

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INGENIERIA CULIACAN
PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA**



**“DEMANDAS DE ENERGÍA EN ESTRUCTURAS SOMETIDAS A
SECUENCIAS SÍSMICAS”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

PRESENTA

JUAN AGUSTÍN SERRANO CORONA

DIRECTORES DE TESIS

DR. EDÉN BOJÓRQUEZ MORA

DR. ALFREDO REYES SALAZAR

CULIACÁN, SINALOA, MEXICO, JUNIO DEL 2023



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



AGRADECIMIENTOS

A mi **director de tesis**, el **Dr. Edén Bojórquez Mora** por sus conocimientos brindados y por su guía en este proceso, su amistad todos estos años ha permitido que este camino sea más fácil.

Al **Dr. Eduardo Rene Fernández González**, quien sea convertido en más que un tutor un gran amigo, su buen consejo me ha permitido entender mejor este sendero de la ciencia.

A mi **Co-director de tesis**, el **Dr. Alfredo Reyes Salazar**, gracias por todo su apoyo y orientación brindada.

A la **UAS y Facultad de Ingeniería Culiacán** por brindarme a través de sus programas de estudio la formación académica, cultural y de valores éticos. Ahora también me abre las puertas para ser parte de su equipo docente; siempre estaré agradecido con el alma mater. “Sursum versus”.

A la **UAS-DGIP** por el apoyo económico otorgado en la recta final a través del programa **PROFAPI-2022** para la conclusión de mis estudios.

Al **CONACyT** por su programa de becas nacionales y por el apoyo económico del proyecto **CF-2023-G-1636**.

A mis **sinodales**, **Dr. Juan Bojórquez Mora**, **Dr. Héctor Enrique Rodríguez Lozoya**, **Dra. Juana Luz Rivera Salas** y **Dr. Manuel Antonio Barraza Guerrero**, por la revisión de la tesis que sirvió para enriquecer su contenido y sus aportes en el conocimiento.

A mis **tíos, tías, primos y familia en general**, gracias por estar siempre ahí cuando más se necesitan, cuentan conmigo siempre.

A los **profesores**, **Dr. Robespierre Chávez**, **Dr. Federico Valenzuela**, **Dr. Mario Llanes**, **Dr. Victor Baca**, **Dr. Herian Leyva**, **MC. Ignacio Torres**, **MC. Joel Carvajal**, **MC. Francisco Acosta**, **MC. Ricardo Torres**, entre otros, por sus aportes académicos, y consejos. Además de grandes investigadores, son unos grandes seres humanos.

DEDICATORIA

A **DIOS**: por ser el autor principal en mi vida, quien hasta al momento me ha ayudado [1 Samuel 7:12] y me ha concedido la dicha del conocimiento a través del tiempo [Proverbios 2:6].

A **mis padres Juan y Laura**, que desde el día 1 me han brindado su amor y apoyo incondicional que todo hijo desea tener. No hay párrafos que alcancen para describir todo lo que han hecho por mí, “LOS AMO”.

A **mi Esposa Liliana**, que ha sido de gran sostén a mi vida. Gracias por estar a mi lado en todo tiempo. Esto no fuera posible sin tu apoyo.

A **mis dos Hijos: Juan Abdiel y María Laura**, son un regalo de Dios a mi vida. Siempre serán mi mayor motivación en la vida.

A **mis dos hermanas: Verónica y Daniela**, mis hermanas mayores, tanto en la edad como en el alma. Siempre fueron un modelo de vida [2 Corintios 3:2-3].

RESUMEN

En el presente estudio se propone una expresión para estimar la relación de la energía histerética y energía entrada inelástica ($E_H/E_{I\mu}$) para sistemas de un grado de libertad considerando el efecto de las réplicas y tomando en cuentas las características estructurales, tales como: ductilidad, modelo histerético y coeficiente de amortiguamiento, etc. Para obtener dicha expresión se hicieron los análisis dinámicos de varios sistemas de un grado de libertad (S1GL) sometidos a secuencias sísmicas artificiales formadas a partir de registros reales de la ciudad de México desplantados en suelo blando. Subsecuentemente se obtienen los espectros de respuesta para las variables energía entrada elástica (E_I), $E_{I\mu}$, E_H y $E_H/E_{I\mu}$ con periodos que van desde 0 a 5 segundos. Los resultados de los espectros de respuesta de la razón $E_H/E_{I\mu}$ muestran que los parámetros de ductilidad y coeficiente de amortiguamiento presentan gran influencia sobre la respuesta de $E_H/E_{I\mu}$; sin embargo, los modelos histeréticos y el efecto de las réplicas mostraron muy poca influencia tanto en la forma como en la respuesta espectral en términos de la razón de energía. No sucede lo mismo en los espectros de las variables E_I , $E_{I\mu}$ y E_H , donde las intensidades de réplica si reflejaron un aumento importante en la respuesta de las demandas de energía sísmica. Con los resultados numéricos se propone una expresión par calcular la razón de energía $E_H/E_{I\mu}$ de sistemas inelásticos sometidos a secuencias sísmicas. Es importante mencionar que los espectros con la formulación propuesta son bastante similares a los calculados mediante los registros reales. Con la nueva expresión propuesta y con la ayuda de un espectro de energía de entrada será posible obtener las demandas de energía histerética (parámetro relacionado con el daño estructural) hacia diseño sismorresistente de estructuras basado en energía que considere de manera explícita el efecto de las secuencias sísmicas. Finalmente, se amplía el estudio para sistemas de varios grados de libertad mediante el análisis de un edificio de concreto reforzado (C/R) donde se concluye que las réplicas no tienen influyen significativa en la relación de energía $E_H/E_{I\mu}$, por lo que dicho parámetro puede ser de gran ayuda para el diseño de estructuras basado en energía que considere el efecto de réplica.

Palabras clave: Secuencias Sísmicas, Réplicas, Energía de entrada, Energía Histerética y Estructuras no lineales.

OBJETIVOS

Objetivo General

Proponer una expresión para determinar la razón de Energía Histerética y Energía Entrada Inelástica ($E_H/E_{I\mu}$) para S1GL que considere el efecto de las réplicas.

Objetivos Específicos

- i. Selección de modelos estructurales para los análisis no lineales de los S1GL.
- ii. Formación de secuencias sísmicas artificiales formadas de registros reales de la ciudad de México desplantados en suelo blando.
- iii. Determinar las demandas de energía de entrada elástica, energía de entrada inelástica y energía histerética en osciladores no lineales de un grado de libertad de las secuencias sísmicas artificiales formadas.
- iv. Calcular los espectros de E_I para diferentes niveles de intensidad de las réplicas.
- v. Calcular los espectros de la razón $E_H/E_{I\mu}$.
- vi. Proponer una expresión simplificada para calcular la relación de la energía histerética y la energía de entrada inelástica.
- vii. Calcular espectros con la nueva expresión con parámetros similares a los utilizados con los registros reales.
- viii. Comparar los espectros utilizados con la expresión propuesta contra los espectros utilizados con los registros reales.
- ix. Calcular error cuadrático medio (ECM) de los espectros de la expresión obtenida contra los espectros calculados por los registros de las secuencias sísmicas artificiales.
- x. Modelación de un edificio de concreto reforzado de 10 niveles.

- xi. Análisis sísmico del edificio de concreto reforzado para determinar las demandas de energía a través del conocimiento del espectro de la relación $E_H/E_{I\mu}$.
- xii. Determinar las demandas de energía de entrada, energía de entrada inelástica y energía histerética del edificio de C/R.
- xiii. Determinar los espectros $E_H/E_{I\mu}$ para el edificio de C/R.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
DEDICATORIA	4
RESUMEN	5
OBJETIVOS	6
Objetivo General	6
Objetivos Específicos.....	6
ÍNDICE	8
LISTA DE TABLAS.....	9
LISTA DE FIGURAS	10
ABREVIATURAS.....	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. MARCO TEORICO	16
2.1. SECUENCIAS SÍSMICAS	16
2.2 CONCEPTOS DE ENERGÍA SÍSMICA	21
2.3 RELACIONES E_H/E_I PROPUESTAS	28
3. METODOLOGÍA.....	32
3.1 SELECCIÓN DE MODELOS ESTRUCTURALES.....	32
3.2 SECUENCIAS SÍSMICAS UTILIZADAS.....	34
4. RESULTADOS NUMÉRICOS PARA SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD.....	40
4.1 ENERGÍA DE ENTRADA ELASTICA (E_I).....	41
4.2 ENERGÍA DE ENTRADA INELASTICA ($E_{I\mu}$).....	45
4.3 ENERGÍA HISTERÉTICA (E_H).....	51
4.4 RELACIÓN DE $E_H/E_{I\mu}$	55
4.5 EXPRESIÓN PROPUESTA	61
4.6 DEMANDAS DE ENERGÍA EN EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO DE SVGL	66
5. CONCLUSIONES	71
REFERENCIAS	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Sismos severos y sus réplicas en las últimas décadas.	20
Tabla 2.2. Expresiones propuestas de E_H/E_I (revisión de la literatura).	30
Tabla 3.1. Características de las secuencias de la estación CDAF (19-20/Septiembre/1985)	34
Tabla 3.2. Características de los registros utilizados para la generación de las secuencias artificiales	36
Tabla 4.1. Valores de las constantes θ_1 a θ_6 para el modelo elástoplastico, con una magnitud de réplica de $\gamma=1.0$ y un coeficiente de amortiguamiento de $\zeta=5\%$	62
Table 4.2. Error cuadrático medio de la ecuación propuesta para el modelo histerético elastoplástico.	65
Tabla 4.3. Características del edificio de 10 niveles.	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Movimiento sísmico: a) evento principal, b) evento principal con réplica.	18
Figura 2.2. Sistema de un grado de libertad.....	22
Figure 3.1: Modelo histérico y respuestas cíclicas de los cuatro sistemas analizados, los modelos no lineales corresponden a: a) elastoplástico, b) bilineal con 3% de rigidez postfluencia y c) bilineal con 5% de rigidez postfluencia.....	32
Figura 3.2. Combinación utilizadas para generar la secuencias sísmicas artificiales.	37
Figura 3.3 Secuencia sísmica EP1R2 para los diferentes porcentajes de escalamiento.....	38
Figura 4.1. Espectros de E_I promedio de las 28 secuencias sísmicas utilizadas, para diferente magnitud de réplica; $\gamma= 1.0$, $\gamma= 0.7$ y $\gamma=0.35$ y diferentes coeficientes de amortiguamiento, a) $\zeta=2\%$, b) $\zeta=5\%$ y c) $\zeta=10\%$	42
Figura 4.2. Espectro de E_I promedio de los 28 registros utilizados, para diferente amortiguamiento; $\zeta=2\%$ $\zeta=5\%$, y $\zeta=10\%$. Con una magnitud de réplica de $\gamma= 1.0$	43
Figura 4.3. Espectros de E_I máximo, mínimo y promedio para diferentes magnitudes de réplicas (a) $\gamma=0.35$ (b) $\gamma= 0.7$ y (c) $\gamma= 1.0$; calculado a partir de los veintiocho espectros E_I con un coeficiente de amortiguamiento $\zeta=5\%$	44
Figura 4.4. Espectro de E_I con magnitud de réplica de $\gamma= 1.0$ y $\zeta=5\%$ [figura color azul] y Espectro de $E_{I\mu}$ con una magnitud de réplica de $\gamma= 1.0$, para un $Q=2$, modelo elástoplastico, y un coeficiente de amortiguamiento del $\zeta=5\%$ [figura color negro].....	46
Figura 4.5. Espectros de $E_{I\mu}$ promedio de los 28 registros utilizados, para un $Q=2$, modelo elástoplastico, diferente magnitud de réplica $\gamma= 1.0$, $\gamma= 0.7$ y $\gamma=0.35$ y diferentes coeficientes de amortiguamiento del a) $\zeta=2\%$, b) $\zeta=5\%$ y c) $\zeta=10\%$	46
Figura 4.6. Espectros de $E_{I\mu}$ promedio de los 28 registros utilizados, para un $\gamma= 1.0$, modelo elástoplastico, diferentes factores de ductilidad $\mu=2$, $\mu=4$ y $\mu=6$. diferentes coeficientes de amortiguamiento del a) $\zeta=2\%$, b) $\zeta=5\%$ y c) $\zeta=10\%$	47
Figura 4.7. Espectro de $E_{I\mu}$ promedio para la misma magnitud de réplica; $\gamma= 1.0$, ductilidad de $Q=2$, Modelos histéricos: Elástoplastico, Bilineal 3% y bilineal 5%. diferentes coeficientes de amortiguamiento del a) $\zeta=2\%$, b) $\zeta=5\%$ y c) $\zeta=10\%$	48
Figura 4.8. Espectro de $E_{I\mu}$ promedio de los 28 registros utilizados, para la misma magnitud de réplica; $\gamma= 1.0$, ductilidad de $Q=2$, Modelo histérico: Elastoplastico. Amortiguamiento del $\zeta=2\%$, 5%, 10%.....	49
Figura 4.9. Espectros máximo, mínimo y promedio de $E_{I\mu}$ para diferentes magnitudes de réplicas (a) $\gamma=0.35$ (b) $\gamma= 0.7$ y (c) $\gamma= 1.0$; calculado a partir de los veintiocho espectros $E_{I\mu}$ con valores de ductilidad $\mu=4$, modelo elastoplástico y coeficiente de amortiguamiento $\zeta=5\%$	50
Figura 4.10. Espectros de energía histérica promedio, modelos histéricos= Elástoplastico; Factor de ductilidad $Q=4$ magnitud de réplica: $\gamma=0.35$, $\gamma=0.7$ y $\gamma=1.0$. Amortiguamiento del $\zeta=5\%$	51

Figura 4.11. Espectros de Energía Histerética promedio de los 28 registros usados, modelos histeréticos= elastoplástico; Factor de ductilidad $\mu=2, \mu=4$ y $\mu=6$; $\gamma=1.0$. Amortiguamiento del $\zeta=5\%$.	52
Figura 4.12. Espectros de energía Histerética promedio de los 28 registros usados, modelos histeréticos= Elastoplastico, Bilineal 3% y 5%; Factor de ductilidad $\mu=2$. $\gamma=1.0$ Amortiguamiento del $\zeta=5\%$.	53
Figura 4.13. Espectros de energía Histerética promedio de los 28 registros usados, modelos histeréticos= elastoplastico; Factor de ductilidad $\mu=2$. magnitud de réplica: $\gamma=1.0$ Amortiguamiento del $\zeta=2\%$. $\zeta=5\%$ y $\zeta=10\%$.	53
Figure 4.14. Espectros maximos, minimos y promedio de E_H para diferentes magnitudes de replica (a) $\gamma=0.35$ (b) $\gamma= 0.7$ y (c) $\gamma= 1.0$; calculado de las veintiocho espectros de E_H con una ductilidad $\mu=4$, modelo elástoplastico y coeficiente de amortiguamiento del $\zeta=5\%$.	54
Figura 4.15. Espectro promedio de $E_H/ E_{i\mu}$ de los 28 registros usados, modelo histerético= Elastoplástico, Factor de ductilidad a) $\mu=2$, b) $\mu=4$ y c) $\mu=6$. Intensidades de réplica $\gamma=1.0$, $\gamma=0.7$ y $\gamma=0.35$. Amortiguamiento del $\zeta=5\%$.	55
Figura 4.16. Espectro promedio de $E_H/ E_{i\mu}$ de los 28 registros usados, modelo histerético= ELASTOPLASTICO, Factor de ductilidad a) $\zeta=2\%$., b) $\zeta=5\%$. y c) $\zeta=10\%$. $\gamma=1.0$,	56
Figura 4.17. Espectro promedio de $E_H/E_{i\mu}$ de los 28 registros usados, modelo histerético= Elastoplastico; Factor de ductilidad $Q=2$. $\gamma=1.0$. Amortiguamiento del $\zeta=2\%$, $\zeta=5\%$ y $\zeta=10\%$.	57
Figura 4.18. Espectro promedio de $E_H/ E_{i\mu}$ de los 28 registros usados, modelo histerético= Elastoplástico, Bilineal (3%) y Bilineal (5%); Factor de ductilidad $Q=2$. $\gamma=1.0$ Amortiguamiento del $\zeta= 5\%$.	58
Figura 4.19. Espectros de máximo, mínimo y promedio de $E_H/E_{i\mu}$ para diferentes magnitudes de réplicas (a) $\gamma=0.35$ (b) $\gamma= 0.7$ y (c) $\gamma= 1.0$; con valores de ductilidad $\mu=4$, modelo elastoplástico y coeficiente de amortiguamiento $\zeta=5\%$.	60
Figura 4.20. Tres espectros promedios de $E_H/ E_{i\mu}$ ($\gamma=1.0$, $\gamma=0.7$, $\gamma=0.35$), modelo histerético= ELASTOPLASTICO, Factor de ductilidad $Q=2$ y Amortiguamiento del $\zeta=5\%$ [figura 4.15] y el espectro de $E_H/ E_{i\mu}$ (color negro) de la ecuación 15.	63
Figura 4.21. tres espectros promedios de $E_H/E_{i\mu}$; modelo histerético= (ELASTOPLASTICO, BILINEAL 3% y BILINEAL 5%), magnitud de la réplica ($\gamma=0.7$), Factor de ductilidad $Q=4$ y Amortiguamiento del $\zeta=5\%$ y el espectro de $E_H/E_{i\mu}$ (color negro) de la ecuación 15.	64
Figura 4.22.- Características geométricas del marco a utilizar de 10 niveles.	66
Figura 4.23, Resultados de la $E_{i\mu}$ para el modelo de 10 niveles, con un $T= 0.98$ seg; una magnitud de réplica de $PGA=125$ y distintos niveles (0.05 a 2 de pseudo-aceleración) de escalamiento del evento principal.	68
Figura 4.24, Resultados de la E_H para el modelo de 10 niveles, con un $T= 0.98$ seg; una magnitud de réplica de $PGA=125$ y distintos niveles (0.05 a 2 de pseudo-aceleración) de escalamiento del evento principal.	69

Figura 4.25, Resultados de la $E_H/E_{1\mu}$ para el modelo de 10 niveles, con un $T= 0.98$ seg; una magnitud de réplica de $PGA=125$ y distintos niveles (0.05 a 2 de pseudo-aceleración) de escalamiento del evento principal.69

Figura 4.26, Resultados de la $E_H/E_{1\mu}$ para el modelo de 10 niveles, con un $T= 0.98$ seg; tres magnitudes de réplica ($PGA=125$ [color azul], $PGA 100$ [color naranja] y $PGA 75$ [color gris]) y distintos niveles (0.05 a 2 de pseudo-aceleración) de escalamiento del evento principal.70

ABREVIATURAS

EI	Energía de Entrada Elástica
$E_{I\mu}$	Energía de Entrada Inelástica
EH	Energía Histerética
E_H/E_I	Razón de Energía Histerética y Energía de Entrada elástica
$E_H/E_{I\mu}$	Razón de Energía Histerética y Energía de Entrada Inelástica
ECM	Error cuadrático medio
S1GL	Sistema de Un Grado de Libertad
SVGL	Sistemas de Varios Grado de Libertad
C/R	Concreto Reforzado
C.V.	Coficiente de Variación
Cy	Coficiente sísmico

1. INTRODUCCIÓN

En los terremotos que han ocasionado mayores pérdidas económicas y de vidas humanas, normalmente el evento principal es el responsable de los daños a las edificaciones del conjunto de eventos sísmicos. Sin embargo, en las últimas décadas, se han presentado secuencias sísmicas significativas, conformadas por evento principal y réplicas, donde las réplicas en particular tuvieron intensidades sísmicas más altas de lo habitual [1-2]. Además del evento principal, las réplicas también causaron daños importantes en las estructuras, aumentando el nivel de daño de manera considerable, incluso en ciertos casos las consecuencias fueron un estado de daño irreparable o el colapso total de edificios [3-4]. Por otro lado, los edificios que aparentemente estaban intactos ante un evento principal sufrieron daños como consecuencia de las réplicas [5-7]. Debido a que la actividad de las réplicas constituye uno de los mayores peligros después del evento principal, es necesario que los reglamentos y códigos de diseño sismorresistente tomen en cuenta estas secuencias sísmicas al momento de brindar los lineamientos para el diseño de edificaciones. Actualmente, sólo el evento principal es considerado en el diseño estructural; es decir, las réplicas no se toman en cuenta ni en cantidad y magnitud para la formación de los espectros de diseño, o en general para la estimación de las demandas sísmicas [8-10].

Dado el peligro que representan las réplicas a las edificaciones, este enfoque de considerar las secuencias sísmicas en los reglamentos de diseño se debe tomar con mayor interés, al considerar implícita o explícitamente el daño acumulado que éstas ocasionan en las estructuras, mediante parámetros que sean más representativos del daño provocado por las secuencias sísmicas [11]. Los parámetros más usados comúnmente en los reglamentos y códigos de construcción son pseudo-aceleración y desplazamientos relativos máximos [12-13]. Sin embargo, a través de conceptos de energía se podría dar una representación más racional y adecuada del daño acumulado por el efecto de las secuencias sísmicas sobre los edificios.

Las metodologías de diseño basadas en conceptos de energía se enfocan en que la estructura tenga una capacidad de disipación de energía igual o mayor que la demanda de energía total. Uno de los parámetros que sirve para medir las demandas de energía en una estructura es la

energía histerética ya que está directamente relacionada con el daño acumulado y puede interpretarse como el área total bajo todos los ciclos de histéresis que sufre una estructura durante un movimiento del suelo [14-15]. Existen diversos procedimientos para la determinación de la E_H , uno de ellos es a través de la razón de la energía histerética y la energía de entrada inelástica apoyándose en un espectro de energía de entrada inelástica. La razón $E_H/E_{I\mu}$ ha mostrado ser uno de los parámetros más estables para la determinación de E_H , ya que sus valores presentan una dispersión muy baja con coeficientes de variación (C.V.) aproximadamente 0.1 [16]. Investigadores a través de los años han propuesto diversas expresiones sobre la razón $E_H/E_{I\mu}$ en función de diversos parámetros estructurales [17-19], esta razón ha presentado una característica muy particular en la forma espectral que es la tendencia casi lineal en la mayoría de todo el intervalo de periodos. Aunque la forma espectral es casi lineal, los valores de la ordena están directamente relacionados con algunos parámetros estructurales, entre los más importantes son: la ductilidad y el parámetro de amortiguamiento.

Aun cuando se han desarrollado varias expresiones para obtener la relación E_H/E_I y $E_H/E_{I\mu}$ [20-22], estas son válidas únicamente para sistemas sometidos a eventos principales. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo es obtener una expresión que determine la razón de $E_H/E_{I\mu}$ para sistemas de un grado de libertad (S1GL) que contemplen el efecto de las réplicas y distintas características estructurales, las cuales servirán para calcular las demandas de energía, es decir E_H , con la ayuda de un espectro de $E_{I\mu}$.

2. MARCO TEORICO

2.1. SECUENCIAS SÍSMICAS

Los sismos son fenómenos naturales que vienen en grupo; el sismo de mayor magnitud se denomina evento principal; cualquier sismo antes que este se llama sismo premonitor y a los que se presentan después del evento principal se les nombra réplicas [23]. En los últimos años, los eventos sísmicos de gran magnitud han generado numerosas réplicas, todos ocasionados por la misma falla sísmica [24-25]. Existe un acuerdo general en que las réplicas son provocadas por cambios de estrés de algún tipo inducidos por la ruptura del sismo principal [26-27]. Normalmente en los grandes terremotos pocos profundos les sigue un aumento de la actividad sísmica, definida como secuencias de réplicas. Estas réplicas pueden continuar por más de semanas, meses o incluso años, como en el caso del terremoto de Landers de 1992 donde las réplicas duraron aproximadamente 7 años [28-30]. Un sismo lo suficientemente fuerte para causar un gran daño estructural, probablemente producirá un gran número de réplicas en la hora siguiente, cuya tasa disminuye aproximadamente como la inversa de tiempo transcurrido desde el choque principal [31-32].

Grandes réplicas han mostrado la existencia de actividades de réplicas secundarias, es decir, el hecho de que las réplicas pueden tener sus propias réplicas, como el evento de Big Bear con una magnitud de 6.5 (M6.5), que se considera una réplica del terremoto de Landers, California en 1992 (M7.2); y que claramente desencadenó sus propias réplicas [33]. Si bien algunos autores a estas réplicas de tamaño considerable las han denominado “multipletes” o “dobletes” en el caso de ser un par de eventos [34], lo importante aquí es entender que todas las réplicas, multipletes, dobles, sismo premonitor y evento principal forman parte del conjunto de secuencias sísmicas provocadas por un solo evento desencadenador.

El primer estudio formal de las réplicas fue realizado por Omori (1894) para el terremoto de 1891 en Mino-Owari (Nobi), Japón. Encontró que se registraron más de 3000 réplicas en el período de 26 meses después del terremoto, y sus observaciones lo llevaron a postular la ley, ahora llamada ley de Omori, que muestra que la frecuencia de réplicas desaparece hiperbólicamente después del terremoto principal. Está es una de las pocas leyes empíricas bien establecidas en sismología [35-36].

$$N(t) = \frac{K}{(t+c)^p} \quad (2.1)$$

donde $N(t)$ es el número de réplicas por unidad de tiempo, t es el tiempo transcurrido desde el sismo principal, K , c y p son constantes. Algunos autores propusieron algunos valores y expresiones para estas constantes [37-38].

Otra aportación en el plano de las secuencias sísmicas fue la llamada ley de Bath [39], propuesta en la década de 1950, la cual establece que la réplica más grande tiene una magnitud que suele ser 1.2 menos que la del sismo principal independientemente de la magnitud del sismo principal. Se han realizado varios estudios para la interpretación física de la ley de Bath [40-43]. También Karen Felzer, Rachel E. Abercrombie and Goran Ekstrom encontraron que el número de réplicas producidas por un sismo principal de magnitud M_1 varía aproximadamente $c10^{\alpha M_1}$, (donde $\alpha=b=1$), independientemente de si las magnitudes de las réplicas son mayores o más pequeños que M_1 , esto apoyado en un estudio realizado en una amplia base de registros sísmicos.

Como se ha mencionado, la actividad de réplicas constituye uno de los mayores peligros sísmicos después de un terremoto. Las réplicas sacuden las estructuras ya debilitadas por el evento principal, y si una réplica está más cerca del centro de una población que la ruptura original, puede causar temblores locales más graves; es decir, aunque la magnitud de la réplica sea menor que el evento principal no lo será en intensidad sísmica en esa población en específico; añadiendo también que el contenido de energía es completamente distinto. Por ejemplo, La réplica de magnitud de $M6.4$ en 1992 en la ciudad de Big Bear, que ocurrió varias horas después y 40 km al oeste del terremoto principal de magnitud de $M7.3$ en 1992 la ciudad de Landers, California, causó sustancialmente más daño a la ciudad de Big Bear que el terremoto de Landers. Aún más dañino fue el terremoto del 22 de agosto de 1952 con magnitud de $M5.8$ en la ciudad de Bakersfield, California; con una réplica de magnitud de $M7.5$ en el condado de Kern. que ocurrió aproximadamente un mes después del sismo principal. Debido a la proximidad de la réplica a Bakersfield y la condición debilitada de los edificios, esta réplica provocó la muerte de 2 personas, 35 personas heridas y causó \$10 millones en daños a la propiedad. Otro ejemplo más recientemente fue el sismo del 12 de mayo de 2008 con magnitud de $M7.9$ en la provincia de Sichuan, China, el terremoto ha sido seguido, a partir del 1 de agosto de 2008, por cinco réplicas que causaron importantes lesiones

adicionales, muertes, y/o daños mayores [44-45]. En la Figura 1. Compara un evento principal con y sin réplica.

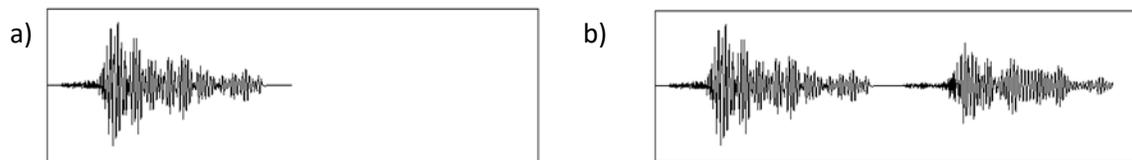


Figura 2.1. Movimiento sísmico: a) evento principal, b) evento principal con réplica.

La relación entre un sismo principal y sus réplicas ha sido un tema de estudio durante décadas [46-47]; sin embargo, muchas preguntas sobre la física de las réplicas siguen sin resolverse [48-49]. Hasta principios de la década de 1990, se creía comúnmente que todas las réplicas ocurrían dentro de una zona de una a dos longitudes de fallas principales desde el hipocentro del choque principal [50]. Pero en 1992 los investigadores descubrieron que el evento de Landers, California con magnitud de M 7.3, provocó sismicidad en distancias superiores a dos veces la longitud de la falla [51]. Desde entonces, varios otros terremotos de magnitudes mayores de 7 ($M \geq 7$) así como pequeños terremotos principales de Magnitud entre 2 y 4 [52-53] han demostrado que provocan terremotos a distancias de hasta decenas de longitudes de falla de choque principal. Por ejemplo, el 12 de junio de 2005, en Anza California con un evento principal de M 5.2 ocurrieron grandes replicas en el sur de California en medio de una red sísmica densamente instrumentada y, por lo tanto, se registraron inusualmente bien. Para el evento de junio de 2005, réplicas tan pequeñas casi con una M 0.0 se pudieron observar extendiéndose por al menos 50 km a lo largo de la falla de San Jacinto a pesar de que la falla del sismo principal tenía solo aproximadamente 4.5 km de largo [54-55]. Estas nuevas observaciones han generado una controversia sustancial con respecto a si los terremotos desencadenados a distancia son réplicas regulares, es decir, generadas por el mismo proceso físico que los eventos de campo cercano, o si representan un fenómeno separado [56-57].

Por todo lo anterior, se han hecho varios estudios para comprender mejor el efecto de las réplicas sobre las edificaciones, por ejemplo, Molchan y Dmitrieva en 1992 estudiaron la identificación de réplicas en un conjunto de registros [27]; en 1998 S. Toda y compañía investigaron el efecto de las réplicas y las probabilidades futuras de presentarse más sismos,

tomando como estudio el evento de Kobe, Japón (1995) [58]; En 2005, Luco, Bazzurro y Cornell estudiaron la capacidad residual de un edificio dañado por el evento principal sometido a réplicas[59]; En 2007, Q. Li y B. Ellingwood evaluaron el desempeño y daño de edificios de acero sometidos a secuencias sísmicas [5], K. Goda y C. Taylor investigaron el efecto de la réplicas sobre la demanda de ductilidad máxima [26], J. Ruiz-García evaluó el desempeño sísmico de edificios que tienen el prototipo “escolar”, la cual fueron sometidas a secuencias sísmicas [60], C. Zhai, W. Wen, Z. Chen investigaron el espectro de daño para secuencias sísmicas con el índice de daño de Park-Ang [61], S. Amiri y E. Bojórquez calcularon la razón del desplazamiento residual de estructuras sometidas a secuencias sísmicas y la determinación de la demanda de desplazamiento residual [62]; Song, Li y Van de Lindt calcularon la estimación de pérdida en un edificio de acero sometidos a secuencias sísmicas [63]; entre muchos otros estudios.

Es evidente que existen muchas preguntas sobre la física de las réplicas que siguen aún sin resolverse, de aquí que el objetivo del presente estudio no es comprender la naturaleza misma del origen de las secuencias sísmicas, sino, se centra en medir la cantidad de daño acumulado que pueden ocasionar las secuencias sísmicas en las edificaciones. Nótese que en eventos sísmicos importantes probablemente las réplicas presenten intensidades sísmicas significativas que se traduzcan en más daños estructurales, pérdida de propiedad y lesiones o muertes en los ocupantes de los edificios; como se puede observar en la tabla 2.1 con eventos sísmicos y réplicas del pasado. Debido al aumento de información relacionada tanto en cantidad como en intensidad sísmica de las réplicas en los últimos eventos sísmicos, es importante considerar las secuencias sísmicas en el diseño sismorresistente considerando parámetros que racionalicen mejor la cantidad de daño acumulado en las estructuras en el tiempo, ya que incluso los edificios aparentemente intactos pueden dañarse como resultado de las réplicas. Actualmente los parámetros de diseño que rigen los códigos de construcción no toman en cuenta el daño acumulado que presenta una estructura al estar sometida a un conjunto de secuencias sísmicas, por lo que es a través de conceptos de energía es como se podría dar una mejor representación de dicho daño y llevarlo al diseño sismo-resistente tomando en cuenta el efecto de réplica.

Tabla 2.1. Sismos severos y sus réplicas en las últimas décadas.

Evento	Fecha	País	Mw	Réplicas
1	22/05/1960	Chile	9.5	6 réplicas. 8.75 Mw la mayor
2	19/09/1985	México	8.1	Fuertes réplicas al día siguiente (7.5 Mw la mayor)
3	28/06/1992	Landers, California.	7.3	Réplica de 6.5 Mw de Big Bear
4	26/12/2004	Indonesia	9.1	69 réplicas. 7.1 Mw la mayor
5	13/05/2005	Chile	7.8	2000 réplicas aproximadamente
6	28/03/2005	Indonesia	8.6	Ocho réplicas importantes entre 5.5 y 6.0 Mw
7	8/10/2005	Pakistan	7.6	147 réplicas al día siguiente. 6.2 Mw la mayor
8	12/05/2008	China	8.2	46 réplicas (M5 la mayor)
9	27/02/2010	Chile	8.8	22 réplicas mayores de 6.0 Mw (6.9 Mw la mayor)
10	2/2/2010	Haiti	7.0	Se contabilizaron cientos de réplicas, la más fuerte de 5,9, Mw
11	11/03/2011	Japón	9	Más de mil replicas. Las más fuertes de 7.4 Mw, 7.9 Mw y 7.7 Mw
12	22/02/2011	New Zelanda	6.3	Un minuto después se presentó una réplica de 6.0 Mw
13	11/04/2012	Indonesia	8.6	111 réplicas superiores a los 4.0 Mw (8.2 Mw la mayor).
14	24/09/2013	Pakistán	7.8	Cientos de réplicas, (7.2 Mw la mayor)
15	25/04/2015	Nepal	8.1	Una réplica alcanzo 6.7 Mw. y otra de 5 Mw
16	19/09/2017	México	7.5	9,945 réplicas al día 6 de noviembre. Dos réplicas de 5.8 Mw y 6.1 Mw
17	25/02/2018	Nueva Guinea	7.5	Una réplica de 6.0 Mw, de 6.7 Mw y otra de 6.3 Mw.
18	5/08/2018	Indonesia	7.5	Premonitor 6.1, Mainshock=7.5; 350 réplicas.
19	22/05/2021	China	7.3	<u>Premonitores de 6.4 Mw, después 4 eventos mayores a 5 Mw, evento principal de 7.3 Mw y réplica.</u>
20	06/02/2023	Turquía y Siria	7.8	Severas réplicas inclutendo algunas con magnitudes mayores de 6 Mw.
21	06/02/2023	Turquía y Siria	7.5	Evento principal cercano a Kahramanmaras, severas réplicas, incluyendo algunas con magnitudes más grandes que 6 Mw.

2.2 CONCEPTOS DE ENERGÍA SÍSMICA

Los reglamentos de construcción utilizan el espectro de pseudo-aceleración para el cálculo de estructuras sismorresistentes a través de controlar las distorsiones laterales (desplazamientos laterales); sin embargo, el desempeño sísmico probablemente puede ser estimado de mejor manera con otros parámetros de respuesta estructural que incluyan el efecto de la duración de los sismos y la acumulación del daño, tal como sucede con el uso de la energía sísmica. En particular, la experiencia en eventos sísmicos y en el campo experimental sugiere que las demandas de deformación plástica acumulada pueden ser de gran importancia en la seguridad estructural de estructuras expuestas a eventos sísmicos de larga duración [64-66].

Uno de los primeros investigadores que iniciaron el estudio de los conceptos de energía en el diseño sísmico fue Housner a finales de los años cincuenta [67]. Housner propuso una metodología de diseño basado en energía sísmica, la cual consiste en proporcionar a la estructura una capacidad de disipación mayor o igual que la demanda de energía esperada en caso de eventos sísmicos extremadamente fuerte, ver ecuación 2.2. Debido a la complejidad de estimar la capacidad y las demandas de energía el enfoque de Housner fue ignorado por décadas.

Una estructura bien diseñada y construida debe ser capaz de absorber y disipar la energía de entrada impartida por un evento sísmico con el mínimo de daño posible. Durante el movimiento dinámico de la estructura sujeta al sismo, parte de la energía permanece en la estructura en forma de energía cinética y energía de deformación; la otra parte de la energía de entrada se disipa por medio de amortiguamiento y deformación inelástica (fluencia) en los componentes estructurales que entraron en el rango inelástico, al final toda la energía es disipada [68].

La implementación de un enfoque de energía en el diseño sismorresistente requiere la estimación tanto de la demanda como de la capacidad en términos de energía. Las metodologías basadas en energía se centran en proporcionar estructuras con capacidades de disipación de energía mayores o iguales a sus demandas de energía esperadas tal y como se

mencionó en el apartado anterior [69-70]. Los requisitos de diseño de una estructura resistente a terremotos en estos términos se pueden definir como:

$$\text{Capacidad de energía} \geq \text{Demanda de Energía} \quad (2.2)$$

Si bien para obtener la capacidad de energía de un miembro individual o la energía global de una estructura se requieren pruebas experimentales, aún existe una incertidumbre en la estimación de la capacidad global en las estructuras [16]. Por otro lado, la demanda sísmica es dependiente tanto de las características del sismo como de las propiedades estructurales, es decir, estructuras con diferentes propiedades de rigidez y resistencia presentarán diferentes demandas sísmicas ante el mismo evento sísmico [71].

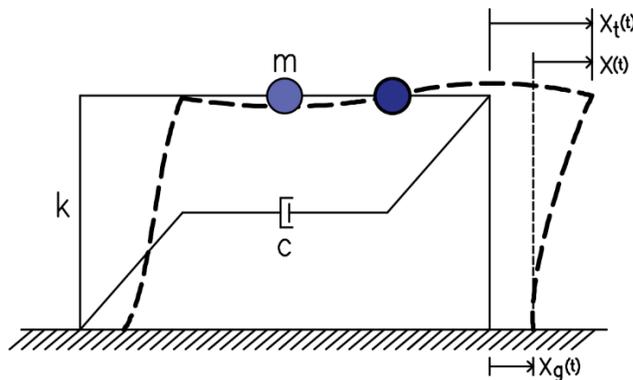


Figura 2.2. Sistema de un grado de libertad.

En los primeros estudios realizados sobre el enfoque de energía, para un sistema como el de la figura 2.2, la ecuación de movimiento utilizada para obtener las expresiones de energía para S1GL era la siguiente

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + f_s(x, \dot{x}) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (2.3)$$

Donde:

- | | |
|---|--------------------------------------|
| m = masa de la estructura; | $\ddot{x}(t)$ = aceleración relativa |
| c = coeficiente de amortiguamiento viscoso; | \dot{x} = velocidad relativa |
| $f_s(x, \dot{x})$ = fuerza restauradora; | \ddot{x}_g = aceleración del suelo |
| x = desplazamiento relativo del sistema con respecto al suelo | |

Note que $\ddot{x}_t(t) = \ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)$, la ecuación 2.3 puede reescribirse como

$$m\ddot{x}_t(t) + c\dot{x}(t) + f_s(x, \dot{x}) = 0 \quad (2.4)$$

Donde:

$x_t = x + x_g$ = desplazamiento absoluto de la masa

x_g = desplazamiento del suelo

\ddot{x}_t = aceleración total o absoluta

La ecuación 2.4, fue utilizada por primera vez en un estudio hecho por Uang y Bertero en 1988; donde derivaron la ecuación convencional, es decir la ecuación 2.3 de este estudio, en 2 definiciones de energía, que son la energía relativa, obtenida de la ecuación 2.3 del presente estudio, que antes del estudio hecho por Uang y Bertero se utilizó, pero con el nombre de “energía” simplemente; y la otra es la energía absoluta derivada de la ecuación 2.4 de este estudio. Este enfoque de dividir los tipos de energía en relativa y absoluta ganó ampliamente terreno en el área de diseño basado en energía hasta el día de hoy.

A continuación, se resume brevemente como se obtiene la energía de entrada relativa y la energía cinética relativa, así como también la energía de entrada absoluta y la energía cinética absoluta. En ambos criterios se obtienen la energía de amortiguamiento, energía de deformación y energía histerética. Éstas tres energías son las mismas independientemente de los dos enfoques que se utilicen de energía absoluta o energía relativa.

ENERGÍA RELATIVA

La ecuación del balance de energía relativa se obtiene integrando directamente la ecuación de movimiento con respecto a la respuesta de desplazamiento relativo del sistema. Integrando todos los elementos de la ecuación 2.3 y sustituyendo $f_s(x, \dot{x}) = kx$, y donde k es la rigidez del Sistema, obtenemos

$$\int m\ddot{x}(t)dx + \int c\dot{x}(t)dx + \int kx dx = - \int m\ddot{x}_g(t)dx \quad (2.5)$$

El primer término de la ecuación 2.5 puede reescribirse como

$$\int m\ddot{x}(t)dx = \int m \frac{d\dot{v}}{dt} dx = \int m d\dot{x} (\dot{x}) = \frac{m \dot{x}^2}{2} \quad (2.6)$$

que es la energía cinética relativa (E'_k) calculada de la velocidad relativa:

$$E'_k = \frac{m \dot{x}^2}{2} \quad (2.7)$$

El término del lado derecho de la ecuación 2.5 es definido como energía de entrada relativa

$$E'_I = - \int m\ddot{x}_g(t)dx \quad (2.8)$$

La ecuación 2.5 puede reescribirse como:

$$E'_k + E_D + E_a = E'_I \quad (2.9)$$

Donde independientemente si el sistema entra en el rango inelástico o no, la energía absorbida (E_a) del sistema es igual a la energía de deformación (E_S) más la energía histerética

$E_a = E_S + E_H$. Reescribiendo la ecuación 2.9

$$E'_k + E_D + E_S + E_H = E'_I \quad (2.10)$$

La ecuación 2.10 representa el balance de energía en una estructura. En esta ecuación E'_k, E_D, E_S, E_H representan las energías: cinética, amortiguamiento, deformación y la histerética disipada, respectivamente; y E'_I es la energía de entrada relativa. El daño estructural se puede representar mediante E_H . La energía histerética disipada puede ser interpretada físicamente por considerar que es igual al área encerrada por cada ciclo histerico que la estructura desarrolla durante una excitación sísmica.

ENERGÍA ABSOLUTA

Por otro lado, la ecuación del balance de energía absoluta es derivada de la ecuación número 2.4, integrando cada uno de los términos de ecuación obtenemos

$$\int m\ddot{x}_t(t)dx + \int c\dot{x}(t) dx + \int f_s(x, \dot{x}) = 0 \quad (2.11)$$

Reemplazando x por $(x_t - x_g)$ en el primer término en la ecuación (2.11), entonces

$$\begin{aligned} \int m\ddot{x}_t(t)dx &= \int m\ddot{x}_t(t)(dx_t - dx_g) = \int m \frac{d\dot{x}_t}{dt} dx_t - \int m\ddot{x}_t dx_g \\ &= \frac{m\dot{x}_t^2}{2} - \int m\ddot{x}_t(t)dx_g \end{aligned} \quad (2.12)$$

Sustituyendo la ecuación 2.12 en la ecuación 2.11

$$\frac{m\dot{x}_t^2}{2} + \int c\dot{x}dx + \int f_s(x, \dot{x})dx = \int m\ddot{x}_t(t)dx_g \quad (2.13)$$

El primer término es la energía cinética absoluta, como se muestra a continuación

$$E_k = \frac{m\dot{x}_t^2}{2} \quad (2.14)$$

El término del lado derecho de la ecuación 2.13 es por definición la energía de entrada “absoluta”

$$E_I = \int m\ddot{x}_t(t)dx_g \quad (2.15)$$

Reescribiendo la ecuación 2.13, podemos reescribirla de la siguiente manera:

$$E_I = E_k + E_\xi + E_a = E_k + E_\xi + E_s + E_H \quad (2.16)$$

Como ya se mencionó, la energía de amortiguamiento, la energía restauradora y la energía histerética de la ecuación 2.16 tienen el mismo valor que en la ecuación 2.10; es decir, su valor no cambia independientemente del enfoque que se está usando; por lo tanto, la energía cinética y la energía de entrada son las únicas con valores diferentes según el enfoque que se está empleando. Aunque la energía cinética y la energía de entrada son distintas según el enfoque, los valores son muy similares entre sí; la diferencia radica principalmente en periodos demasiados cortos ($T < 0.2$ segundos) y demasiados largos ($T > 10$ segundos) de la estructura, ya que, en periodos intermedios, es decir, en periodos que oscilan entre 0.5 y 7 segundos los valores de ambas energías (entrada y cinética) son bastante similares. [69-70].

El enfoque utilizado en el presente estudio es el primero, que es el de energía relativa, debido

a que algunos autores han considerado tener una mayor aplicación [71-72]; recordemos que la E_I' es definida como el trabajo hecho por la fuerza equivalente sobre el sistema equivalente de base fija. Otro de los aspectos que hacen atractiva el estudio de la energía relativa es que el desplazamiento y la velocidad relativa son los causantes de las fuerzas en las estructuras. A partir de este párrafo por cuestiones de abreviación a la energía de entrada relativa y la energía cinética relativa, E_I' y E_k' , se les hará mención como E_I y E_k .

Existen diferentes estudios que proponen expresiones para calcular las demandas sísmicas, uno de ellos es el realizado por Fajfar, Vidic y Fischinger en 1988, quienes proponen una fórmula para determinar la demanda sísmica en S1GL para un rango de periodos naturales medianos y largos [14] y más adelante proponen unos espectros de Energía Histerética por unidad de masa (E_H/m) [71-72]; También Decanini y Mollaioli en 1998, formularon un espectro de diseño de energía de entrada elástica para fines de diseño sísmico tomando en cuenta parámetros como el suelo, magnitud del sismo y distancia de la falla al sitio [73]; también J. Shein and B. Akbas en 1999, estudiaron las demandas de energía sísmica en marcos resistentes a momento de acero y más adelante propusieron un método de diseño basado en desempeño enfocado en energía sísmica en marcos de acero [74]; E. Bojórquez, S. Ruiz y A. Terán-Gilmore en 2008, usaron conceptos de energía para hacer una evaluación basada en rehabilitación de estructuras de acero y para obtener el índice de daño en estructuras de acero [64], aunque estas expresiones son para obtener las demandas de energía sísmica tanto para S1GL y SVGL, todas ellas fueron obtenidas a través de análisis dinámicos con registros que incluían únicamente eventos principales; es decir, no se tomaron en cuenta las réplicas ni en cantidad ni magnitud. Aun cuando existen éstos y otros estudios para determinar la demanda sísmica; todavía es necesario entender mejor las demandas de energía sísmica en edificaciones sometidas a secuencias sísmicas y el daño acumulado que éstas provocan en el tiempo.

Una de las maneras más efectivas de estimar las demandas de energía en estructuras es a través de la E_H , ya que está directamente relacionado con el daño acumulado y fluencia de las estructuras. Como ya se mencionó en la parte introductora, con el apoyo de un espectro de E_I , la E_H se puede obtener a través de la razón de E_H/E_I y $E_H/E_{I\mu}$. Diversos autores han calculado espectros para esta razón para S1GL y SVGL para modelos con distintas

características estructurales y del suelo; la razón $E_H/E_{I\mu}$ ha mostrado ser un parámetro muy estable para determinar las demandas de energía con el apoyo de un espectro de energía de entrada elástico o inelástico.

2.3 RELACIONES E_H/E_I PROPUESTAS

Una de las maneras de obtener la E_H es a través de la razón de E_H/E_I y con el apoyo de un espectro de E_I . El estudio de la razón E_H/E_I inició con Akiyama en 1985 [17], quien propuso una expresión sobre la razón de E_H/E_I , dicha fórmula está en función del coeficiente de amortiguamiento. La expresión se muestra a continuación en la ecuación 2.17:

$$\frac{E_H}{E_I} = 1 - \frac{1}{(1+3\zeta+1.2\sqrt{\zeta})^2} \quad (2.17)$$

Donde ζ es el coeficiente de amortiguamiento. Aunque la expresión presenta buenos resultados, no toma en cuenta otros parámetros como ductilidad, modelos histeréticos, efecto de réplica, entre otros factores. Más adelante, Kuwamura y Galambos [18] propusieron otra expresión para determinar la razón E_H/E_I , ellos observaron que la razón estaba en función del amortiguamiento viscoso y ductilidad. Esta expresión se muestra a continuación:

$$\frac{E_H}{E_I} = 1 - \frac{\frac{\varphi}{\varphi+0.15}}{1 + \frac{20(3\zeta+1.2\sqrt{\zeta})}{\varphi+10}} \quad (2.18)$$

Donde el φ es definido como el radio entre el desplazamiento plástico y el desplazamiento de fluencia y ζ es el coeficiente de amortiguamiento. Ellos también encontraron que el valor de la razón decrece a medida que el valor de ζ aumenta y a medida que disminuye el valor φ también se reduce el valor de E_H/E_I . También, Fajfar y Vidic [16], encontraron que la relación E_H/E_I es influenciada por el amortiguamiento y además observaron que factor de ductilidad y el comportamiento histerético implicaba una influencia sobre dicha razón. Entre estos parámetros el amortiguamiento mostró mayor influencia sobre la razón de E_H/E_I ; a medida que decrecía el coeficiente de amortiguamiento viscoso aumentaba la razón de E_H/E_I . En base a un estudio paramétrico hecho de varios registros sísmicos propusieron la siguiente fórmula:

$$\frac{E_H}{E_I} = 1.05 \frac{(\mu-1)^{0.95}}{\mu} \quad (2.19)$$

En su estudio paramétrico sobre demandas de energía sísmica, concluyó que la razón de E_H/E_I era el parámetro más estable de su estudio, con un coeficiente de variación de alrededor de 0.1. Ellos obtuvieron las siguientes constantes máximas para las ordenadas espectrales:

$$\frac{E_H}{E_I} = 0.8 \quad (\zeta = 5\%) \quad (2.20)$$

$$\frac{E_H}{E_I} = 0.9 \quad (\zeta = 2\%) \quad (2.21)$$

Por otro lado, G. Manfredi [75] en su estudio de la respuesta sísmica para S1GL mostro que E_H/E_I es dependiente solo de la demanda de ductilidad y no es significativamente afectada por las características sísmicas de los registros considerados. Llevado a cabo un análisis el propuso la siguiente expresión para un coeficiente de amortiguamiento del 5%:

$$\frac{E_H}{E_I} = 0.72 \frac{\mu_c^{-1}}{\mu_c} \quad (2.22)$$

donde μ_c es la ductilidad cíclica, igual a $1 + \Delta x_{\max} / x_y$, esta ecuación es muy similar a las propuestas por los demás autores. Más adelante prosiguieron Decanini y Molallioli 2001, quienes brindaron una metodología basada en energía para evaluar la demanda sísmica en edificios, la cual consiste en evaluar las demandas de energía histerética a través de un espectro de energía de entrada inelástico y un espectro de la relación E_H/E_I , éste último presenta una tendencia casi lineal en los resultados de los modelos estudiados [21], la expresión es la siguiente:

$$\frac{E_H}{E_I} = K_s \frac{\mu^{-1}}{\mu} \quad (2.23)$$

donde K_s es un coeficiente que depende sobre el tipo de suelo y que asume los valores de 0.75, 0.8, 0.9 respectivamente para tipo de suelo S1, S2 y S3. Otros autores tales como Akbas, Shen, and Hao, [76] propusieron una simple relación para determinar E_H/E_I para sismos de mediana y severa magnitud, la ecuación se muestra a continuación:

$$\frac{E_H}{E_I} = 1 - 0.09/(\ddot{u}_{g0}/g) \quad (2.24)$$

Otros autores tales como Akbas, Aksar, Doran and Alacali propusieron un espectro de la relación de E_H/E_I para S1GL y para SVGL tomando en cuenta propiedades del suelo y propiedades estructurales en edificios de acero [22].

$$\frac{E_H}{E_I}(n) = aT^3 + bT^2 + cT + d \quad (2.25)$$

$$(E_H/E_I)_{MDOF} = C_{EH/EI} \times (E_H/E_I)_{SDOF} \quad (2.26)$$

En la ecuación anterior a, b, c y d son constantes polinomiales y $C_{EH/EI}$ es el factor de modificación para SVGL. También Zhou, Song GG and Tan PP [77] propusieron las siguientes expresiones:

$$\left(\frac{E_H}{E_I}\right)_{\text{Benchmark}} = 0.35 \quad (2.27)$$

$$\left(\frac{E_H}{E_I}\right) = I_1 I_2 I_3 \left(\frac{E_H}{E_I}\right)_{\text{Benchmark}} \quad (2.28)$$

Donde los I_1 , I_2 y I_3 son coeficientes de influencia. Si bien las expresiones anteriores sobre la razón E_H/E_I y $E_H/E_{I\mu}$ sirven para calcular la E_H y por ende las demandas de energía, todas ellas son obtenidas de análisis dinámicos no lineales de registros sísmicos que consideran sólo eventos principales, es decir, no consideran el efecto de las réplicas. Aunque la E_H es un parámetro que racionaliza de manera adecuada el daño acumulado de los eventos principales, el no considerar las secuencias sísmicas en la razón $E_H/E_{I\mu}$ probablemente pudiera incidir en una subestimación de las demandas de energía. Por tal motivo el objetivo del presente estudio es proponer una expresión que calculen la razón $E_H/E_{I\mu}$ considerando diferentes intensidades de réplica, niveles de ductilidad y coeficientes de amortiguamiento, todo esto para S1GL inelásticos. Los registros utilizados para los análisis dinámicos son de suelo blando registrados en estaciones de la ciudad de México, ya que en ese tipo de suelos las demandas de energía en edificaciones producto de un sismo son muy altas.

Tabla 2.2. Expresiones propuestas de E_H/E_I (revisión de la literatura).

No	Researchers	Proposals	Description
1	Akiyama [17]	$\frac{E_H}{E_I} = 1 - \frac{1}{(1+3\zeta+1.2\sqrt{\zeta})^2}$	Donde ζ es el coeficiente de amortiguamiento.1
2	Kuwumura and Galambos [18]	$\frac{E_H}{E_I} = 1 - \frac{\frac{\varphi}{\varphi+0.15}}{1 + \frac{20(3\zeta+1.2\sqrt{\zeta})}{\varphi+10}}$	Donde el φ es definido como la razón entre el desplazamiento plástico y el desplazamiento de fluencia y ζ es el coeficiente de amortiguamiento

3	Fajfar and Vidic [16]	$\frac{E_H}{E_I} = C_E \frac{(\mu-1)^{C_H}}{\mu}$	Donde μ es la ductilidad. C_E y C_H son constantes que dependen del modelo histéretico y del amortiguamiento
4	Manfredi [75]	$\frac{E_H}{E_I} = 0.72 \frac{\mu_c - 1}{\mu_c}$	Donde μ_c es la ductilidad cíclica, igual a $1 + \Delta x_{\max} / x_y$,
5	Decanini and Molalioli [21]	$\frac{E_H}{E_I} = K_S \frac{\mu - 1}{\mu}$	Donde K_S es un coeficiente que depende sobre el tipo de suelo y que asume los valores de 0.75, 0.8, 0.9 respectivamente para el tipo de suelo S1, S2 y S3 y μ es la ductilidad.
7	B. Akbas, B. Aksar, B. Doran and Alacali [22]}	$\frac{E_H}{E_I} (n) = aT^3 + bT^2 + cT + d$ $(E_H/E_I)_{MDOF} = C_{EH/EI} X (E_H/E_I)_{SDOF}$	Donde a, b, c y d son constantes polinomiales y $C_{EH/EI}$ es el factor de modificación para SVGL. Prosiguieron
8	Zhou, Song GG and Tan PP [77]	$\left(\frac{E_H}{E_I}\right)_{\text{Benchmark}} = 0.35$ $\left(\frac{E_H}{E_I}\right) = I_1 I_2 I_3 \left(\frac{E_H}{E_I}\right)_{\text{Benchmark}}$	Donde I_1 , I_2 , y I_3 son los coeficientes de influencia.

3. METODOLOGÍA

3.1 SELECCIÓN DE MODELOS ESTRUCTURALES

Para el presente estudio, tres comportamientos histeréticos son considerados para los modelos no lineales basados en diferentes niveles posfluencia. El primer modelo estructural seleccionado corresponde al modelo histerético con comportamiento elastoplástico perfecto (ver figura 3.a), este modelo puede exhibir un comportamiento elástico lineal hasta un valor de resistencia llamado límite elástico, y luego se comportan en un modo plástico hasta que se obtiene un desplazamiento máximo. En esta modelación los edificios no presentan degradación de rigidez ni deterioro de resistencia en cada ciclo de deformación. Si bien esta modelación está un poco alejada de la realidad, ayuda a estudiar y entender el comportamiento de las estructuras en el tiempo.

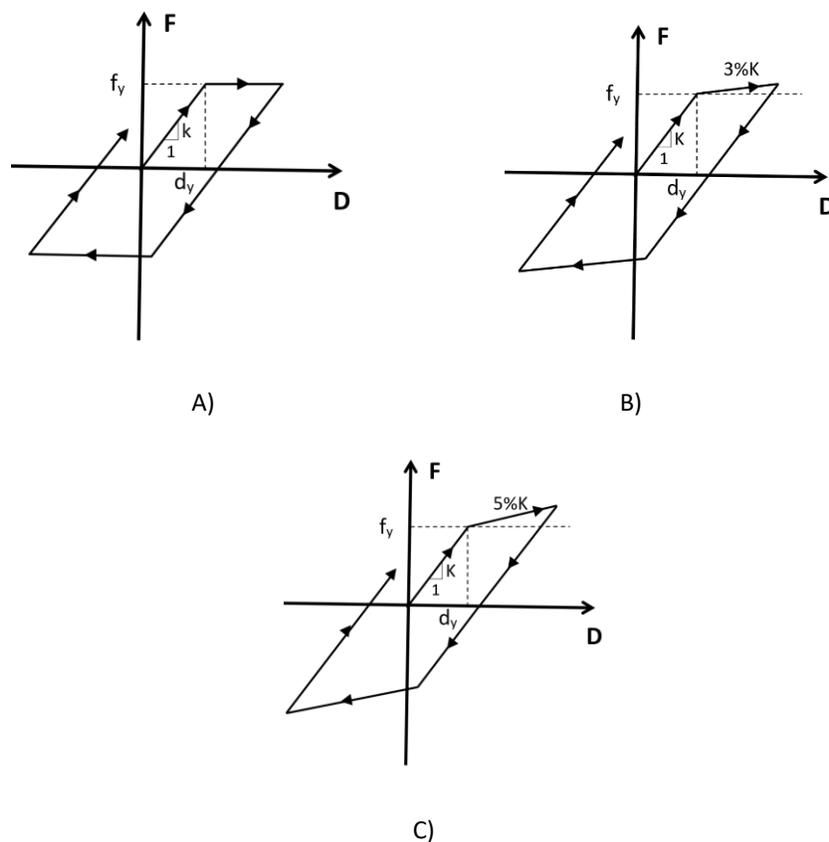


Figure 3.1: Modelo histerético y respuestas cíclicas de los cuatro sistemas analizados, los modelos no lineales corresponden a: a) elastoplástico, b) bilineal con 3% de rigidez postfluencia y c) bilineal con 5% de rigidez postfluencia.

Por otro lado, se han seleccionado dos modelos bilineales con diferentes niveles de rigidez de post-fluencia correspondientes al 3% y 5% (ver figuras 3.b y 3.c.), que corresponde a la mayoría de las estructuras. Niveles de posfluencia mayores a estos valores corresponden a edificios con características estructurales especiales o con algunos disipadores de energía, como es el caso de la mayoría de los disipadores elastómeros laminados (con y sin corazón de plomo, de alto amortiguamiento) que se comercializan actualmente con una fluencia del 10% [78]. El presente trabajo utiliza los modelos de estructuras más comunes, donde la mayoría de los espectros de diseño de los reglamentos de construcción utilizan estos modelos.

Una vez seleccionado los modelos estructurales, se procede a los análisis dinámicos no lineales para S1GL, estos fueron realizados con secuencias sísmicas formadas por registros sísmicos de la ciudad de México con la especificación de tipo de suelo blando.

3.2 SECUENCIAS SÍSMICAS UTILIZADAS

En el diseño sismo-resistente de edificios es deseable contar con registros sísmicos del sitio en el que se va a desplantar la estructura, para que los análisis de diseño sean lo más realísticos posible. En general, los registros del evento principal y de las réplicas son escasos en número a lo largo que ha transcurrido el tiempo, por ello, es necesario generar secuencias sísmicas artificiales a partir de registros reales. En este estudio, se utilizarán secuencias sísmicas artificiales que estarán formadas de registros sísmicos reales de la Ciudad de México en estaciones donde el suelo es de tipo blando, ya que este tipo de suelo favorece la amplificación de ondas sísmicas. De acuerdo un estudio hecho por Maldonado [79], solo existe la secuencia sísmica real ocurrida el 19 de septiembre (Evento principal) y el 20 de septiembre (réplica) de 1985 que sacudió fuertemente a la ciudad de México y que se registró en la estación central de abastos (CDAF) (ver tabla 3.1).

Tabla 3.1. Características de las secuencias de la estación CDAF (19-20/Septiembre/1985)

	ESTACIÓN	FECHA	COMPONENTE	AMT (CM/S ²)	TG (S)
EVENTOS PRINCIPALES	CDAF	19/09/1985	N-S	61.62	2.88
			E-W	88.26	2.96
RÉPLICAS	CDAF	20/09/1985	N-S	40.14	2.28
			E-W	30.245	3.01

Debido a la ambigüedad del estudio hecho por Maldonado, se revisó nuevamente la base de datos de registros acelerográficos de la RAII-UNAM [80] y especialmente el evento sísmico ocurrido el 19 de septiembre del 2017, el cual se ocasiono debido a una falla intraplaca y su epicentro se ubicó a 9 km al Noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla, provocando una Magnitud de 7.1 (M=7.1); los daños ocasionados por este evento fueron: el deceso de 369 personas y fuertes pérdidas económicas. En este evento, se observó según la base de datos, que 73 estaciones de diferentes estados de la república registraron el evento principal del día 19 de septiembre, entre esas estaciones cuatro fueron de la Ciudad de México, en orden ascendente de aceleraciones son: “IDEI patio 5” que registro una aceleración máxima del suelo de 58.84 cm/s²; la siguiente estación fue “Tacubaya” que está ubicada en suelo firme y presento una aceleración máxima de 62.38 cm/s²; la otra estación fue “Centro cultural universitario Tlatelolco campo libre” con una aceleración de 85.53 cm/s²; y por último la estación “SCT B-2” fue la que presento una Aceleración mayor de las cuatro estaciones, con

una aceleración máxima de suelo de 97.68 cm/s^2 . Posteriormente al evento principal se presentaron réplicas, una de ellas a sólo 25 minutos después del Evento principal con magnitud de $M=4$ se originó a 7 kilómetros de distancia del epicentro del Evento principal, pero debido a la poca magnitud solo fue registrada por una estación (Raboso) en el estado de Puebla y por ninguna estación en la Ciudad de México. Cuatro días después (23 de septiembre del 2017) del evento principal se produjo otra posible réplica ubicada a 9 kilómetros al suroeste de CD. Ixtepec, Oaxaca; con una magnitud de $M=6.1$ de la cual 39 estaciones tomaron el registro, pero debido a la lejanía con la Ciudad de México (aproximadamente 700 kilómetros), sólo se registró en la estación de Tacubaya con una aceleración máxima del suelo de apenas 0.93 cm/s^2 ; días posteriores se siguieron presentando algunas réplicas, pero con magnitudes menores y ninguna estación de la ciudad de México pudo tener registro de ello.

Con todo lo anterior y debido a que no se registraron nuevas réplicas en suelo blando después del sismo de septiembre de 1985 en la estación central de abastos en 1985, es necesario generar secuencias sísmicas artificiales, a partir de este registro real. La relación de velocidades máximas del suelo entre un evento principal y la réplica es de gran importancia y será la base para el escalamiento de los movimientos sísmicos del presente estudio. Las secuencias reales registradas en la estación CDAF tiene una relación de velocidades de aproximadamente 0.35. Las características de las secuencias sísmicas de la estación CDAF se muestran en la tabla 3.1, en la cual se observa la estación, fecha del registro, componente o dirección, aceleración máxima del suelo y el periodo predominante; definido como el periodo predominante del movimiento sísmico como el periodo en el que se registra la velocidad máxima en el espectro de respuesta.

Se buscaron eventos sísmicos con periodos similares a esta secuencia sísmica real. Se encontraron cuatro eventos sísmicos que tienen periodos muy cercanos a los tres segundos similar al del evento principal, estos registros serán utilizados como eventos principales en las secuencias artificiales. También se encontraron cuatro registros con periodos cercanos a los 2.3 segundos, que son similares a la réplica del evento real. La tabla 3.2 muestra los detalles de estos registros utilizados.

Tabla 3.2. Características de los registros utilizados para la generación de las secuencias artificiales

#	No. Estación	Nombre	Magnitud (Ms)	AMT (cm/s ²)	VMT (cm/s)	T _g (s)
1	29	Villa del mar	6.9	46.5	15.3	2.96
2	29	Villa del mar	6.9	49.4	22.0	2.96
3	43	Jamaica	6.9	35.2	15.6	3.04
4	48	Rodolfo Menéndez	6.9	47.7	18.8	2.89
5	25	P.C.C. Superficie	6.9	42.5	15.4	2.3
6	56	Córdova	7.1	19.4	11.2	2.3
7	58	Liverpool	6.9	40	12.4	2.3
8	RB	Roma-B	7.1	25	4.8	2.3

Todos los registros usados fueron escalados. El criterio que se siguió en su escalado se basó en la velocidad máxima registrada en la historia de aceleración de la estación SCT componente EW, obtenida el 19 de septiembre de 1985 durante el sismo en la Ciudad de México D.F. El procedimiento fue el siguiente:

1. Se integraron los 8 registros para obtener su historia de velocidades, de esta se obtuvo la velocidad máxima registrada.
2. Se obtuvo del mismo modo la velocidad máxima registrada en la historia de aceleraciones de SCT, esta se dividió entre cada una de las velocidades máximas de los registros, obteniendo así 8 factores de escala.
3. Se multiplicaron las historias de velocidades por los factores de escala particulares.
4. Se derivaron las historias de velocidades por los factores de escala particulares.
5. Por último, se derivaron las historias de velocidades para obtener y volver a una historia de aceleraciones, es decir, el registro ya escalado.

La relación de velocidades evento principal-réplica en la secuencia real de la estación CDAF es 0.35. En este trabajo se utilizan 3 grupos de veintiocho secuencias cada uno, que se muestran a continuación:

1. Grupo (A): consiste en eventos principales con réplicas con un nivel de escalamiento del 100% ($\gamma=1.0$) de la velocidad máxima del movimiento de la SCT-1985 (61.414 cm/s). Relación de velocidades VMT_R/VMT_{EP} igual a 1.0.

2. Grupo (B): consiste en eventos principales con un nivel de escalamiento del 100% con réplicas con un nivel de escalamiento del 70% ($\gamma=0.7$) de la velocidad máxima del movimiento de la SCT-1985 (42.86 cm/s).
3. Grupo (C): consiste en eventos principales con un nivel de escalamiento del 100% con réplicas con un nivel de escalamiento del 35% ($\gamma=0.35$) de la velocidad máxima del movimiento de la SCT-1985 (21.4 cm/s).

Las secuencias sísmicas artificiales se obtuvieron considerando como evento principal los 4 movimiento sísmicos con periodo del suelo similar al de la secuencia real. Por otro lado, los 8 registros se utilizaron como réplica, excepto cuando el evento principal coincide con la réplica, como se ilustra en la figura 3.2.

		Réplicas							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Evento Principal	1	11	12	13	14	15	16	17	18
	2	21	22	23	24	25	26	27	28
	3	31	32	33	34	35	36	37	38
	4	41	42	43	44	45	46	47	48

Evento no utilizado.

Figura 3.2. Combinaciones utilizadas para generar la secuencias sísmicas artificiales.

La nomenclatura que se utiliza para representar las secuencias sísmicas artificiales es la siguiente: está conformada por la combinación de los registros que conforman las secuencias artificiales, por ejemplo, la secuencia artificial EP3R6 del grupo A, es secuencia formada por el evento principal tres y la réplica seis. Como pertenece al grupo A se sabe que la réplica seis se escaló al cien por ciento de la velocidad máxima del registro real. En la figura 3.3 se compara la combinación evento principal 1 y réplica 2 para los 3 grupos de registros escalados.

Una vez que las secuencias sísmicas están formadas se procede a los análisis dinámicos no lineales para la determinación de las demandas sísmicas de los S1GL para diferentes coeficientes de amortiguamiento ($\zeta=2\%$, $\zeta=5\%$ y $\zeta=10\%$) y diferentes niveles de ductilidad

($Q=2$, $Q=4$ y $Q=6$). Finalmente, es importante decir que los sismos de movimiento del suelo se seleccionaron de suelo blando porque como se observó en trabajos anteriores, la demanda energética en edificios ubicados en suelo blando es bastante mayor en comparación con estructuras ubicadas en suelo rígido. Sin embargo, nótese que diferentes propiedades del suelo afectarían los resultados de la presente investigación. En otras palabras, futuros estudios serán necesarios para proponer ecuaciones para calcular la relación de energía de estructuras no lineales ubicadas en suelos con diferentes propiedades. En el caso del suelo blando de la Ciudad de México es interesante observar el efecto de los movimientos de banda estrecha, en particular, notar que estructuras con periodo de vibración similar al periodo del suelo podrían recibir una gran cantidad de energía.

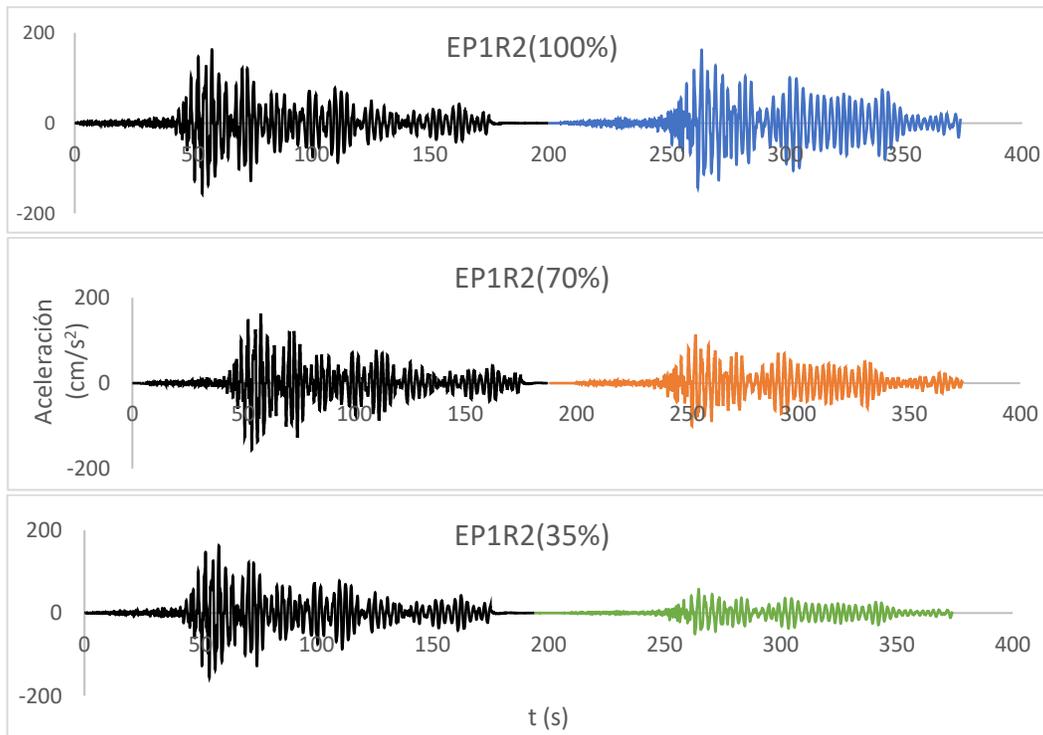


Figura 3.3 *Secuencia sísmica EP1R2 para los diferentes porcentajes de escalamiento*

La Figura 3.4, ilustra el espectro de Fourier para el conocido sismo de México de 1985 registrado en la Estación SCT. Observe la banda estrecha del espectro y la gran amplitud en los valores de frecuencia alrededor de 0,5.

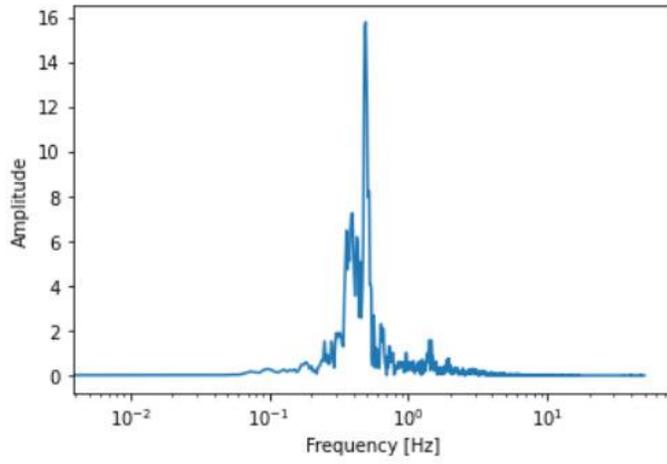


Figura 3.4. Espectro de fourier para el sismo de México de 1985 registrado sobre suelo blando (estación de la SCT).

4. RESULTADOS NUMÉRICOS PARA SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

Con el objeto de estudiar la influencia de las secuencias sísmicas en las demandas de energía y de proporcionar una expresión que determine la razón $E_H/E_{I\mu}$ que considere el efecto de las réplicas y diversos parámetros estructurales, se calcularon los espectros de respuesta y promedio de la E_I , $E_{I\mu}$ y E_H . Adicionalmente, se obtienen los espectros de la razón $E_H/E_{I\mu}$. Para calcular dichos espectros, se hicieron los análisis dinámicos de osciladores lineales y no lineales sometidos a tres grupos de secuencias sísmicas con diferentes intensidades de réplica ($\gamma=1.0$, $\gamma=0.7$ y $\gamma=0.35$) y distintas características estructurales, tales como: modelo estructural (Elastoplásticos, bilineal 3% y 5% de posfluencia), ductilidad ($Q=2$, $Q=4$ y $Q=6$) y coeficientes de amortiguamiento ($\xi=2\%$, $\xi=5\%$ y $\xi=10\%$). Nótese que todos los parámetros de energía están normalizados por la masa del sistema. Es importante decir que el método numérico utilizado para calcular la respuesta no lineal (espectros no lineales) corresponde al enfoque de Newmark, considerando un intervalo de 0.01 segundos y coeficientes $\gamma_N=1/2$ y $\beta_N=1/6$ (lineal aceleración; la N se utilizó para indicar Newmark). Además, en el caso de los espectros no lineales se utilizó un procedimiento iterativo para obtener la ductilidad deseada, donde la ductilidad se define como la relación del desplazamiento máximo dividido por el desplazamiento de fluencia.

Los resultados muestran que las intensidades de las réplicas si representan ser una influencia importante en las demandas de energía (E_I , $E_{I\mu}$ y E_H), ya que el valor de la respuesta crece a porcentajes importantes a medida que la intensidad de la réplica aumenta. Sin embargo, no sucede lo mismo en la razón $E_H/E_{I\mu}$, esto debido a que ambos valores ($E_{I\mu}$ y E_H) aumentan o disminuyen en la misma proporción; es decir, el espectro de la razón $E_H/E_{I\mu}$ que tiene 100 % de intensidad de réplica ($\gamma=1.0$) será muy similar al espectro de la intensidad de réplica ($\gamma=0.35$). Por otro lado, las características estructurales utilizadas también representaron una influencia importante en las demandas de energía, excepto en el modelo estructural, donde en los tres modelos utilizados (Elastoplásticos, bilineal 3% y 5% de posfluencia) la respuesta tanto de la demanda sísmica como de la razón $E_H/E_{I\mu}$ no represento ninguna variación importante entre los modelos, demostrando así que la posfluencia no represento una influencia significativa tanto en la demanda como en la razón $E_H/E_{I\mu}$.

4.1 ENERGÍA DE ENTRADA ELÁSTICA (E_I)

Iniciando con el estudio de la energía de entrada elástica, se calcularon veintiocho espectros de respuesta para cada uno de los tres grupos de registros sísmicos (veintiocho registros por grupo), y se consideraron los tres coeficientes de amortiguamiento previamente indicados. En total se obtuvieron 252 espectros de energía (28 espectros por grupo x 3 grupos x 3 coeficientes de amortiguamiento utilizado = 252 espectros). Del total de espectros, se obtuvieron los espectros promedio de las 28 secuencias sísmicas que conforman cada grupo; es decir, se obtuvieron un total de nueve espectros promedio (252 espectros /28 [número de registros]= 9 espectros promedio) que se muestran en la figura 4.1.a (espectros con un $\xi=2\%$), 4.1.b ($\xi=5\%$) y 4.1.c ($\xi=10\%$). En cada figura se encuentran tres espectros con diferentes intensidades de réplica ($\gamma=1.0$, $\gamma=0.7$ y $\gamma=0.35$) con el fin de mostrar su influencia en las demandas de energía.

Analizando la forma espectral, existe bastante similitud entre cada espectro, donde sobresalen 2 características importantes. La primera, sucede en periodos muy cortos ($T<0.5$ seg) y largos ($T>5.0$ seg) donde los valores de la E_I son iguales y con tendencia a cero para todos los espectros independientemente de la intensidad de réplica y el coeficiente de amortiguamiento; es decir, estructuras con periodos cortos o muy largos presentaran una demanda de energía muy baja independientemente de las características estructurales o del movimiento sísmico. El otro comportamiento se da en el umbral de periodos de 1.0 a 4.0 segundos, donde los espectros presentan una sola meseta máxima con distintos valores en la ordenada espectral que dependen directamente de la intensidad de la réplica o el coeficiente de amortiguamiento.

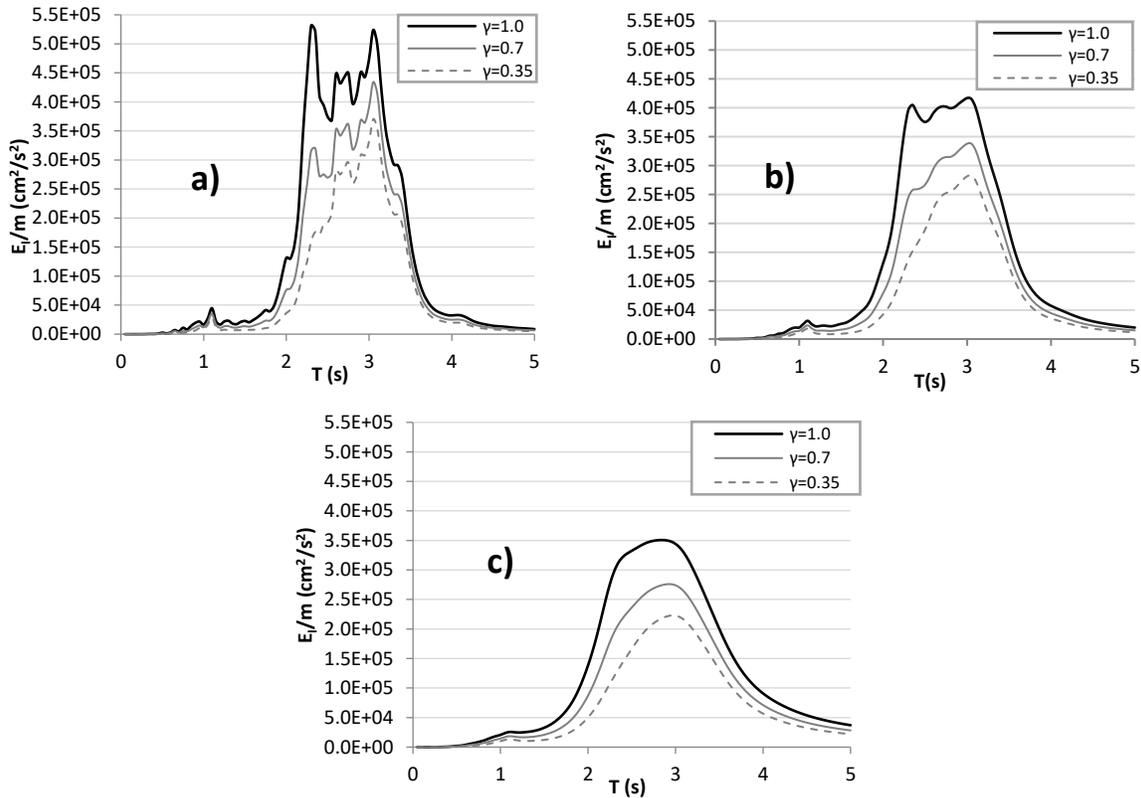


Figura 4.1. Espectros de E_I promedio de las 28 secuencias sísmicas utilizadas, para diferente magnitud de réplica; $\gamma= 1.0$, $\gamma= 0.7$ y $\gamma=0.35$ y diferentes coeficientes de amortiguamiento, a) $\zeta=2\%$, b) $\zeta=5\%$ y c) $\zeta=10\%$.

La intensidad de las réplicas, como era de esperarse aumenta el valor de la ordenada espectral a medida que su intensidad es mayor, es decir, las demanda de E_I son mayores a medida que existen réplicas o aumentan; esto no se debe pasar por alto ya que la mayoría de edificios estan en el intervalo de periodos de 1 a 4 segundos como se menciono en el apartado anterior. Por ejemplo, para la ordenada maxima del espectro del grupo de registros con $\gamma=1.0$ el valor es aproximadamente 50% mayor con respecto a la ordenada del grupo de $\gamma=0.35$, sin embargo, en los intervalos de periodos de 2 a 2.5 segundos la diferencia puede crecer hasta tres veces más independientemente del coeficiente de amortiguamiento utilizado, por ejemplo, para un $\zeta=5\%$ (figura 4.1.b) y un periodo de $T=2.4$ segundos, la E_I para un espectro con registros de $\gamma=1.0$ tiene un valor de $400,000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ mientras que para un espectro con registros de $\gamma=0.35$ alcanza el valor de $150,000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, evidenciando así la gran cantidad de

energía que pueden producir las secuencias sísmicas sobre edificios con ciertas características estructurales.

Por otro lado, el *coeficiente de amortiguamiento* también mostro gran influencia en la ordenada espectral, se observa que a medida que disminuye el coeficiente de amortiguamiento la demanda de E_I aumenta, por ejemplo, en la figura 4.1.a donde el valor de la ordenada máxima del espectro para un $\xi=2\%$ y una $\gamma=1.0$ tiene un valor de $530,000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ que es 1.5 veces mayor con respecto a la ordenada del espectro que tiene un $\xi=10\%$ y una $\gamma=1.0$ que tiene un valor de $330,000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ que se observa en la figura 4.1.c. Estos espectros se grafican en la figura 4.2 donde se muestran los tres espectros con diferentes coeficientes de amortiguamiento ($\xi=2\%$, $\xi=5\%$ y $\xi=10\%$) y con una intensidad de réplica del 100% ($\gamma=1.0$). En periodo largos ($T>3.5$ Segundos) el efecto del amortiguamiento es mayor y el comportamiento es inverso, por lo que a medida que el coeficiente de amortiguamiento es mayor la demanda de energía E_I también aumentará. Estos resultados son muy similares con los obtenidos en otras investigaciones que no consideran registros con secuencias sísmicas [18-20].

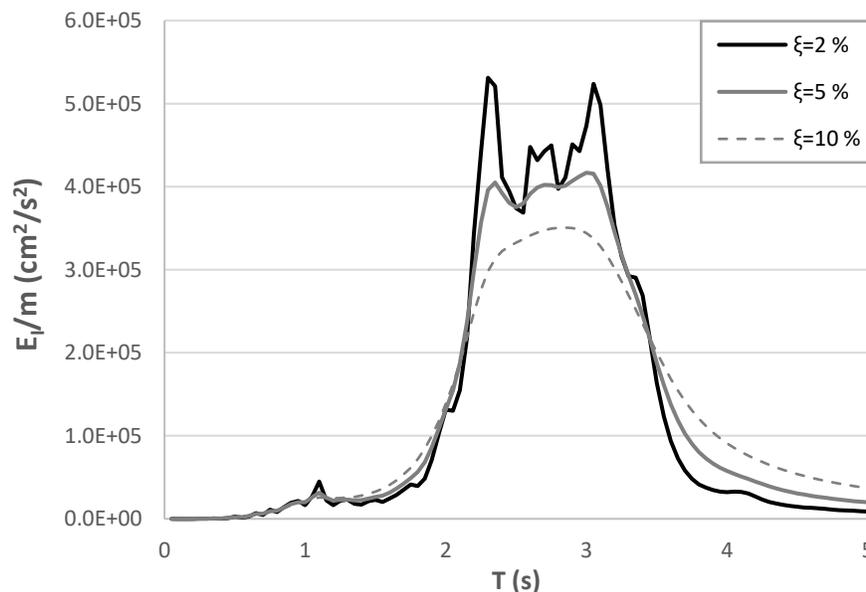


Figura 4.2. Espectro de E_I promedio de los 28 registros utilizados, para diferente amortiguamiento; $\xi=2\%$, $\xi=5\%$, y $\xi=10\%$. Con una magnitud de réplica de $\gamma=1.0$

Finalmente, la figura 4.3 muestra el gráfico promedio y mínimo-máximo de los espectros de energía de entrada para una relación de amortiguamiento del 5% y los tres niveles de intensidad para la réplica. Nótese que no existe una gran incertidumbre, además, se observa una forma espectral similar para las tres curvas. En particular, las grandes demandas de energía ocurren cuando el periodo estructural es muy similar al periodo del suelo. Esta conclusión es válida para todos los coeficientes de amortiguamiento e intensidad de la réplica.

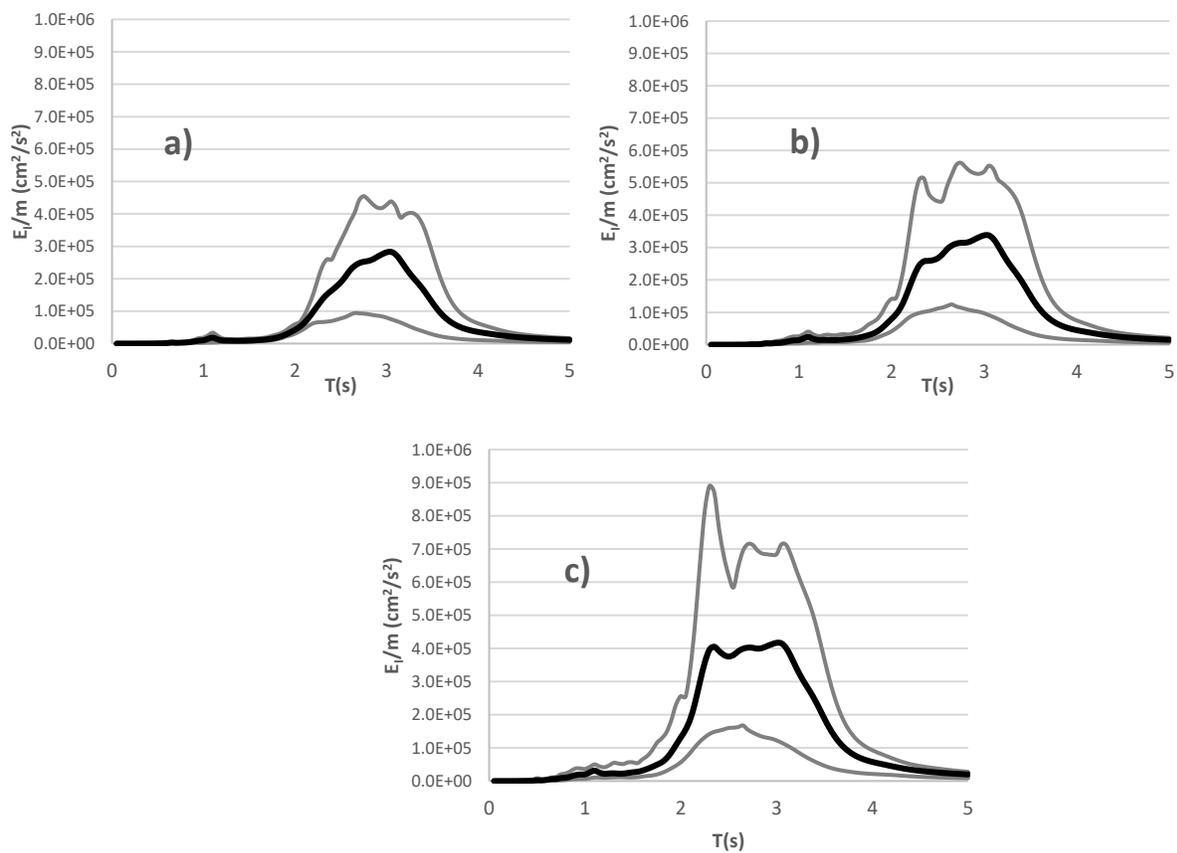


Figura 4.3. Espectros de E_I máximo, mínimo y promedio para diferentes magnitudes de réplicas (a) $\gamma=0.35$ (b) $\gamma=0.7$ y (c) $\gamma=1.0$; calculado a partir de los veintiocho espectros E_I con un coeficiente de amortiguamiento $\zeta=5\%$.

4.2 ENERGÍA DE ENTRADA INELASTICA ($E_{I\mu}$)

En todos los reglamentos de diseño se considera que las estructuras incursionaran en el rango inelástico sometidas al sismo del espectro de diseño, esto como ya se sabe es debido al elevado costo en que resultan los edificios diseñados en el rango elástico. Con este fin, se estudian las demandas de energía en el rango inelástico. Se calcularon los espectros para la $E_{I\mu}$, que se obtuvieron de hacer los análisis dinámicos utilizando los registros sísmicos para el mismo grupo de secuencias y las características estructurales previamente indicadas. Se calculó un total de 2,268 espectros de respuesta (28 espectros por grupo x 3 grupos de secuencias x 3 modelos histeréticos x 3 factores de ductilidad x 3 coeficientes de amortiguamiento = 2268 espectros de respuesta) y 81 espectros promedio (2268 espectros obtenidos / 28 [número de registros por grupo]= 81 espectros promedio). Del total de espectros promedio, se graficaron 39 que se muestran de la figura 4.4 a la 4.9.

Analizando su forma espectral, se observa de manera general que los espectros presentan una sola meseta máxima con un pico máximo independientemente de las intensidades de réplica y las características estructurales utilizadas, que en el rango inelástico se añaden ductilidad y modelo histeretico. Se muestra bastante similitud entre los espectros de $E_{I\mu}$ y los espectros de E_I ; es decir, que el S1GL incursione en el rango inelástico no significa un cambio en la forma espectral, pero si en la ordenada espectral, tal y como se muestra en la Figura 4.4, donde se muestra el espectro de E_I de la figura 4.1 (magnitud de réplica de $\gamma= 1.0$ y coeficiente de amortiguamiento de $\zeta=5\%$) en color azul y un espectro de $E_{I\mu}$ con características similares (magnitud de réplica de $\gamma= 1.0$, modelo histeretico: Elástoplastico, $Q=2$ y coeficiente de amortiguamiento de $\zeta=5\%$) en color negro; se puede apreciar que la forma entre ambos espectros es muy similar, sin embargo, su ordena espectral varía según el periodo. En el intervalo de periodos menores de 1.2 segundos ambas energías (E_I y $E_{I\mu}$) son muy similares y en periodos demasiado cortos ($T \ll 1$ seg.) y largos ($T \gg 5$ seg.) tienden a cero. Sin embargo, en los periodos pico, es decir, de 2 a 3.8 segundos, la energía elástica es mayor que la inelástica, esto debido a que el sistema estructural en el comportamiento elástico aumenta la fuerza elástica (restauradora) sin límite, donde el periodo del suelo es máximo y se presentan las mayores oscilaciones. El otro umbral se da en los intervalos de periodos de 1.2 a 2 segundos y 3.8 a 5 segundos donde la demanda de energía inelástica es mayor que la energía

elástica, se debe poner mayor atención en este aspecto, ya que en el rango de 1.2 a 2 segundos se presentan la mayoría de los edificios de mediana altura.

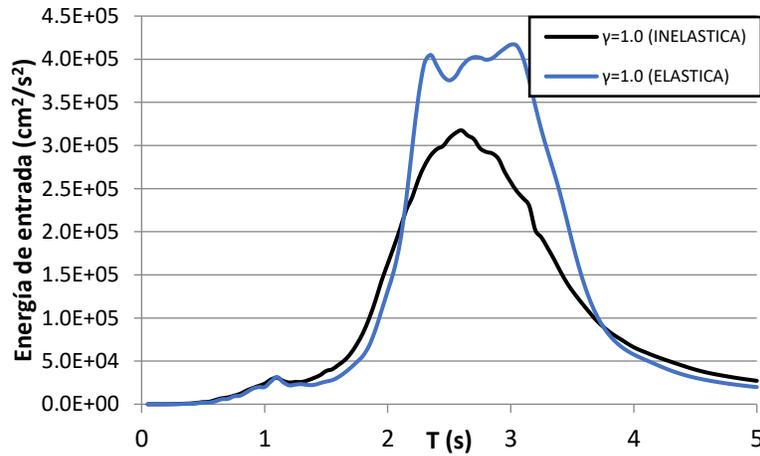


Figura 4.4. Espectro de E_I con magnitud de réplica de $\gamma=1.0$ y $\zeta=5\%$ [figura color azul] y Espectro de $E_{I\mu}$ con una magnitud de réplica de $\gamma=1.0$, para un $Q=2$, modelo elástoplastico, y un coeficiente de amortiguamiento del $\zeta=5\%$ [figura color negro].

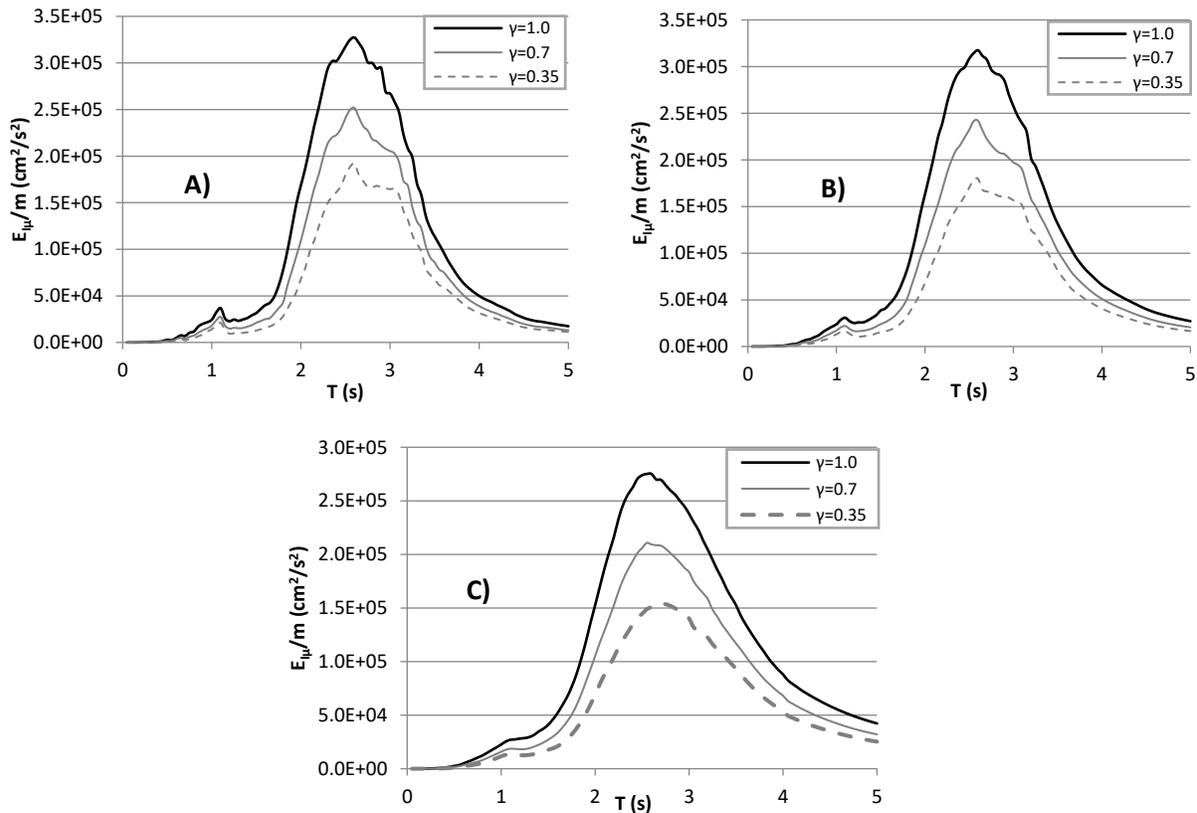


Figura 4.5. Espectros de $E_{I\mu}$ promedio de los 28 registros utilizados, para un $Q=2$, modelo elástoplastico, diferente magnitud de réplica $\gamma=1.0$, $\gamma=0.7$ y $\gamma=0.35$ y diferentes coeficientes de amortiguamiento del a) $\zeta=2\%$, b) $\zeta=5\%$ y c) $\zeta=10\%$.

Las gráficas muestran que la forma es muy similar y que la ordenada espectral varía de manera sustancial de acuerdo a las secuencias sísmicas y características estructurales. En la figura 4.5 se muestra el potencial de las réplicas; para ello, se presentan 3 figuras [A)= $\zeta=2\%$, B)= $\zeta=5\%$ y C)= $\zeta=10\%$] con tres espectros promedio con diferentes intensidades de réplica ($\gamma=1.0$, $\gamma=0.7$ y $\gamma=0.35$) cada figura. Se observa que las secuencias sísmicas juegan un papel muy importante, ya que se muestra una gran influencia en las demandas de energía sísmica al igual que en la E_I , la cantidad de energía aumenta a medida que la intensidad de la réplica también aumenta, esto es independientemente de las características estructurales. Por ejemplo, el valor de la $E_{I\mu}$ para intensidades de réplicas de $\gamma=1.0$ es casi el doble en su pico máximo con respecto al de los registros de las réplicas de $\gamma=0.35$. En los intervalos de periodos de 2 a 2.5 segundos la diferencia puede crecer hasta tres veces más independientemente del coeficiente de amortiguamiento utilizado, esto responde a lo

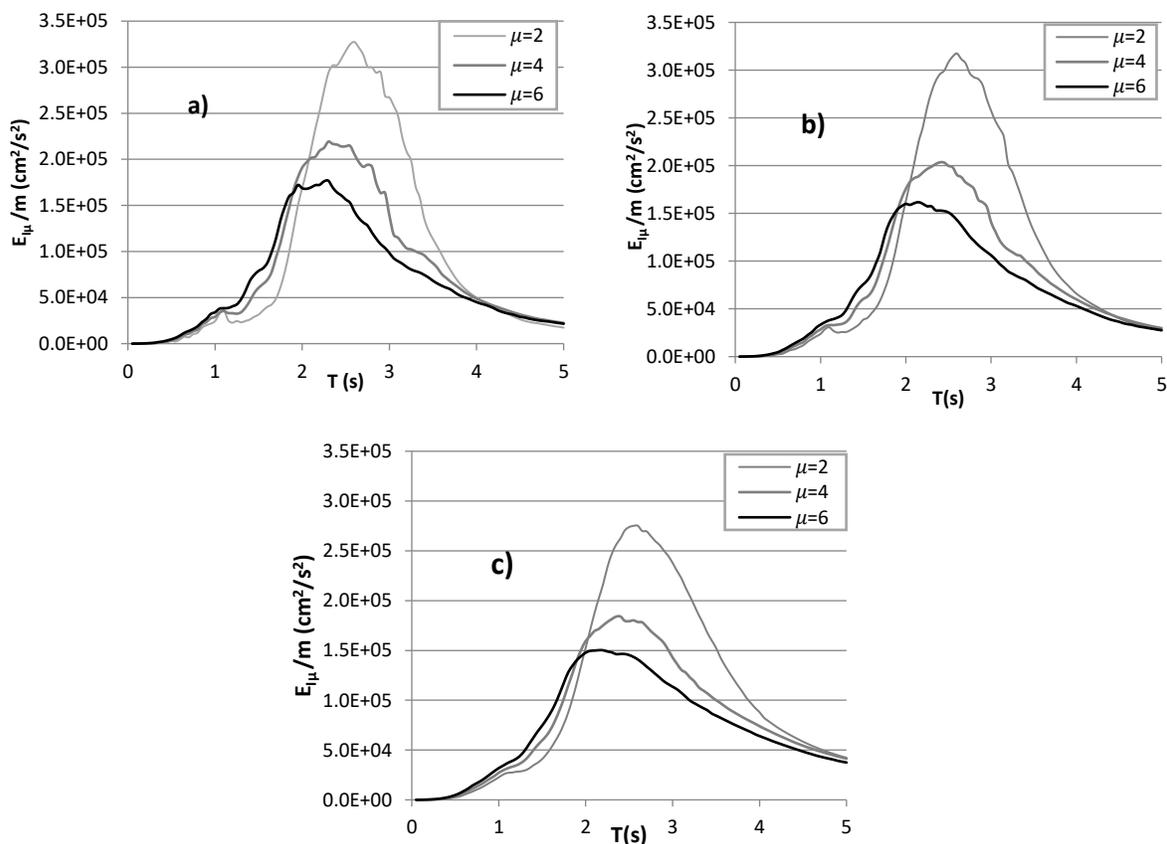


Figura 4.6. Espectros de $E_{I\mu}$ promedio de los 28 registros utilizados, para un $\gamma=1.0$, modelo elástoplastico, diferentes factores de ductilidad $\mu=2$, $\mu=4$ y $\mu=6$. diferentes coeficientes de amortiguamiento del a)= $\zeta=2\%$, b)= $\zeta=5\%$ y c)= $\zeta=10\%$.

planteado desde el inicio, que las demandas de energía aumentan con las secuencias sísmicas.

Las características estructurales también tienen un papel importante en la $E_{I\mu}$ en la ordenada espectral. Con la finalidad de analizar la ductilidad, en la figura 4.6 se graficaron tres espectros promedio con diferentes valores de ductilidad ($Q=2$, $Q=4$ y $Q=6$) en cada una de las figuras [A)= $\zeta=2\%$, B)= $\zeta=5\%$ y C)= $\zeta=10\%$]. La ductilidad presenta una gran influencia en las demandas de energía, donde sobresalen 2 comportamientos importantes; el primero, es en el intervalo de periodos de 1 a 2 segundos aproximadamente, donde a medida que el factor de ductilidad aumenta la $E_{I\mu}$ tendrá una mayor demanda; el segundo se muestra en el intervalo de periodos de 2 a 4 segundos, donde sucede lo opuesto, a medida que el factor de ductilidad aumenta la $E_{I\mu}$ disminuye; es decir, tendrá una menor demanda de energía en una proporción de casi el doble. Estas dos tendencias se muestran en cada una de las figuras (a, b y c) donde tenemos para cada figura el mismo modelo histérico (Elástoplastico) y la

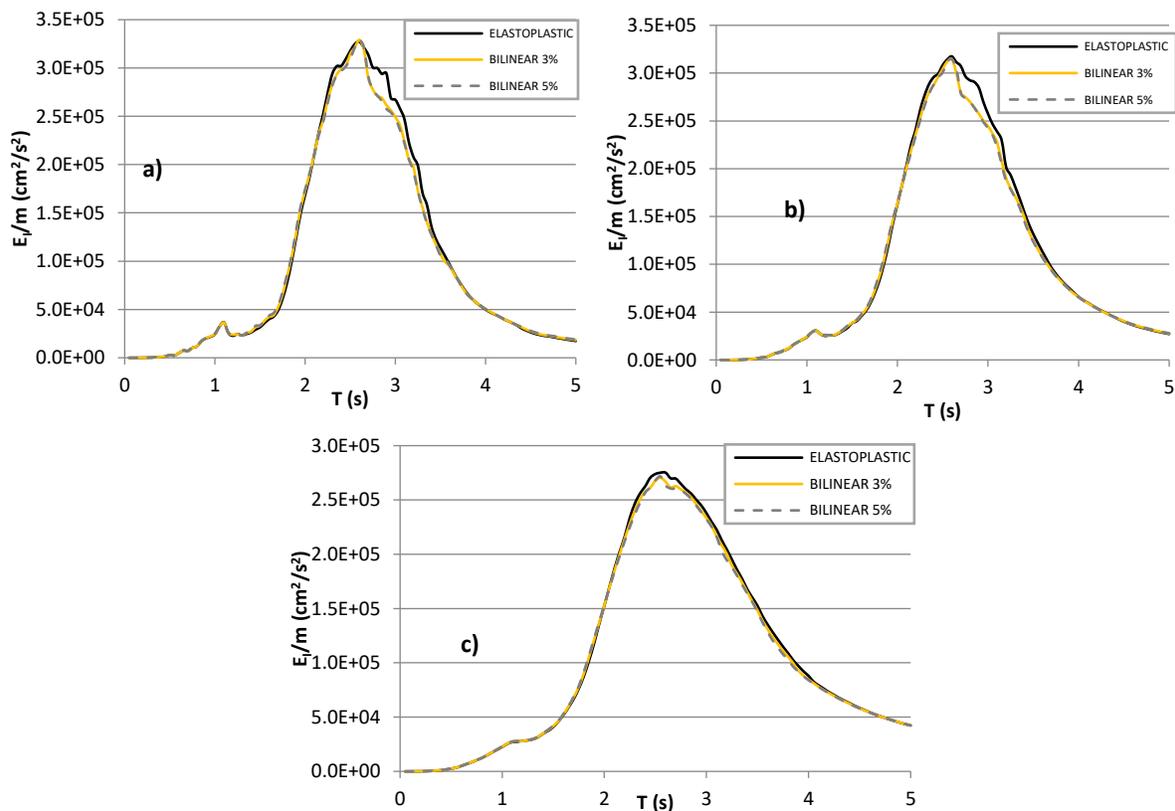


Figura 4.7. Espectro de $E_{I\mu}$ promedio para la misma magnitud de réplica; $\gamma=1.0$, ductilidad de $Q=2$, Modelos histéricos: Elastoplástico, Bilineal 3% y bilinear 5%. diferentes coeficientes de amortiguamiento del a)= $\zeta=2\%$, b)= $\zeta=5\%$ y c)= $\zeta=10\%$.

misma intensidad de réplica ($\gamma=1.0$), mostrando así que la variable de ductilidad juega un papel importante en las demandas de energía.

Por último, para observar el comportamiento de los modelos histeréticos, se presentaron tres espectros promedio con diferentes modelos de histeresis (elástoplastico, bilineal 3% y bilineal 5%) en cada figura de la 4.7.a, 4.7.b y 4.7.c, también para un coeficiente de amortiguamiento de $\xi=2\%$, $\xi=5\%$ y $\xi=10\%$. De las características estructurales utilizadas, el modelo histerético no represento ser un parámetro significativo en las demandas de energía, esto se puede ver con más detalle en los espectros de las figuras A, B y C, donde se observa en cada figura que los tres espectros para los modelos: elástoplastico, bilineal 3% y 5% de posfluencia son bastante similares en su forma y ordenada espectral, por lo que la posfluencia no represento ser un parámetro que influyera en las demandas de $E_{I\mu}$, por lo que es razonable no considerar la posfluencia en la expresión a proponer y estimar las demandas de energía con un modelo elastoplastico donde la posfluencia no es tomada en cuenta.

El otro parametro estructural analizado es el coeficiente de amortiguamiento, el cual mostró menor influencia en la demanda de $E_{I\mu}$ con respecto a la E_I , esto debido a que en el rango inelástico la E_H tiene un valor preponderante en la energía de entrada total (ver ecuación 2.16), en cambio en el rango elástico es igual a cero y la E_D al final del movimiento sísmico es igual a E_I . Aunque su influencia es menor en la $E_{I\mu}$, la caracterización es la misma que en

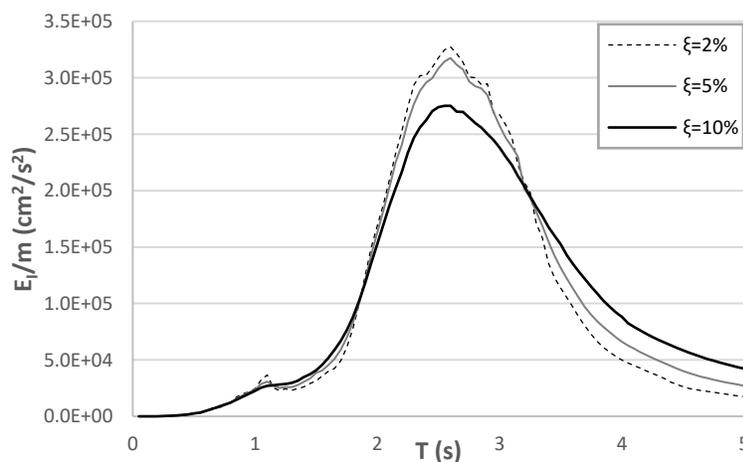


Figura 4.8. Espectro de $E_{I\mu}$ promedio de los 28 registros utilizados, para la misma magnitud de réplica; $\gamma=1.0$, ductilidad de $Q=2$, Modelo histerético: Elastoplástico. Amortiguamiento del $\xi=2\%$, 5% , 10% .

la E_I , el coeficiente de amortiguamiento a medida que disminuye el valor de la $E_{I\mu}$ aumenta, tal y como se aprecia en la figura 4.8, donde se presenta un $\xi=2\%$, $\xi=5\%$ y $\xi=10\%$ con la misma secuencia sísmica y los mismos parámetros estructurales.

Finalmente, los valores medios incluidos en la gráfica max-min se observan en la figura 4.9 para un valor de ductilidad de 4 y una relación de amortiguamiento del 5%.

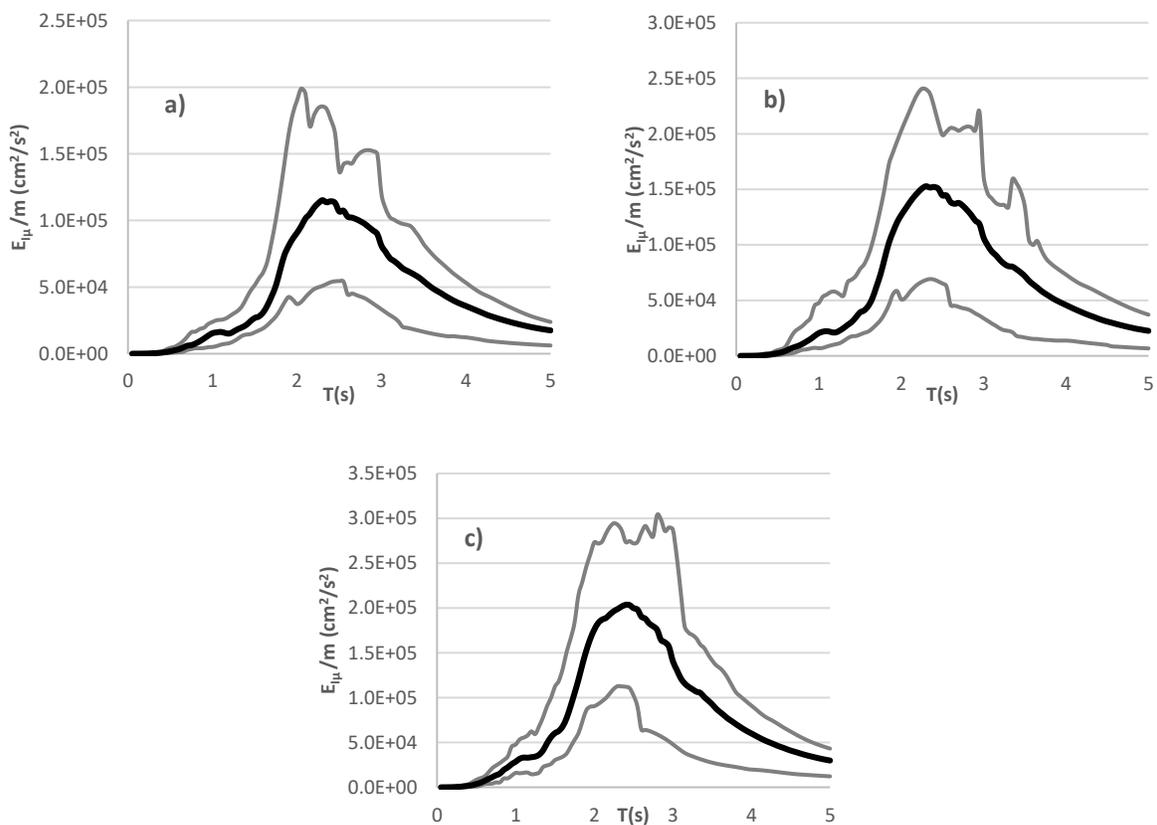


Figura 4.9. Espectros máximos, mínimo y promedio de $E_{I\mu}$ para diferentes magnitudes de réplicas (a) $\gamma=0.35$ (b) $\gamma=0.7$ y (c) $\gamma=1.0$; calculado a partir de los veintiocho espectros $E_{I\mu}$ con valores de ductilidad $\mu=4$, modelo elastoplástico y coeficiente de amortiguamiento $\zeta=5\%$.

4.3 ENERGÍA HISTERÉTICA (E_H)

Para obtener las relaciones de $E_H/E_{I\mu}$, se determina a continuación los espectros de energía histerética, lo que permitirá proponer la expresión para calcular las demandas de energía para S1GL con comportamiento inelástico. Como ya se mencionó, E_H es uno de los parámetros que sirven para estimar las demandas de energía en estructuras ya que está directamente relacionada con el daño acumulado y la fluencia de las estructuras y es por eso la importancia de su estudio. Para discutir los resultados de la E_H , al igual que la $E_{I\mu}$ se utilizaron los mismos parámetros para hacer los análisis sísmicos y se calcularon la misma cantidad de espectros; es decir, 2,268 espectros de respuesta y 81 espectros promedio. Del total de espectros promedio, se graficaron solamente 21 que se muestran de la figura 4.10 a la 4.14. De manera similar que la E_I y la $E_{I\mu}$, los espectros de la E_H mantienen la misma forma espectral, presentando una sola meseta máxima en el mismo intervalo de periodos. En periodos intermedios cercanos al suelo y en periodos cortos y largos la tendencia en la ordena espectral es cero. Como ya se vio tanto en la E_I y la $E_{I\mu}$, el valor de la ordenada espectral depende de las características estructurales de los edificios y de las secuencias sísmicas. Para E_H se observa de igual forma que existe una influencia importante tanto del efecto de las réplicas como de los parámetros estructurales del sistema inelástico.

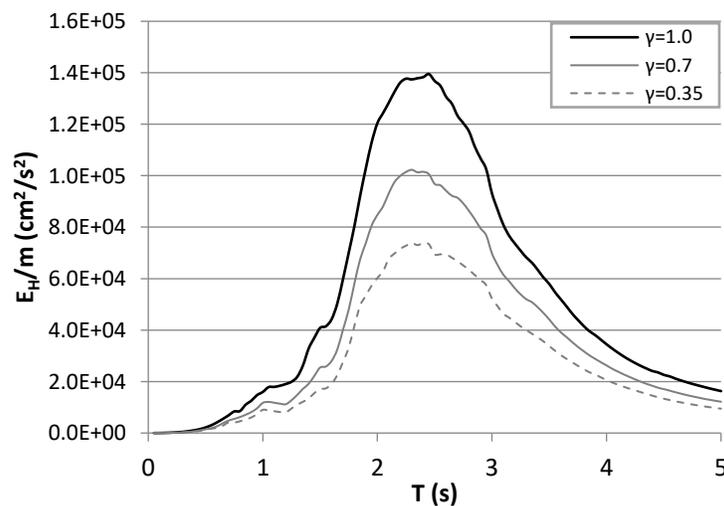


Figura 4.10. Espectros de energía histerética promedio, modelos histeréticos= Elástoplastico; Factor de ductilidad $Q=4$ magnitud de réplica: $\gamma=0.35$, $\gamma=0.7$ y $\gamma=1.0$. Amortiguamiento del $\zeta=5\%$.

El efecto de las réplicas, al igual que en la E_I y la $E_{I\mu}$, volvió a mostrar una gran influencia en las demandas de energía, aumentando la cantidad de energía sísmica a medida que la magnitud de la réplica también aumenta, independientemente de los parámetros estructurales utilizados, tal y como se observa en la figura 4.10. Por ejemplo, el valor de la E_H para réplicas con magnitud del $\gamma=1.0$ fue casi el doble con respecto al de los registros de las réplicas de magnitud del $\gamma=0.35$, comprobando así la gran cantidad de energía sísmica que puede producir una réplica importante en los edificios y de ahí la importancia de considerar las secuencias sísmicas en los futuros reglamentos y/o normas de construcción.

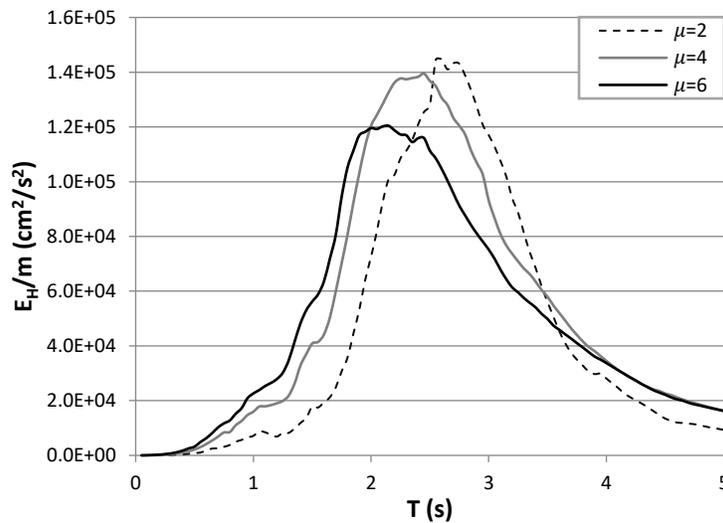


Figura 4.11. Espectros de Energía Histerética promedio de los 28 registros usados, modelos histéreticos= elastoplástico; Factor de ductilidad $\mu=2$, $\mu=4$ y $\mu=6$; $\gamma=1.0$. Amortiguamiento del $\zeta=5\%$.

En el caso de la ductilidad se observa el mismo efecto para espectros de energía histerética que para la $E_{I\mu}$, donde se presentan dos tendencias según el intervalo de periodos. La primera se da en el intervalo de periodos de 1 a 2 segundos y ahora también de 3.5 a 5 segundos, a medida que el factor de ductilidad aumenta la E_H tendrá una mayor demanda de energía. La segunda se muestra en el intervalo de periodos de 2.5 a 3.5 segundos, a medida que la ductilidad es mayor, la E_H tiende a reducirse, tal y como se muestran en la figura 4.11; mostrando así que la variable de ductilidad juega un papel importante en las demandas de energía histerética.

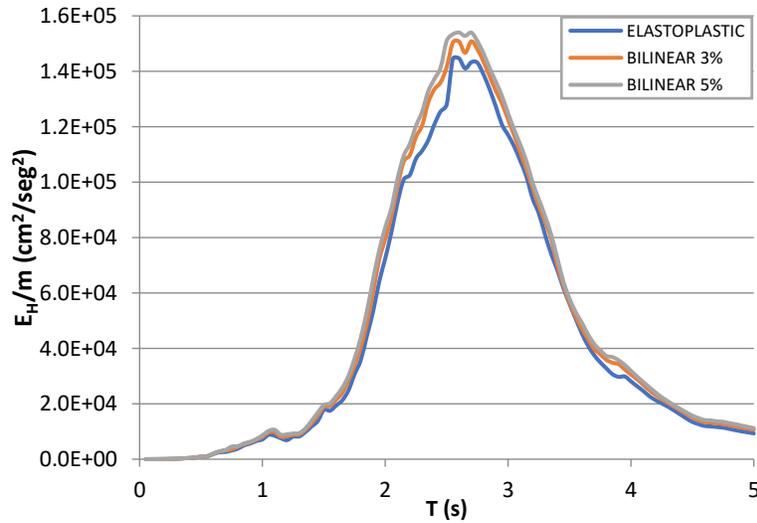


Figura 4.12. Espectros de energía Histerética promedio de los 28 registros usados, modelos histeréticos= Elastoplastico, Bilineal 3% y 5%; Factor de ductilidad $\mu=2$. $\gamma=1.0$ Amortiguamiento del $\zeta=5\%$.

El Modelo histórico no represento tener una influencia en los espectros de respuesta, tal y como se aprecia en la figura 4.12. Se observa que en los tres espectros promedio de E_H para los modelos: elástico-plástico, bilineal 3% y 5% de posfluencia son prácticamente iguales la forma y ordenadas espectrales, teniendo el mismo comportamiento con respecto a los espectros de $E_{I\mu}$. Se puede concluir en este estudio que la influencia de la rigidez post-fluencia en la evaluación de E_H es despreciable.

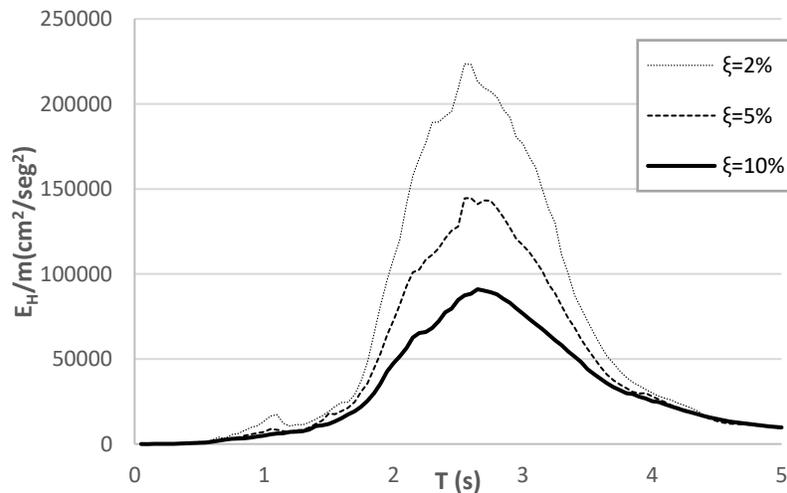


Figura 4.13. Espectros de energía Histerética promedio de los 28 registros usados, modelos histeréticos= elastoplastico; Factor de ductilidad $\mu=2$. magnitud de réplica: $\gamma=1.0$ Amortiguamiento del $\zeta=2\%$. $\zeta=5\%$ y $\zeta=10\%$.

El coeficiente de amortiguamiento por otro parte, mostro una influencia parecida a la E_I , a medida que el coeficiente aumenta la ordenada espectral disminuye, tal y como se muestra en la figura 4.13, donde la demanda de energía para un espectro del $\xi=2\%$ es más del doble con respecto a los espectros del $\xi=10\%$.

La figura 4.14 compara el promedio con los valores máximo y mínimo de la energía histerética normalizada para una ductilidad igual a 4 y $\xi=5\%$. Observe que existen menos incertidumbres en comparación con los resultados de la energía de entrada.

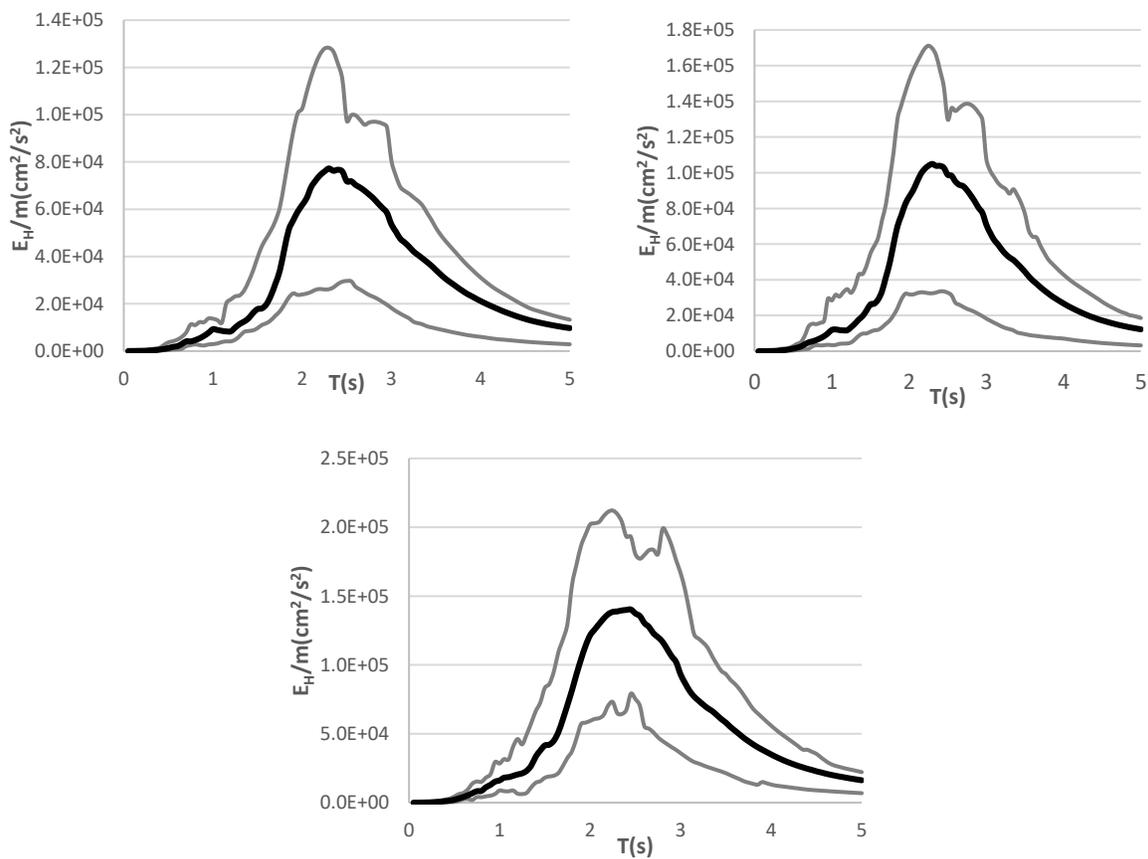


Figure 4.14. Espectros maximos, minimos y promedio de E_H para diferentes magnitudes de replica (a) $\gamma=0.35$ (b) $\gamma= 0.7$ y (c) $\gamma= 1.0$; calculado de las veintiocho espectros de E_H con una ductilidad $\mu=4$, modelo elástoplastico y coeficiente de amortiguamiento del $\zeta=5\%$.

4.4 RELACIÓN DE $E_H/E_{I\mu}$

Una vez obtenidos los espectros de $E_{I\mu}$ y E_H se procede a calcular los espectros de la razón de $E_H/E_{I\mu}$, que servirán para proponer expresiones simplificadas que calculen las relaciones de $E_H/E_{I\mu}$ en estructuras no lineales teniendo en cuenta secuencias sísmicas con diferentes intensidades de réplica y ciertos parámetros estructurales para cualquier sistema de un grado de libertad. Una vez obtenidas las expresiones, se podrán calcular las demandas de energía histerética a través de calcular el espectro de energía de entrada inelástica $E_{I\mu}$ y la razón de $E_H/E_{I\mu}$ de las fórmulas propuestas en este estudio. En total fueron calculados 2,268 espectros de respuesta y 81 espectros promedio calculados de $E_H/E_{I\mu}$, por motivos de espacio se mostrarán únicamente 24 espectros que se presentan de la figura 4.15 a la 4.19, donde las unidades de la ordenada espectral en los espectros de $E_H/E_{I\mu}$ son adimensionales y en el eje de las abscisas es el periodo estructural en segundos.

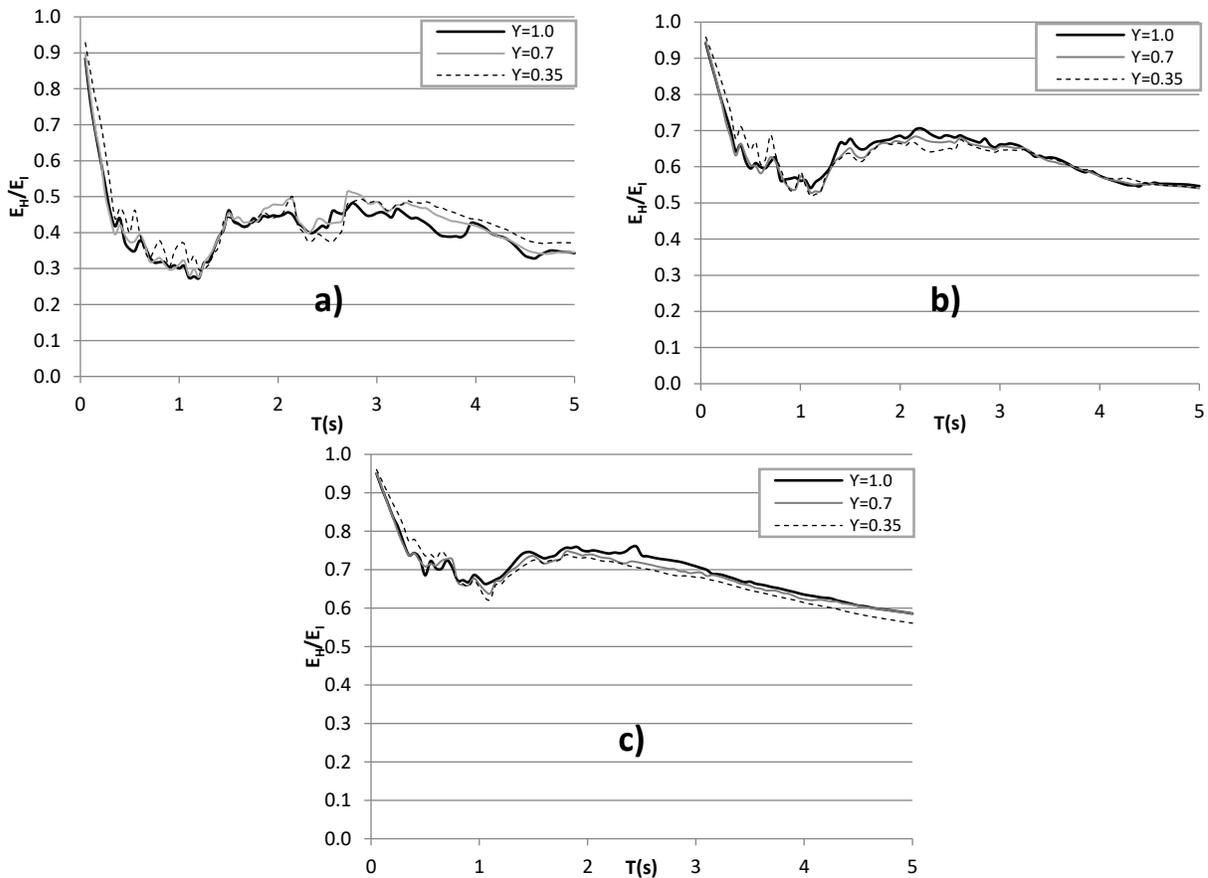


Figura 4.15. Espectro promedio de $E_H/E_{I\mu}$ de los 28 registros usados, modelo histéretico= Elastoplástico, Factor de ductilidad a) $\mu=2$, b) $\mu=4$ y c) $\mu=6$. Intensidades de réplica $\gamma=1.0$, $\gamma=0.7$ y $\gamma=0.35$. Amortiguamiento del $\zeta=5\%$.

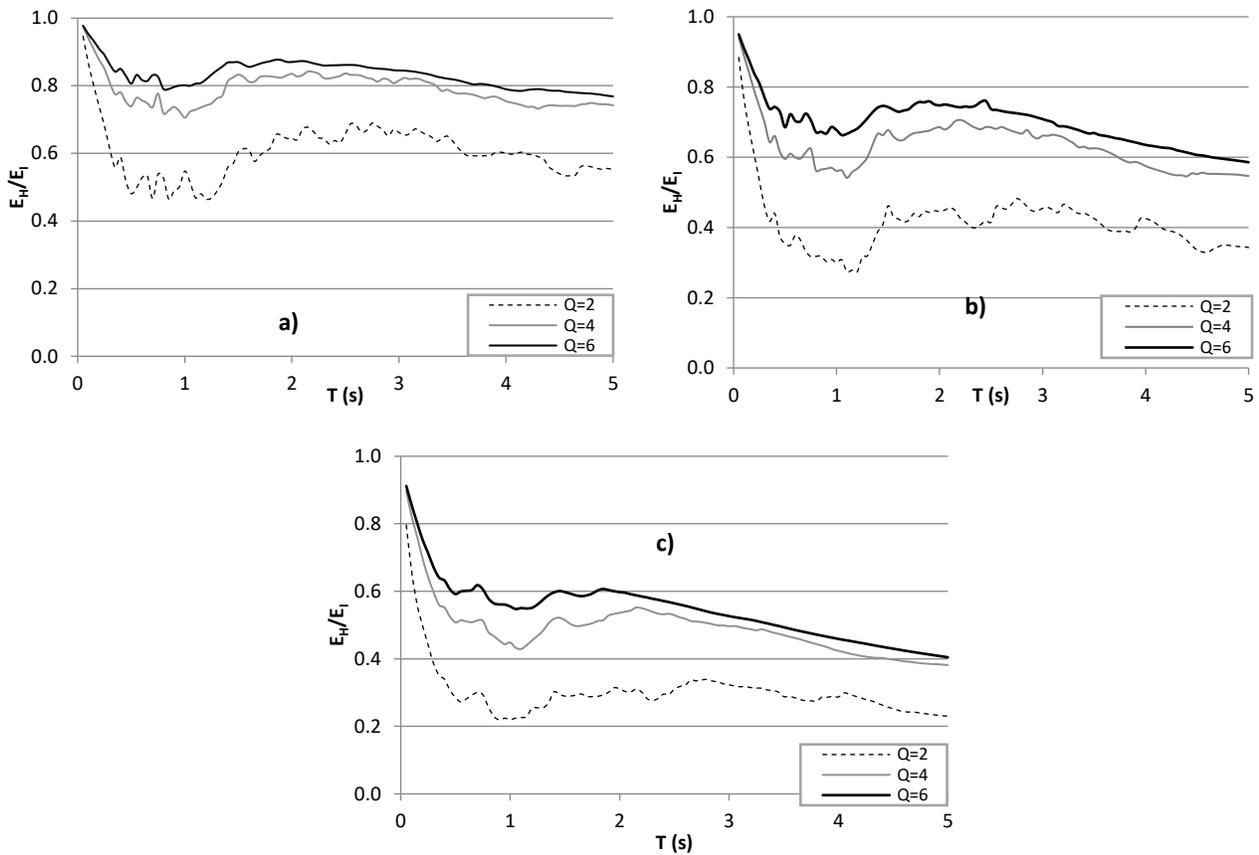


Figura 4.16. Espectro promedio de E_H/E_I de los 28 registros usados, modelo histéretico= ELASTOPLASTICO, Factor de ductilidad a) $\zeta=2\%$, b) $\zeta=5\%$ y c) $\zeta=10\%$. $\gamma=1.0$,

Se observa una forma muy similar en todos los espectros, que es una tendencia casi constante a lo largo de toda la abscisa; independientemente de las intensidades de réplica o las características estructurales utilizadas. Estos resultados son muy similares a los encontrados en la mayoría de estudios donde no se considera el efecto de las réplicas [17-18]. Por otro lado, todos los valores de la ordenada espectral son menores que la unidad. Las fronteras máximas y mínimas de estas ordenadas rondan aproximadamente entre 0.9 y 0.2, esto según las características estructurales utilizadas; valores muy parecidos encontraron de igual manera otros autores [78-79]. Para periodos muy bajos ($T < 0.2$ Seg) la respuesta en la razón de E_H/E_I toma valores muy cercanos la unidad.

En la figura 4.15.a, 4.15.b y 4.15.c se utilizó una ductilidad de $Q=2$, $Q=4$ y $Q=6$ en el mismo orden. En cada una de estas figuras se considera un modelo histéretico elástoplastico, un

coeficiente de amortiguamiento del 5 por ciento ($\zeta=5\%$) y se presentan 3 espectros promedio de $E_H/E_{I\mu}$ para diferentes intensidades de réplica ($\gamma=1.0$, $\gamma=0.7$ y $\gamma=0.35$). Se observa de manera general que para los tres espectros de cada figura, la forma y los valores de la ordenada espectral son prácticamente los mismo en todo el intervalo del eje de las abscisas, lo que indica poca o nula influencia de la réplica en la razón de $E_H/E_{I\mu}$. El hecho de que las intensidades de las réplicas no influyan en la respuesta de $E_H/E_{I\mu}$ no significa que no deben ser tomadas en cuenta, ya que como se observó previamente en la respuesta de la $E_{I\mu}$ y E_H su influencia es bastante significativa (ver figura 4.5 y 4.10). La ventaja que ofrece obtener la relación de energía es que es independiente del nivel de la intensidad de la réplica.

En cuanto a las características estructurales, en la figura 4.17, se trazan tres espectros para los modelos: elastoplástico, bilineal 3% y 5% de posfluencia, con el fin de observar como influye el modelo histérico en la respuesta de $E_H/E_{I\mu}$. Se puede ver que en los tres espectros se mantiene la misma forma casi lineal y los valores de la ordenada espectral presentan valores muy similares entre sí a lo largo de todo el intervalo de periodos, demostrando poca o nula influencia de la posfluencia en la respuesta de la razón $E_H/E_{I\mu}$. Por lo que no considerar en la expresión a proponer el parámetro de posfluencia no se está de lado de la inseguridad, es decir, considerar un modelo elastoplástico tendría valores muy similares a los obtenidos por modelos bilineales.

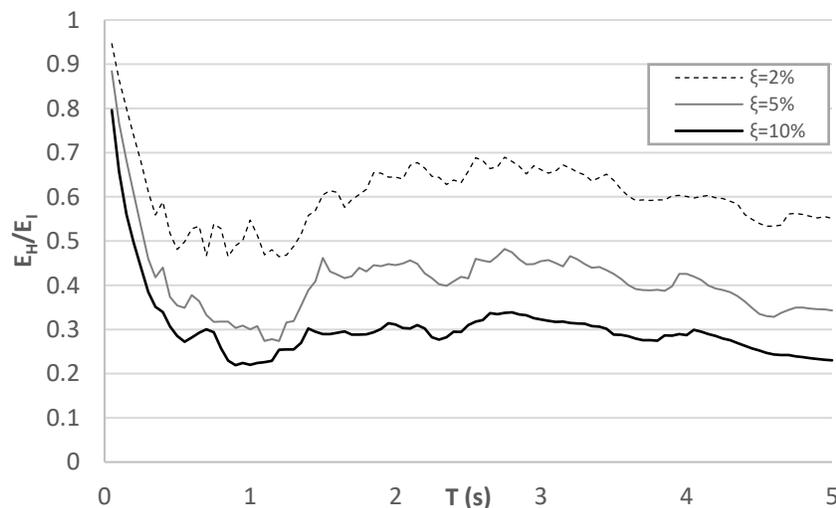


Figura 4.17. Espectro promedio de $E_H/E_{I\mu}$ de los 28 registros usados, modelo histérico= Elastoplástico; Factor de ductilidad $Q=2$. $\gamma=1.0$. Amortiguamiento del $\zeta=2\%$, $\zeta=5\%$ y $\zeta=10\%$.

En cuanto a la influencia de la ductilidad sobre la respuesta de $E_H/E_{I\mu}$ se observa la misma forma casi lineal a lo largo de todo el intervalo de periodos; sin embargo, la ordenada si varía de acuerdo con el parámetro de ductilidad utilizado, tal y como se observan en la figura 13 y 15. La respuesta de $E_H/E_{I\mu}$ aumenta a medida que la ductilidad aumenta. Por ejemplo, en la figura 13.a se observa que para una ductilidad de $Q=2$ los valores de la razón rondan entre 0.3 y 0.5, mientras que para una ductilidad de $Q=6$ los valores están entre 0.6 y 0.8 como se observan en la figura 13.c. Estos resultados se observan mejor en la figura 4.16 donde se muestran tres espectros con ductilidades de $Q=2$, $Q=4$ y $Q=6$. Aquí se observa que la respuesta varía según la variable de ductilidad, mostrando ser un parámetro de ajuste para la nueva expresión que se propondrá a continuación para estimar la relación de energía en osciladores inelásticos sometidos a secuencias sísmicas.

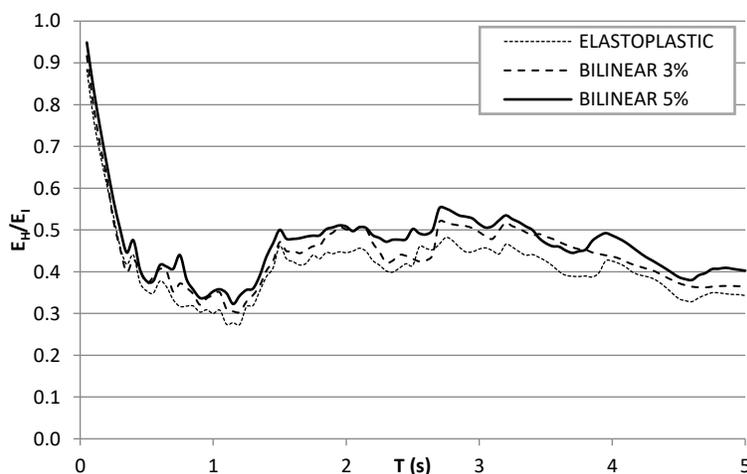


Figura 4.18. Espectro promedio de $E_H/E_{I\mu}$ de los 28 registros usados, modelo histéretico= Elastoplástico, Bilineal (3%) y Bilineal (5%); Factor de ductilidad $Q=2$. $\gamma=1.0$ Amortiguamiento del $\zeta=5\%$.

Analizaremos ahora con detalle la influencia de la ductilidad sobre la respuesta $E_H/E_{I\mu}$. En cuanto a su forma como se dijo en párrafos anteriores su influencia no es muy significativa; sin embargo, en cuanto a su respuesta, la ordenada espectral varía de acuerdo con el parámetro de ductilidad. A medida que aumenta la ductilidad, la respuesta de $E_H/E_{I\mu}$ también aumenta y viceversa. Por ejemplo, en la figura 4.15.a se observa que para una ductilidad de $Q=2$ los valores de la razón rondan entre 0.3 y 0.5, mientras que para una ductilidad de $Q=6$

los valores están entre 0.6 y 0.8 (ver figura 4.15.c). Estos resultados se observan mejor en cada una de las figuras 4.16.a, 4.16.b y 4.16.c donde se muestran tres espectros promedio con las diferentes ductilidades utilizadas ($Q=2$, $Q=4$ y $Q=6$). Se observa que, aunque la forma espectral es la misma, la respuesta varía según la variable de ductilidad, que será un parámetro de ajuste para las nuevas expresiones que se propondrán más adelante.

El último parámetro analizado es el coeficiente de amortiguamiento. En la figura 4.17 se observan tres espectros para los tres coeficientes de $\xi=2\%$, $\xi=5\%$ y $\xi=10\%$, estos espectros son calculados para el mismo modelo histérico (elastoplástico), la misma ductilidad ($Q=2$) y el mismo grupo de registros de $\gamma=1.0$. Se puede apreciar que la tendencia es casi lineal en todo el eje de las abscisas; sin embargo, el valor de la respuesta es dependiente del coeficiente de amortiguamiento. Se observa que la ordenada espectral disminuye a medida que el coeficiente de amortiguamiento aumenta. Por lo que es adecuado como en la mayoría de los reglamentos de diseño sísmico considerar un coeficiente de amortiguamiento $\xi=5\%$ para proponer expresiones que estimen la relación de energía en osciladores no lineales sometidos a secuencias sísmicas. Finalmente, la figura 4.19 compara el promedio con los valores máximo y mínimo de la relación de energía para una ductilidad igual a 4, $\xi=5\%$ y el modelo histérico elastoplástico. Nótese que se observan menos incertidumbres en comparación con la estimación de las demandas de energía sísmica.

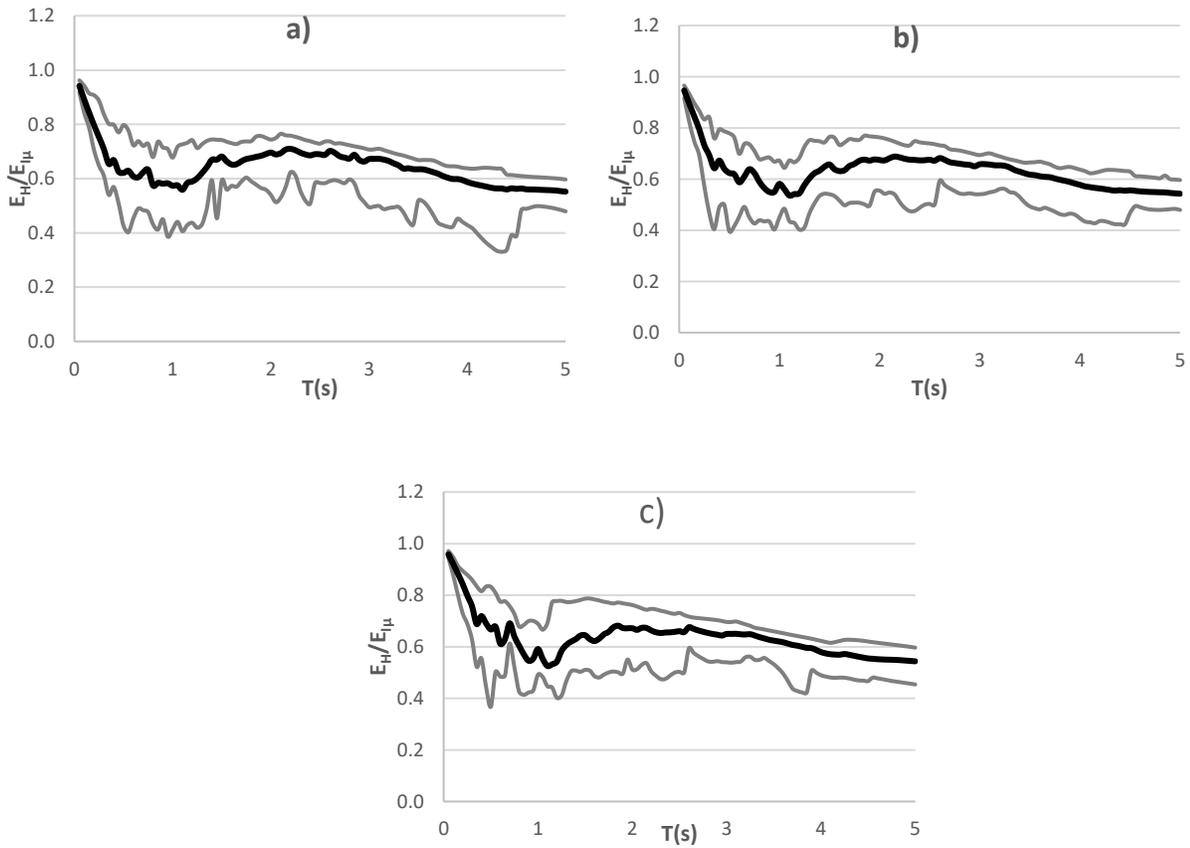


Figura 4.19. Espectros de máximo, mínimo y promedio de $E_H/E_{I\mu}$ para diferentes magnitudes de réplicas (a) $\gamma=0.35$ (b) $\gamma=0.7$ y (c) $\gamma=1.0$; con valores de ductilidad $\mu=4$, modelo elastoplástico y coeficiente de amortiguamiento $\zeta=5\%$.

4.5 EXPRESIÓN PROPUESTA

Para proponer la expresión sobre la razón $E_H/E_{I\mu}$, se tomará en cuenta solamente aquellos parámetros que fueron de influencia tanto en la forma como en la ordenada espectral. El no considerar en la nueva expresión aquellos parámetros que no son relevantes conlleva a una reducción de términos en la fórmula y por ende un ahorro del tiempo en el trabajo del cálculo de la respuesta. Iniciando con las intensidades de las réplicas, se observa que no influyeron en la respuesta de la razón $E_H/E_{I\mu}$ (ver figura 4.15), por lo que se llega a la conclusión de no considerarlas en la expresión, ya que no tendría sentido expresar la fórmula en términos de la intensidad de réplica si se obtendrá el mismo resultado. De la misma manera sucede con el modelo histerético, ya que no demostró ninguna particularidad diferente en la respuesta de $E_H/E_{I\mu}$ entre un modelo utilizado y otro (ver figura 4.18), concluyendo así que la posfluencia no tiene dominio en la respuesta para cualquier intervalo de periodo; por lo tanto, se puede pensar del lado de la seguridad en expresar la fórmula para modelos elastoplásticos, a fin de no considerar la posfluencia en los cálculos de la respuesta.

Por el contrario, al modelo histerético y la intensidad de réplica, el coeficiente de amortiguamiento (ξ) si mostro una influencia significativa en los valores de la razón de $E_H/E_{I\mu}$ (ver figura 4.17); sin embargo, gran parte de las estructuras están modeladas con un coeficiente de amortiguamiento del $\xi=5\%$, por lo que expresar la fórmula en términos de un coeficiente del 5% conlleva a una reducción importante de términos en la expresión y por consecuencia un ahorro en el cálculo del tiempo. Por otro lado, la ductilidad (Q) como se esperaba, demostró una gran influencia en la respuesta en todo el intervalo de periodos (ver figura 4.15 y 4.16), por lo que la expresión estará directamente relacionada con el valor de la ductilidad, que es uno de los parámetros más importantes para el diseño sismorresistente de edificios.

Dado la caracterización de los espectros obtenidos y los parámetros que fueron de influencia en la respuesta de $E_H/E_{I\mu}$, se obtuvo la siguiente expresión que se muestra en la ecuación número 15, la cual está en términos exponenciales y logarítmicos. La fórmula tiene seis constantes ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_5$ y θ_6) para tres diferentes factores de ductilidad ($Q=2, Q=4$ y $Q=6$) que se muestran en la tabla 4.1 y como variable independiente el periodo (T , seg). Esta expresión es propuesta para estructuras con un modelo histerético Elastoplástico y un

coeficiente de amortiguamiento del $\xi=5\%$ que representa a la mayoría de las estructuras modeladas. Con el fin de observar el desempeño de esta nueva expresión, se calculan algunos espectros los cuales se compararán con los espectros obtenidos en la sección anterior que tengan los mismos parámetros estructurales; esta comparación se muestra en la figura 4.20 y 4.21.

$$\frac{E_H}{E_I} = \left[\frac{1}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_2 \cdot T^{\theta_3}} \right] + \theta_4 \cdot (1/T) \cdot \exp[\theta_5 \cdot \{\ln T + \theta_6\}^2] \quad (15)$$

Con el fin de observar el desempeño de esta nueva expresión, se calculan algunos espectros con esta expresión y se compararán con los espectros obtenidos en la sección anterior que tengan los mismos parámetros estructurales y registros sísmicos; esta comparación se muestra en la figura 4.20 y 4.21.

Tabla 4.1. Valores de las constantes θ_1 a θ_6 para el modelo elástoplastico, con una magnitud de réplica de $\gamma=1.0$ y un coeficiente de amortiguamiento de $\zeta=5\%$.

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
Q=2	2.3	50	1.2	-0.15	-5	-0.005
Q=4	1.4	85	1.1	-0.15	-5	-0.005
Q=6	1.3	100	1.1	-0.15	-5	-0.005

En la figura 4.20, con la intención de observar que tanto la intensidad de las réplicas como el modelo histérico no influyen en el resultado de la respuesta, se presentan tres figuras (A, B y C) que contienen cuatro espectros cada una de ellas, de los cuatro espectros, un espectro es obtenido por la ecuación 15 y tres espectros fueron obtenidos de los análisis sísmicos (ver sección anterior) para diferentes intensidades de réplica ($\gamma=1.0$, $\gamma=0.7$ y $\gamma=0.35$). En cada figura se hace referencia al modelo histérico utilizado, por ejemplo, la figura “a” hace referencia al modelo Elastoplastico, la figura “b” al bilineal 3% y “c” al bilineal con 5% de posfluencia. Los espectros empíricos tienen los siguientes parámetros: diferentes magnitudes de réplica, un coeficiente de amortiguamiento del $\zeta=5\%$, un factor de ductilidad de $Q=2$ y variando el modelo histérico según la figura (A, B y C). Por parte de los espectros obtenidos por la ecuación número 15, en la tabla 4.1 se muestran los valores de las seis constantes para una ductilidad de $Q=2$. Se observa en las tres figuras que tanto los espectros empíricos de E_H/E_{Iu} (líneas discontinuas color negro) como el espectro obtenido por la ecuación 15 (línea

continua color negro) muestra bastante similitud en su forma espectral en todo el rango de periodos, es decir, de 0 a 5 segundos. En la ordenada espectral, los valores de $E_H/E_{I\mu}$ son muy aproximados, de error minimo.

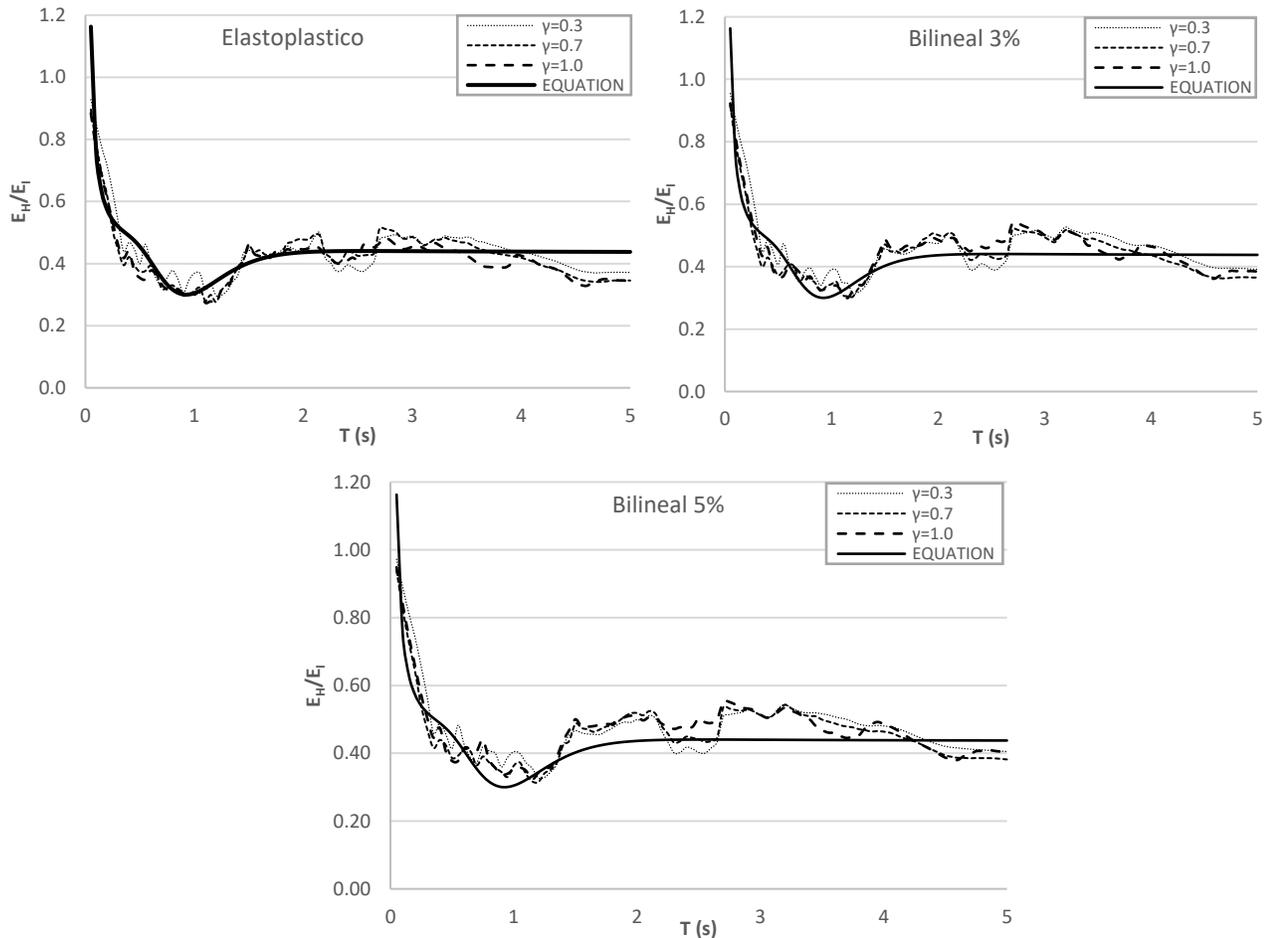


Figura 4.20. Tres espectros promedios de $E_H/ E_{I\mu}$ ($\gamma=1.0$, $\gamma=0.7$, $\gamma=0.35$), modelo histérico= ELASTOPLASTICO, Factor de ductilidad $Q=2$ y Amortiguamiento del $\zeta=5\%$ [figura 4.15] y el espectro de $E_H/ E_{I\mu}$ (color negro) de la ecuación 15.

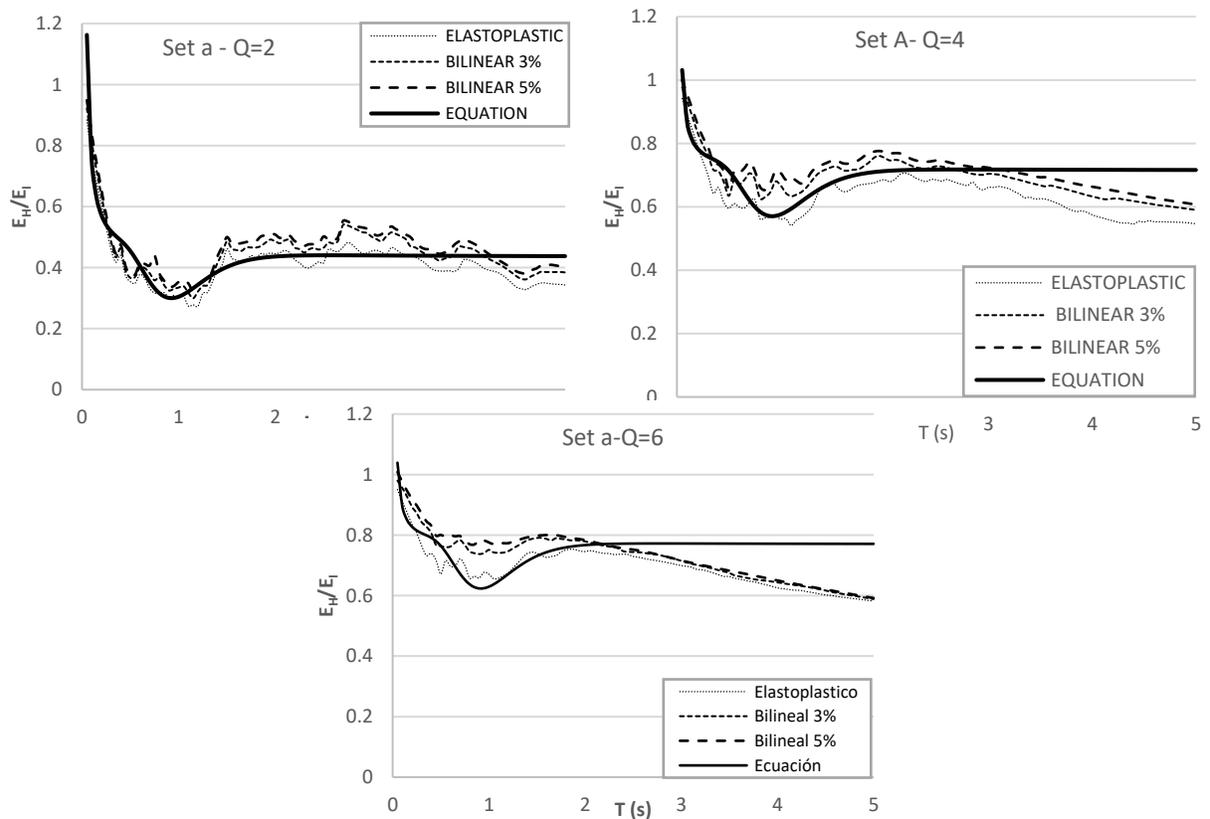


Figura 4.21. tres espectros promedios de $E_H/E_I\mu$; modelo histéretico= (ELASTOPLASTICO, BILINEAL 3% y BILINEAL 5%), magnitud de la réplica ($\gamma=0.7$), Factor de ductilidad $Q=4$ y Amortiguamiento del $\zeta=5\%$ y el espectro de $E_H/E_I\mu$ (color negro) de la ecuación 15.

En la figura 4.21, con la intención de observar la respuesta de la razón $E_H/E_I\mu$ para distintos factores de ductilidad calculados por la ecuación 15, se presentan tres figuras (A, B y C) que contienen cuatro espectros cada una de ellas, de los cuatro espectros, un espectro es obtenido por la ecuación 15 y tres espectros fueron obtenidos de los análisis sísmicos (ver sección anterior) para diferentes modelos histéreticos (Elastoplastico, bilineal 3% y 5% de posfluencia). En cada figura se hace referencia a la ductilidad utilizada, por ejemplo, la figura “A” hace referencia a un factor igual a $Q=2$, la figura “B” a un $Q=4$ y la figura “C” a un $Q=6$. Los espectros empíricos tienen los siguientes parámetros: magnitud de réplica $\gamma=1.0$, un coeficiente de amortiguamiento del $\zeta=5\%$, diferentes modelos histéreticos y variando el factor de ductilidad según la figura (A, B y C). Por parte de los espectros obtenidos por la ecuación número 15, en la tabla 4.1 se muestran los valores de las seis constantes para los

factores de ductilidad utilizados. Se observa en las tres figuras que tanto los espectros empiricos de $E_H/E_{I\mu}$ (lineas discontinuas color negro) como el espectro obtenido por la ecuación 15 (linea continua color negro) muestra bastante similitud en su forma espectral en todo el rango de periodos, es decir, de 0 a 5 segundos, excepto cuando el factor de ductilidad Q aumenta, en periodos largos se presenta una mayor desviación del espectro obtenido por la formula con respecto a los resultados empiricos.

Table 4.2. Error cuadrático medio de la ecuación propuesta para el modelo hysterético elastoplástico.

Ductility	MSE
2	0.0030
4	0.0086
6	0.0092

Se concluye que la ecuación propuesta es muy precisa también para diferentes valores de ductilidad como se puede ilustrar en la figura 4.21 y la Tabla 4.2 que indica el error cuadrático medio (MSE) de la ecuación para los sistemas elastoplásticos y los tres niveles de ductilidad bajo consideración. Es importante decir que el MSE se estima mediante la ecuación 16. En esta ecuación $\left(\frac{E_H}{E_{I\mu}}\right)_{eq}$ representa el radio de energía para un periodo específico estimado por la ecuación 15; $\left(\frac{E_H}{E_{I\mu}}\right)_{cal}$ es el actual radio de energía obtenido de los análisis dinámicos no lineales; finalmente N_T es el número de periodos de 0.05 a 5 segundos, esto da un total de 100 puntos espectrales que son usados para calibrar la ecuación y calcular el MSE.

$$MSE = \frac{1}{N_T} \sum_{T=0.05}^{T=5} \left[\left(\frac{E_H}{E_{I\mu}}\right)_{eq} - \left(\frac{E_H}{E_{I\mu}}\right)_{cal} \right]^2 \quad (11)$$

4.6 DEMANDAS DE ENERGÍA EN EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO DE SVGL

Los sistemas de varios grados de libertad representan mejor la respuesta de los edificios ante eventos sísmicos comparado con los S1GL. Por tal motivo, se calculan las demandas de energía para un edificio de concreto reforzado sometido a las secuencias sísmicas utilizadas previamente en los osciladores inelásticos (ver sección 3.2). La figura 4.22 muestra las características del edificio: 10 niveles; 3.5 metros de altura entre cada nivel; tres crujeías de 7 metros cada una en ambos ejes (eje x y eje z); periodo natural en ambas direcciones de 0.98 segundos y dos tipos de secciones para ambos elementos;. En resumen, las características del edificio se muestran en la tabla 4.3 donde también se indica que se utilizó el modelo de comportamiento de Takeda para representar el comportamiento cíclico del material. Nótese que V y C en la tabla 4.3 se refiere a vigas y columnas. El diseño sismorresistente se hizo de acuerdo con las disposiciones de Diseño Sísmico de la Ciudad de México (NTC-2017). Se obtendrán los espectros de energía de entrada inelástica, Energía Histerética y la razón entre ambos espectros ($E_H/E_{I\mu}$). Es importante resaltar que, las secuencias sísmicas estarán conformadas de manera distinta; es decir, con los mismos registros, pero con diferentes parámetros de escalamiento y diferentes intensidades de réplica. Es importante mencionar que, en este caso, se utilizó el conocido análisis dinámico incremental para obtener las demandas de energía sísmica.

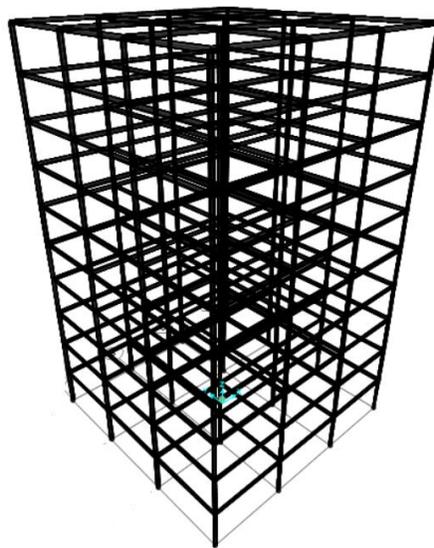


Figura 4.22.- Características geométricas del marco a utilizar de 10 niveles.

En la figura 4.23, se observan los diferentes resultados del modelo de 10 niveles de C/R, que tiene un periodo natural de 1 segundo. En el eje de las abscisas se muestra la intensidad del evento en término de la pseudo-aceleración escalado a cada 0.05g, iniciando desde 0.05 hasta 2g; obteniendo un total de 40 niveles de escalamiento. Por parte de la ordenada, obtenemos el valor de la $E_{I\mu}$ en unidades de cm^2/s^2 ; estos resultados son para una intensidad de réplica del 125% del parámetro de la aceleración máxima del suelo del evento principal. Como se esperaba, se observa que a medida que la intensidad del evento principal aumenta; es decir, que el nivel de escalamiento es mayor, la energía de entrada también se eleva.

Tabla 4.3. Características del edificio de 10 niveles.

Edificio de 10 Niveles (10N)			
3 Crujías de 7 mts cada una			
10 Niveles con 3.5 mts de altura			
Periodo	=	0.98	seg
2 tipos de vigas			
2 tipos de columnas			
Nivel 1 al 6			
V1=	40	x	70 cms
C1=	85	x	85 cms
Nivel 7 al 10			
V2=	35	x	60 cms
C2=	80	x	80 cms
Modelo Histeretico:			
Takeda Modificado			

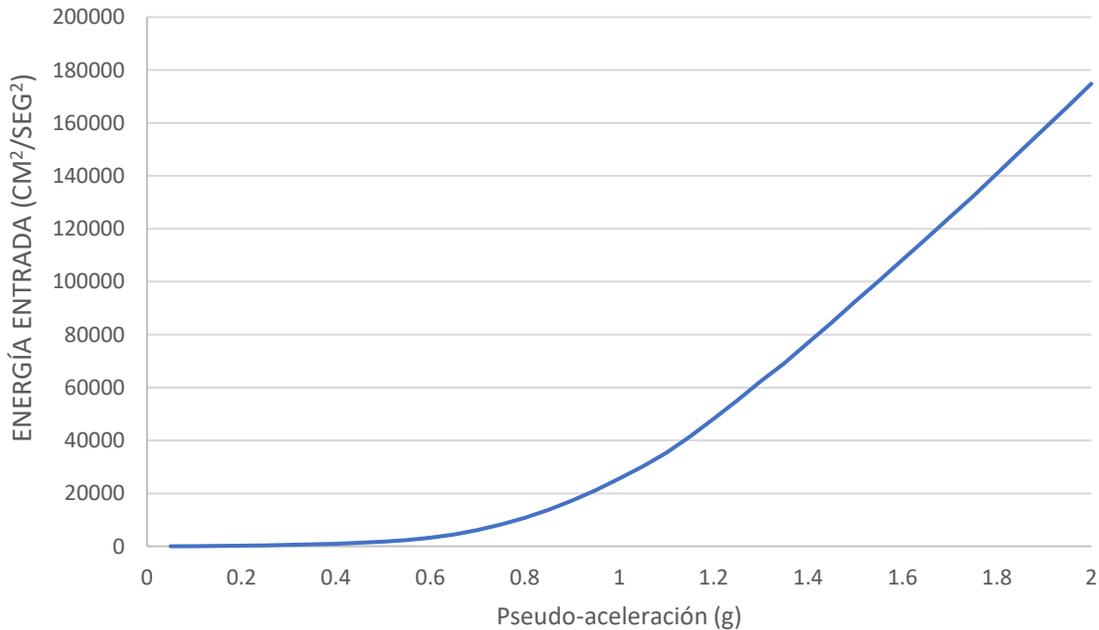


Figura 4.23, Resultados de la $E_{I\mu}$ para el modelo de 10 niveles, con un $T= 0.98$ seg; una magnitud de réplica de $PGA=125$ y distintos niveles (0.05 a 2 de pseudo-aceleración) de escalamiento del evento principal.

En la figura 4.24, se muestra la E_H obtenida del mismo modelo de 10 niveles de C/R. La figura sugiere que la energía histerética será mayor a medida que el evento principal de la secuencia sísmica tiene mayor intensidad. En la figura 4.24 se muestra la relación de $E_H/E_{I\mu}$ para el mismo modelo. Se observa una tendencia muy similar a la obtenida en los sistemas de un grado de libertad, esto tomando en cuenta que el resultado es solo para un modelo de concreto reforzado con un periodo de 1 segundo.

En la figura 43, se agregan los resultados de $E_H/E_{I\mu}$ para las secuencias sísmicas que tienen magnitud de réplica del 100% y 75% de aceleración máxima del suelo del evento principal. Como se esperaba, la forma y los valores de la ordenada son muy similares.

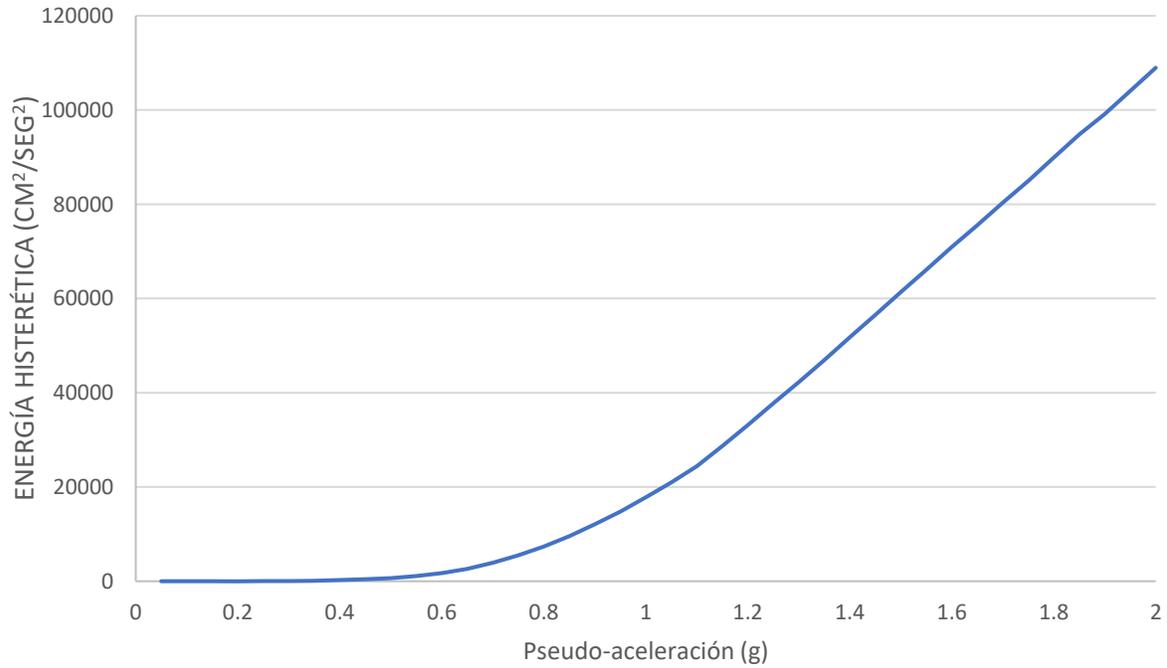


Figura 4.24, Resultados de la E_H para el modelo de 10 niveles, con un $T=0.98$ seg; una magnitud de réplica de $PGA=125$ y distintos niveles (0.05 a 2 de pseudo-aceleración) de escalamiento del evento principal.

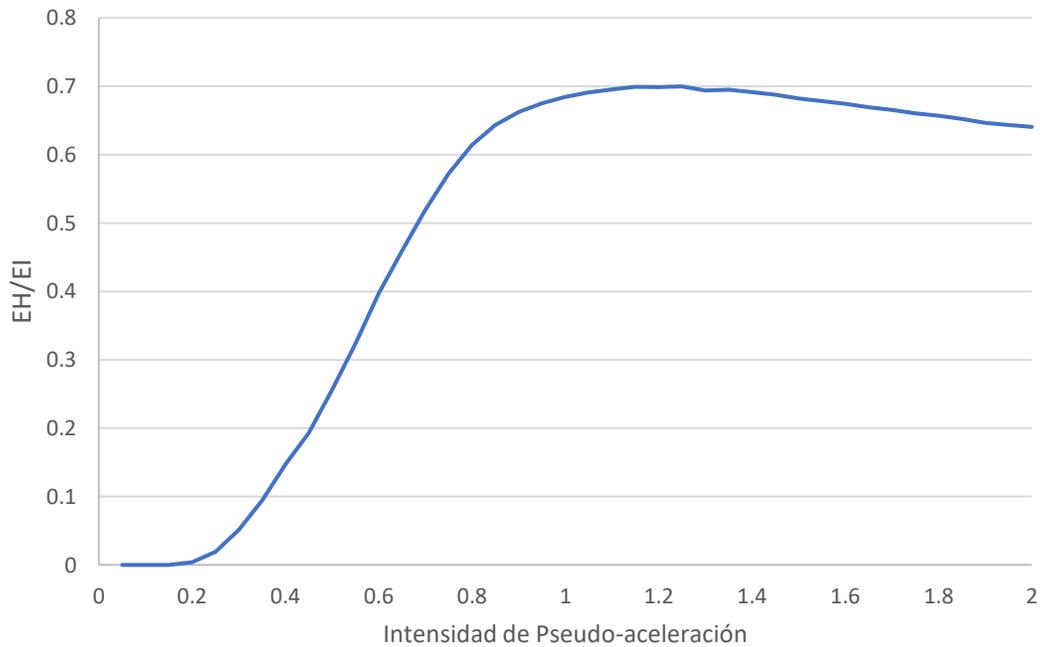


Figura 4.25, Resultados de la $E_H/E_{I\mu}$ para el modelo de 10 niveles, con un $T=0.98$ seg; una magnitud de réplica de $PGA=125$ y distintos niveles (0.05 a 2 de pseudo-aceleración) de escalamiento del evento principal.

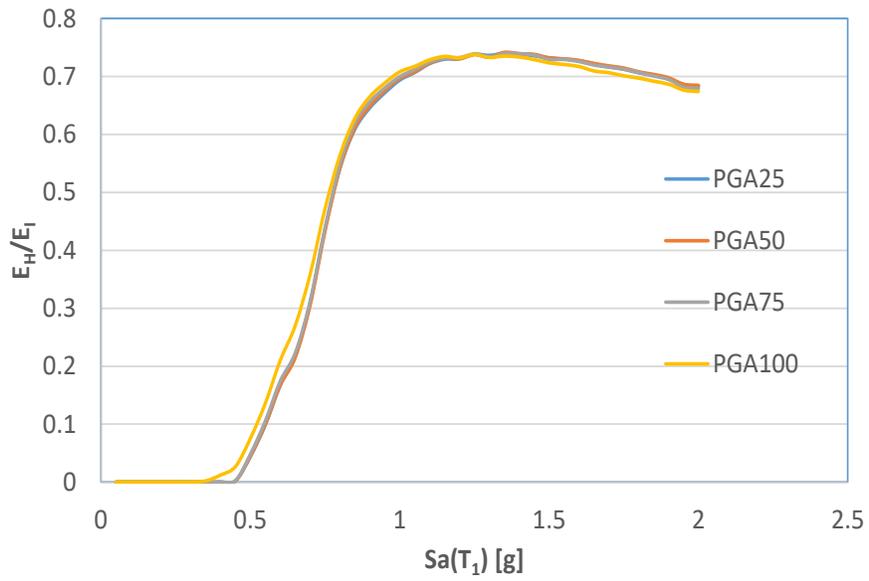


Figura 4.26, Resultados de la $E_H/E_{I\mu}$ para el modelo de 10 niveles, con un $T= 0.98$ seg; tres magnitudes de réplica (PGA=125 [color azul], PGA 100 [color naranja] y PGA 75 [color gris]) y distintos niveles (0.05 a 2 de pseudo-aceleración) de escalamiento del evento principal.

5. CONCLUSIONES

Con el fin de proponer una ecuación para calcular la relación de energía $E_H/E_{I\mu}$ de estructuras no lineales sometidas a secuencias sísmicas, se someten varios sistemas SDOF bilineales con diferentes rigideces post-cedida a secuencias sísmicas obtenidas de sitios de suelo blando de la Ciudad de México. En primer lugar, se calculan los espectros de ductilidad constante para la energía de entrada e histerética teniendo en cuenta los sismos principales y réplicas, luego se evalúa la relación de energía. Los resultados numéricos sugieren en general que las demandas de energía tienden a aumentar a medida que la intensidad de la réplica crece, especialmente para periodos estructurales cercanos al periodo suelo. Es importante mencionar que las demandas de energía para intensidades de réplicas similares a las intensidades del sismo principal podrían ser dos veces la energía producida por secuencias sísmicas con intensidades de réplicas bajas o sin réplicas; por esta razón, el potencial de réplicas en la cantidad de energía inelástica es muy importante. Además, el modelo histerético elasto-perfectamente plástico proporcionó demandas de energía similares en comparación con los modelos histeréticos bilineales con diferente rigidez posterior a la fluencia. Por otro lado, los resultados indican que la relación de entrada y energía histerética es casi la misma para los niveles seleccionados de intensidades de las réplicas. Por lo tanto, no hay influencia de la intensidad de la réplica en la estimación de la relación de energía, nótese que esto es preliminarmente válido en el caso de edificios de concreto reforzado. Lo anterior es de gran importancia ya que permite proponer ecuaciones analíticas para predecir la relación de energía en estructuras no lineales de uno o varios grados de libertad que consideren los efectos de las réplicas. Finalmente, las ecuaciones propuestas se pueden utilizar para nuevas regulaciones de construcción de diseño basado en energía sismorresistentes para reducir el riesgo sísmico en áreas urbanas especialmente en sitios con suelos blandos de la Ciudad de México.

REFERENCIAS

1. S. Atzori, C. Tolomei, A. Antonioli, J. P. Merryman Boncori, S. Bannister, E. Trasatti, P. Pasquali, S. Salvi (2012). *The 2010-2011 Canterbury, New Zealand, seismic sequence: Multiple source analysis from InSAR data and modeling. Journal of Geophysical Research. Vol. 117, Issue B8.*
2. Kazuhiko Kasai, M. EERI, Akira Mita, Haruyuki Kitamura, Kazuhiro Matsuda, Troy A. Morgan, M.EERI, and Andrew W. Taylor. *Performance of Seismic Protection Technologies during the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. Earthquake Spectra, Volume 29, No. Si, pages S265-S293, March 2013, Earthquake Engineering Research Institute.*
3. Lisa Moon, Dmytro Dizhur, Ilaria Senaldi, Hossein Derakhshan, Michael Griffith, M. EERI, Guido Magenes and Jason Ingham (2014)-*The Demise of the URM Building Stock in Christchurch during the 2010-2011 Canterbury Earthquake Sequence. Earthquake Spectra. <https://doi.org/10.1193/022113EQS044M>.*
4. W. Y. Kam, S. Pampanin and K. Elwood (2011). *Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings in the 22 February Christchurch (Lyttelton) earthquake. New Zealand Society for Earthquake Engineering. Vol. 44. No 4.*
5. Q. Lim and B. Ellingwood (2007). *Performance evaluation and damage assessment of steel frame buildings under main shock-aftershock earthquake sequences. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Volume 36. Issue 3. p. 405-427.*
6. D.K. Singh, A. Mandal, S.R. Karumanchi, A. Murmu, N. Sivakumar (2018). *Seismic Behaviour of damaged tunnel during aftershock. Vol. 93, P. 44-54.*
7. A. Lemnitzer, L. M. Massone, D. Skolnik, J. C. de la Llera Martin, J. W. Wallace (2014). *Aftershock response of RC buildings in Santiago, Chile, succeeding the magnitude 8.8 Maule earthquake. Engineering Structures. Vol. 76. P 324-338.*
8. *Mexico City Building Code. 2017. Complementary Technical Norms for Earthquake Resistant Design, Mexico City (RCDF-17).*
9. *Seismic Design 2015, Design Manual of civil works. Federal Commission of electricity (MOC-CFE-15).*
10. *Norma Chilena Oficial. 2012. Diseño Sísmico de Edificios, Instituto Nacional de Normalización, Chile.*
11. Q. Li and B. R. Ellingwood (2007). *Performance evaluation and damage assessment of steel frame buildings under main shock-aftershock earthquake sequences. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Doi:10.1002/eqe.667.*
12. *EC8-05, (2005), EuroCode – 8. Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.*
13. *ASCE 7-16 (2016), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. ASCE Standard ACE/SEI 7-05, American Society of Civil Engineers.*
14. E. Bojórquez, A. Reyes-Salazar, A. Terán-Gilmore and S.E. Ruiz (2010). *Energy-based damage index for Steel Structures. Steel and Composite Structures, Vol. 10, No. 4. Pp 343-360.*

15. E. Bojórquez, S.E. Ruiz and A. Terán-Gilmore (2008). *Reliability-based evaluation of steel structures using energy concepts. Engineering Structures. Vol 30, Issue 6. PP 1745-1759.*
16. P. Fajfar, and T. Vidic, “Consistent inelastic design spectra: hysteretic and input energy”, *Earthquake Engng. Struct. Dyn. 23, 523-532 (1994).*
17. H. Akiyama, *Earthquake Resistant Limit-state Design for Buildings, University of Tokyo Press. Japan, 1985.*
18. Kuwamura H, Galambos TV. *Earthquake load for structural reliability. J Struct Eng. ASCE 1989,115:1446-62.*
19. H. Krawinkler y A. Nassar, “Seismic design based on ductility and cumulative damage demands and capacities”, *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings (Editors: H. Krawinkler and P. Fajfar), Elsevier Applied Science, U.K. 95-104, 1992.*
20. P. Fajfar, T. Vidic and M. Fischinger (1992) *On energy demand and supply in SDOF systems. Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings. Pp48-71.*
21. L. Decanini and F. Mollaioli (2001). *An energy-based methodology for the assessment of seismic demand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 21. Pp 113-137.*
22. B. Akbas, B. Aksar, B. Doran and S. Alacali (2016). *HYSTERETIC ENERGY TO ENERGY INPUT RATIO SPECTRUM IN NONLINEAR SYSTEMS. Cilt/Vol.:18 No/Number:2Sayı/Issue:53Sayfa/Page:239-254MAYIS 2016/May 2016. DOI Numarası (DOI Number): 10.21205/deufmd.20165318384.*
23. E. Corona, E. Bojórquez, J. Ruiz and A. Reyes (2019). “Respuesta estructural de edificios acero con sistemas de contraventeos excéntricos ante secuencias sísmicas”. *Revista de Ingeniería sísmica.*
24. Karen R. Felzer, Rachel E. Abercrombie, Göran Ekström. *A Common Origin for Aftershocks, and Multiplets. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No, 1, pp. 88-98, February.*
25. T. Yamashita and L. Knopoff. *Models of aftershock occurrence. Geophys. J. R. astr. Soc. (1987) 91, 13-26. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1987.tb05210.x>.*
26. S. Das and C. Henry. *Spatiel Relation Between main earthquake slip and its aftershock distribution. Reviews of Geophysics. <https://doi.org/10.1029/2002RG000119>. REPLICAS FUERA DE FALLA.*
27. G. M. Molchan and O. E. Dmitrieva (1992). *Aftershock identification: methods and new approaches. Geophysical Journal International. Citeseer.*
28. Karen R. Felzer, T.W. Becker, R. Abercrombie, G. Ekstom and J. Rice (2002). *Triggering of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake by aftershocks of the 1992 Mw 7.3 Landers earthquake. Journal of Geophysical Research. Solid Earth. <https://doi.org/10.1029/2001JB000911>.*
29. Karen R. Felzer, R. Abercrombie and G. Ekstom (2003). *Secondary aftershocks and their importance for aftershock forecasting. Bulletin of the Seismological Society of America.*

- Vol. 93, Number 4. <https://doi.org/10.1785/0120020229>.
30. Y. Ogata, Lucile M Jones and Shinji Toda (2003). "When and where the aftershock activity was depressed: Contrasting decay patterns of the proximate large earthquakes in southern California". *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. Volumen 108, Issue B6.
 31. Milne, J., and A. W. Lee, *Earthquakes and Other Earth Movements*, 244 pp., K. Paul, Trench, Trubner, London, 1939.
 32. Scholz, C., *The Mechanics of Earthquake and Faulting*, 439 pp., Cambridge Univ. Press, New York, 1989.
 33. K. Felzer (2009). *Simulated aftershock sequences for an M 7.8 earthquake on the southern San Andreas fault*. *Seismological Research Letters*. Citeseer. Volume 80. Number 1. doi: 10.1785/gssrl.80.1.21.
 34. S. Das and C. Henry. *Spatiel Relation Between main earthquake slip and its aftershock distribution*. *Reviews of Geophysics*. <https://doi.org/10.1029/2002RG000119>.
 35. Omori, F., *On the aftershocks of earthquakes*, *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 7, 111– 120, 1894.
 36. Utsu, T., Y. Ogata, and R. Matsu'ura (1995), *The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity*, *J. Phys. Earth*, 43(1), 1–33.
 37. Narteau, C., S. Byrdina, P. Shebalin, and D. Schorlemmer (2009), *Common dependence on stress for the two fundamental laws of statistical seismology*, *Nature*, 462(7273), 642–645.
 38. Helmstetter, A., and D. Sornette (2003a), *Importance of direct and indirect triggered seismicity in the ETAS model of seismicity*, *Geophys. Res. Lett.*, 30(11), 1576, doi:10.1029/2003GL017670.
 39. Båth, M. (1965), *Lateral inhomogeneities of the upper mantle*, *Tectonophysics*, 2(6), 483–514.
 40. M. Tahir, J-R. Grasso, and D. Amorése, "The largest aftershock: How strong, how far away, how delayed?" *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 39, L04301, doi:10.1029/2011GL050604, 2012.
 41. Helmstetter, A., and D. Sornette (2003b), *Båth's law derived from the Gutenberg-Richter law and from aftershock properties*, *Geophys. Res. Lett.*, 30(20), 2069, doi:10.1029/2003GL018186.
 42. Shcherbakov, R., D. Turcotte, and J. Rundle (2006), *Scaling properties of the parkfield aftershock sequence*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96(4B), S376–S384.
 43. Vere-Jones, D. (2008), *A limit theorem with application to Båth's law in seismology*, *Adv. Appl. Probab.*, 40(3), 882–896.
 44. Karen R. Felzer and Debi Kilb. *A Case Study of Two M ~5 Mainshocks in Anza, California: Is the Footprint of an Aftershock Sequence Larger Than We Think?*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 5, pp. 2721–2735, October 2009, doi: 10.1785/0120080268.

45. Benioff, H. (1951). *Earthquakes and rock creep: Part I: Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks*, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 41, 31–62.
46. Utsu, T. (1961). *A statistical study on the occurrence of aftershocks*, *Geophys. Mag.* 30, 521–605.
47. Scholz, C. H. (1968). *Microfractures, aftershocks, and seismicity*, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 58, 1117–1130.
48. Nur, A., and J. R. Booker (1972). *Aftershocks caused by pore fluid flow?* *Science* 175, 885–887.
49. Das, S., and C. H. Scholz (1981). *Off-fault aftershocks caused by shear stress increase?*, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, 1669–1675.
50. Dieterich, J. A. (1994). *Constitutive law for the rate of earthquake production and its application to earthquake clustering*, *J. Geophys. Res.* 99, 2601–2618.
51. Parsons, T. (2005). *A hypothesis for delayed dynamic triggering*, *Geophys. Res. Lett.* 32, L04302, doi 10.1029/2004GL021811
52. Helmstetter, A., and B. E. Shaw (2006). *Relation between stress heterogeneity and aftershock rate in the rate and state model*, *J. Geophys. Res.* 111, doi 10.1029/2005JB0040077.
53. Hill, D. P. (2008). *Dynamic stresses, Coulomb failure, and remote triggering*, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 98, 66–92.
54. Gomberg, J. (2001). *The failure of earthquake failure models*, *J. Geophys. Res.* 106, 16,253–16,263
55. K. R. Felder, and E.E. Brodsky, “Decay of aftershock density with distance indicates triggering by dynamic stress” *Nature*, 441, 735–738 (2006), doi:10.1038/nature04799.
56. Hough, S. E. (2005). *Remotely triggered earthquakes following moderate mainshocks (or why California is not falling into the ocean)*, *Seism. Res. Lett.* 76, 58–66.
57. Steacy, S., J. Gomberg, and M. Cocco (2005). *Introduction to special section: Stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard*, *J. Geophys. Res.* 110, B05S01.
58. Toda, S., R. S. Stein, P. A. Reasenber, J. H. Dieterich, and A. Yoshida (1998). *Stress transfer by the Mw=6:9 Kobe, Japan earthquake: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities*, *J. Geophys. Res.* 103, 24,543–24,565.
59. N. Luco, P. Bazzurro, C.A. Cornell. “Dynamic versus static computation of the residual capacity”. *13th World conference on earthquake engineering*. Vancouver, B.C. Canada.
60. J. Ruiz-García, R. N. Olvera and A. Frias. “Seismic assessment of school buildings with short captive RC columns under subduction seismic sequences”. *Structures*. Vol. 34. Pages. 2432-2444. Science Direct.
61. Y. Park, A. Ang , y Y. Wen, *Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings*. *J Struct Eng.* 1985.
62. S. Amiri y E. Bojórquez. “Residual displacement ratios of structures under mainshock-aftershock sequences. *Soil dynamics and earthquake engineering*. Vol. 121, pag. 179-

- 193.
63. R. Song, Y Li, JW Van de Lindt (2016). *Loss estimation of Steel buildings to earthquake mainshocks-aftershock sequences. Structural Safety. Volume 61.* <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2016.03.002>.
 64. Edén Bojórquez Mora, A. Terán, J. Bojórquez y S. E. Ruiz. “Consideración explícita del daño acumulado en el diseño sísmico de estructuras a través de factores de reducción de resistencia por ductilidad”. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 80, 31-62.* 2009.
 65. Teran-Gilmore y R. Simon, “Use of constant cumulative ductility spectra for performance-based seismic design of ductile frames”. *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering.* 2006.
 66. A. Terán-Gilmore y O. Jirsa. “Energy demands for seismic design against low cycle fatigue”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 36, 383-404, 2007.
 67. G. W. Housner, “Limit design of structures to resist earthquakes”, *Proc. 1st WCEE, Berkeler, California, 1956 pp 5.1-5-13.*
 - 68.- T. Zahrah, and J. Hall, “Earthquake energy absorption in SDOF structures”, *J. Struct. Div. ASCE, 8, 1984.*
 69. C. M. Uang, and V. V. Bertero, “Use of energy as a design criterion in earthquake resistant design”, *Report No. °CB/EERC-88/18, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1988.*
 70. C. M. Uang, and V. V. Bertero, “Evaluation of Seismic Energy in Structures”, *EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL. 19.77-90 (1990)*
 71. P. Fajfar, T. Vidic and M. Fishinger, “Seismic demand in medium and long-period structures”, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 18, 1133-1144 (1989).
 72. Zahrah and Hall (1982). *Seismic Energy Absorption in simple structures. Civil Engineering Studies. Structural Research Series No 501.*
 73. L.D. Decanini and F. Mollaioli (1998). *Formulation of Elastic Earthquake Input Energy Spectra. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1503-1522 (1998).*
 74. J Shen, B. Akbas (1999). “Seismic energy demand in steel moment frames”. *Journal of Earthquake Engineering; P. 519-559.*
 75. G. Manfredi. (2001). *Evaluation of seismic energy demand. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 30, Issue 4. Pp 485-499.*
 76. B. Akbas, J. Shen and H. Hao (2001). *Energy approach in performance-based seismic design of steel moment resisting frames for basic safety objective. The Structural Design of Tall Buildings. https://doi.org/10.1002/tal.172.*
 77. Zhou Ying, Song GG, Tan PP (2019). *Hysteretic energy demand for self-centering SDOF systems. Soil Dynam Earthq Eng; 125:105703. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105703.*
 78. M. E. Rodríguez yD. Padilla, “A Damage Index for the Seismic Analysis of Reinforced Concrete Members”. *Journal of Earthquake Engineering, Vol. 13.* 2009.
 79. Maldonado Aguilera, I. A. (2006). “Evaluación de la respuesta de estructuras existentes

- sujetas a secuencias sísmicas”, tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo; pp 109; México.*
80. *Mexican strong earthquake database, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, <https://www.smis.mx>*
81. *Arturo Tena Colunga (2001). Diseño de estructuras con aislamiento sísmico mediante el uso de espectros de diseño por capacidad. Revista de Ingeniería Sísmica. No. 65. 49-80 (2001).*