



45
24

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
" ARAGON "**

**CRITERIOS ENERGETICOS PARA EL ESTUDIO DEL
COMPORTAMIENTO SISMICO DE ESTRUCTURAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

MARTHA E. ZAPATA CHAIRES

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

CAPITULO	PAGINA
1.- Introducción	1
1.1.- Antecedentes	2
1.2.- Objetivos	3
2.- Método para evaluar los diferentes tipos de energía en estructuras sencillas sometidas a terremotos	4
2.1.- Solución de la ecuación diferencial de movimiento	4
2.1.1.- Obtención de la fuerza restauradora de la estructura	10
2.1.2.- Cálculo de los diferentes tipos de energía.	12
2.2.- Modelos empleados para representar las curvas de carga-deformación de la estructura empleada en este estudio	16
2.2.1.- Modelo elastoplástico	16
2.2.2.- Modelo con degradación de rigidez	16
3.- Registros sísmicos empleados	18
3.1.- Intensidad de Arias	19
3.2.- Registro sísmico de la SCT	20
3.3.- Registro sísmico de El CENTRO	20
3.4.- Registro sísmico de LLOLLEO	20
3.5.- Espectros de respuesta	23
3.6.- Comparación de los espectros de respuesta elástica	25

4.- Evaluación de las demandas de energía histérica en estructuras sencillas sometidas a acciones sísmicas	28
4.1.- Evaluación de demandas de energía histérica para el temblor de la SCT componente E-W del 19 de septiembre de 1985	30
4.1.1.- Evaluación de demandas de energía histérica para los temblores de EL CENTRO, California componente N-S de el 18 de mayo de 1940 y LLOLLEO, Chile componente N10E de el 3 de marzo de 1985	34
4.1.2.-Demandas y capacidades de disipación de energía	38
4.2.- Aplicación de resultados de este estudio	39
4.2.1.- Criterios de ensayos en laboratorio de estructuras ante cargas laterales cíclicas reversibles	39
4.2.3.- Demandas y capacidades de disipación de energía histérica para los temblores E-W de la SCT, Ciudad de México, de septiembre de 1985; N-S EL CENTRO, California USA,(1940), y N10E LLOLLEO, Chile, del 3 de marzo de 1985	40
4.2.4.- Correlación entre demandas de energía histérica calculadas y distribución de daños en estructuras durante el terremoto del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México	41
5.- Conclusiones y recomendaciones	44
Referencias	46

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

De entre todos los peligros naturales a los que se enfrenta este planeta, los sismos representan uno de los más graves, debido a las pérdidas humanas y económicas que provocan.

Los reglamentos de construcción en zonas sísmicas consideran que las estructuras que cumplen los requisitos de diseño sísmico tiene capacidad para disipar la energía introducida por un terremoto; sin embargo los estudios realizados para evaluar la demanda y capacidad de disipación de energía por terremotos son aún insuficientes.

La energía que el terreno transmite a la estructura es transformada en diferentes formas como la del amortiguamiento, la cinética y la de deformación elástica, así como la histerética. La energía histerética evaluada en este estudio se relaciona con la distribución de daños en estructuras por sismo y con criterios de ensayos de estructuras en laboratorio para representar acciones sísmicas. Los ensayos se dividen en dos tipos: dinámicos y estáticos. Los dinámicos se efectúan en mesa vibradora o con cargas laterales aplicadas a la estructura con velocidades específicas. Los inconvenientes que presentan este tipo de ensayos son de tipo económico y técnico. Los ensayos estáticos se efectúan empleando cargas laterales reversibles de aplicación lenta. Este tipo de ensayos es comunmente utilizado en diversos países incluyendo México. Existe una gran variedad de procedimientos para definir este tipo de ensayos, los cuales se basan principalmente en criterios intuitivos del investigador o grupo que efectúan este tipo de ensayos.

La investigación aquí presentada emplea criterios energéticos y análisis no lineal de estructuras simples para evaluar la energía introducida por terremotos.

1.1 ANTECEDENTES

La aceleración máxima del terreno ha sido empleada por algunos investigadores como un índice de la capacidad de daño en estructuras, sin embargo este parametro no permite cuantificar la cantidad de energía que suministra el terreno a las estructuras o la cantidad de daños que puede provocar un terremoto en las estructuras.

Housner¹ en el año 1956 realizó uno de los primeros estudios destinado a evaluar la demanda y capacidad de disipación de energía. El estudio de Housner se basó en la cantidad de energía suministrada a la estructura y en su habilidad para disiparla.

Zahrah y Hall¹⁵ en el año 1982 realizaron estudios en estructuras de un grado de libertad , empleando diversos registros sísmicos ocurridos en el estado de California durante los años de 1940 a 1979. Estos investigadores encontraron que ha mayor duración de el sismo, la estructura incurrió mayor número de veces en el intervalo inelástico, con el consiguiente aumento en la demanda de disipación de energía histerética.

1.2 OBJETIVOS

- 1).- Efectuar estudios analíticos para evaluar las diversas fuentes de disipación de energía en estructuras sencillas cuando son sometidas a registros sísmicos específicos.*
- 2).- Comparar la capacidad de disipación de energía histerética por historias de cargas laterales estáticas de tipo reversible con demandas de energía histerética por sismo a fin de llegar a una metodología de ensaye de estructuras en laboratorio ante cargas laterales estáticas de tipo reversible que sea representativa del daño estructural asociado a movimientos sísmicos típicos.*
- 3).- Relacionar criterios energéticos con criterios de evaluación del nivel potencial de daño sísmico, en especial con los que son típicos de la zona considerada de alto riesgo sísmico de la Ciudad de México.*

CAPITULO 2

MÉTODO PARA EVALUAR LAS FUENTES DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN ESTRUCTURAS SENCILLAS SOMETIDAS A TERREMOTOS

Una estructura de varios niveles se puede estudiar de manera simplificada a partir de los conceptos desarrollados para una estructura de un grado de libertad. Un razonamiento en este sentido es empleado por reglamentos de diseño sísmico para el análisis de estructuras de varios niveles a partir del concepto de espectro de diseño, el cual proviene de analizar estructuras de un grado de libertad.

A continuación se desarrolla el método que en este trabajo se emplea para evaluar los diferentes tipos de absorción de energía en estructuras sencillas de un grado de libertad, sometidas a terremotos. El método se basa en criterios energéticos.

2.1 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DE MOVIMIENTO

En la figura 2.1 se muestra una estructura sencilla de un grado de libertad sometida a una excitación sísmica. La masa M se concentra en el elemento horizontal rígido, sostenido con las columnas de una rigidez lateral K y un coeficiente de amortiguamiento C .

La excitación dinámica del terreno induce a la base de la estructura la aceleración $y(t)$ y el desplazamiento $y(t)$. (figura 2.1).

Debido a esta excitación el elemento de masa M se desplaza $u(t)$ respecto a la base, teniendo un desplazamiento total $u_T(t)$, (figura 2.1)

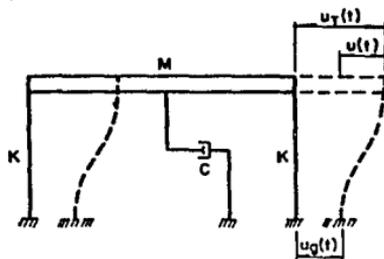


Fig.2.1. Estructura sencilla de un grado de libertad sometida a movimiento sísmico del terreno

Del diagrama de cuerpo libre del elemento M mostrado en la figura 2.2, se tiene que la ecuación de equilibrio dinámico es:

$$F_I + F_D + F_g = 0 \quad (2.1)$$

La fuerza de inercia F_I es:

$$F_I = M [\ddot{y}(t) + \ddot{u}(t)]$$

La fuerza de amortiguamiento, F_D , se calcula con:

$$F_D = C \dot{u}(t)$$

en donde:

$$C = 2 M \xi \omega$$

En la expresión anterior ξ es el porcentaje de amortiguamiento y ω es la frecuencia circular de la estructura .

La fuerza del resorte, F_s , se calcula como:

$$F = K u(t)$$

Si se sustituye F_s , F_D , y F_l en la ecuación (2.1) se obtiene la **ECUACIÓN DIFERENCIAL DE MOVIMIENTO**:

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + K u(t) = -M \ddot{y}(t) \quad (2.2)$$

Dividiendo (2.2) por M , se obtiene:

$$\ddot{u}(t) + \frac{C}{M} \dot{u}(t) + R(u) = -\ddot{y}(t) \quad (2.3)$$

donde:

$$\frac{C}{M} = 2 \xi \omega$$

Sustituyendo el valor de C/M en (2.3) se obtiene:

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega\dot{u}(t) + R(u) = -\ddot{y}(t) \quad (2.4)$$

En esta expresión $R(u)$ es la fuerza restauradora de la estructura por unidad de masa.

Esta ecuación es la **ECUACIÓN DIFERENCIAL DE MOVIMIENTO POR UNIDAD DE MASA**.

La ecuación (2.4) se resuelve con el método de integración de Newmark en su variante de aceleración lineal. Este método se basa en las siguientes expresiones.

$$u(t+\Delta t) = u(t) + [(1-\delta) \dot{u}(t) + \delta \dot{u}(t+\Delta t)] \Delta t \quad (2.5)$$

$$u(t+\Delta t) = u(t) + \dot{u}(t) \Delta t + [(0.5-\alpha) \ddot{u}(t) + \alpha \ddot{u}(t+\Delta t)] \Delta t^2$$

Realizando algunas manipulaciones algebraicas y reemplazando $\alpha=1/6$ y $\delta=1/2$, se tiene:

$$\dot{u}(t+\Delta t) = \dot{u}(t) + 0.5 [\ddot{u}(t) + \ddot{u}(t+\Delta t)] \Delta t \quad (2.6)$$

$$u(t+\Delta t) = u(t) + \dot{u}(t) \Delta t + \ddot{u}(t) \frac{\Delta t^2}{3} + \ddot{u}(t+\Delta t) \frac{\Delta t^2}{6}$$

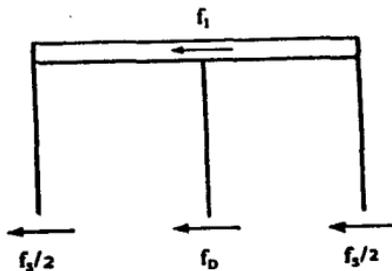


Fig. 2.2. Diagrama de cuerpo libre de la figura 2.1.

El método para resolver numericamente la ecuación (2.4) puede resumirse en los siguientes pasos:

- 1).- Se parte de valores iniciales para u, \dot{u}, \ddot{u} , a sí como de las características de la estructura y del acelerograma.
- 2).- Se asigna un valor arbitrario para el parámetro $\ddot{u}(t+\Delta t)$ que interviene en la ecuación (2.6). A este valor se le denomina $\ddot{u}_{sup}(t+\Delta t)$, y se calcula $u(t+\Delta t)$ y $\dot{u}(t+\Delta t)$ con las ecuaciones (2.6).
- 3).- Con $u(t+\Delta t)$ se obtiene $R(t+\Delta t)$, con el procedimiento descrito en la sección 2.1.1.
- 4).- Los resultados calculados se sustituyen en la ecuación (2.4) para el tiempo $t+\Delta t$, obteniendo de la misma el parámetro $\ddot{u}(t+\Delta t)$ que no necesariamente es igual a $\ddot{u}_{sup}(t+\Delta t)$ del paso 2.
- 5).- El valor de $\ddot{u}(t+\Delta t)$ se compara con el de $\ddot{u}_{sup}(t+\Delta t)$ si el valor absoluto de la diferencia de estos dos valores es menor o igual a una aproximación dada, la ecuación (2.4) se considera resuelta para el tiempo $t+\Delta t$, pero si la diferencia es mayor la aproximación supuesta se asigna a $\ddot{u}_{sup}(t+\Delta t)$ el valor $\ddot{u}(t+\Delta t)$, y se repite el proceso desde el paso 2, hasta que la diferencia sea menor o igual que la aproximación dada.

6).- Para el siguiente instante de tiempo se considera:

$$d(t) = d(t+\Delta t)$$

$$d(t) = d(t+\Delta t)$$

$$u(t) = u(t+\Delta t)$$

y se repite el proceso desde el paso 2.

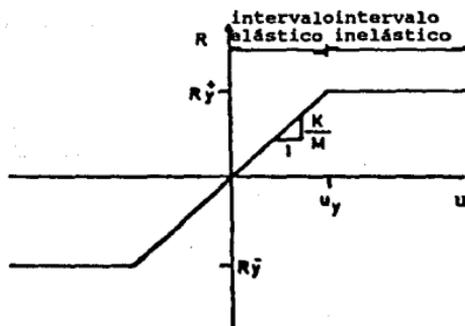


Fig.2.3 Intervalos elástico e inelástico de una estructura.

2.1.1 OBTENCIÓN DE LA FUERZA RESTAURADORA DE LA ESTRUCTURA

El valor de la fuerza restauradora R esta en función del desplazamiento de la estructura y tiene un valor máximo R_y , asociada al desplazamiento de fluencia U_y . R_y es un valor límite entre los intervalos elásticos e inelásticos de la estructura, figura 2.3. R_y se calcula con:

$$R_y = \omega^2 U_y \quad (2.7)$$

A partir de la figura 2.4, $R(t+\Delta t)$ puede calcularse como:

$$R(t+\Delta t) = R(t) + [u(t+\Delta t) - u(t)]\omega^2 \quad (2.8)$$

Esta expresión es aplicable en el intervalo elástico o en la zona de carga o descarga en el intervalo inelástico.

El procedimiento para evaluar $R(t+\Delta t)$ es el siguiente:

- 1).- El valor de $R(t)$ en el tiempo $t=0$ se considera igual a cero.
- 2).- Se obtiene $R(t+\Delta t)$ con (2.8).
- 3).- Se compara $|R(t+\Delta t)|$ con $|R_y|$. Si es menor o igual, el valor no se modifica y se sigue con el siguiente tiempo, haciendo antes:

$$R(t) = R(t+\Delta t)$$

y se repite el proceso desde el paso 2.

4).- Si $|R(t+\Delta t)|$ es mayor que $|R_y|$, la primera toma el valor de la segunda con su signo correspondiente.

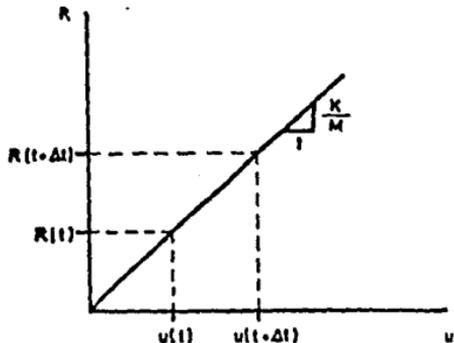


Fig. 2.4 Diagrama fuerza R - deformación.

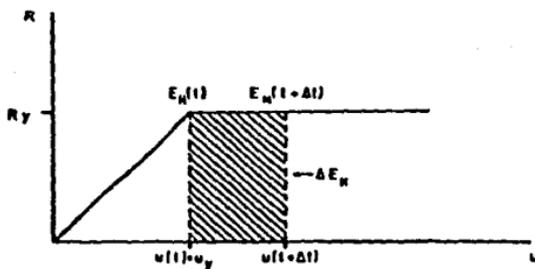


Fig. 2.5. Representación esquemática de la E_n

2.1.2 CÁLCULO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ENERGÍA

Durante un terremoto el terreno transmite a la estructura una cierta cantidad de energía. Una parte se transforma en energía cinética y otra en energía de deformación elástica. El resto es absorbida por amortiguamiento y por energía de deformación inelástica.

A partir de la ecuación (2.2) se puede calcular la energía que se suministra a la estructura, E_I^1 , con la expresión ¹¹:

$$E_I^1 = -\int_0^u M y(t) du = -M \int_0^u y(t) du \quad (2.9)$$

La energía absorbida por la estructura, E_I^2 , es¹²:

$$E_I^2 = \int_0^u M \dot{u}(t) du + \int_0^u C \dot{u}(t) du + \int_0^u R'(u) du \quad (2.10)$$

En esta expresión R' es la fuerza restauradora de la estructura.

Si las ecuaciones (2.9) y (2.10) se expresan en términos de unidad de masa y considerando $du = u(t)dt$, éstas se transforman en:

$$E_I = -\int_0^t y(t) \dot{u}(t) dt \quad (2.11)$$

$$E_I = \int_0^t \dot{u}(t) \dot{u}(t) dt + 2\xi\omega \int_0^t \dot{u}(t)^2 dt + \int_0^t R(u) \dot{u}(t) dt \quad (2.12)$$

La ecuación (2.12) permite identificar los tipos de energía por unidad de masa absorbida por la estructura.

$$E_K = \int_0^t \dot{u}(t) \dot{u}(t) dt \quad (2.13)$$

$$E_D = 2\xi\omega \int_0^t \dot{u}(t)^2 dt \quad (2.14)$$

$$E_H + E_S = \int_0^t R(u) \dot{u}(t) dt \quad (2.15)$$

En las ecuaciones (2.13), (2.14) y (2.15) E_K es la energía cinética, E_D es la energía disipada por el amortiguamiento, E_H es la energía histerérica y E_S es la energía de deformación elástica.

El incremento de energía suministrada, ΔE_s , en el intervalo de tiempo t y $t+\Delta t$ se puede evaluar con la regla de Simpson y la ecuación (2.11)¹², con lo que se obtiene:

$$\begin{aligned} \Delta E_s = & -[\dot{u}(t)y(t) + 0.5\dot{u}(t)\Delta y + \frac{1}{3}\Delta\dot{u}\Delta y + 0.5\Delta\dot{u}y(t)]\Delta t \\ & + [0.5\Delta\dot{u}\Delta y + \Delta\dot{u}y(t)] \frac{\Delta t^2}{12} \end{aligned}$$

La energía E_x en el tiempo $t+\Delta t$ se puede evaluar con la expresión anterior como:

$$E_x(t+\Delta t) = E_x(t) + \Delta E_x$$

El incremento de energía cinética, ΔE_x , se define como:

$$\Delta E_x = \dot{u}(t) \Delta u + 0.5 (\Delta u)^2$$

Igualmente la energía cinética, E_x , en el tiempo $t+\Delta t$ se puede evaluar con:

$$E_x(t+\Delta t) = 0.5 u(t+\Delta t)^2$$

El incremento de energía disipada por amortiguamiento ΔE_D , puede evaluarse con la regla de Simpson y empleando la ecuación (2.14)¹²:

$$\begin{aligned} \Delta E_D = 2 \xi \omega \left[\left(\dot{u}(t)^2 + \frac{\Delta \dot{u}^2}{3} + \dot{u}(t) \Delta \dot{u} \right) \Delta t \right. \\ \left. - \left(\dot{u}(t) \Delta \dot{u} + 0.5 \Delta \dot{u} \Delta \dot{u} \right) \frac{\Delta t^2}{6} + \frac{\Delta \dot{u}^2 \Delta t^3}{96} \right] \end{aligned}$$

La energía E_D en el tiempo $t+\Delta t$ se calcula como:

$$E_D(t+\Delta t) = E_D(t) + \Delta E_D$$

Si $R(t+\Delta t)$ es igual a R_y , la energía de deformación elástica, E_s , es máxima y se evalúa con:

$$E_s(\text{MAX}) = \frac{R_y^2}{2\omega^2}$$

Si $R(t+\Delta t)$ es menor que R_y , E_s , se calcula con:

En el intervalo inelástico E_s , es nulo.

ENERGÍA HISTERÉTICA E_H

Esta energía se disipa por la ocurrencia de daños en la estructura, y se calcula de la siguiente manera.

Si la estructura está en el intervalo elástico el incremento de energía histerética ΔE_H es igual a cero. Si la estructura tiene una fuerza restauradora igual a R_y , figura 2.5, entonces el incremento ΔE_H se calcula con:

$$\Delta E_H = \omega^2 u_y [u(t+\Delta t) - u(t)] \quad (2.16)$$

Como se muestra en la figura 2.5, la energía E_H en el tiempo $t+\Delta t$ se calcula con:

$$E_H(t+\Delta t) = E_H(t) + \Delta E_H \quad (2.17)$$

2.2 MODELOS EMPLEADOS PARA REPRESENTAR LAS RELACIONES CARGA-DEFORMACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

En este trabajo se emplean dos modelos: elastoplástico y de degradación de rigidez.

2.2.1 MODELO ELASTOPLÁSTICO

Es una representación bastante simplificada de la relación carga-deformación de la estructura, por su sencillez ha sido bastante empleado en la literatura. Un ciclo histérico completo con este tipo de modelo se muestra en la figura 2.6.

2.2.2 MODELO CON DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ

Se basa en el modelo de Takeda ¹⁴, el cual se representa como se muestra en la figura 2.7. Esta figura ilustra el concepto de degradación de rigidez que toma en cuenta la disminución de la pendiente de carga y descarga respecto a la rigidez inicial.

Para el análisis de estructuras con el modelo de degradación de rigidez de Takeda, se empleó el programa DRAIN⁹. Este programa obtiene la historia de desplazamientos de la estructura, pero en los resultados del programa DRAIN no aparecen la velocidad ni la aceleración. Motivo por el cual en este estudio la evaluación de energías para el caso de estructuras con degradación de rigidez considera sólo la energía histérica E_H , a partir de las ecuaciones (2.16) y (2.17)

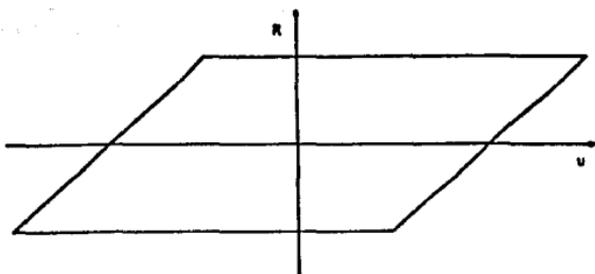


Fig. 2.6. Ciclo histerético en el modelo elastoplástico

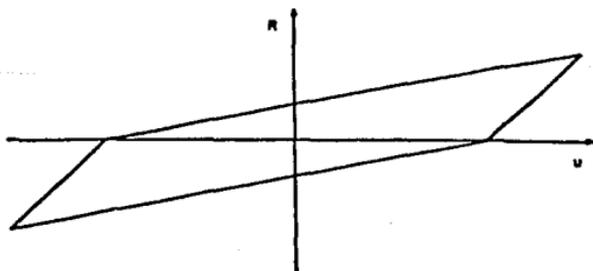


Fig. 2.7. Ciclo histerético en el modelo de degradación de rigidez de Takada

CAPITULO 3

REGISTROS SÍSMICOS EMPLEADOS

Los terremotos, que ocurren en diversas zonas telúricas de nuestro planeta, provocan deplorables pérdidas humanas y materiales. A pesar de los esfuerzos realizados, no se cuenta aún con procedimientos confiables que permitan predecir el grado de intensidad de los terremotos. Es posible, como ha sucedido en otros renglones de la ciencia, que en el futuro se pueda contar con procedimientos que nos aproximen a la naturaleza y precisión de los movimientos telúricos.

Los terremotos son causados por explosiones provocadas por el hombre, actividad volcánica, actividad tectónica, etc. De estos tipos de temblores, los más importantes son los de origen tectónico, dado que la energía y el área afectada suelen ser mucho mayores que en los otros casos.

Los movimientos del terreno provocados por terremotos son registrados con aparatos llamados acelerómetros. Estos aparatos registran las variaciones de las aceleraciones del terreno en función del tiempo, no necesitan funcionar todo el tiempo, se ajustan para que se activen a partir de un determinado nivel de aceleraciones del terreno, por lo tanto miden los movimientos de gran intensidad.

Los acelerómetros miden componentes en direcciones perpendiculares, así como la componente vertical.

3.1 INTENSIDAD DE ARIAS

Con el objeto de disminuir el tiempo de ejecución de los programas para computadora utilizados en este estudio y dado que algunos registros sísmicos empleados tienen duraciones muy grandes, para definir una duración del registro seleccionado, de manera que sea bastante menor que la del registro seleccionado, se empleó el criterio de evaluar la intensidad de Arias². El criterio que se siguió fue, evaluar la intensidad de Arias del registro seleccionado de manera que ésta sea menor solo en un pequeño porcentaje a la intensidad de Arias del registro original.

Arias² define la intensidad como la cantidad de energía por unidad de peso disipada por una familia de osciladores lineales de un grado de libertad, cuyas frecuencias están comprendidas en el rango $(0, +\infty)$, para un terremoto y amortiguamientos dados. Esta intensidad en su variante simplificada se define como:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_D} a^2(\tau) d\tau$$

En la expresión anterior I_A tiene unidades de velocidad.

Además:

τ = tiempo

g = aceleración de la gravedad

$a(\tau)$ = aceleración del suelo durante el terremoto

t_D = duración total del terremoto

Si en lugar de t_D se elige un valor t_0 , pueden calcularse los valores de I_A respectivos y revisar que la diferencia anteriormente mencionada no sea significativa.

3.2 REGISTRO SÍSMICO DE LA SCT

Para este estudio se eligió una duración de 61.9 segundos de la parte más intensa de la componente SCT E-W. Este registro fue obtenido en el edificio de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en la Ciudad de México, durante el terremoto del 19 de septiembre de 1985⁷. El registro seleccionado se muestra en la figura 3.1. La intensidad de Arias correspondiente a este movimiento que se calculó fue igual a 2.33 m/seg. El valor de la intensidad de Arias calculada para el registro original corresponde a 2.44 m/seg.

Este registro tiene características singulares, debido a que corresponde a un tipo de movimiento sísmico propio de suelos blandos localizados lejos de las fallas activas.

3.3 REGISTRO SÍSMICO EL CENTRO

Este registro ha sido bastante empleado en la literatura y se muestra en la figura 3.2. Este registro corresponde a la componente N-S del terremoto ocurrido en California el 18 de mayo de 1940⁴. Se eligió una duración de 30 segundos, la intensidad de Arias que se calculó para este registro es igual a 1.79 m/seg.

Este registro corresponde a un movimiento sísmico propio de suelos duros y cercanos a fallas activas. El valor de la intensidad de Arias para el registro original es de 1.93 m/seg, Arias².

3.4 REGISTRO SÍSMICO DE LLOLLEO

Este registro corresponde a la componente N10E obtenido en Llolleo, Chile, en el terremoto del 3 de marzo de 1985¹². En la figura 3.3 se muestra el registro sísmico de aceleraciones empleado en este trabajo. Se seleccionó 60 segundos de la parte más intensa del movimiento. La intensidad de Arias que se calculó para este registro es igual a 15.15 m/seg. El valor de la intensidad de Arias que se calculó para el registro original es de 15.33m/seg. La diferencia entre este valor y el correspondiente al registro empleado en este estudio es de 1.4%.

De manera semejante al terremoto de El Centro, este registro corresponde a un movimiento sísmico propio de suelos duros y cercanos a fallas activas.

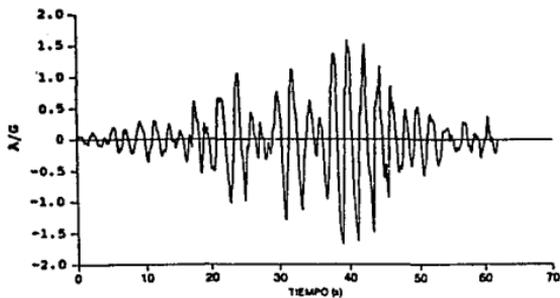


Fig. 3.1 Parte más intensa del acelerograma del sismo registrado en la estación de la SCT, componente E-W (19 de septiembre de 1985), D.F., México.

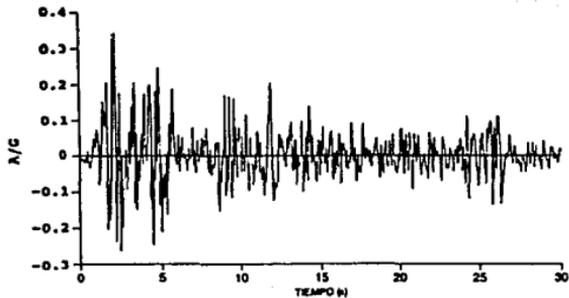


Fig. 3.2 Acelerograma del sismo registrado en la estación "El Centro", componente N-S (18 de mayo de 1940), en California, E.E.U.U.

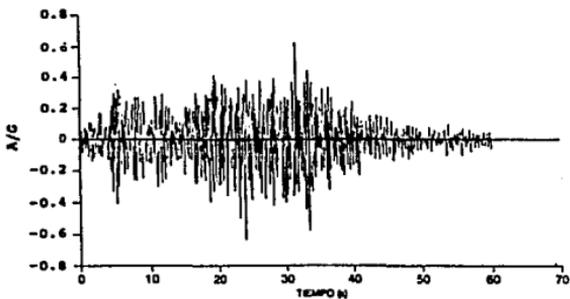


Fig. 3.3. Parte más intensa del acelerograma del sismo registrado en Lolleo, componente N10E (3 de marzo de 1985), en Lolleo, Chile.

3.5 ESPECTROS DE RESPUESTA

Se puede calcular una aproximación a los valores máximos de las fuerzas provocadas en la estructura por una excitación sísmica empleando los llamados espectros de respuesta sísmica¹. Con este concepto se obtienen los desplazamientos, velocidades ó aceleraciones que tendría una estructura sencilla de un grado de libertad, y se expresa en función del periodo natural de la estructura . En la figura 3.4 ¹ se muestra el espectro de respuesta, en este caso de desplazamientos en el intervalo elástico, que se obtendrían a partir del registro de El Centro mencionado anteriormente.

En esta investigación el intervalo de periodos naturales, T , que se seleccionó para el estudio efectuado en este trabajo fue igual a 0.25 a 3.0 segundos con incrementos de 0.25 segundos, para el registro de la SCT. Para los registros El Centro y Llolleo este intervalo fue de 0.1 a 3.0 segundos con incrementos de 0.1 para el intervalo de periodos cortos (menores de 1 seg) y 0.25 segundos para el resto del intervalo. Además en estos dos últimos registros se incluyeron los espectros inelásticos correspondientes a periodos asociados a los picos máximos de respuesta elástica.

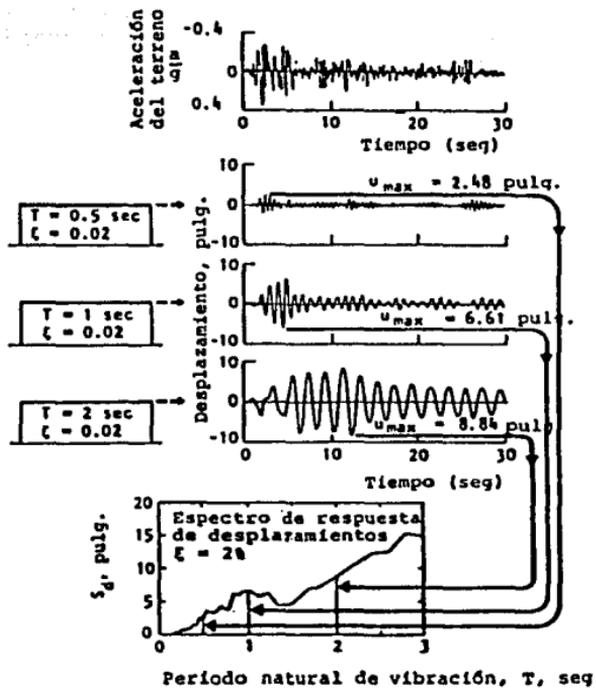


Fig. 3.4 Criterios para calcular espectros de respuesta de desplazamientos⁴.

3.5.1 COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA

a).- ESPECTROS ELÁSTICOS

Los espectros de respuesta para los registros que se emplean en este estudio se muestran en las figuras 3.5, 3.6, 3.7 correspondientes a los registros SCT, EL CENTRO Y LLOLLEO respectivamente. En estas figuras los espectros elásticos se identifican con $\mu=1$.

Si se comparan los espectros de respuesta elástica de los registros empleados en este estudio para EL CENTRO y LLOLLEO figuras 3.6 y 3.7 respectivamente se observa que tienen características semejantes en lo que se refiere al intervalo de periodos asociados a los picos máximos de respuesta. Por ejemplo en ambos espectros se observa que para periodos cortos del orden de menos de 0.5 segundos, se presentan las mayores demandas de aceleraciones, no obstante que ambos sismos tienen una diferencia bastante considerable en intensidad. La intensidad de Arias para el registro LLOLLEO componente N10E de 1985 es del orden de 8 veces la intensidad de Arias del registro EL CENTRO componente N-S de 1940. Por otro lado el espectro de respuesta elástico de la SCT figura 3.5 es diferente a los anteriores espectros porque para este sismo las mayores demandas de ordenadas del espectro elástico se presentan en periodos largos, del orden de 2 segundos.

La respuesta máxima de los espectros de respuesta elástica para los registros de la SCT, EL CENTRO Y LLOLLEO corresponden a los periodos naturales T, igual a 2.0, 0.25, y 0.22 segundos respectivamente.

b).- ESPECTROS INELÁSTICOS

La figura 3.5 muestra que en el intervalo de periodos de aproximadamente 1.5 a 3 segundos la ductilidad en estructuras en terremotos como el registrado en la SCT es bastante efectiva para reducir las ordenadas del espectro elástico.

En la figura 3.6 se observan los resultados del empleo del temblor El Centro. Como se observa en el caso de la SCT, el efecto de la ductilidad es disminuir las ordenadas de los espectros de respuesta inelástica. La figura 3.7 muestra resultados semejantes para el caso de la componente N10E del sismo de Lloleco.

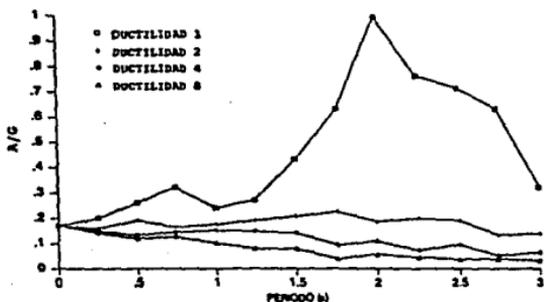


Fig 3.5. Espectros de respuesta del registro sísmico de la SCT, componente E-W, (19 de septiembre de 1985), D.F., México.

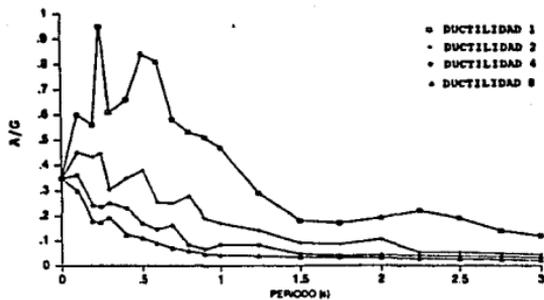


Fig 3.6 Espectros de respuesta del registro sísmico de "El Centro", componente N-S (18 de mayo de 1940), California E.E.U.U.

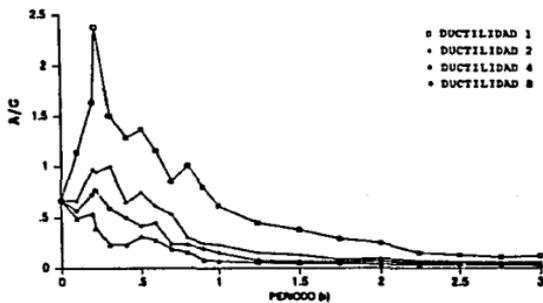


Fig 3.7 Espectros de respuesta del registro sísmico de Lolleo, componente N10E, (3 de marzo de 1985), Lolleo, Chile.

CAPITULO 4

EVALUACIÓN DE DEMANDAS DE ENERGÍA HISTERÉTICA EN ESTRUCTURAS SENCILLAS SOMETIDAS A ACCIONES SÍSMICAS

En este capítulo se estudia la demanda y capacidad de disipación de energía en estructuras sencillas sometidas a terremotos, con el objeto de ampliar el conocimiento del comportamiento sísmico de estructuras, el cual generalmente se basa sólo en conceptos de resistencia y ductilidad.

En este estudio se elaboró un programa para computadora, elaborado por Rodriguez y Sanchez ¹², el cual emplea el modelo elastoplástico. Para la ejecución de este programa se requieren los siguientes parámetros: porcentaje de amortiguamiento, ξ , frecuencia circular de la estructura, ω , intervalo de digitización del registro sísmico, número de puntos que contiene el registro sísmico y máxima ductilidad de desplazamiento, μ , que tiene la estructura. Si el resultado de dividir el periodo natural de la estructura, (T) , entre 20, es mayor que el intervalo de digitización del registro sísmico, entonces el programa interpola un nuevo punto a cada $T/20$, empleando los puntos del registro original. Este criterio es sugerido por Zarah y Hall ¹³

Como resultado de este programa, se obtiene la respuesta de desplazamientos, velocidades, aceleraciones y resistencia de la estructura durante la acción del sismo. A partir de esta respuesta se obtienen las distribuciones de la demanda de energía (E_d), así como las demandas de disipación de energía histerética (E_H), del amortiguamiento (E_D), cinética (E_C) y la de deformación elástica (E_E).

Para esta investigación se empleó el modelo de estructura de un grado de libertad que se ilustra en la figura 4.1, el cual tiene rigidez lateral K , un porcentaje de amortiguamiento ξ y un elemento de masa unitaria.

También en algunos casos se empleó el modelo de degradación de rigidez propuesto por Takeda ¹⁴. Para estos casos se empleó el programa DRAIN⁴ y se consideró que la estructura debería tener una resistencia R_y tal que su ductilidad de desplazamientos μ , fuera la seleccionada en el estudio. Además para esta estructura se consideraron una altura de 100 cm y una masa unitaria. Con esta condición se analizó el modelo mostrado en la figura 4.1. Para emplear el modelo de degradación de rigidez de Takeda se requiere dar valores numéricos a los siguientes parámetros: Rigidez inicial por unidad de masa $K = \omega^2$, altura de la estructura, módulo de elasticidad del concreto E , módulo de inercia I , momento de fluencia $M_y = R_y H/2$, y un coeficiente asociado a el porcentaje de amortiguamiento ξ , y a la frecuencia circular ω , así como el registro sísmico con su respectivo intervalo de digitización.

Como resultado del empleo del programa DRAIN se obtiene la respuesta en el tiempo, la resistencia asociada a la ductilidad seleccionada μ , que requiere la estructura cuando se encuentra sometida a la acción sísmica. A partir de esta respuesta se obtiene la demanda de energía histerética E_H causada por el sismo en estudio.

4.1.1 EVALUACIÓN DE DEMANDAS DE ENERGÍA HISTERÉTICA PARA EL TEMBLOR DE LA SCT COMPONENTE E-W DEL (19 DE SEPTIEMBRE DE 1985)

En la figura 4.2 se estudia el efecto de μ en las demandas de energía histerética E_H . El resultado corresponde al modelo elastoplástico excitado con el registro de la SCT anteriormente comentado y para ξ , igual a 0.05. Las mayores demandas de E_H se presentan en el intervalo de periodos de aproximadamente 1.5 a 3.0 segundos. En este intervalo la ductilidad en estructuras en terremotos como el registrado en la SCT es bastante efectiva para reducir la demanda de energía histerética. En el intervalo de periodos menores a 1.5 segundos, mayores ductilidades llevan a mayores demandas de E_H .

La figura 4.3 ilustra el efecto del tipo de modelo no lineal en las demandas de energía histerética para el registro de la SCT. Para μ y ξ se emplean los valores 4 y 0.05 respectivamente. Los modelos analizados son elastoplástico y de degradación de rigidez. Los resultados de la figura 4.3, muestran que para estructuras con periodos menores de 1.5 segundos, las demandas de E_H para el modelo elastoplástico son menores que para el caso con degradación de rigidez. En algunos casos las diferencias son del orden del 50%. En estructuras con periodos mayores de 1.5 segundos la situación anterior se invierte y el caso con degradación de rigidez da menores demandas de E_H que el caso elastoplástico. Además, para el caso elastoplástico el pico máximo ocurre en 2 segundos, mientras que en el caso de degradación de rigidez hay un corrimiento de este pico al valor de 1.5 segundos.

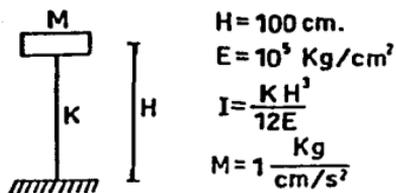


Fig. 4.1 Modelo considerado en el estudio.

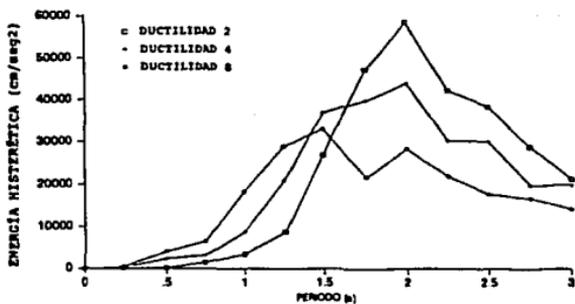


Fig. 4.2 Demanda de E_H con el registro SCT, caso elastoplástico. $\mu=2,4,8$, $\xi=0.05$

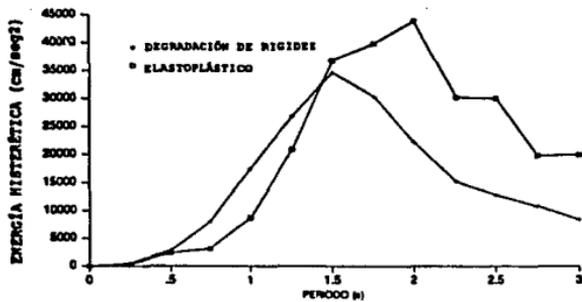


Fig. 4.3 Demanda de E_H con el registro SCT, casos elastoplástico y degradación de rigidez, $\mu=4$, $\xi=0.05$

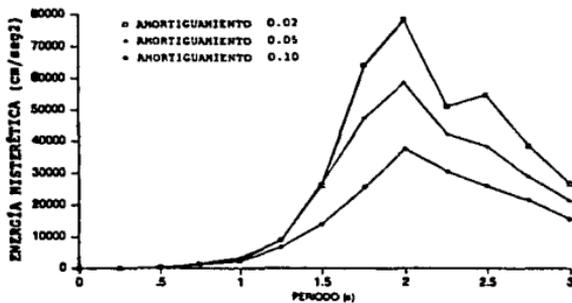


Fig. 4.4 Demandas de E_H con el registro SCT, caso elastoplástico, $\mu=2$, $\xi=0.02, 0.05$ y 0.10

La figura 4.4 muestra el efecto de ξ porcentaje de amortiguamiento, en las demandas de energía histerética para el modelo elastoplástico excitado con el registro de la SCT para μ , igual a 2. La figura 4.5 muestra resultados semejantes para el caso μ , igual a 4. Estos resultados muestran que a mayor porcentaje de amortiguamiento la demanda de energía histerética disminuye.

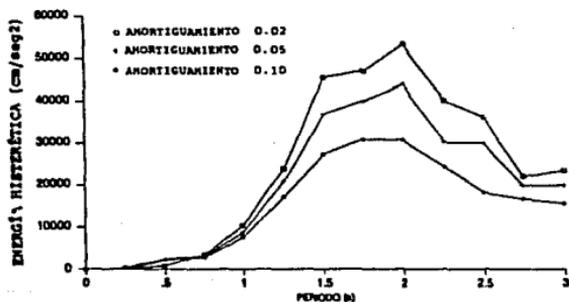


Fig. 4.5 Demandas de E_H con el registro SCT, caso elastoplástico, $\mu = 4$, $\xi = 0.02, 0.05$ y 0.10

4.1.1 EVALUACIÓN DE DEMANDAS DE ENERGÍA HISTERÉTICA PARA LOS TEMBLORES EL CENTRO COMPONENTE N-S (18 DE MAYO DE 1940) Y LLOLLEO, CHILE COMPONENTE N10E (3 DE MARZO DE 1985)

La figura 4.6 muestra los resultados del empleo del temblor de El Centro componente N-S para analizar el efecto de μ , en las demandas de E_H ; para el caso elastoplástico con ξ , igual a 0.05. La figura 4.7 muestra resultados semejantes para el caso de la componente N10E del sismo de Lloleto.

Como se aprecia en las figuras 4.6 y 4.7 las demandas máximas de energía histerética ocurren en estructuras con periodos naturales cortos, menores de 1 segundo. En los casos de los temblores EL CENTRO y LLOLLEO el efecto de la ductilidad de desplazamientos en periodos cortos es aumentar las demandas de E_H .

En la figura 4.8 se muestran los resultados del empleo del temblor El Centro para analizar el efecto de ξ , en las demandas de energía histerética; para el caso elastoplástico con μ , igual a 4. En la figura 4.9 se muestran resultados semejantes para el caso del registro de Lloleto, componente N10E. Como ocurre en cierto intervalo de periodos de estructuras en el caso del registro SCT anteriormente comentado, para los temblores El Centro y Lloleto, figuras 4.8 y 4.9, se observa que el incremento del amortiguamiento reduce la demanda de energía histerética.

La figura 4.10 muestra el efecto del tipo de modelo no lineal en las demandas de energía histerética para el caso del registro El Centro, con μ igual a 4 y ξ igual a 0.05. Los modelos analizados son el elastoplástico y el de degradación de rigidez. Los resultados de la figura 4.10 muestran que los resultados de emplear estos diferentes modelos analíticos no da lugar a diferencias considerables en el intervalo de periodos menores de aproximadamente 1.5 segundos.

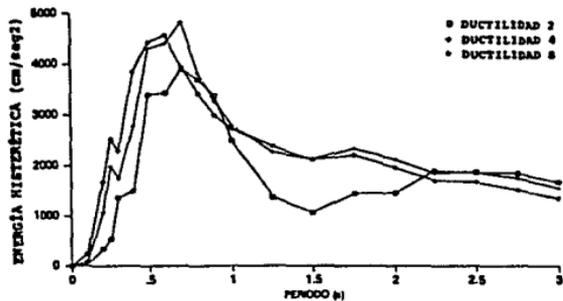


Fig. 4.6 Demandas de E_H con el registro El Centro, caso elastoplástico, $\mu=2,4,8$, $\xi=0.05$

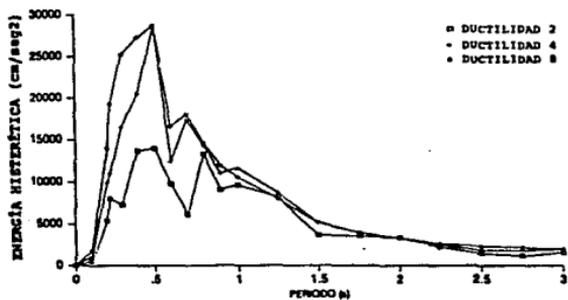


Fig. 4.7 Demandas de E_H con el registro Lolloo, caso elastoplástico, $\mu=2,4,8$, $\xi=0.05$

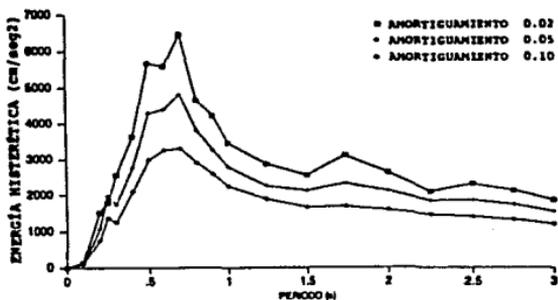


Fig. 4.8 Demandas de E_H con el registro El Centro, caso elastoplástico, $\mu=4$, $\xi=0.02, 0.05$ y 0.10

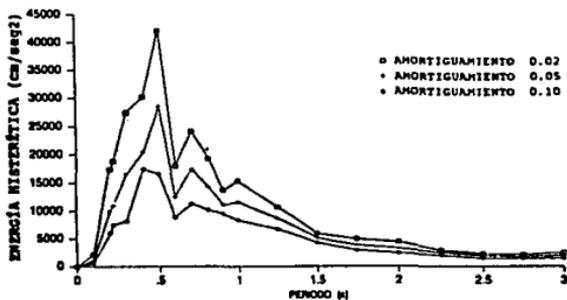


Fig. 4.9 Demandas de E_H con el registro Llofco, caso elastoplástico $\mu=4$, $\xi=0.02, 0.05$ y 0.10

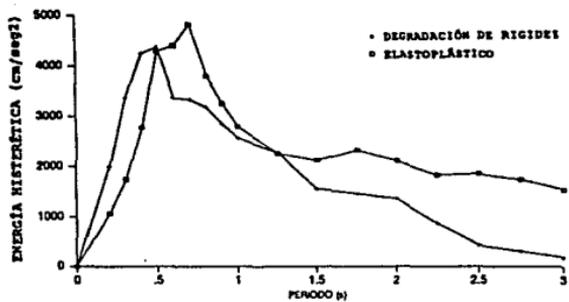


Fig. 4.10 Demandas de E_H con el registro El Centro, Casos elastoplástico y degradación de rigidez, $\mu=4$, $\xi=0.05$

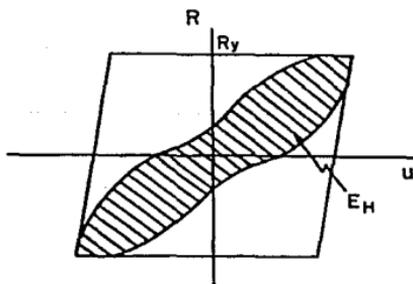


Fig. 4.11. E_H de un ciclo de histeresis

4.1.3 DEMANDAS Y CAPACIDADES DE DISIPACION DE ENERGIA

Empleando los criterios propuestos por Zahrah y Hall¹¹, Rodriguez¹¹ propone una expresión para definir la energía histerética adimensional disipada durante un sismo la cual se expresa con la ecuación siguiente:

$$N_o = \frac{E_H}{(R_y T)^2} \quad (4.1)$$

La expresión anterior tiene la ventaja de poder expresar E_H en forma adimensional mediante el empleo de los parámetros R_y y T que son básicos en el análisis sísmico de estructuras.

También en la referencia 11 se proponen criterios para evaluar la energía histerética disipada durante una historia de cargas estáticas laterales reversibles arbitraria típica de un ensaye de laboratorio. La energía histerética adimensional se evalúa en este caso con la siguiente expresión:

$$\frac{E_H}{(R_y T)^2} = \frac{\alpha}{\pi^2} \sum_{i=1}^n n_i (\mu - 1) \quad (4.2)$$

En la expresión anterior, n_i es el número de ciclos de carga completos en ambos sentidos con un factor de ductilidad de desplazamiento máximo, μ_i , que tiene la estructura durante la historia de cargas. α es el cociente entre el área del ciclo histerético y el área de ciclo elastoplástico. En el caso de la figura 4.11 α es el cociente de el área sombreada (energía que se disipa en un ciclo histerético de forma arbitraria) y el área del ciclo elastoplástico. En ensayos de columnas de concreto reforzado efectuadas por Priestley y Park¹⁰, para el caso de columnas con buen confinamiento y comportamiento del tipo de flexión, se ha encontrado para α valores de alrededor de 0.5.

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

4.2 APLICACIÓN DE RESULTADOS DE ESTE ESTUDIO

4.2.1 CRITERIOS DE ENSAYES EN LABORATORIO DE ESTRUCTURAS ANTE CARGAS LATERALES CÍCLICAS REVERSIBLES

En los ensayos estáticos con cargas laterales reversibles que se emplean en estudios experimentales de estructuras de laboratorio se aplican diferentes historias de carga. La selección de estas no sigue un criterio racional, en general estos criterios se basan en criterios intuitivos de quienes efectúan estos estudios experimentales.

Para ilustrar una aplicación de los resultados de esta investigación, se eligió la historia de ciclos de carga que se empleó en la Universidad de Michigan E.E.U.U. Abdel-Fattah y Wight¹. Esta historia de carga se ilustra en la figura 4.12 y se caracteriza por el escaso número de ciclos de carga.

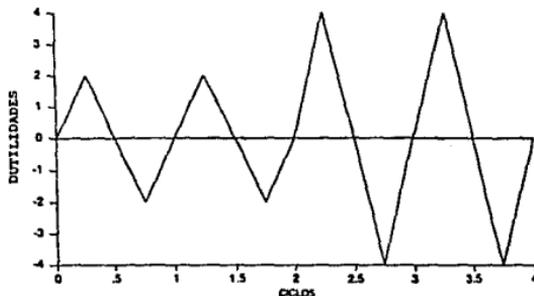


Fig 4.12 Historia de cargas empleada en la Universidad de Michigan.

4.2.3 DEMANDAS Y CAPACIDADES DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA HISTERÉTICA PARA LOS TEMBLORES E-W DE LA SCT DE SEPTIEMBRE DE 1985, N-S DE EL CENTRO, CALIFORNIA (1940) Y LLOLLEO N10E, CHILE (1985).

La figura 4.13 muestra los espectros de respuesta de energía histerética adimensional por sismo definida por el parámetro N_0 , ecuación (4.1) para los tres temblores utilizados en este estudio y la energía histerética adimensional durante una historia de cargas evaluada con la ecuación (4.2). El modelo analizado es el elastoplástico con valores de μ , igual a 4 y ξ , igual a 0.05. En esta figura se observa que los picos del espectro de la energía histerética adimensional de los tres sismos corresponden a diferentes intervalos de periodo. La historia de cargas usada en la Universidad de Michigan (UM) se encuentra del lado de la inseguridad para los tres sismos en un rango extenso de periodos.

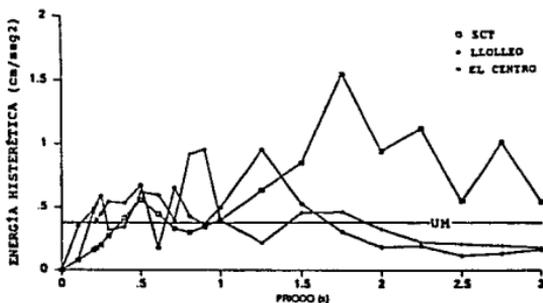


Fig. 4.13. Comparación de las energías histeréticas adimensionales por carga cíclica reversible y por sismo, con los registros sísmicos SCT, EL CENTRO y LLOLLEO. Caso elastoplástico, $\mu=4$, $\xi=0.05$

4.2.4 CORRELACIÓN ENTRE DEMANDAS DE ENERGÍA HISTERÉTICA CALCULADA Y DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS DURANTE EL TERREMOTO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

Durante el terremoto del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México, la mayor parte de daños y colapsos de estructuras de diversos niveles, ocurrieron en la llamada zona del lago del Distrito Federal.

El análisis de una estadística de daños en edificaciones de la Delegación Cuauhtémoc indica que un total de 45625 edificaciones existentes, 1397 llegaron al colapso o tuvieron daños importantes⁸. La figura 4.14 muestra el diagrama de barras para los diferentes porcentajes de daños o colapsos en función del número de niveles. Esta estadística indica que la mayor incidencia de daños ocurrió en edificaciones de 9 a 12 niveles, del total de edificaciones con este número de niveles, 36.8% llegaron al colapso o tuvieron daños severos. En estructuras de más de 12 niveles este porcentaje fue de 35.4%⁸.

La ecuación (4.3) se obtuvo como una aproximación a los resultados comentados por Mell⁶. Esta expresión permite seleccionar con una aproximación regular el periodo natural, T, y el número de niveles, n, de edificaciones típicas de la Ciudad de México.

$$T = \frac{n}{7} \quad (4.3)$$

Los resultados de aplicar la ecuación (4.3) se ilustra en la figura 4.14.

Los resultados de la figura 4.14 sugieren que la mayor incidencia de daños y colapsos ocurrieron en edificaciones con periodos naturales dentro del intervalo de 1 a 2 segundos.

En la figura 4.15 se muestra la demanda de energía histerética adimensional por sismo para los casos de μ igual a 2, 4, y ξ igual a 0.05 para el registro de la SCT anteriormente comentado. La comparación de resultados que se muestran en las figuras 4.14 y 4.15 sugieren una relación de las demandas calculadas de E_H y la distribución de daños en estructuras durante el terremoto en la Ciudad de México en 1985. En la figura 4.15 se observa que las demandas asociadas a los periodos intermedios de 1 a 2 segundos son mayores que las demandas asociadas a periodos menores de 1 segundo. Las estructuras de mediana altura (6 a 12 niveles, periodos de 0.9 a 1.8 segundos según la ecuación 4.3), fueron las que sufrieron daños importantes o llegaron al colapso. Esto sugiere una correlación aceptable entre las demandas que se evaluaron en este estudio para E_H en su forma adimensional y la distribución de daños en estructuras durante el terremoto de 1985 en la Ciudad de México.

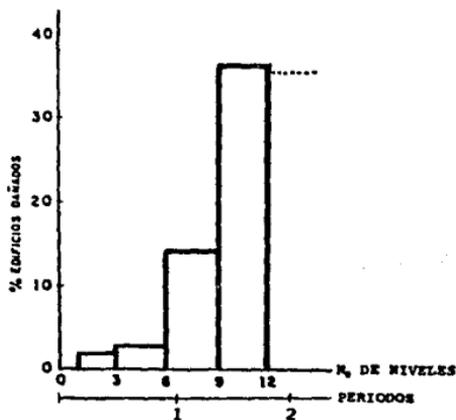


Fig. 4.14 Estadística de daños ocasionados por el terremoto de 1985 en edificaciones de la Delegación Cuauhtémoc.

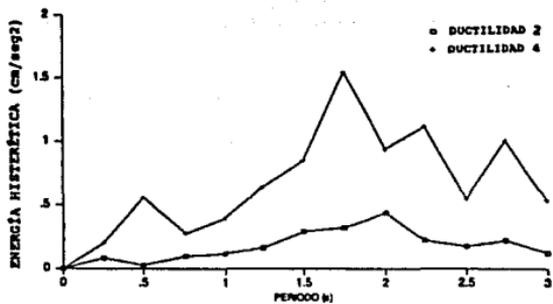


Fig. 4.15 Demandas de energía histérica adimensional, registro SCTEW, 1985. Caso elastoplástico, $\mu=2.4$, $\xi=0.05$

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1).- *Se evaluó la capacidad de disipación de energía histerética que se obtendría con la historia de cargas empleada en la Universidad de Michigan para ensayos de estructuras en laboratorio. Se encontró que para los tres sismos empleados en este estudio el utilizar esta historia de cargas estáticas en general lleva a resultados que están en el lado de la inseguridad en un rango extenso de periodos, las capacidades de disipación de energía histerética que se obtienen son menores a las demandas de energía histerética.*

- 2).- *Se compararon las demandas de energía histerética para el registro de la SCT considerando los modelos elastoplástico y el de degradación de rigidez. La diferencia más relevante es que, la demanda máxima de energía histerética en el modelo elastoplástico ocurre en el periodo de 2.0 segundos, el pico de energía histerética en el modelo de degradación de rigidez ocurre en el periodo de 1.5 segundos.*

- Se compararon las demandas de energía histerética para el registro de El Centro, considerando los modelos elastoplástico y el de degradación de rigidez encontrándose diferencias que sólo en pocos casos son significativas.*

Se evaluó la demanda de energía histérica para el registro de Lolloco considerando el modelo elastoplástico encontrándose que la distribución de demandas de energía histérica en función del periodo es semejante a la del registro El Centro. Sin embargo, las demandas de este son bastante menores que la del registro de Lolloco.

- 3).- La comparación de la demanda de energía histérica, con la distribución de daños y colapsos ocurridos en el terremoto del 19 de septiembre de 1985, muestra una correlación aceptable.*

- 4).- Los resultados de esta investigación sugieren que la demanda de disipación de energía es una buena medida de capacidad de un terremoto para provocar daños en estructuras.*

REFERENCIAS

- 1.- *Abdel-Fattah, B. y Wight, j.*
" Study of moving Beam Plastic Hinging zones for Earthquakes-resistant Design of Reinforced Concrete Buildings ".
ACI Journal, Enero-Febrero 1987.
- 2.- *Arias A.*
" A Measure of Earthquake Intensity ".
Seismic Design for Nuclear Power Plants, MIT Press Camside, MA, 1970.
- 3.- *Chopra Anil*
" Dynamics of Structures, A Primer "
Earthquake Engineering Research Institute, California, USA, 1980.
- 4.- *Earthquake Engineering research Laboratory.*
" Strong Motion Earthquake Accelerograms Digitized and Plotted Data ".
Vol II, Parte A, California Institute of Technology, Pasadena California, 1971.
- 5.- *Housner, G.*
" Limit Design of Structures to Resist Earthquakes ".
First world Conference on Earthquake Engineering, California, 1956.
- 6.- *Meli R.*
"Modificaciones a la Practica de Diseño sísmico de Estructuras de Concreto".
Revista Ingeniería Sísmica, Mayo - Agosto de 1989.
- 7.- *Mena, E et al.*
" Catálogo de Resultados del Proceso de Acelerogramas del Sismo del 19 de Septiembre de 1985. "
Parte I. Instituto de Ingeniería, UNAM, publicación N° 497, julio 1986.

- 8.- Noreña F, C Castañeda y J Iglesias
" Evaluation of the Seismic Capacity of Buildings in México City ".
Earthquake Spectra Journal, Earthquake Engineering Research Institute,
Vol 5, N° 1, Febrero 1989.
- 9.- Powell, G. H. y Kanaan, A.
"A General Purpose Computer Program for Dynamics Analysis of Inelastic
Plane Structures ".
Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley,
EERC 73-6,1973.
- 10.- Priestley, N. y R. Park
" Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading ".
ACI Journal, Enero-Febrero 1987.
- 11.- Rodríguez, M.
" Pseudostatic testing related to damage potential of Earthquakes " .
Memorias del 10º Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica (10 WCEE),
Madrid, España
- 12.- Rodríguez, M. A. Sanchez
" Disipación de Energía Introducida por Terremotos en estructuras sencillas "
Informe del Instituto de Ingeniería UNAM, Febrero 1989.
- 13.- Saragoni, R.
" Analisis de los Acelerogramas del Terremoto del 3 de Marzo de 1985 ",
Parte I. Universidad de Chile, Publicación SES14/1985 (199), Dic. de 1985.
- 14.- Takeda, Sosen Nielsen
" Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes ".

Journal ASCE, Vol 96ST12, Diciembre 1970.

15.- **Zahrah, T. y Hall, W.**

" Seismic Energy Absorption in Simple Structures ".

Journal Struct. Div. ASCE, 110, Vol 8, pp 1757-1772.