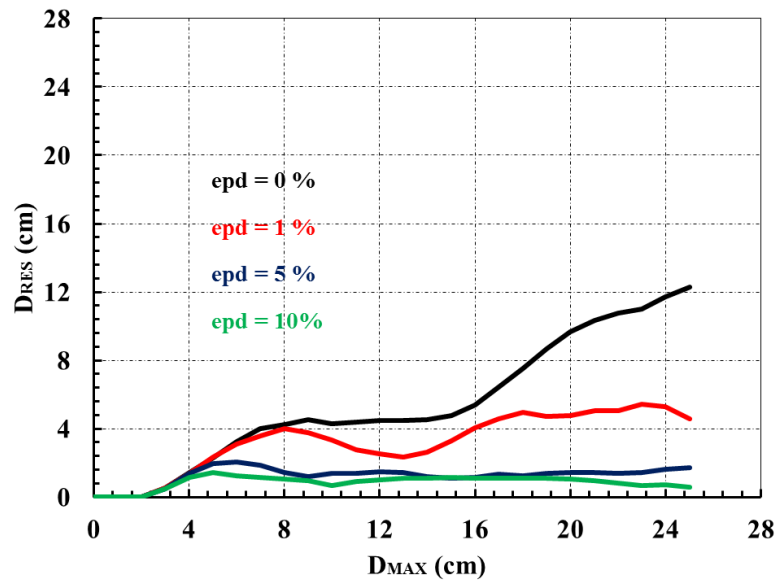
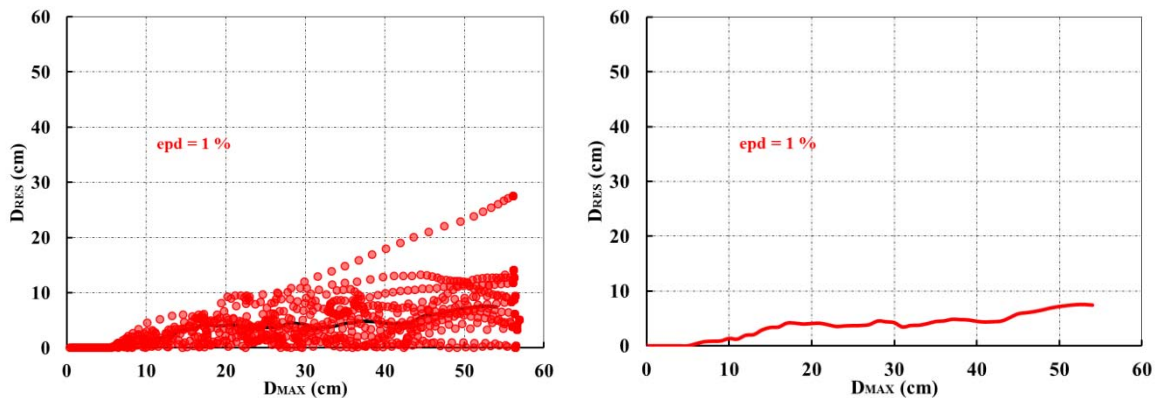


Figura C.3.2. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s con diferentes valores de epd del modelo bilineal.



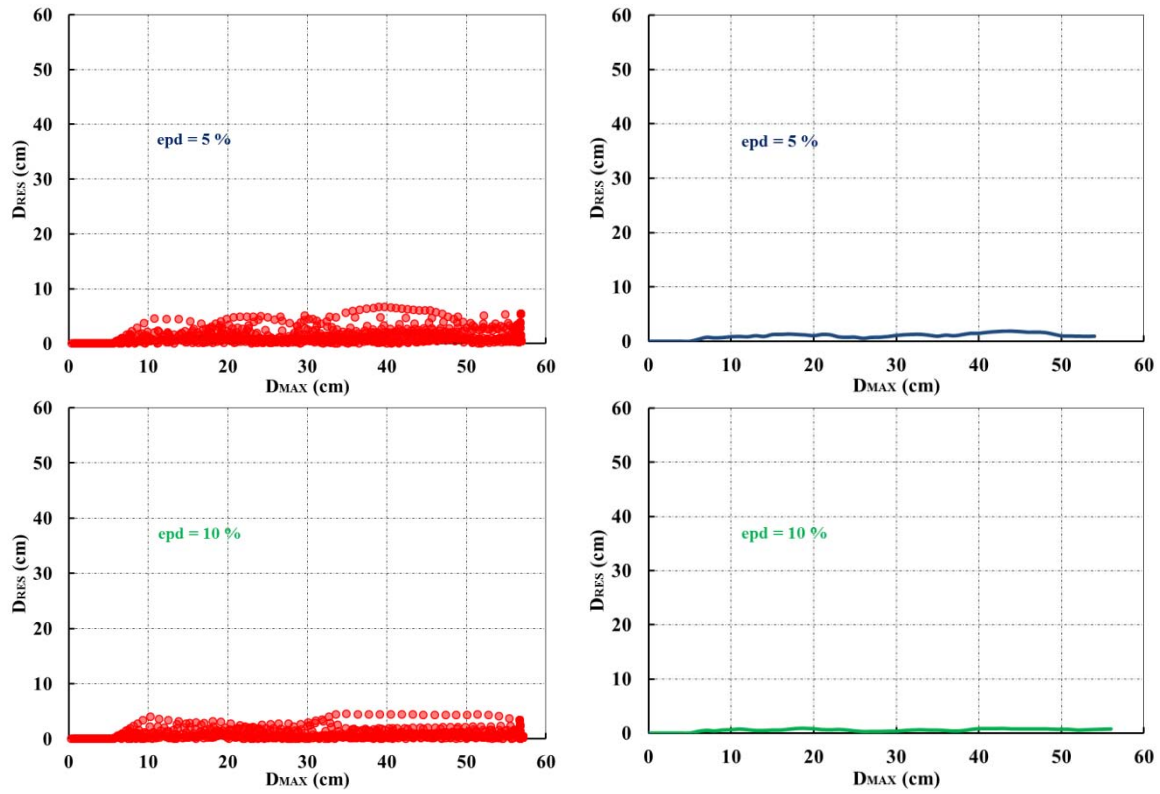


Figura C.3.3. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 1.50$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% y 10% y mediana resultante.

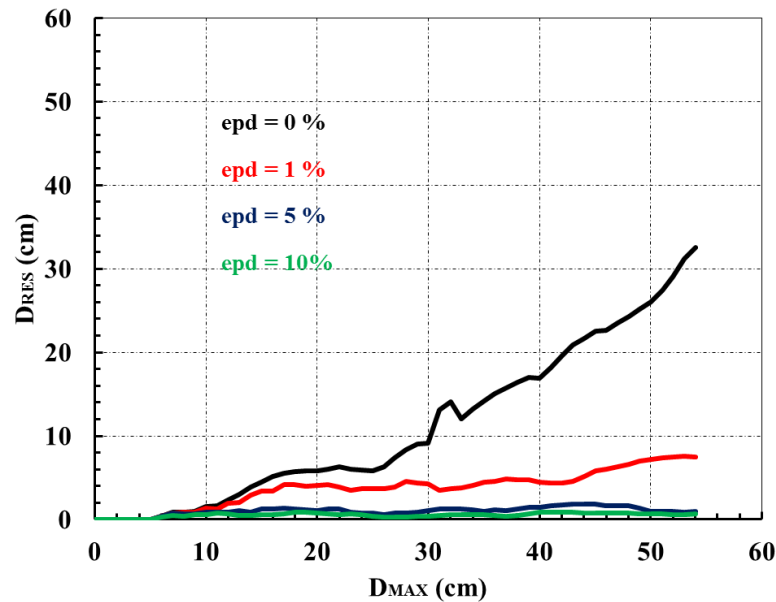


Figura C.3.4. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 1.50$ s con diferentes valores de epd del modelo bilineal.

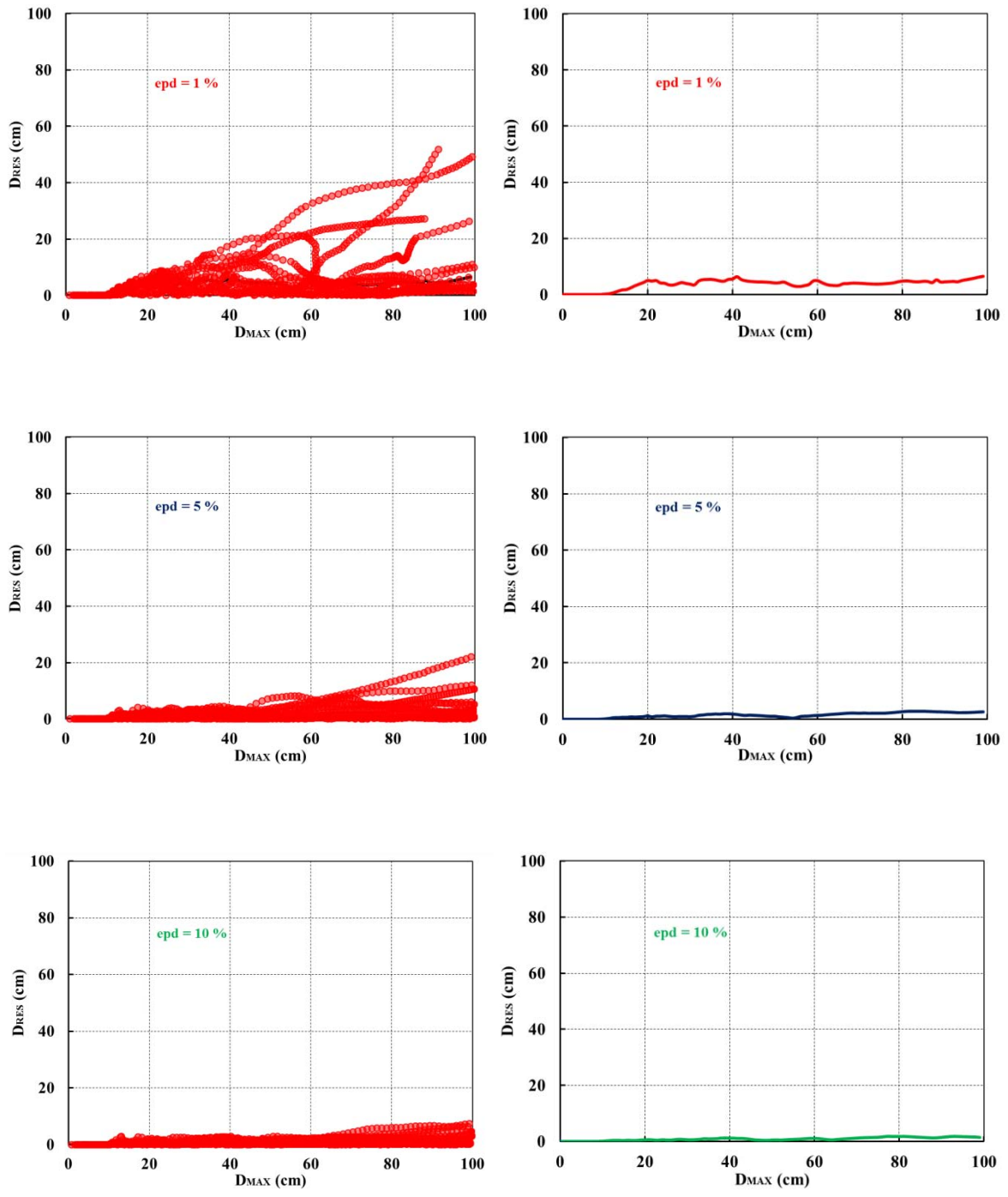


Figura C.3.5. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% y 10% y mediana resultante.

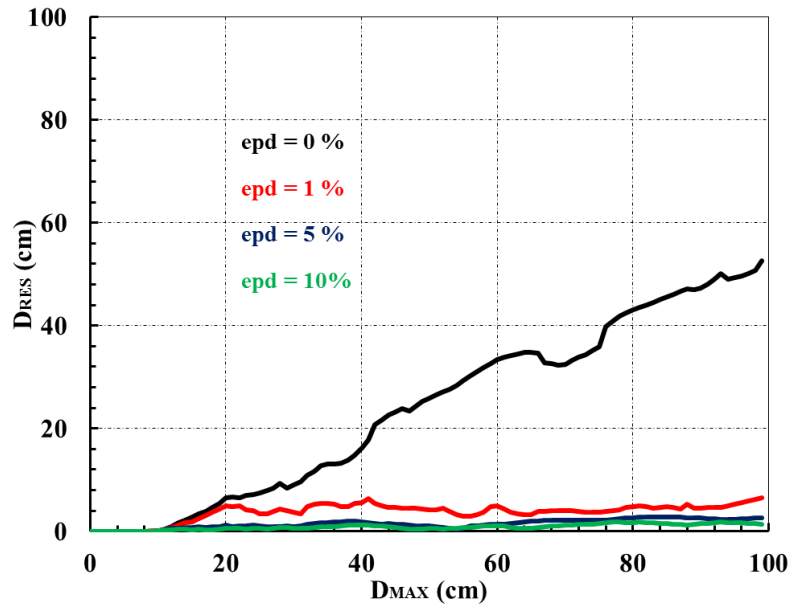
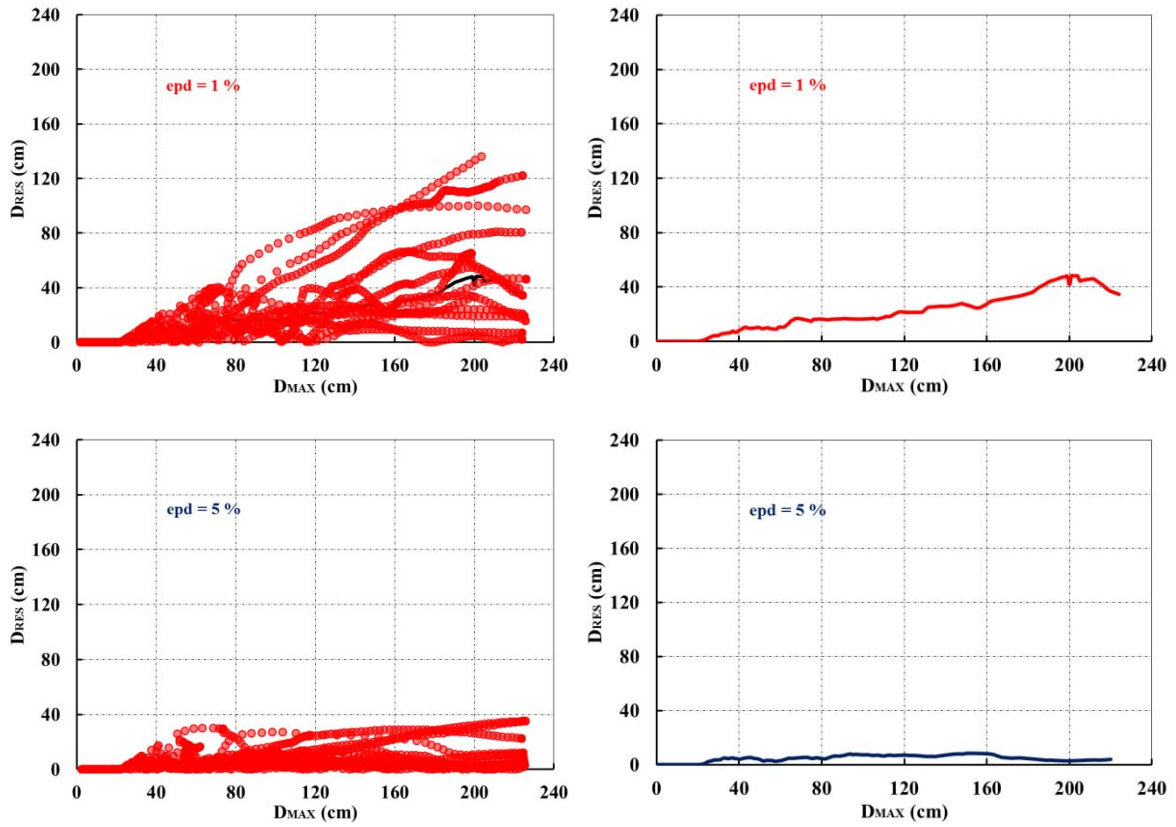


Figura C.3.6. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s con diferentes valores de epd del modelo bilineal.



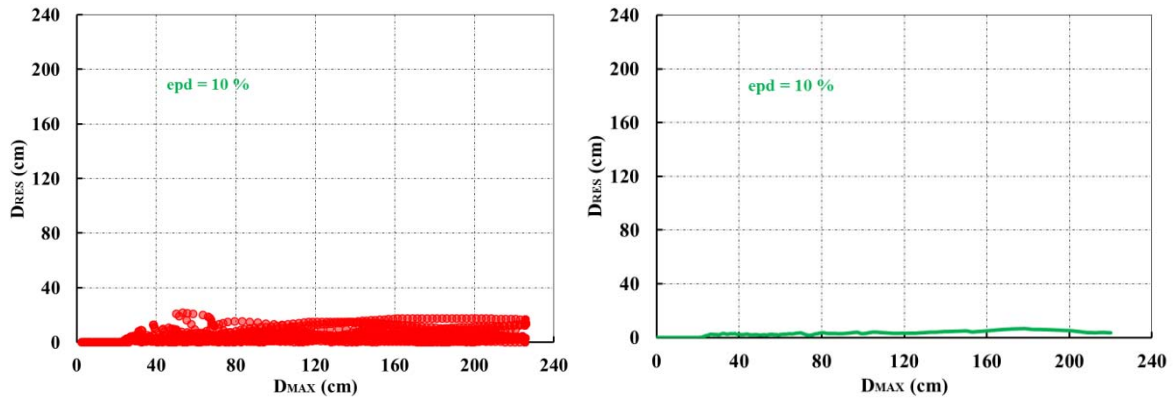


Figura C.3.7. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de S1GL de $T = 3.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de sistema de 1GL de 1%, 5% y 10% y mediana resultante.

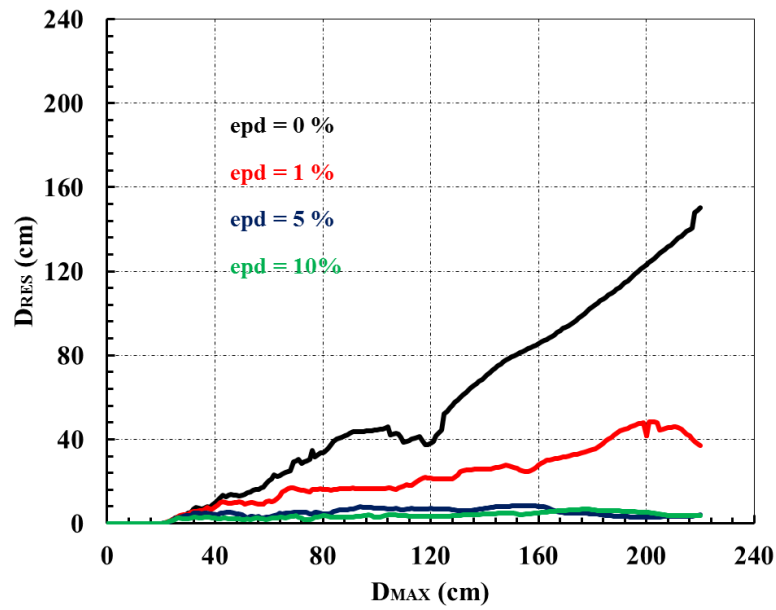
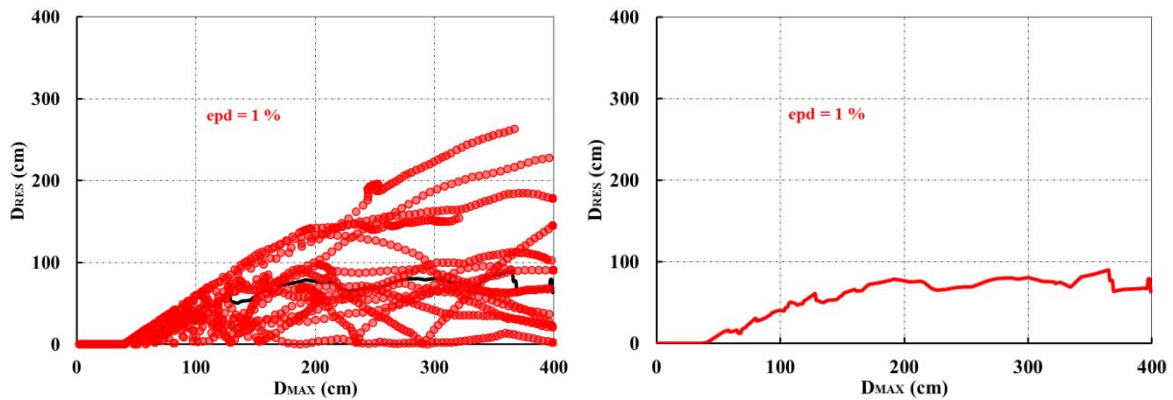


Figura C.3.8. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 3.00$ s con diferentes valores de epd del modelo bilineal.



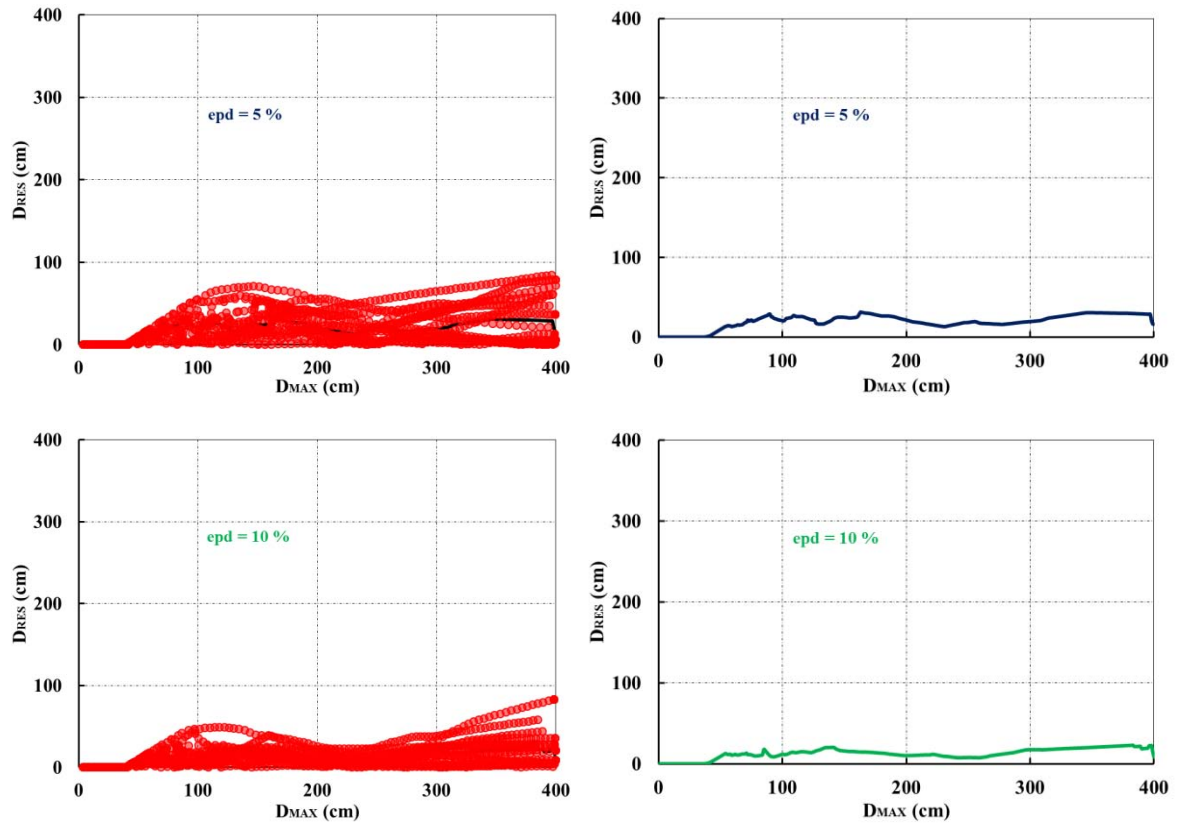


Figura C.3.9. Relación de desplazamiento máximo contra desplazamiento residual de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% y 10% y mediana resultante.

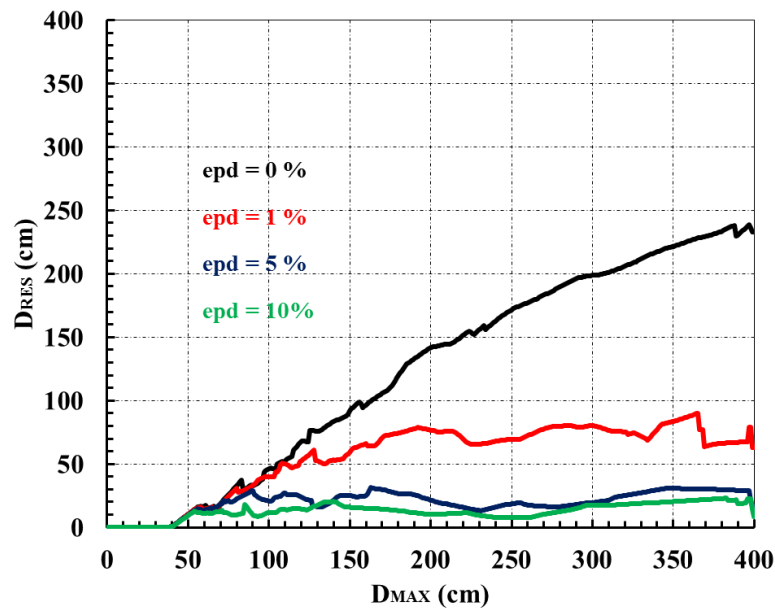


Figura C.3.10. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s con diferentes valores de epd del modelo bilineal.

C.4. Análisis de ductilidad y energía histerética normalizada del modelo bilineal

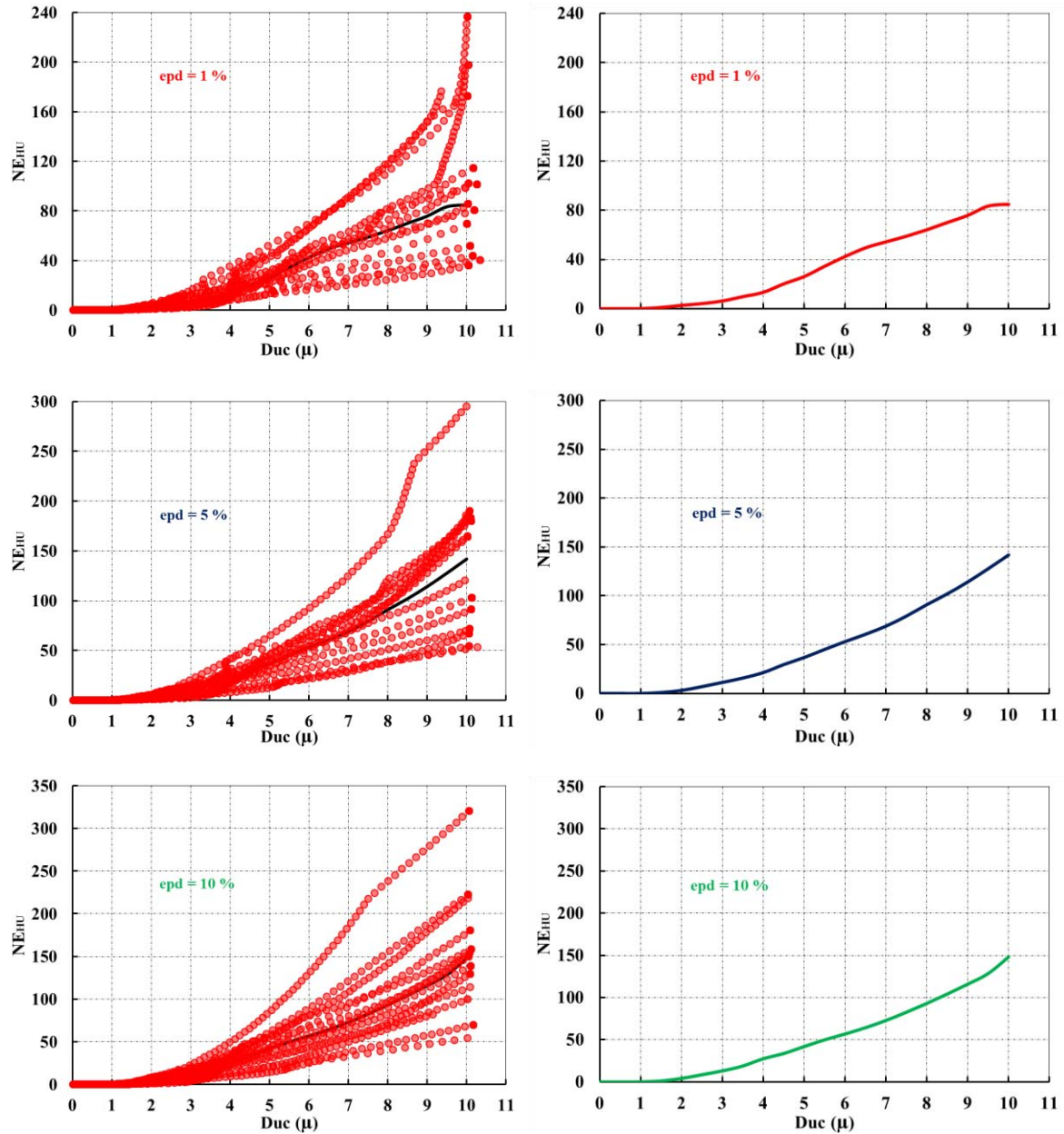


Figura C.4.1. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% y 10% y mediana resultante.

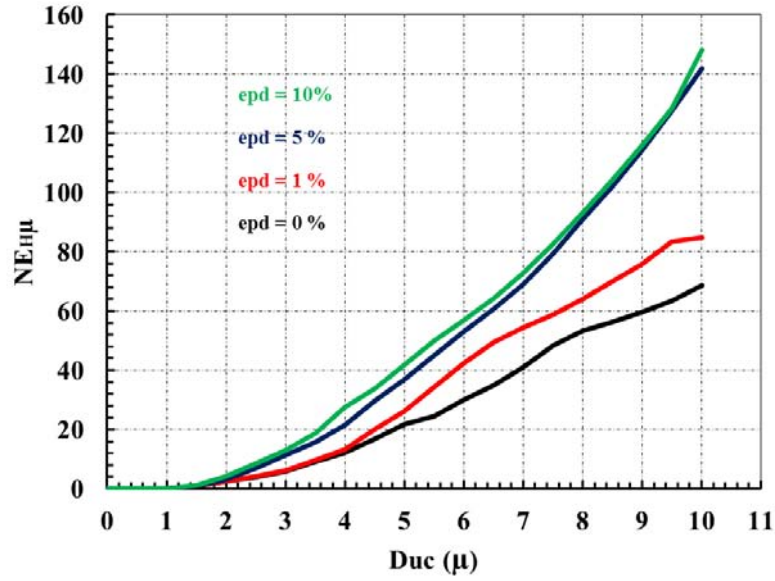
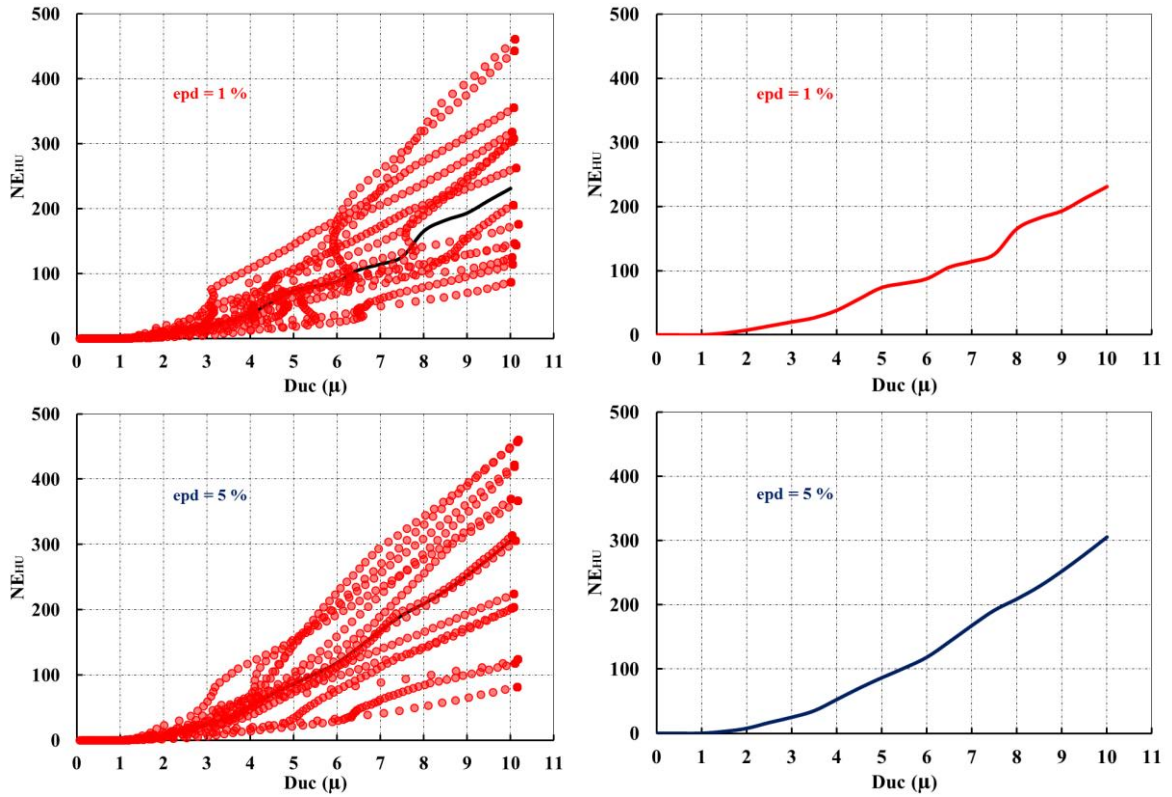


Figura C.4.2. Comparativa de medianas de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s con diferentes valores de epd del modelo bilineal.



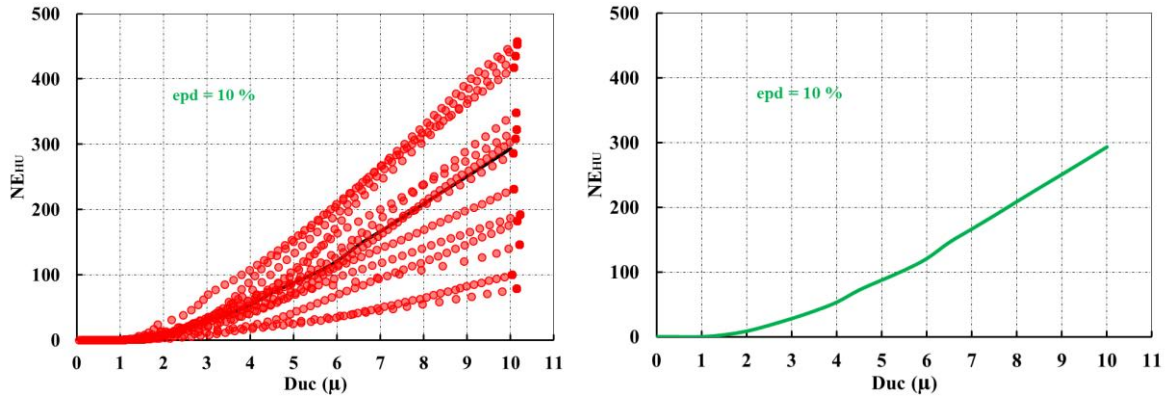


Figura C.4.3. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 1.50$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% y 10% y mediana resultante.

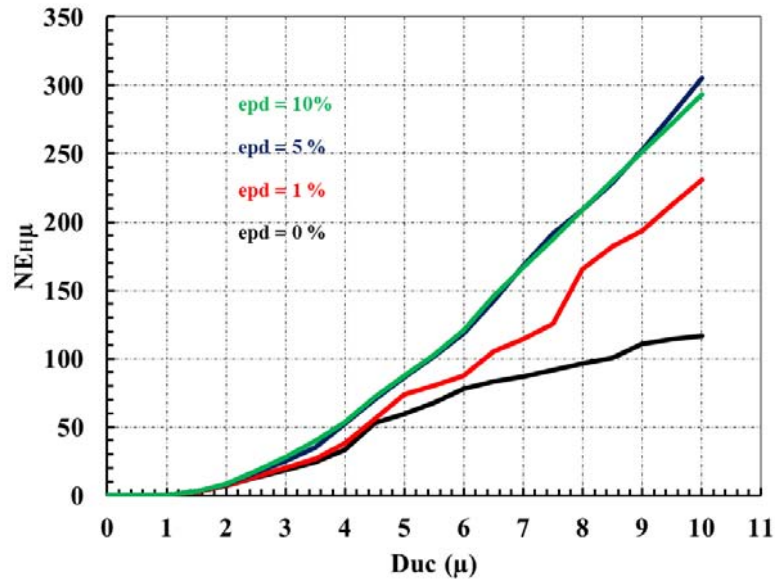
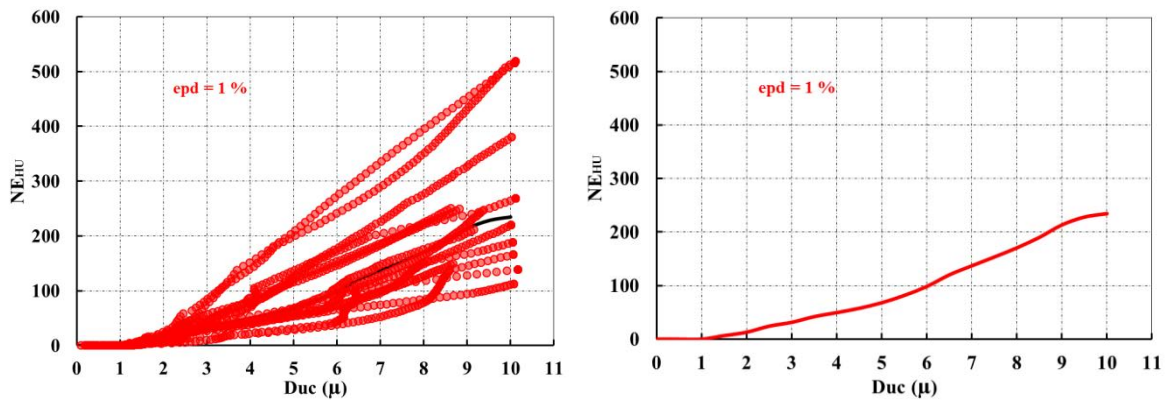


Figura C.4.4. Comparativa de medianas de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 1.50$ s con diferentes valores de epd del modelo bilineal.



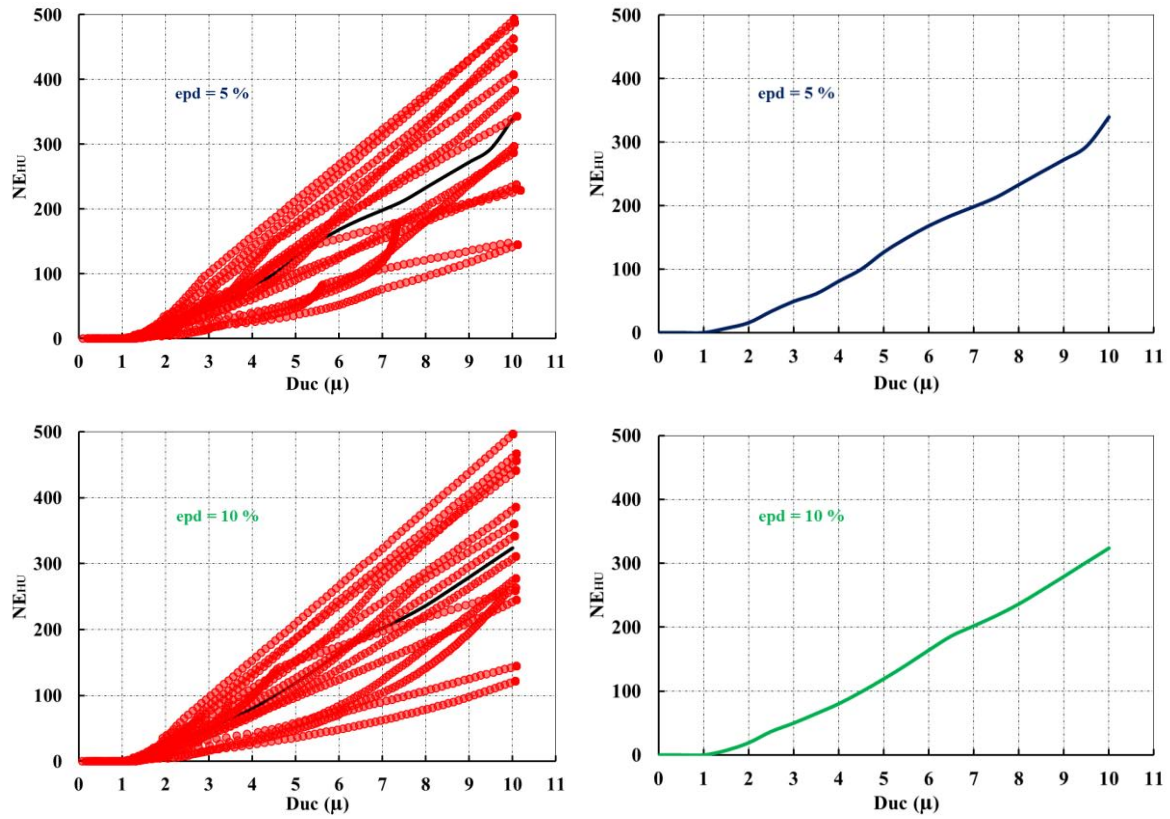


Figura C.4.5. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% y 10% y mediana resultante.

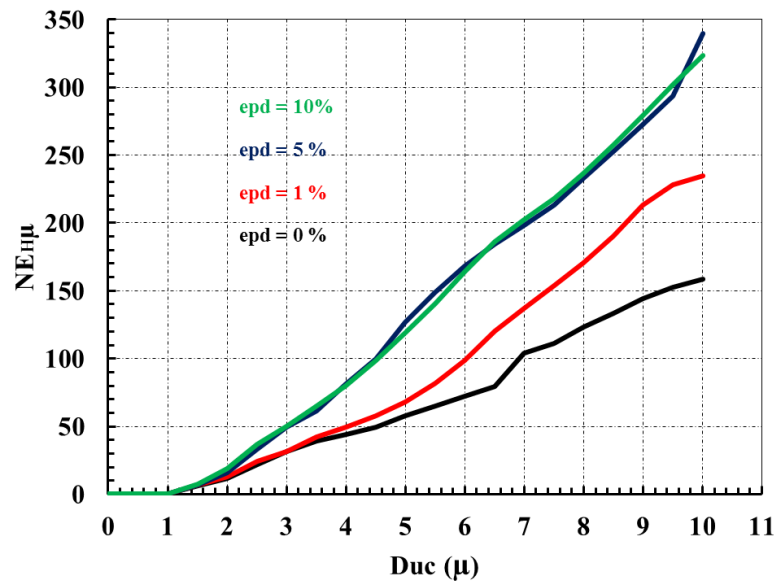


Figura C.4.6. Comparativa de medianas de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s con diferentes valores de epd del modelo bilineal.

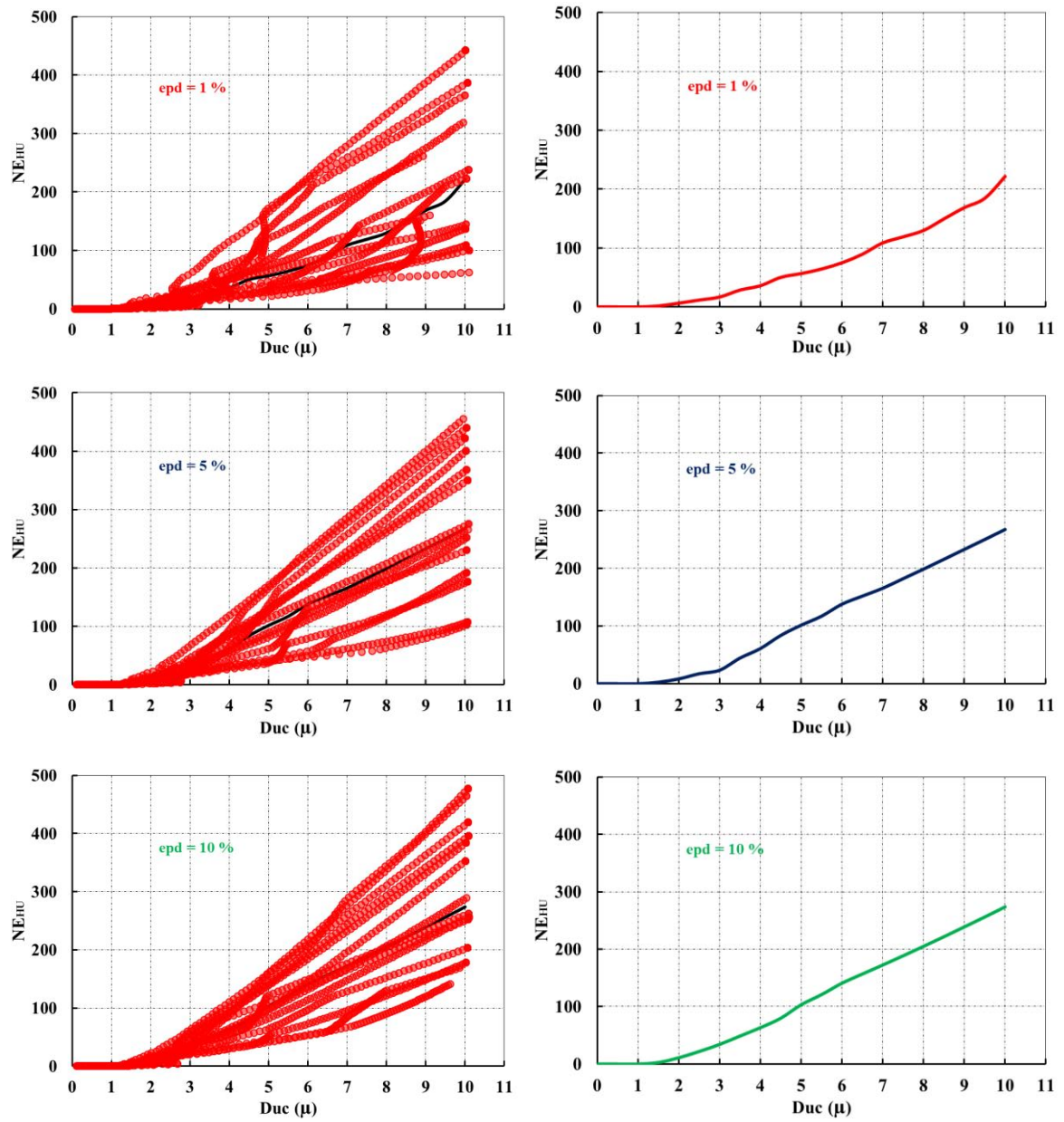


Figura C.4.7. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 3.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% y 10% y mediana resultante.

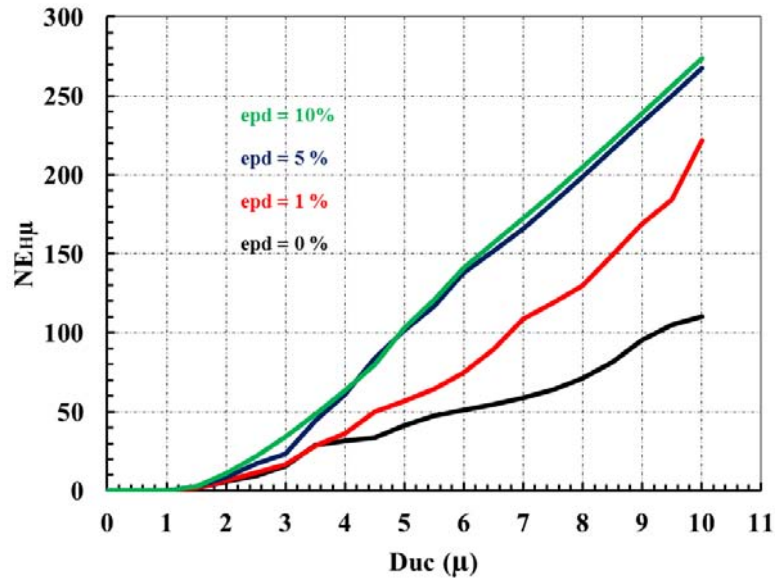
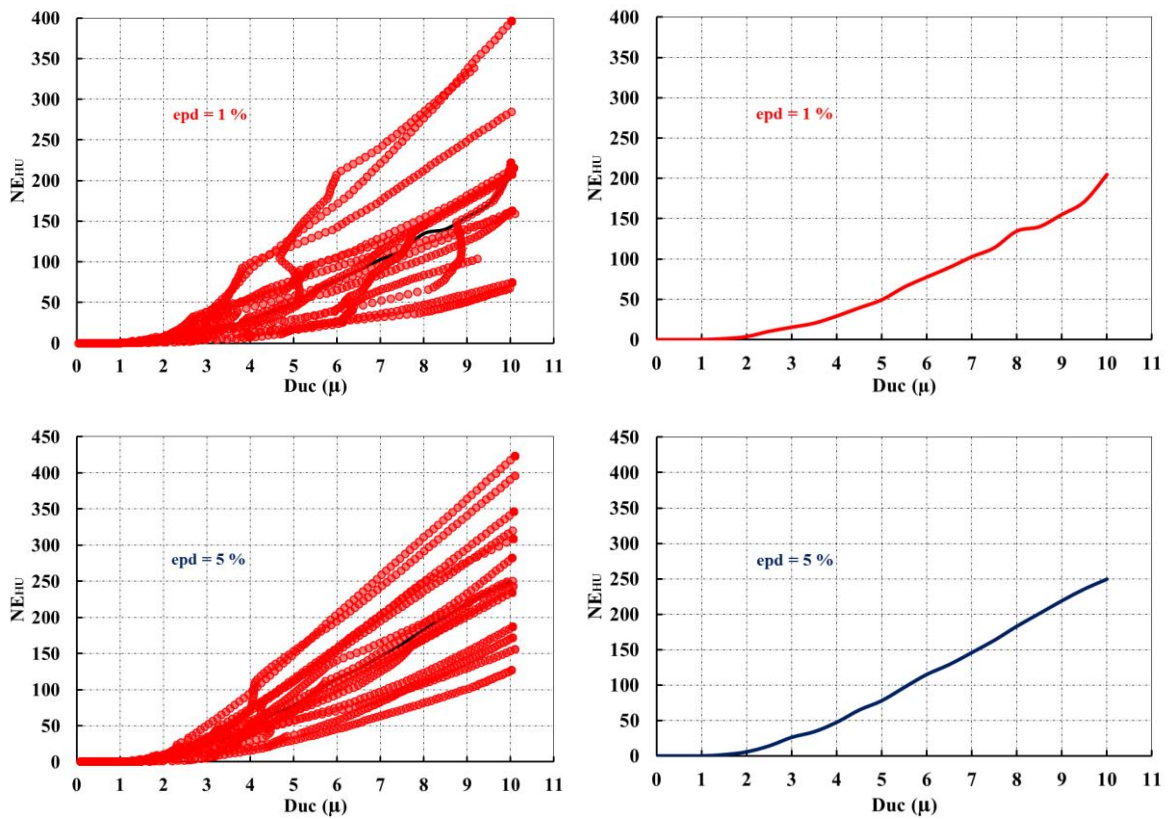


Figura C.4.8. Comparativa de medianas de $Duc(\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 3.00$ s con diferentes valores de epd del modelo bilineal.



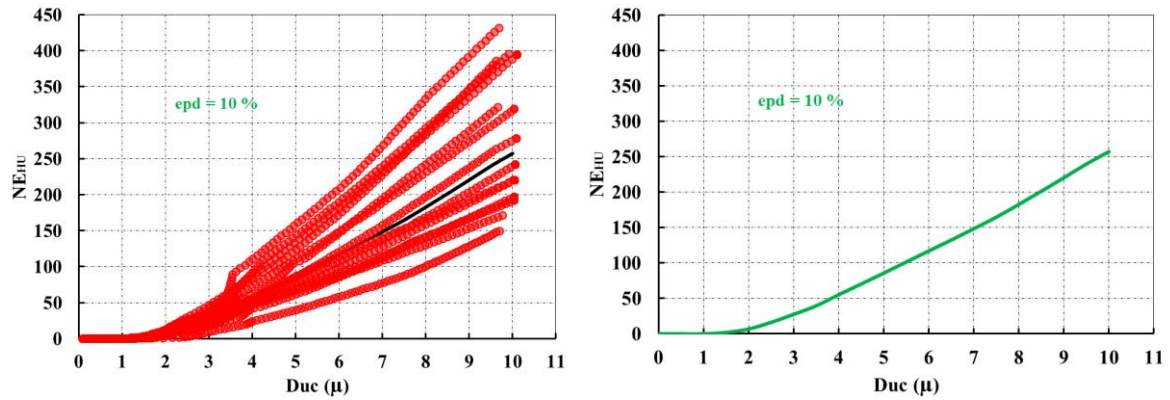


Figura C.4.9. Relación de ductilidad contra energía histerética normalizada de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% y 10% y mediana resultante.

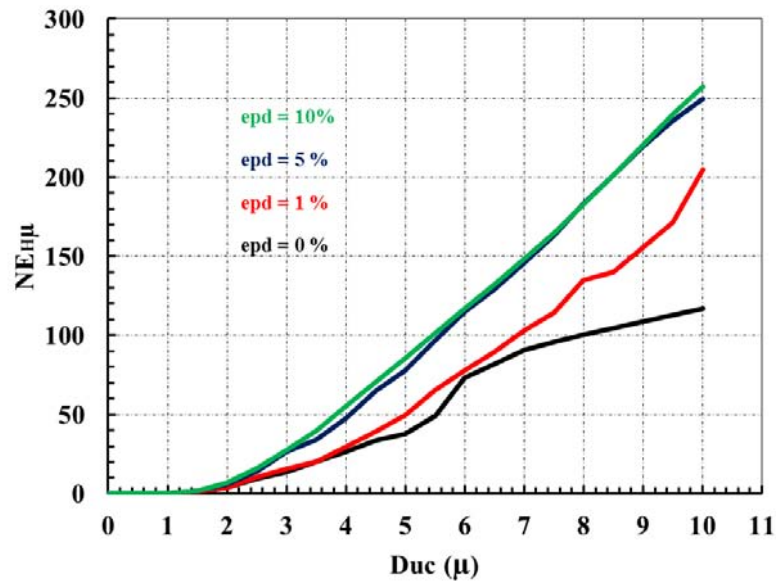


Figura C.4.10. Comparativa de medianas de $Duc (\mu)$ contra NE_{Hu} de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s con diferentes valores de epd del modelo bilineal.

C.5. Análisis de desplazamientos máximos y residuales del modelo trilineal $dy_2=3dy_1$

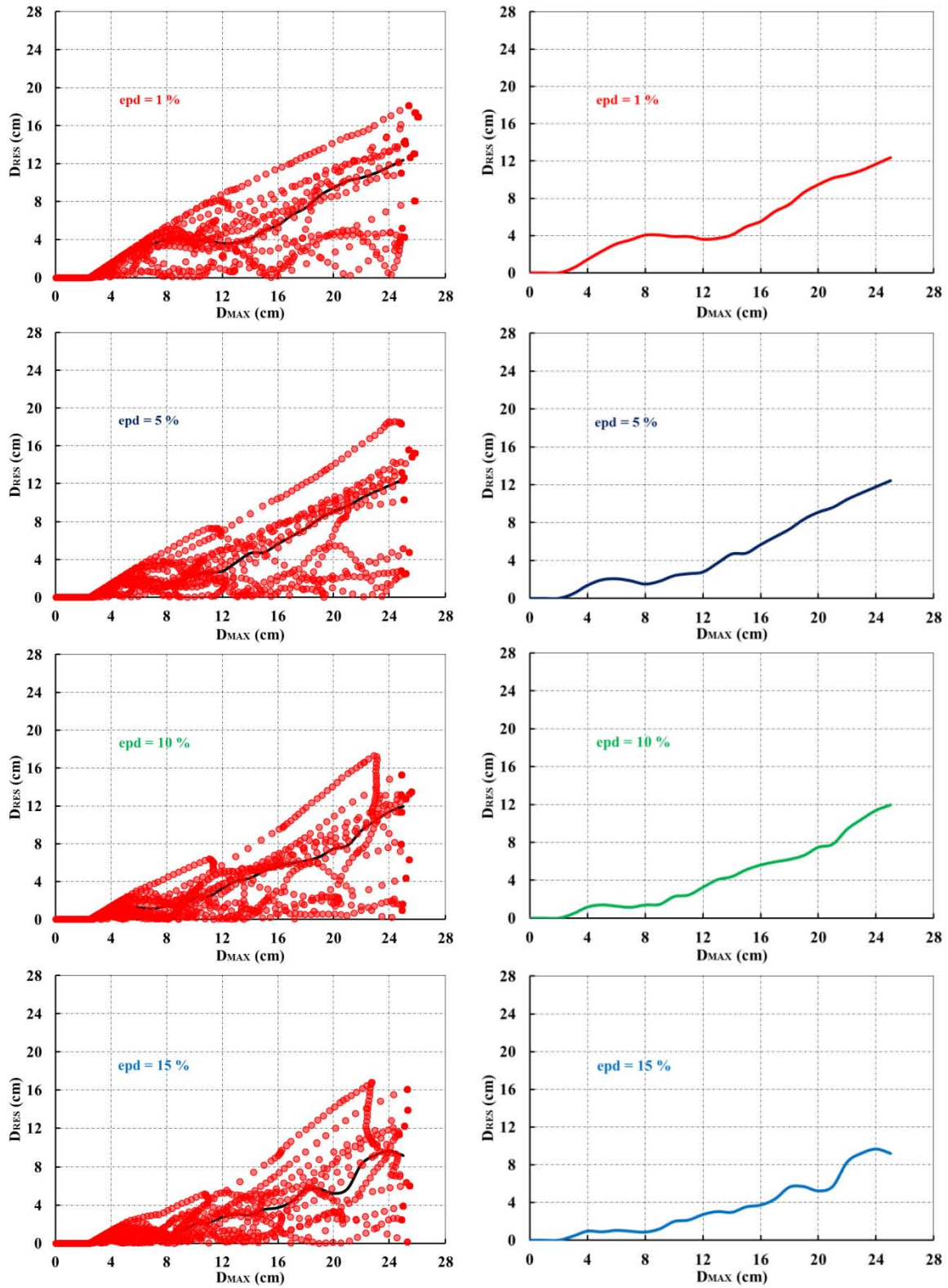


Figura C.5.1. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5%, 10% y 15% con $dy_2=3dy_1$.

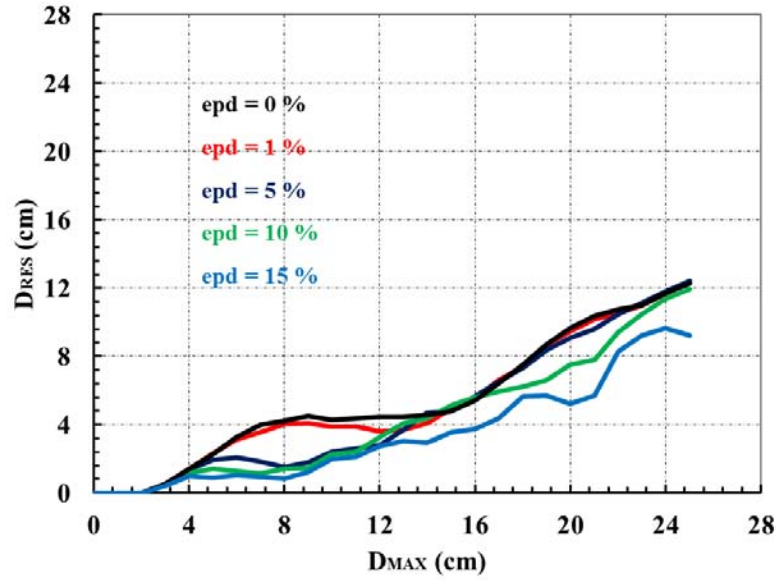
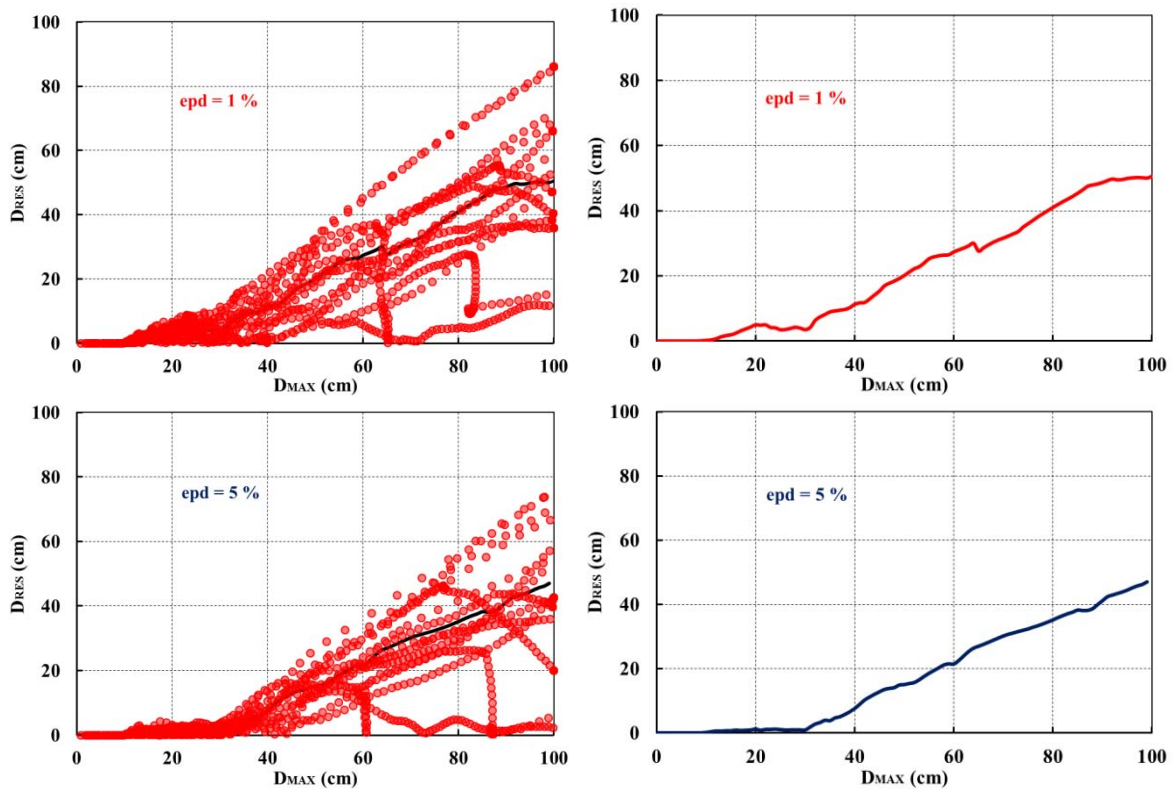


Figura C.5.2. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=3dy_1$.



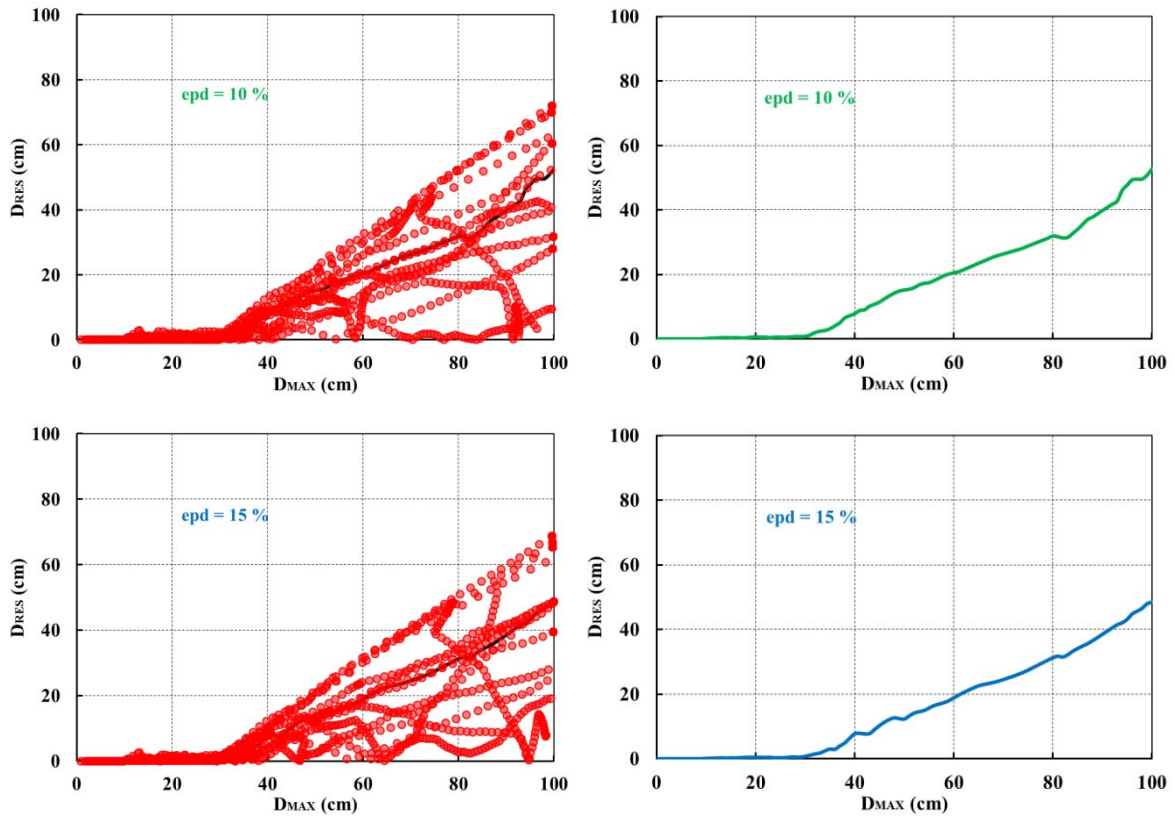


Figura C.5.3. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5%, 10% y 15% con $dy_2=3dy_1$.

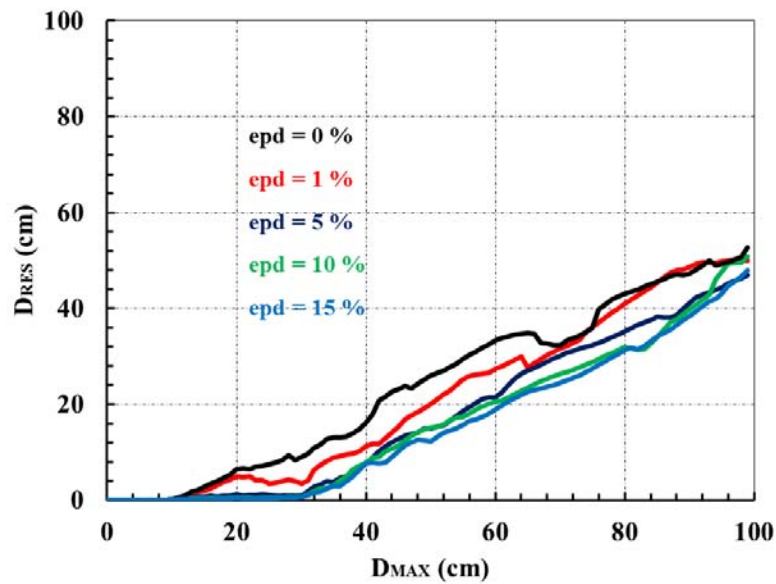


Figura C.5.4. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=3dy_1$.

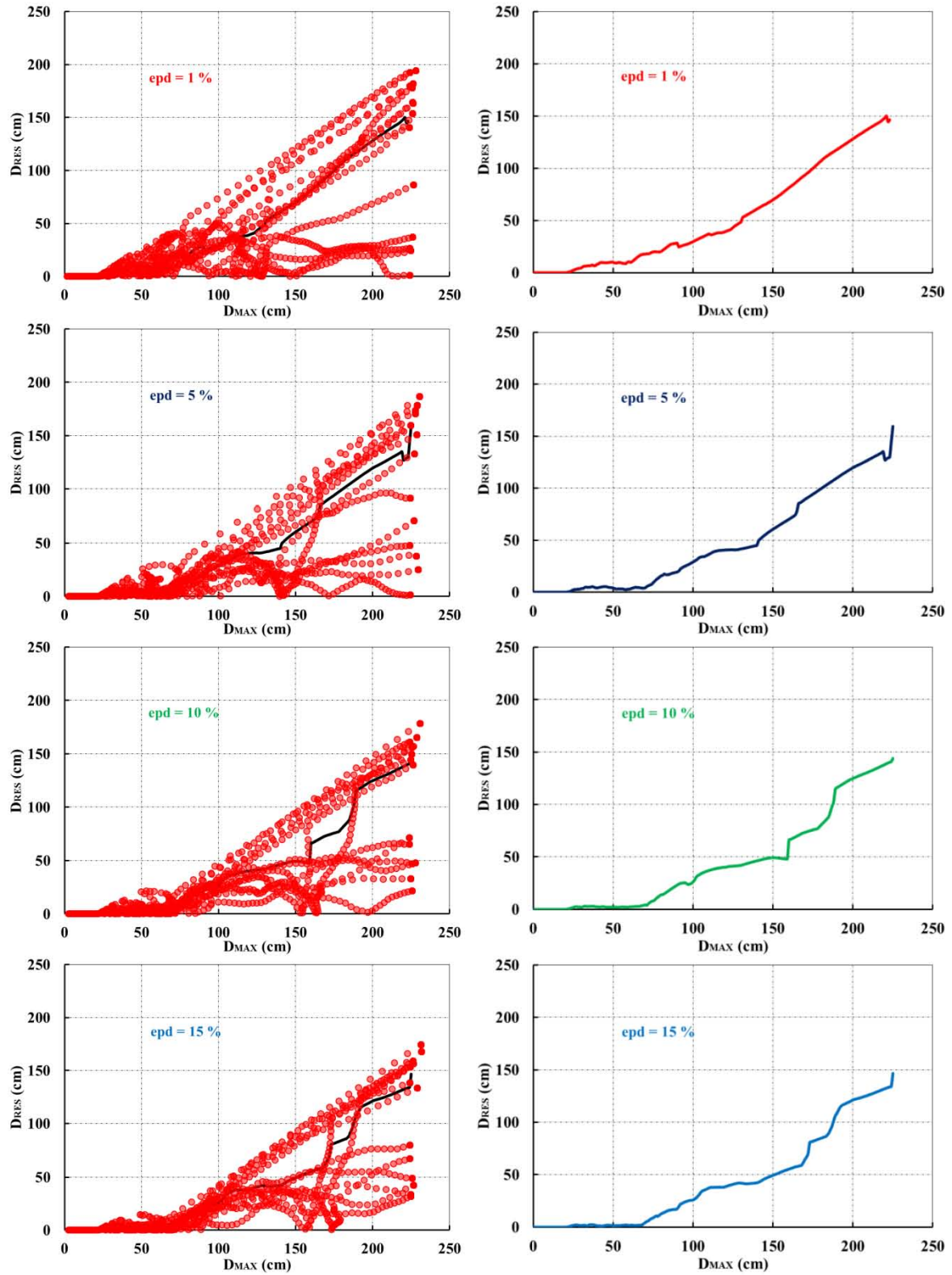


Figura C.5.5. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 3.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5%, 10% y 15% con $dy_2=3dy_1$.

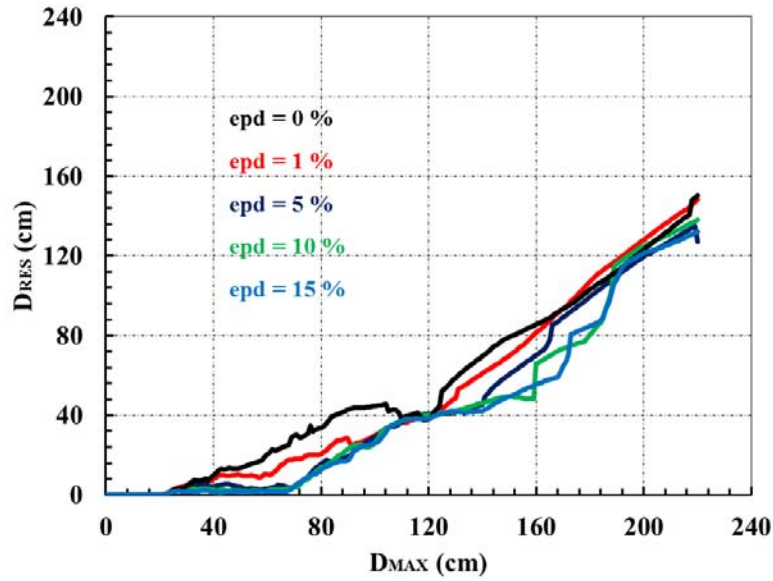
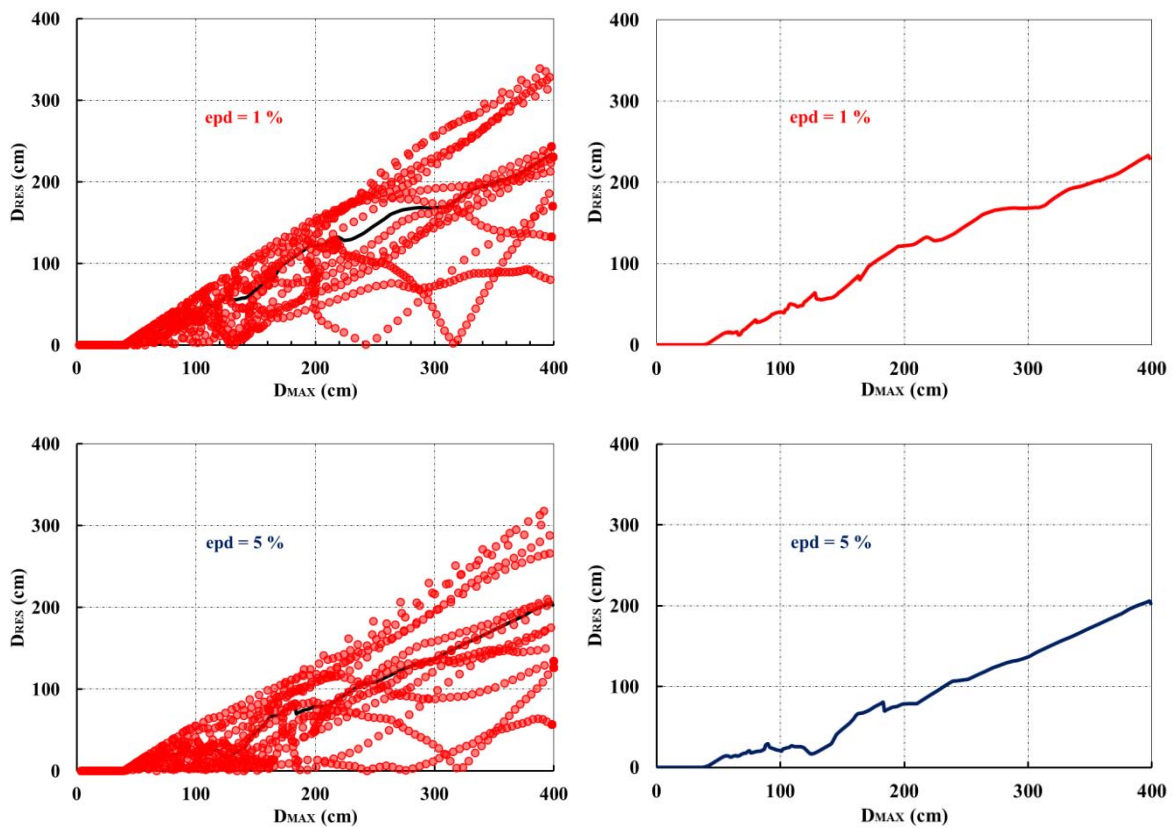


Figura C.5.6. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 3.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=3dy_1$.



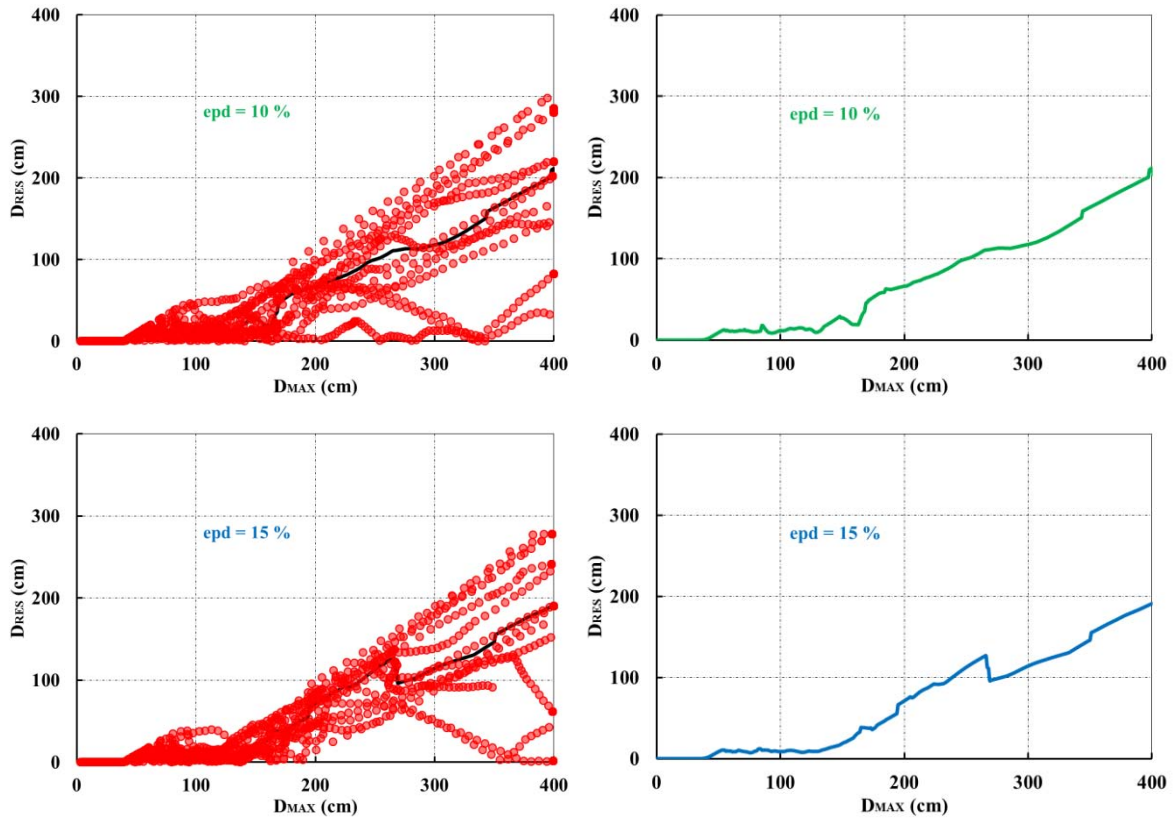


Figura C.5.7. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5%, 10% y 15% con $dy_2=3dy_1$.

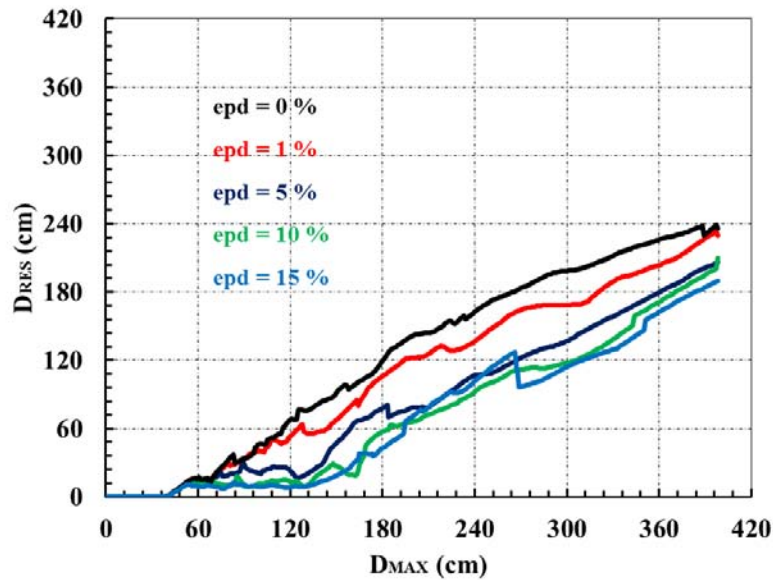


Figura C.5.8. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=3dy_1$.

C.6. Análisis de ductilidad y energía hysterética normalizada del modelo trilineal con $dy_2=3dy_1$

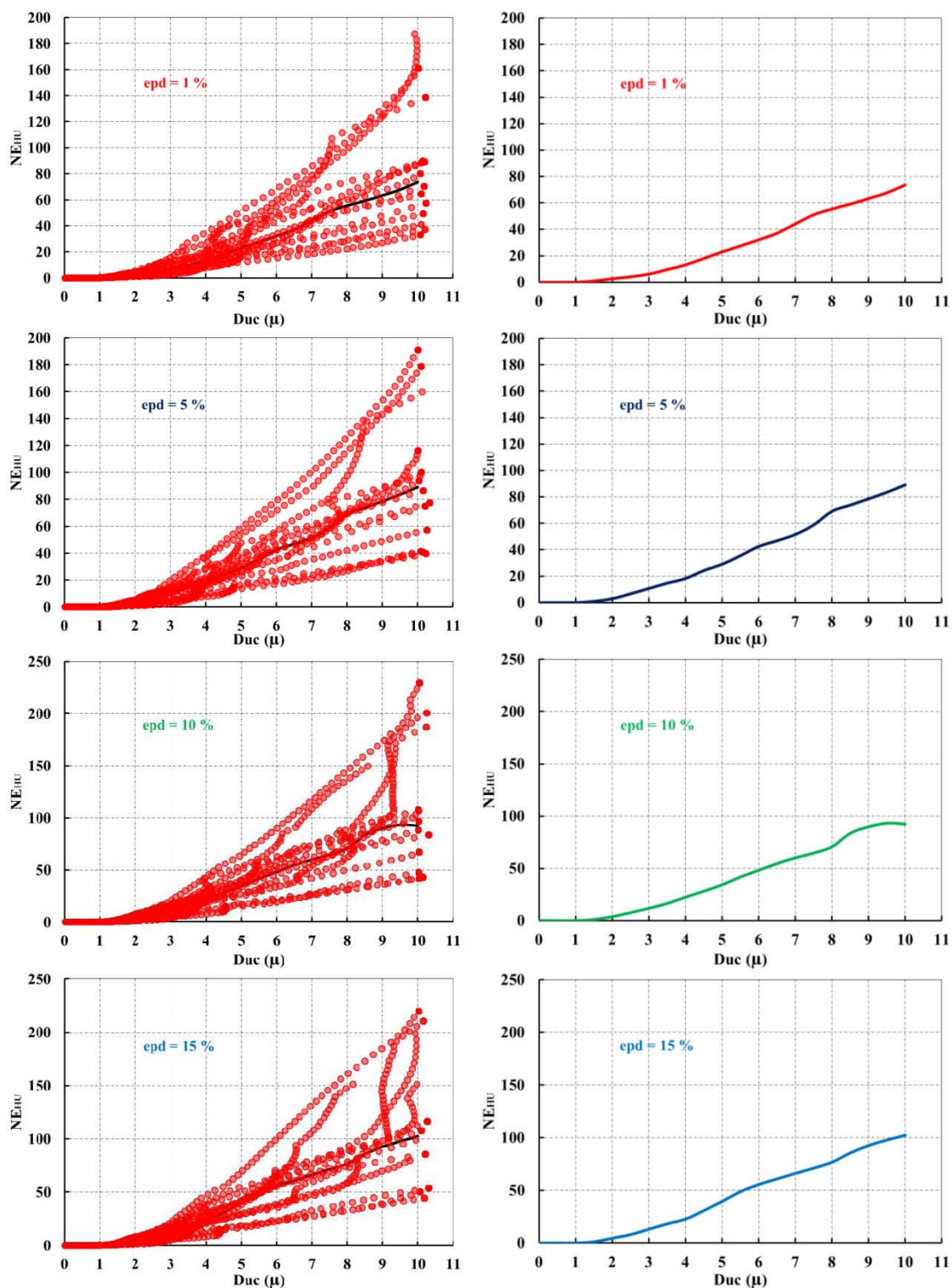


Figura C.6.1. Relación de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5%, 10 y 15% del modelo trilineal con $dy_2=3dy_1$

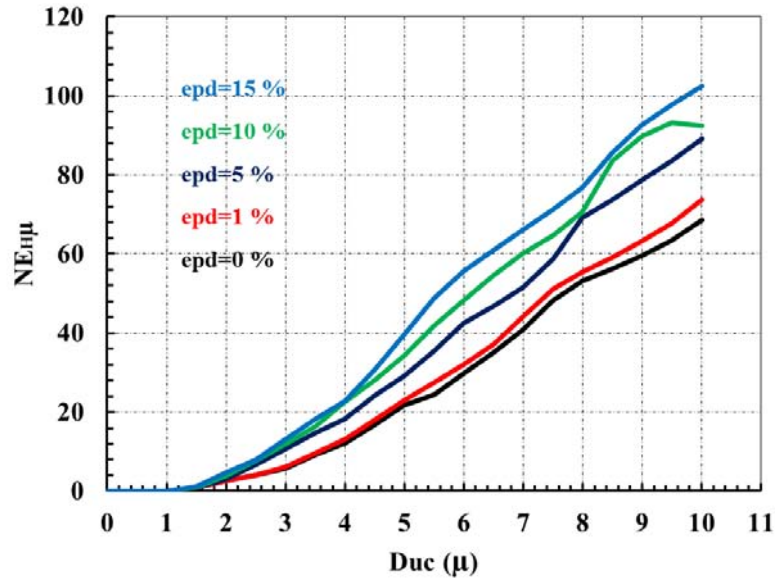
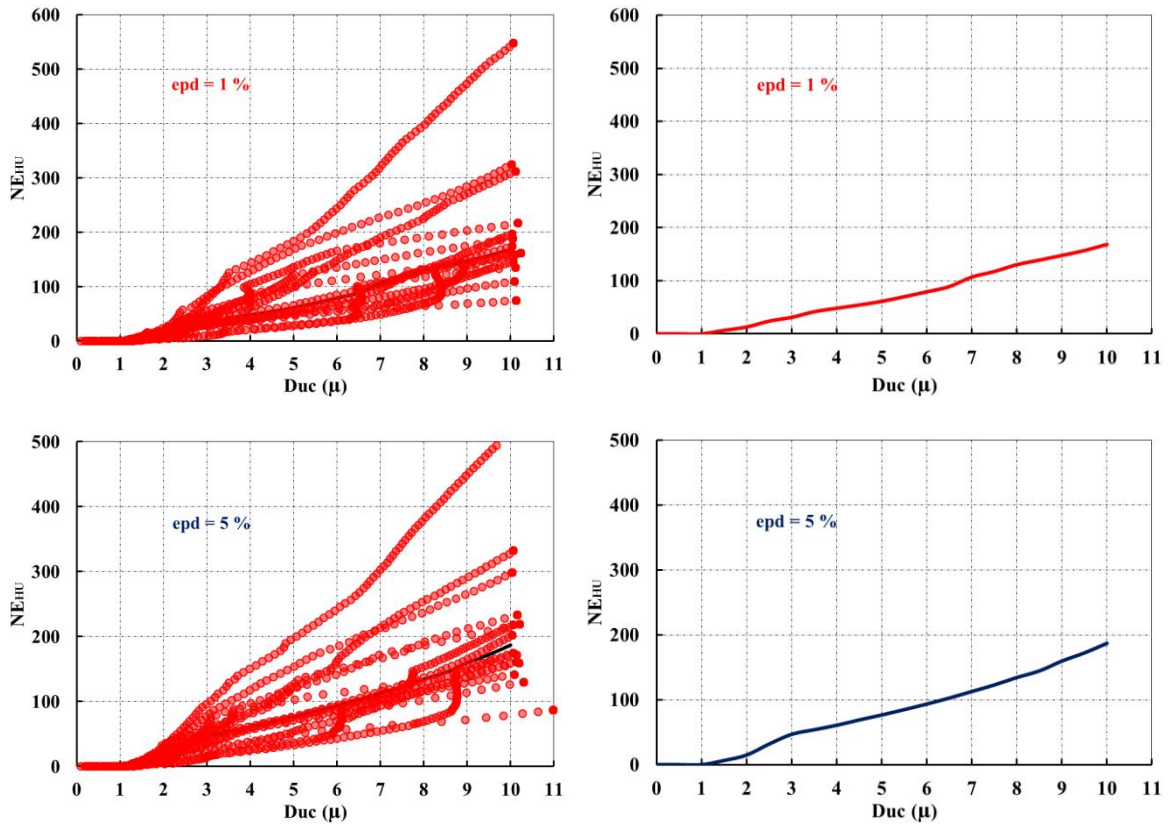


Figura C.6.2. Comparativa de medianas de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=3dy_1$.



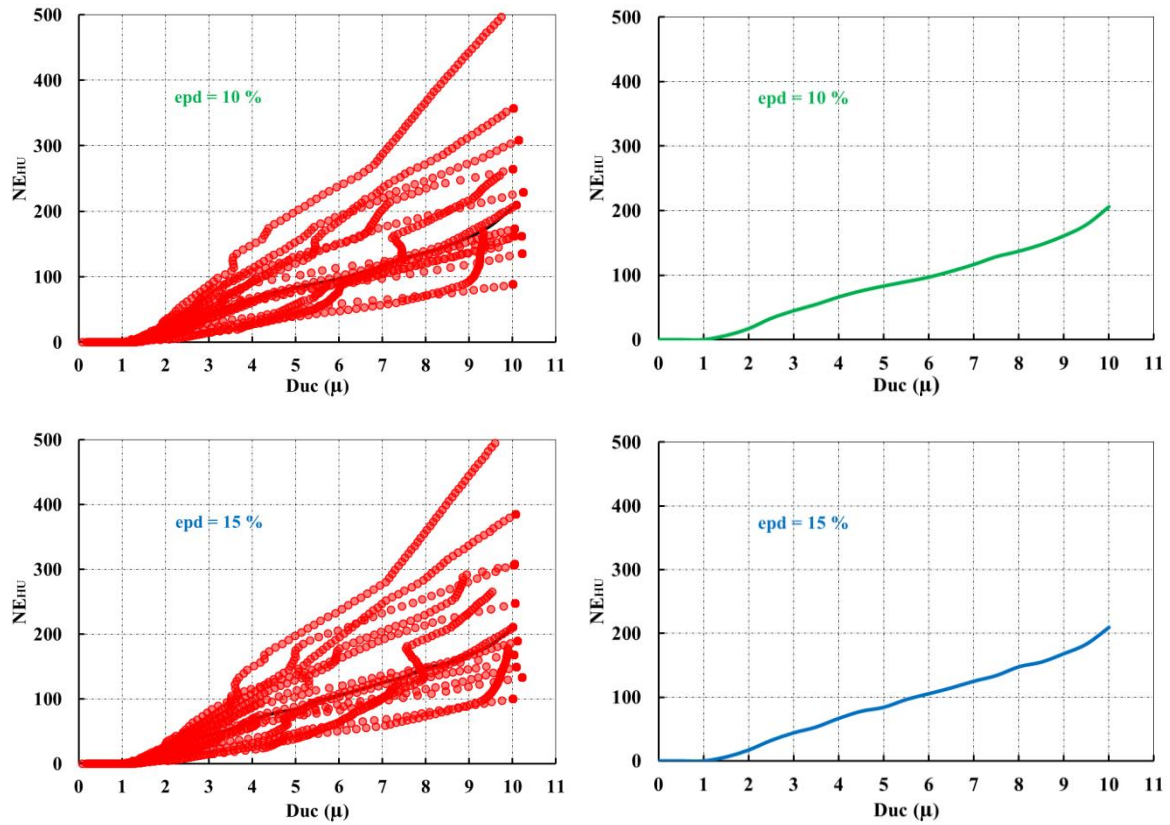


Figura C.6.3. Relación de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% , 10 y 15% del modelo trilineal con $dy_2=3dy_1$

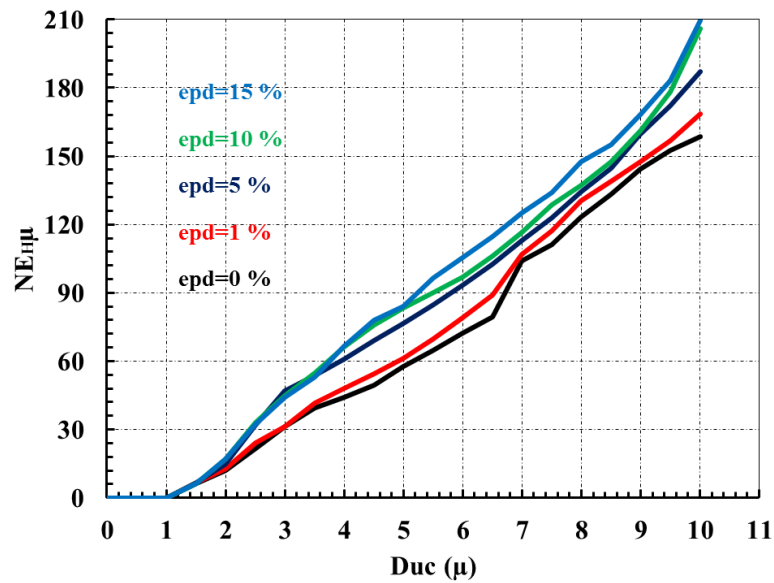


Figura C.6.4. Comparativa de medianas de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=3dy_1$.

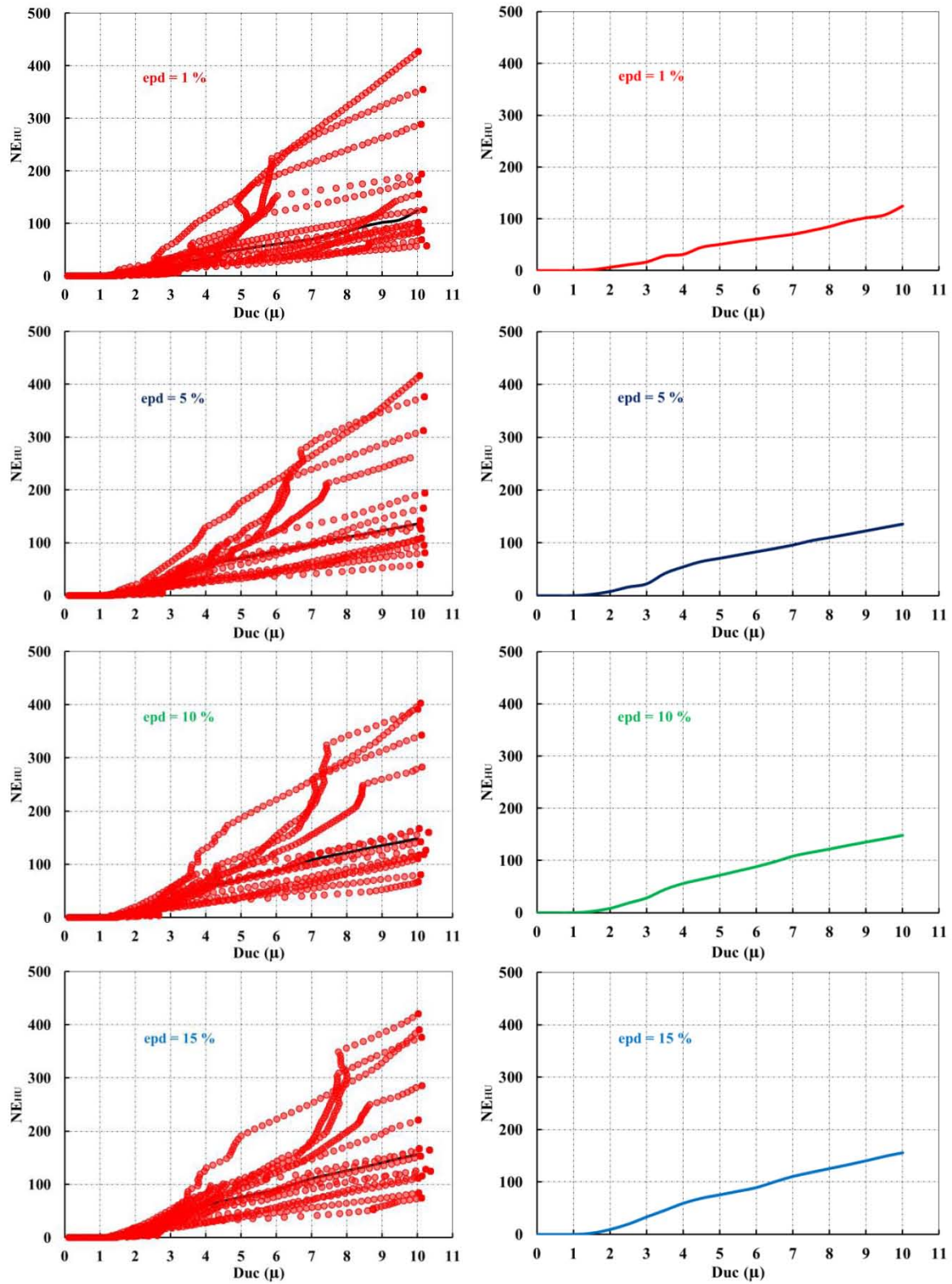


Figura C.6.5. Relación de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 3.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5%, 10 y 15% del modelo trilineal con $dy_2=3dy_1$

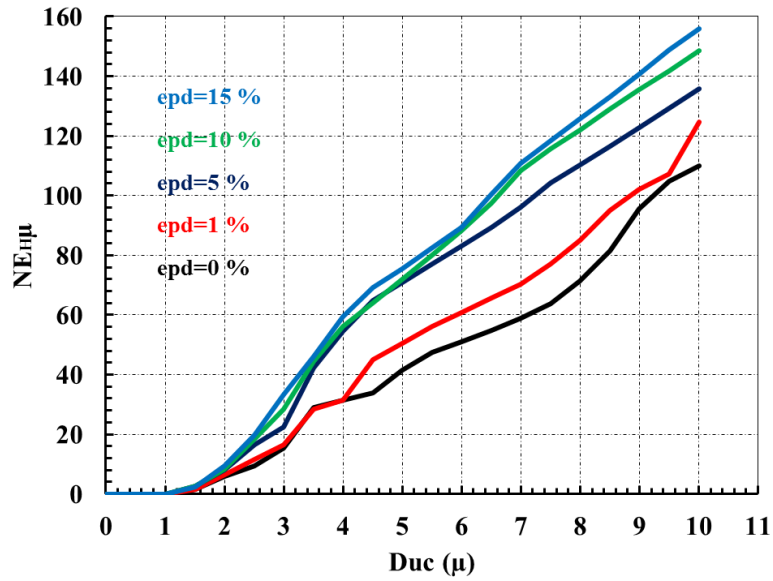
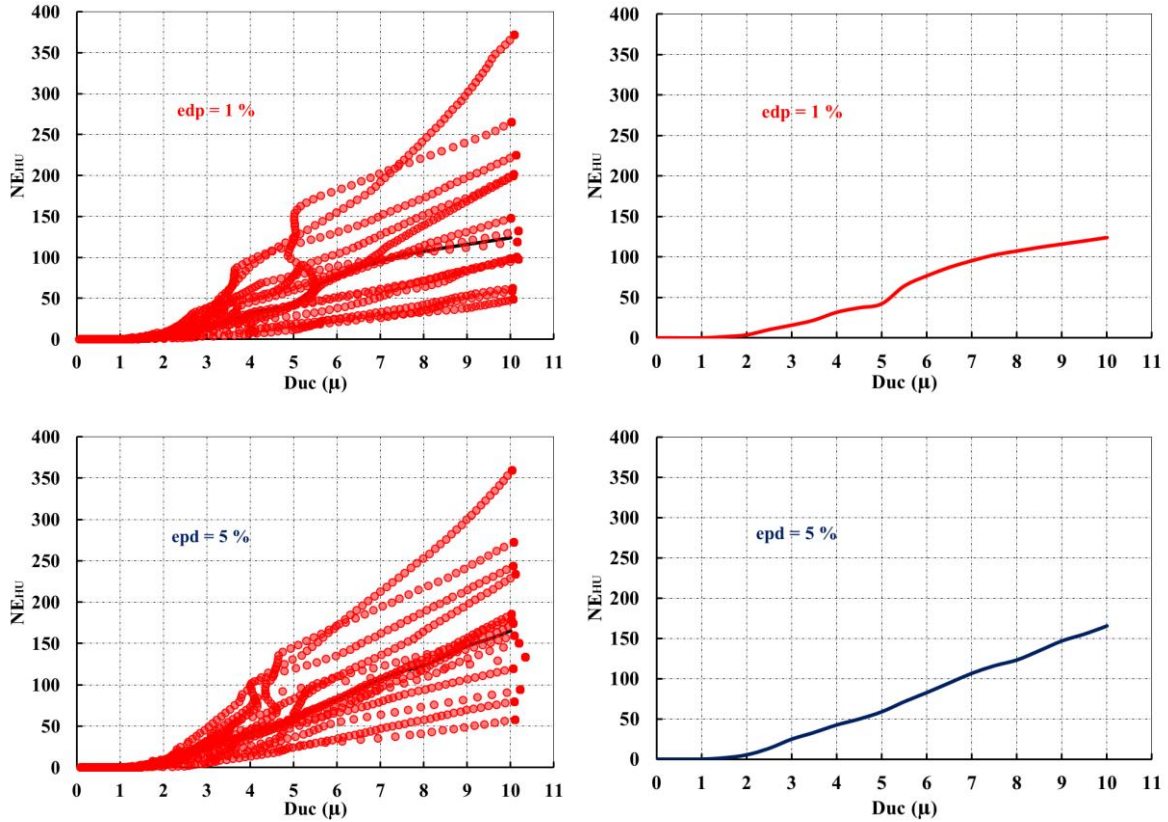


Figura C.6.6. Comparativa de medianas de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 3.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=3dy_1$.



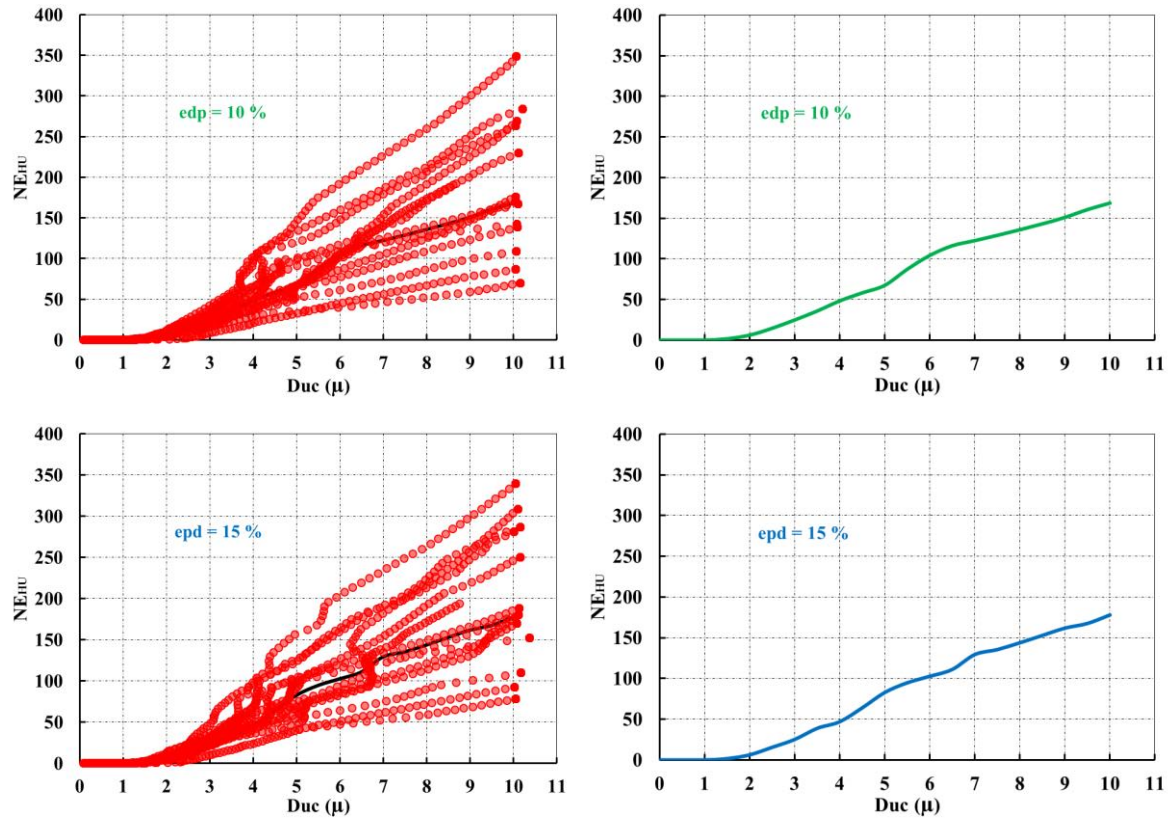


Figura C.6.7. Relación de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% , 10 y 15% del modelo trilineal con $dy_2=3dy_1$

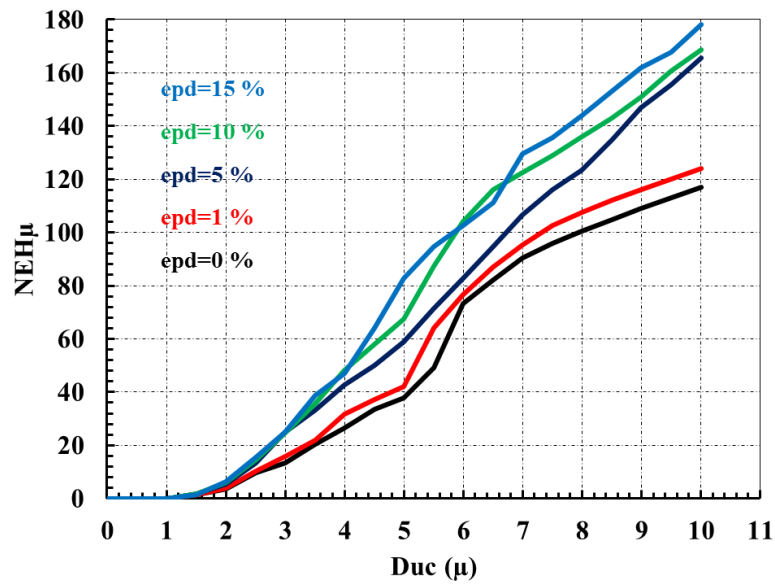


Figura C.6.8. Comparativa de medianas de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=3dy_1$.

C.7. Análisis de desplazamientos máximos y residuales del modelo trilineal con $dy_2=5dy_1$

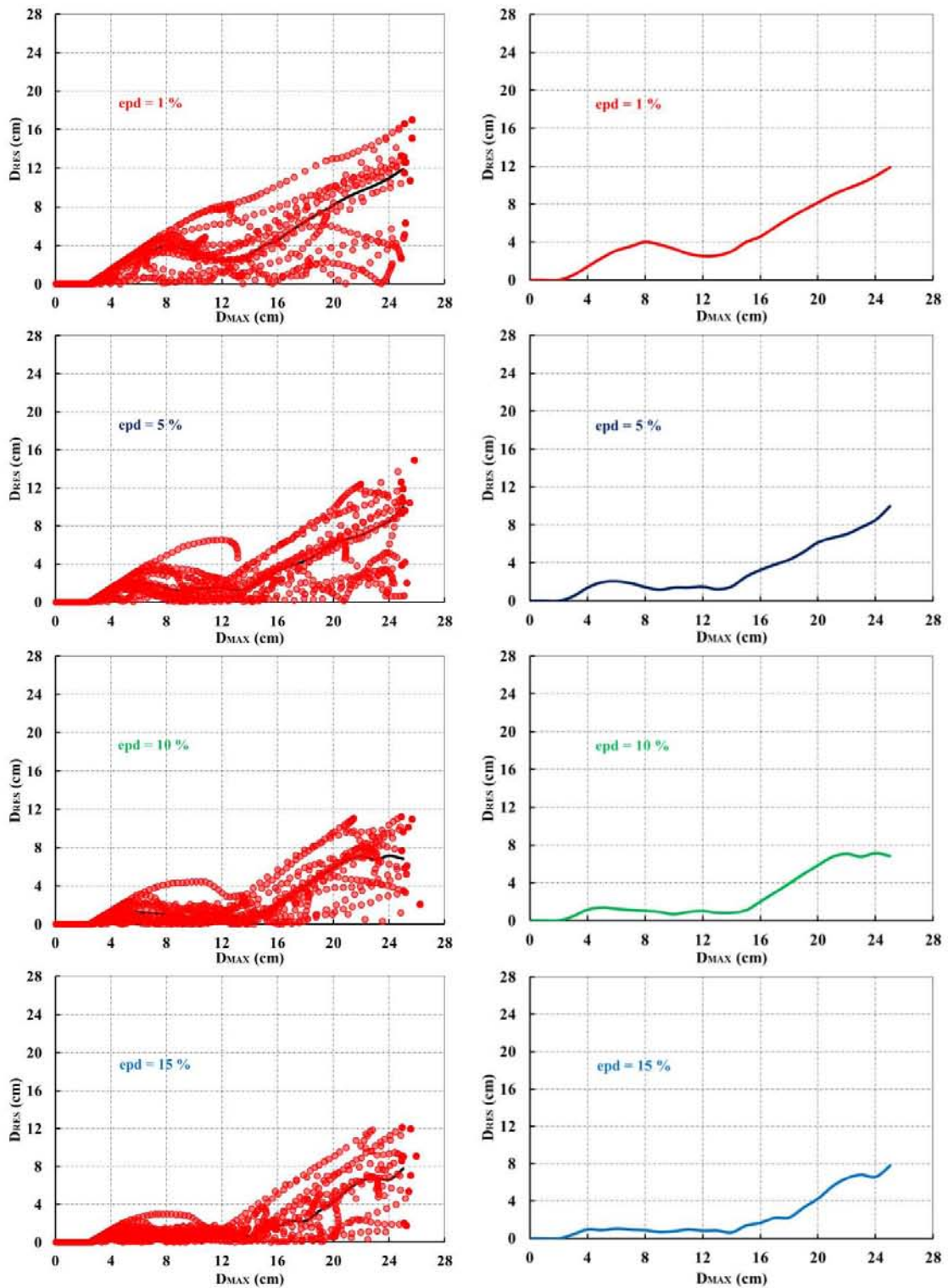


Figura C.7.1. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5%, 10% y 15% con $dy_2=5dy_1$.

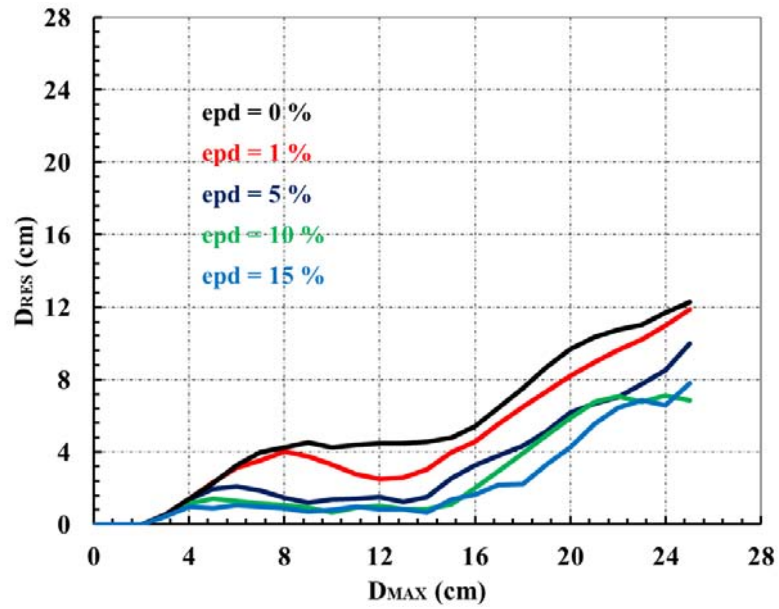
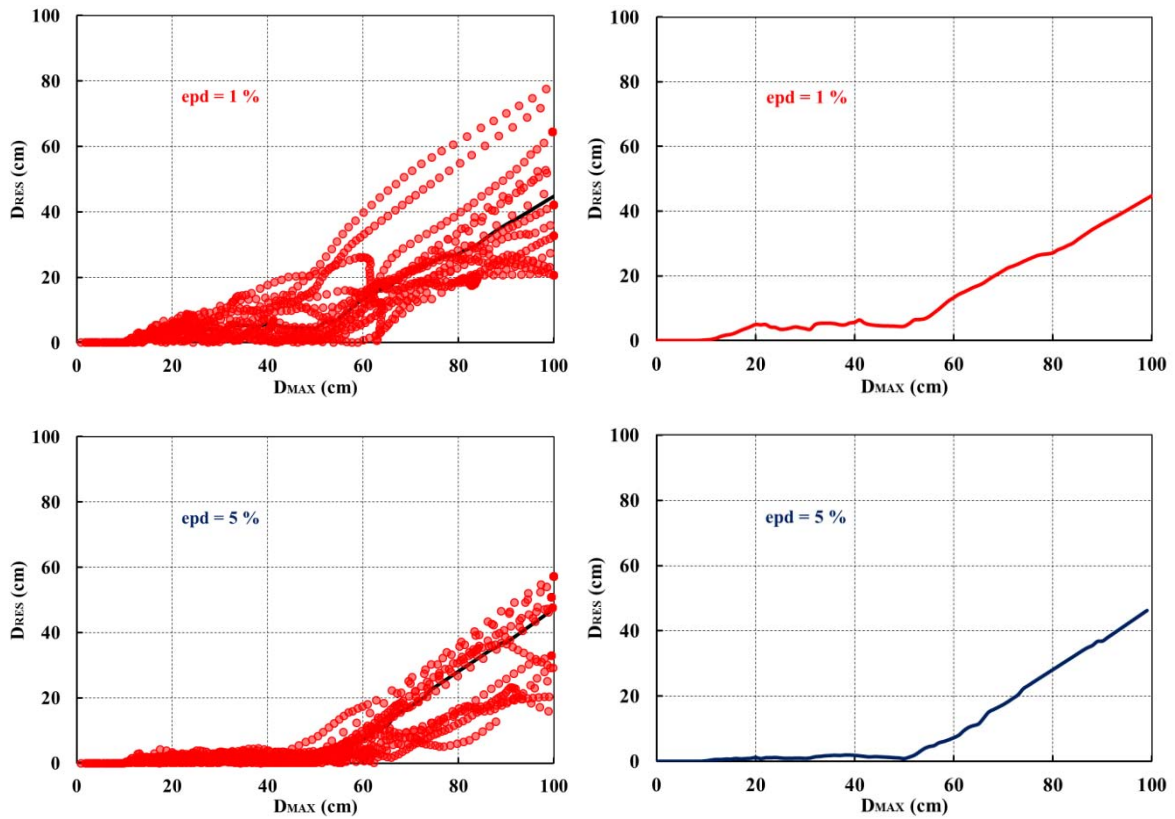


Figura C.7.2. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=5dy_1$.



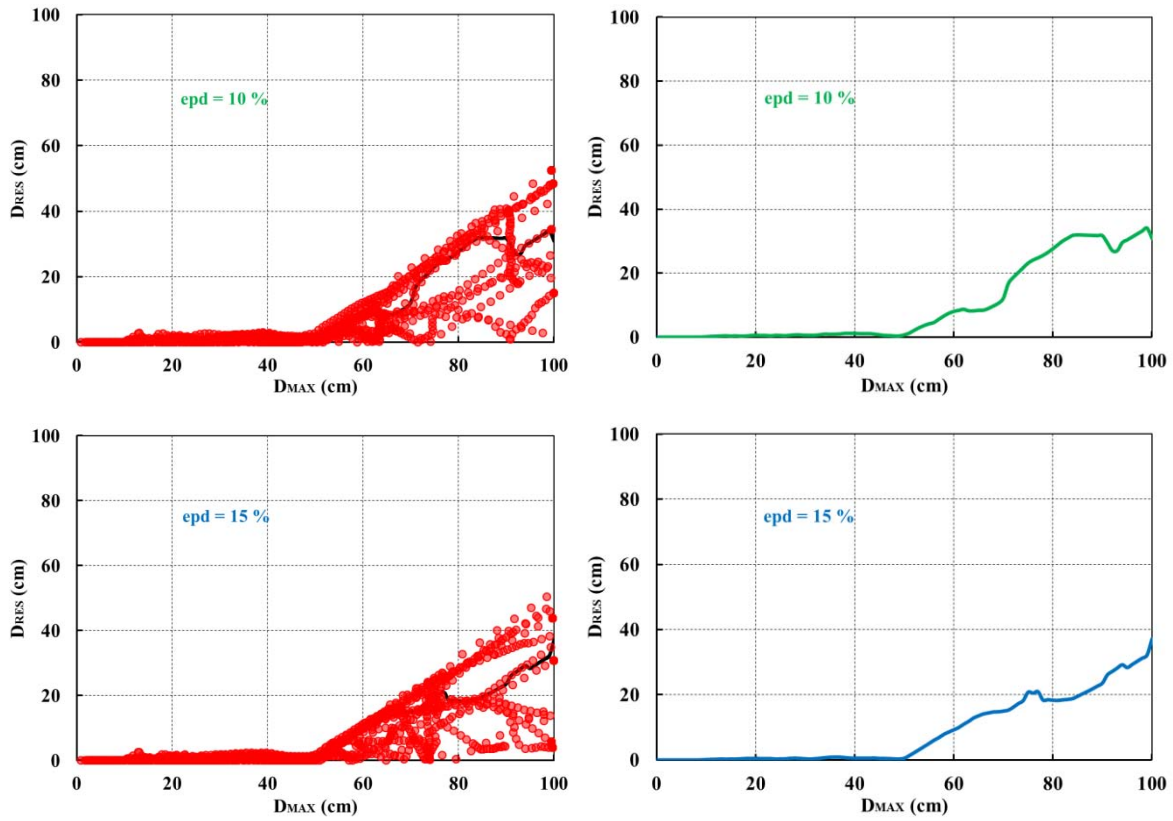


Figura C.7.3. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5%, 10% y 15% con $dy_2=5dy_1$.

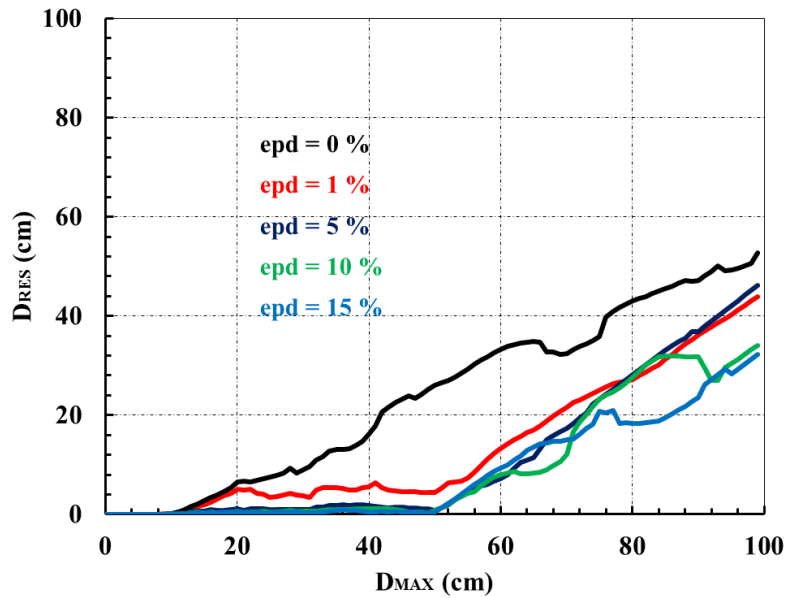


Figura C.7.4. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=5dy_1$.

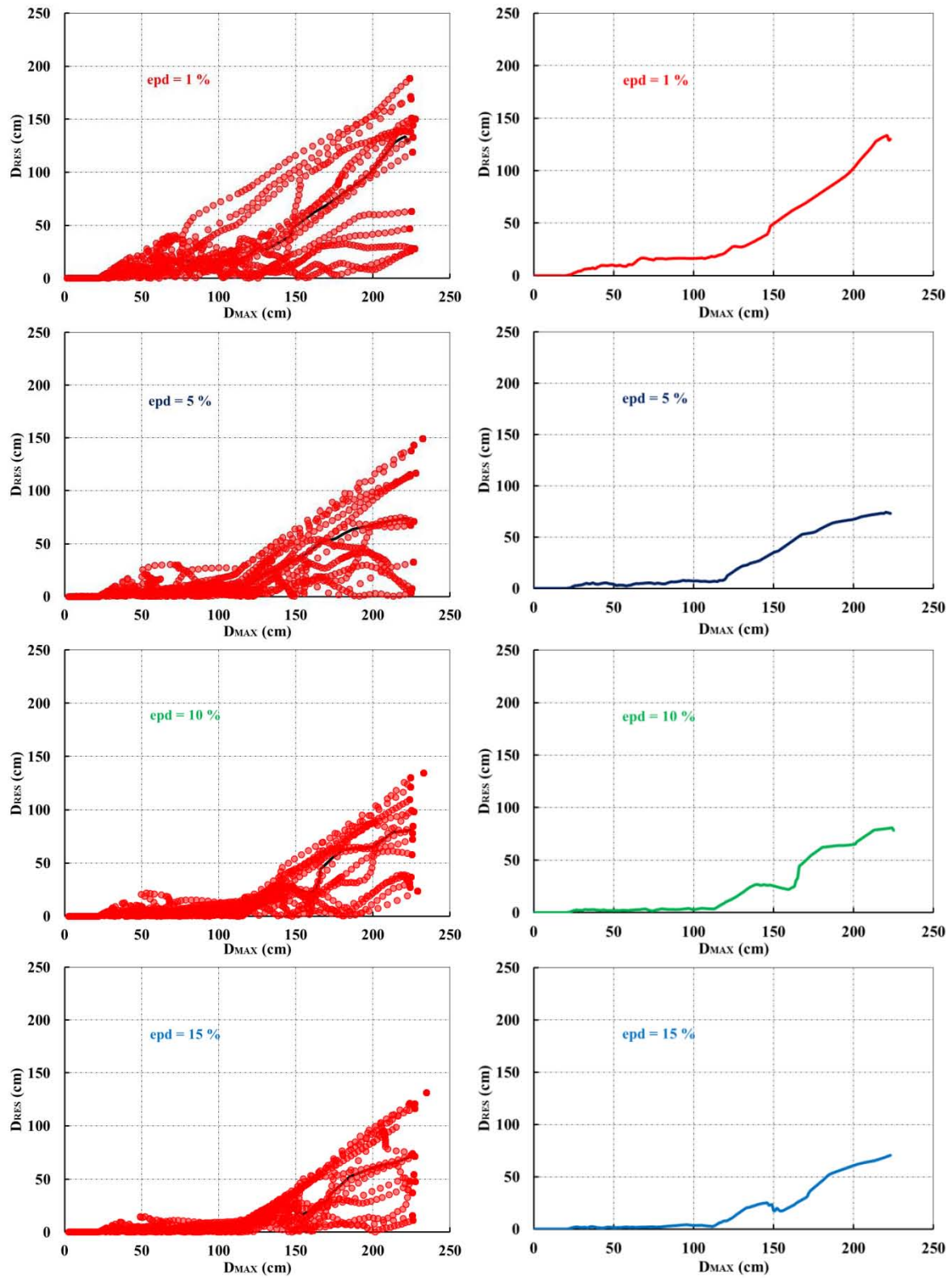


Figura C.7.5. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 3.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5%, 10% y 15% con $dy_2=5dy_1$.

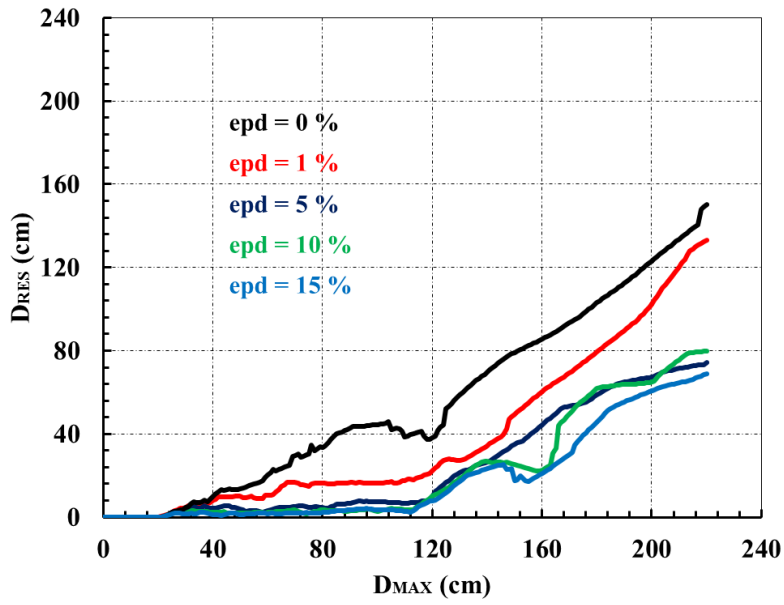
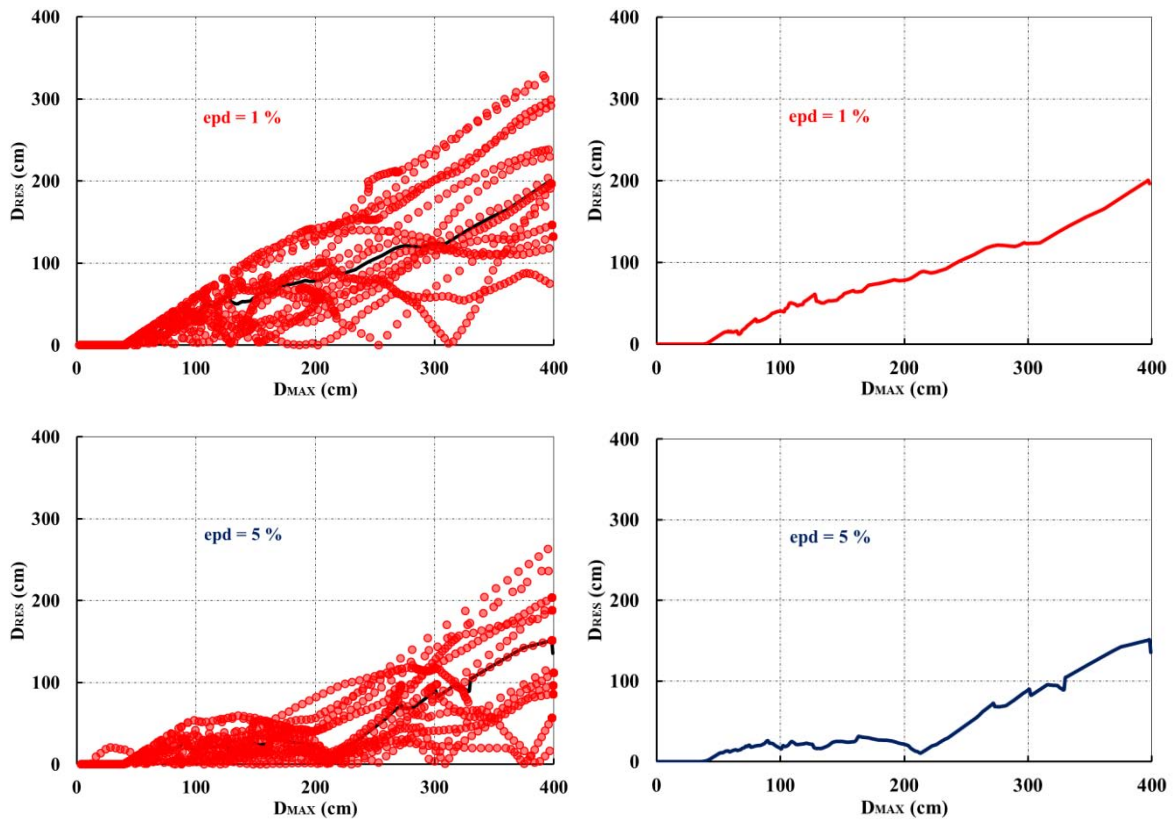


Figura C.7.6. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 3.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=5dy_1$.



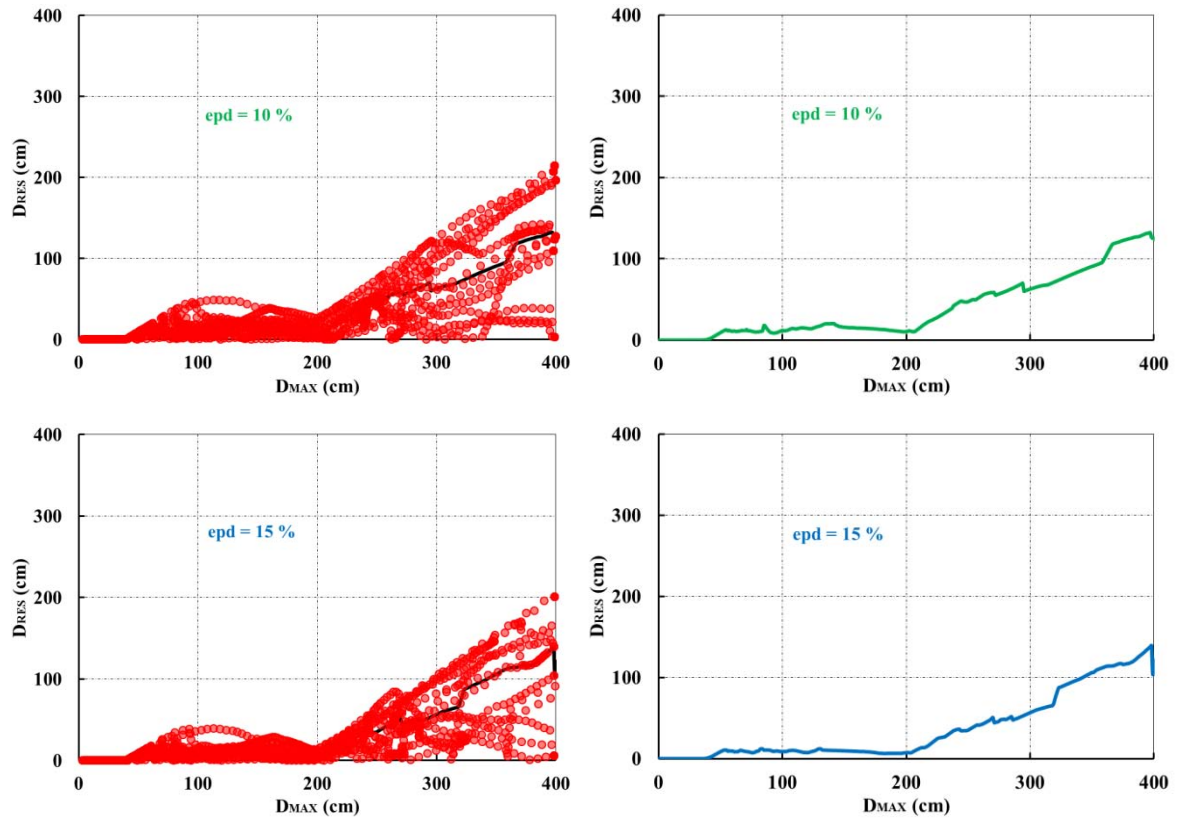


Figura C.7.7. Relación de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% , 10% y 15 % con $dy_2=5dy_1$.

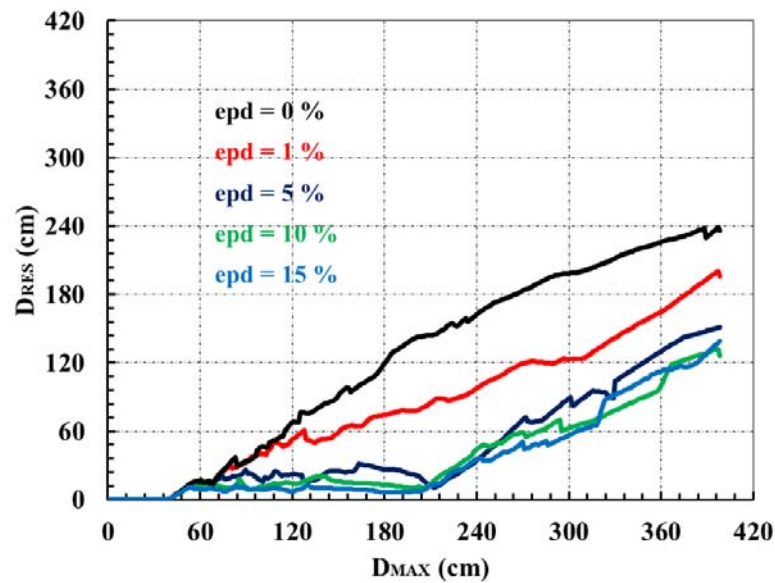


Figura C.7.8. Comparativa de medianas de D_{MAX} contra D_{RES} de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=5dy_1$.

C.8. Análisis de ductilidad y energía hysterética normalizada del modelo trilineal con $dy_2=5dy_1$

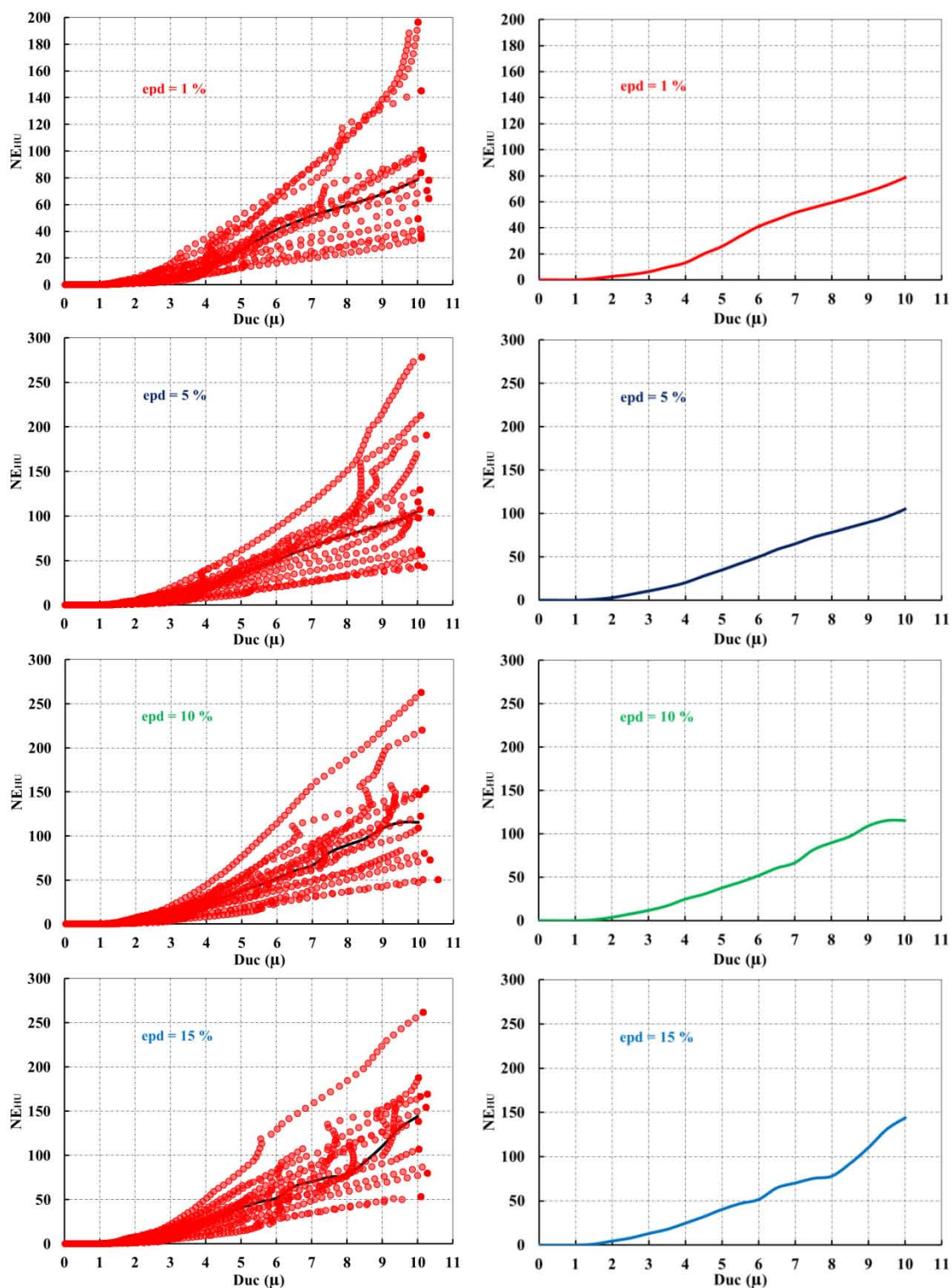


Figura C.8.1. Relación de $Duc (\mu)$ contra NE_{HuS} de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5%, 10% y 15% con $dy_2=5dy_1$.

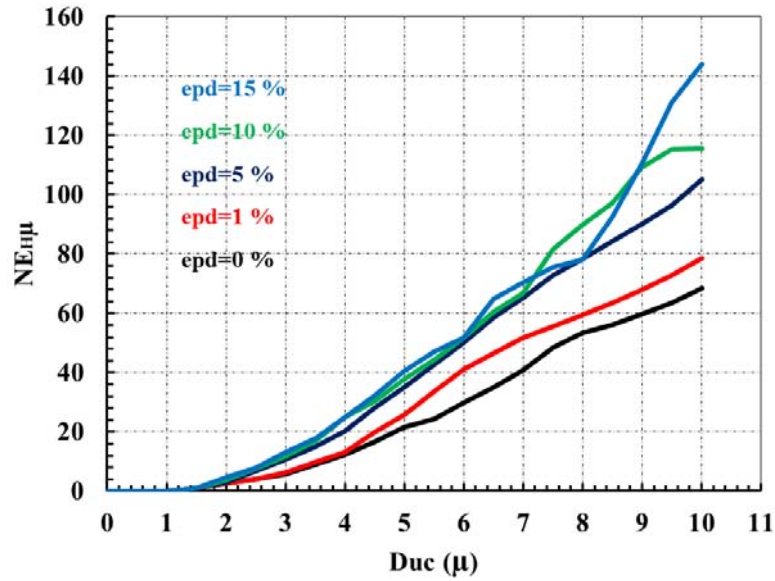
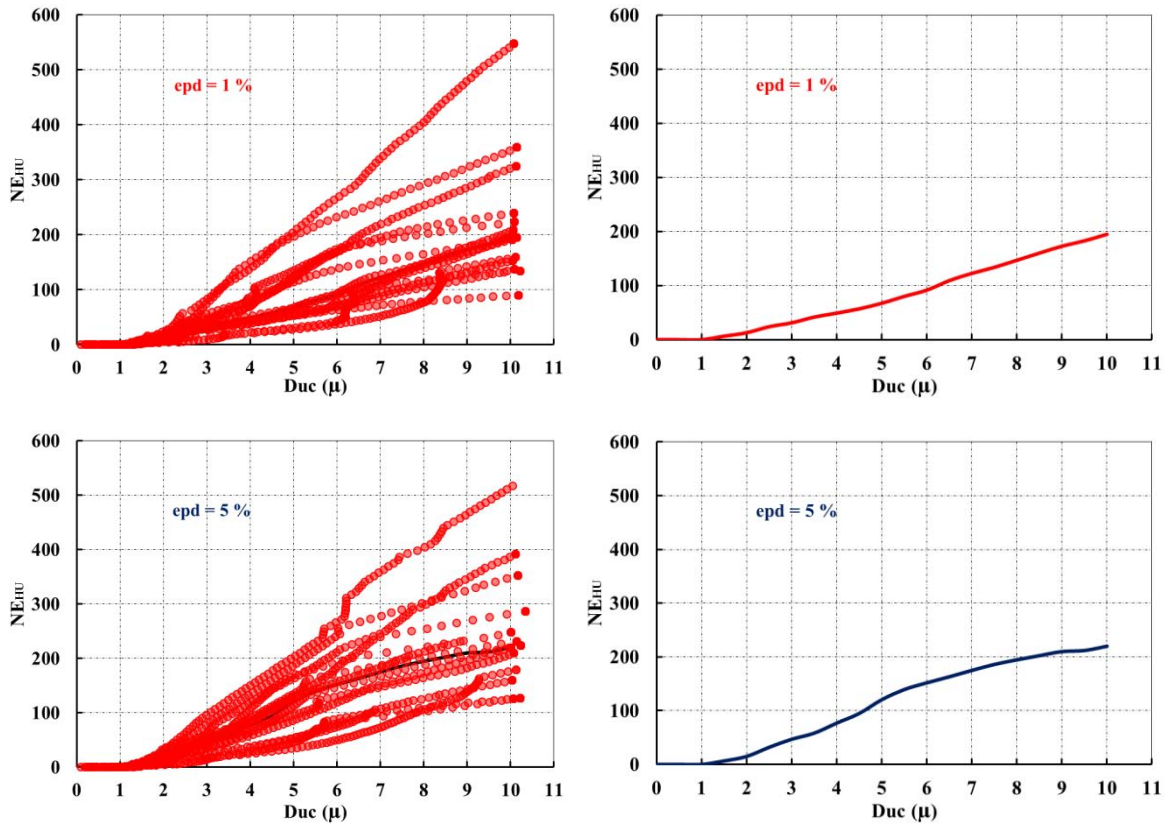


Figura C.8.2. Comparativa de medianas de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 1.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=5dy_1$.



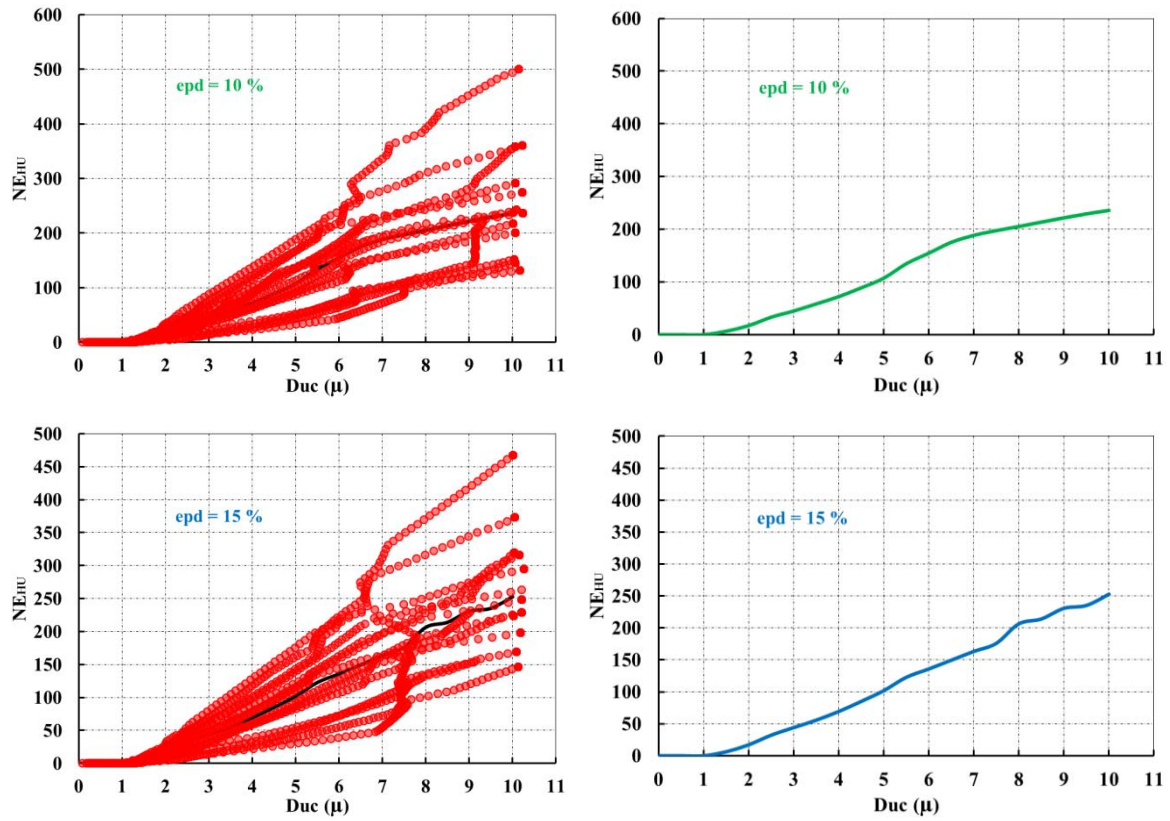


Figura C.8.3. Relación de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu S}$ de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% , 10% y 15 % con $dy_2=5dy_1$.

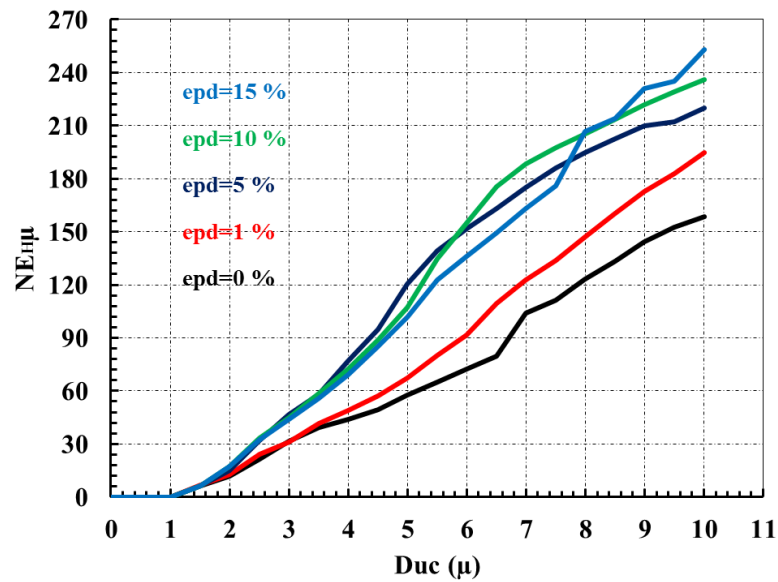


Figura C.8.4. Comparativa de medianas de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 2.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=5dy_1$.

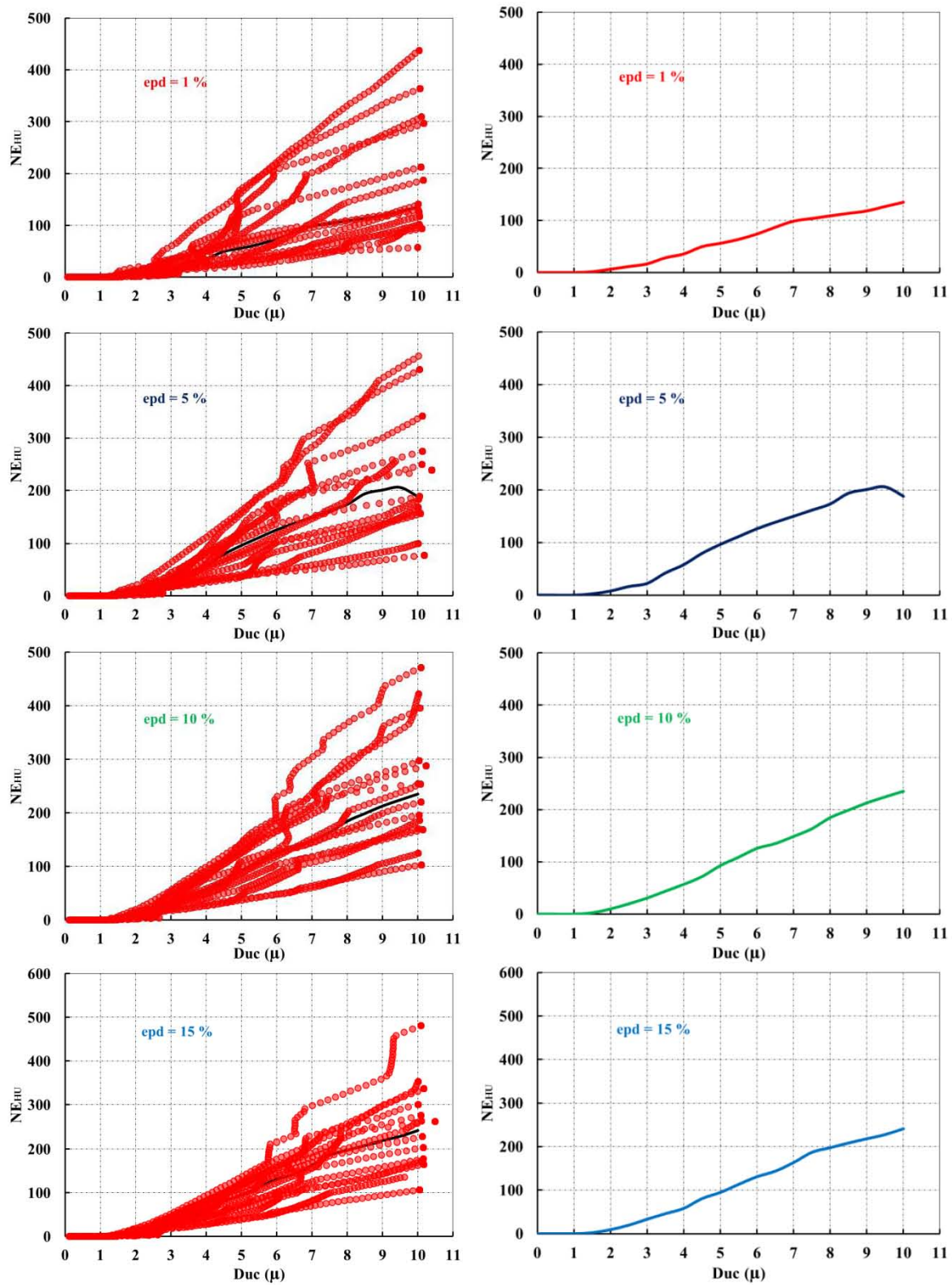


Figura C.8.5. Relación de Duc (μ) contra NE_{HUS} de sistema de 1GL de T = 3.00 s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5% , 10% y 15 % con $dy_2=5dy_1$.

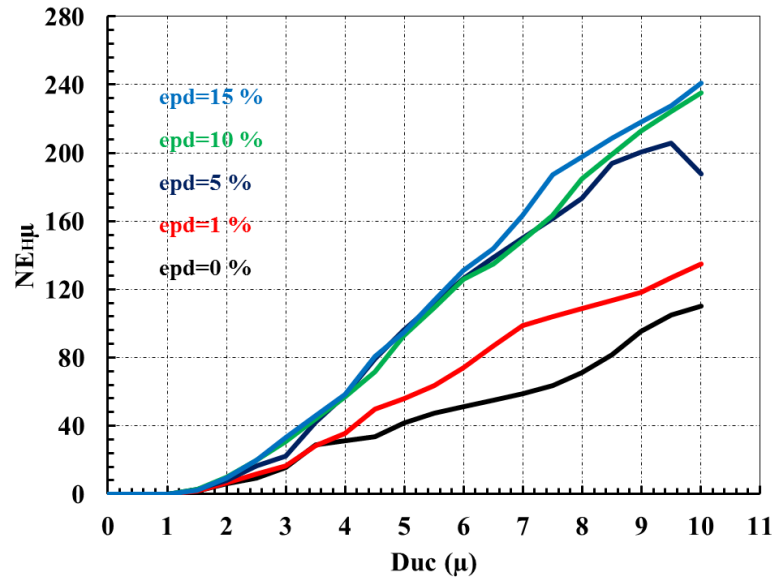
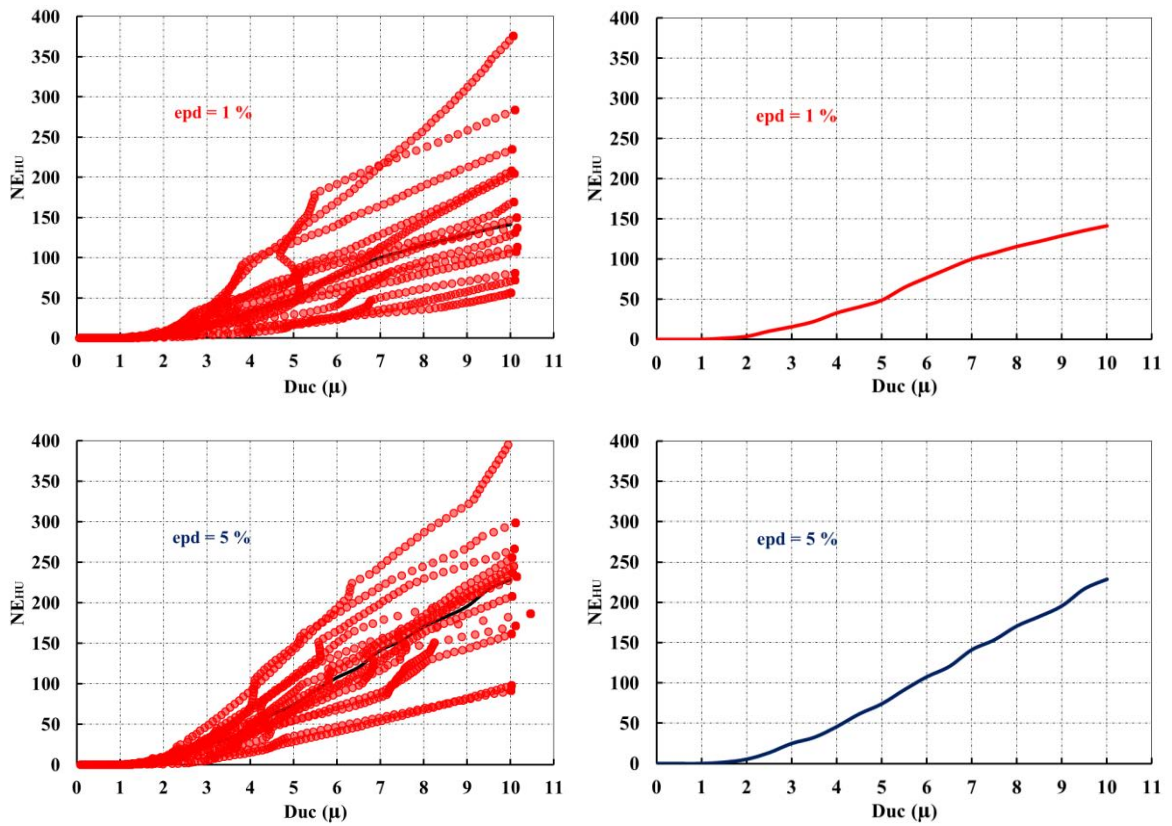


Figura C.8.6. Comparativa de medianas de Duc (μ) contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 3.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=5dy_1$.



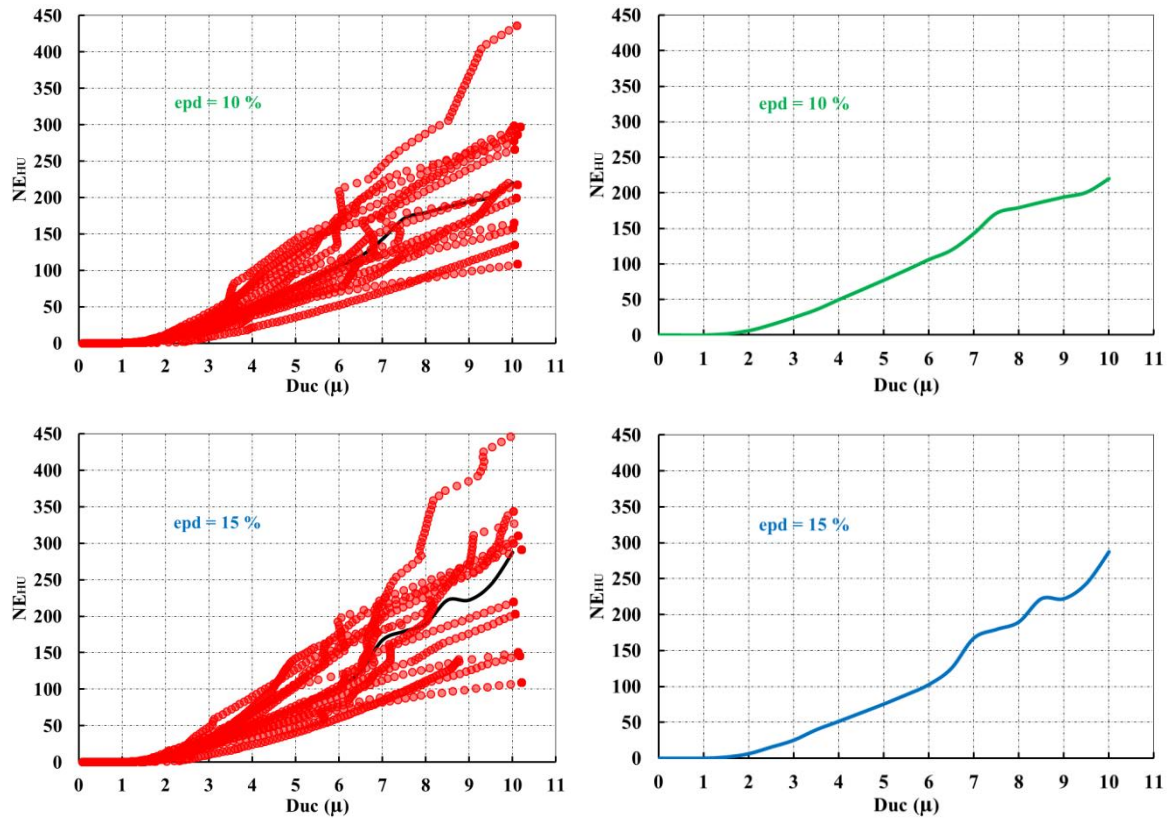


Figura C.8.5. Relación de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu S}$ de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s sometido a sismos de suelo blando con valores de epd de 1%, 5%, 10% y 15% con $dy_2=5dy_1$.

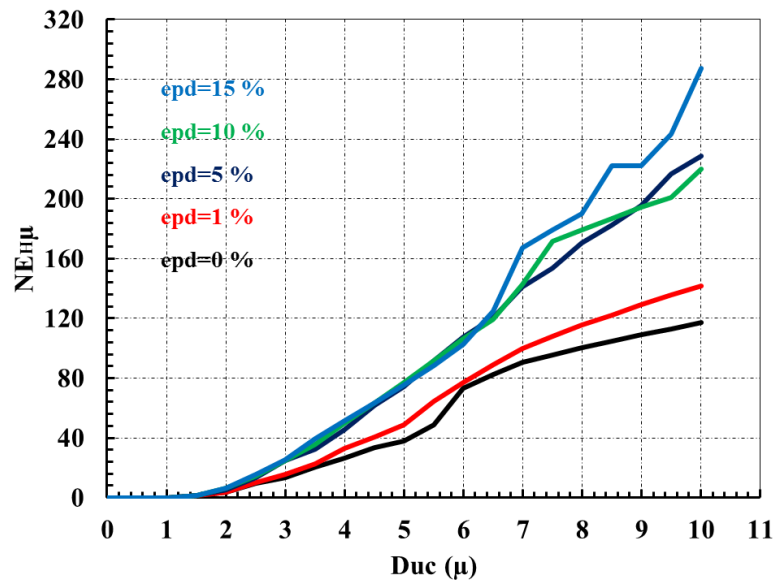


Figura C.8.8. Comparativa de medianas de $Duc (\mu)$ contra $NE_{H\mu}$ de sistema de 1GL de $T = 4.00$ s con diferentes valores de epd del modelo trilineal $dy_2=5dy_1$.