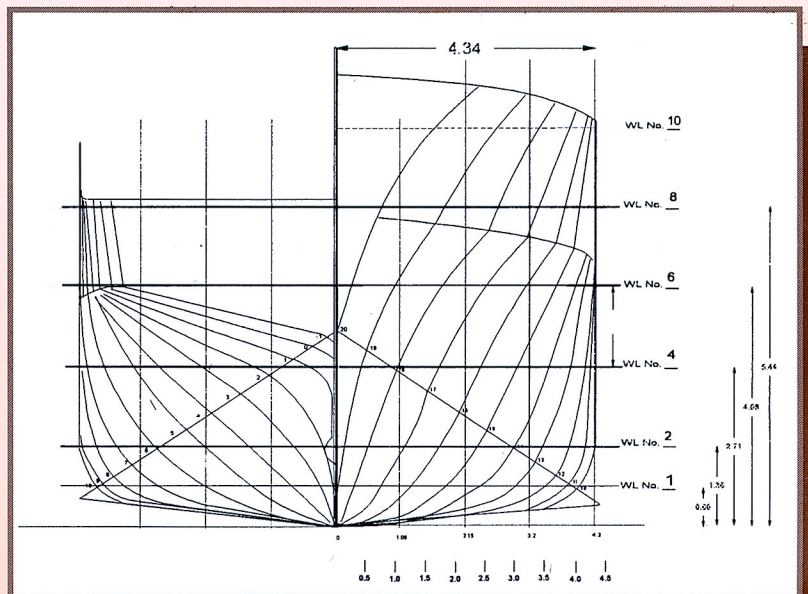
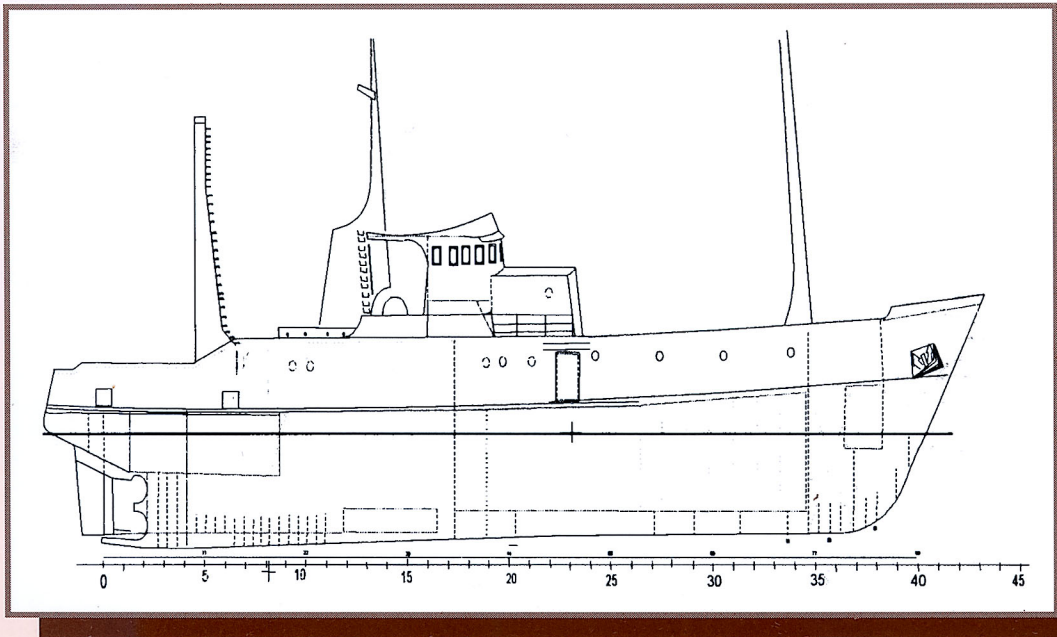


# Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica  
Julio/Diciembre 1995 VOLUMEN 5 Nº 2



## ENERGIA PLASTICA DISIPADA DURANTE UN SISMO COMO FUNCION DE LA RESISTENCIA Y DE LA POTENCIA MEDIA DEL SISMO

*M.F. Cruz Azofeifa\**

*O. A. López\*\**

### RESUMEN

Durante un sismo, la energía que se trasmite del suelo a las estructuras debe ser disipada mediante los mecanismos propios de amortiguamiento y mediante la energía de deformación plástica que está asociada al daño estructural.

Este trabajo relaciona esta energía plástica con la energía de entrada, la duración del sismo, el período de la estructura, el porcentaje de amortiguamiento viscoso y la resistencia de la estructura. Se estudia esta relación en estructuras de un grado de libertad y de diferentes resistencias. El trabajo se realizó para 5 estructuras de período de oscilación iguales a 0,25, 0,5, 1,0, 1,5 y 3,0 seg. y para un porcentaje de amortiguamiento viscoso del 2%.

Se utilizan seis registros sísmicos para realizar los análisis no lineales en el tiempo.

Se llega a expresiones sencillas que relacionan la porción e energía de entrada que es convertida en energía plástica, en función de la potencia media del sismo y de la potencia de amortiguamiento viscoso medida a partir de la deformación de cedencia.

### SUMMARY

During earthquakes the energy flows from the ground to the structures and should be dissipated by damping mechanisms and by plastic deformation energy which is responsible for structural damage.

This work relates this plastic energy with the input energy, the earthquake duration, the period of the structure, the damping ratio, and the structure strength. One degree of freedom structures with different strengths are used. The structures are tested for periods of 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 and 3.0 sec., and the damping ratio used is 0.02. Six earthquake records are used to perform the non linear time analysis.

Simple expressions are found which relate the amount of input energy that is converted into plastic energy as a function of mean earthquake power and the viscous damping power measured from the yield displacement.

### INTRODUCCION

El daño en estructuras sujetas a movimientos sísmicos es ocasionado por el nivel de desplazamiento que la estructura sufra y por el efecto de fatiga que experimente el material (1). Este último

efecto está relacionado con la cantidad de energía plástica que la estructura disipe durante el tiempo que dure el movimiento. Basados en estos conceptos Park y Ang (2) desarrollaron un índice de daño que contiene ambos aspectos del daño. El estudio de Chung et al (3) ha demostrado que la herramienta más útil de que dispone el ingeniero estructural para controlar el daño en los elementos de concreto reforzado, es el porcentaje de refuerzo longitudinal; de ahí que el daño pueda controlarse con la resistencia asignada al elemento.

\* Prof., Ing. Civil, Ms., Esc. Ing. Civil, UCR.

\*\* Ing. Civil.

Cualquier método de diseño que pretenda controlar el daño cuantitativamente debe considerar el nivel de desplazamiento que experimentará la estructura, así como la energía plástica que esta deba disipar. Los desplazamientos de los sistemas inelásticos de período mayor que los predominantes del sismo así como las energías de entrada han sido objeto de mucha investigación (4, 5, 6, 7, 8) y pueden calcularse mediante métodos determinísticos, independientemente de la resistencia de la estructura. No puede decirse lo mismo de la energía plástica que será muy sensible a la resistencia de la estructura y al porcentaje de amortiguamiento viscoso. Si la resistencia va a ser utilizada como el parámetro para controlar el daño, deberá conocerse entonces la relación que existe entre energía plástica y resistencia.

El objetivo de este trabajo es determinar una expresión para el cálculo de la energía plástica como una función de la energía de entrada, de la resistencia, del período y amortiguamiento de la estructura y de la duración del sismo.

Este trabajo estudia cinco estructuras de un grado de libertad con seis niveles de resistencia cada una y sujetas a seis registros sísmicos de diferentes intensidades y duraciones. Se determinaba la relación que existe entre la energía plástica y la resistencia; sin embargo, como se pudo demostrar en el trabajo, la cantidad de energía plástica en relación con la energía de entrada es también muy dependiente de la potencia promedio que el sismo introduzca en la estructura.

## ENERGIA DE ENTRADA Y ENERGIA PLASTICA

En este trabajo se utiliza la definición de energía relativa de entrada definida como (4)

$$E_i = - \int_0^{\infty} M \ddot{u}_g(t) du \quad (1)$$

donde  $\ddot{u}_g$  es la aceleración del movimiento del terreno,  $\mu$  es el desplazamiento de la masa relativo al suelo, y  $m$  es la masa del sistema. Esta energía representa el trabajo de la fuerza sísmica equivalente

sobre la masa en los desplazamientos relativos y desprecia los desplazamientos de cuerpo rígido del sistema. Esta expresión es la más usada en la mayoría de los trabajos relativos a la energía sísmica.

En la Ref. 4 se muestra que para el rango de períodos intermedios (0,2 a 5,0 seg) la energía relativa de entrada es muy similar a la energía absoluta de entrada dada por

$$E_i = - \int_0^{\infty} M \ddot{u}_t(t) du_g \quad (2)$$

donde  $\ddot{u}_t(t)$  es la aceleración total de la masa y  $u_g$  es el desplazamiento del terreno.

Por esta razón se usará la ecuación 1 para definir la energía de entrada.

La energía de entrada es un parámetro relativamente estable e independiente de algunas características no lineales (5, 6, 7). El porcentaje de amortiguamiento tiene poco efecto en la energía de entrada (6, 7). La configuración de la fuerza restauradora influye poco en la cantidad de energía suministrada al sistema, esto implica que indistintamente si la función fuerza-deformación es elastoplástica, bilineal, con o sin degradación de resistencia o rigidez, la energía de entrada permanecerá con muy pocos cambios.

La energía de entrada en sistemas de varios grados de libertad puede ser obtenida con espectros de energía basados en sistemas de un grado de libertad (8). Este hecho fue verificado en la Ref. 4, midiendo la energía de entrada en un edificio de seis pisos ensayado en una mesa vibradora. Se concluyó que los espectros de energía para sistemas de un grado de libertad pueden ser usados confiablemente para evaluar la energía de entrada en edificios de múltiples grados de libertad.

La energía disipada plásticamente se define mediante:

$$E_p = \int_0^{\infty} F \cdot [du_p] \quad (3)$$

donde:  $F$  = fuerza de restitución  
 $u_p$  = componente plástica del desplazamiento

La relativa estabilidad que muestra el parámetro energía de entrada no lo muestra la energía disipada plásticamente  $E_p$ . Por el contrario la energía histerética es un parámetro muy sensible a la razón de amortiguamiento viscoso, a la resistencia y al período del sistema.

**MODELOS, SISMOS UTILIZADOS Y METODO DE ANALISIS**

Para realizar este trabajo se escogieron cinco estructuras de un grado de libertad con períodos de oscilación de 0,25, 0,5, 1,0, 1,5 y 3,0 segundos. Estas estructuras fueron diseñadas según el espectro de diseño que se muestra en la Fig. 1 para aceleraciones máximas del terreno (a) iguales a 0,10, 0,14, 0,18, 0,22, 0,26 y 0,30, obteniéndose de esta manera seis diferentes resistencias para cada estructura estudiada. En la tabla 1 se muestran las resistencias resultantes de estas estructuras expresadas como coeficiente sísmico de cedencia. Las resistencias S1 corresponden a una aceleración máxima del terreno igual a 0,10g y las S6 a una aceleración de 0,30g.

El amortiguamiento escogido para realizar el análisis es el 2% del amortiguamiento crítico. Se ha supuesto que es proporcional a la masa y proporcional a la rigidez inicial.

Los registros sísmicos utilizados se muestran en la Tabla 2, así como sus características más relevantes. Se han incluido tres registros de aceleraciones de los tres sismos destructores ocurridos en Costa Rica en 1990 y 1991, así como tres registros de sismos considerados como muy destructivos y con diferentes características de movimiento, que son la componente N-S de El

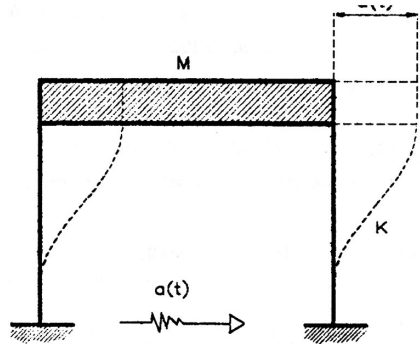


Fig. 1 B: Estructura de 1 grado de Libertad.

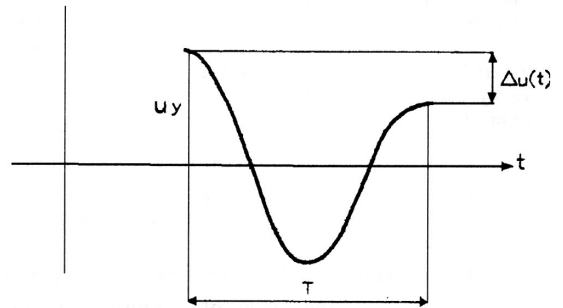


Fig. 1 C: Oscilación libre  $u_y$ .

Centro 1940, la componente E-O del sismo de México 1985, y la componente E-O del sismo de San Salvador 1986.

El registro del sismo de Limón fue utilizado dos veces. Los análisis se realizaron con el registro original y fueron luego repetidos utilizando el registro con las aceleraciones amplificadas dos veces. De esta manera las estructuras fueron analizadas para siete registros sísmicos.

Tabla 1. Resistencia de las estructuras

Estructura	T025	T050	T100	T150	T300
Nivel de Resistencia	COEFICIENTES SISMICOS				
S1	0.184	0.184	0.090	0.060	0.030
S2	0.258	0.258	0.126	0.084	0.042
S3	0.331	0.331	0.163	0.108	0.054
S4	0.405	0.405	0.199	0.132	0.065
S5	0.478	0.478	0.235	0.156	0.077
S6	0.552	0.552	0.271	0.180	0.089

Tabla 2. Características de los Sismos Utilizados

Sismo	Estación	Componente	IA2 (m/seg) <sup>2</sup>	T <sub>g</sub> (seg)	TD (Trifunoc y Brady)	TD (Bolt)	Ag máx (g)	Vg máx (m/seg)	Ms	D Km
Alajuela 22/dic/90	Cipet	N90E	1.71	0.4	10.03	17.00	0.45	0.409	5.7	18
Limón 22/abr/91	UCR	N00E	0.55	0.45	27.14	20.8	0.19	0.123	7.4	110
Limón 22/ab/91 duplicado	UCR	N00E	2.22	0.45	27.14	30.0	0.39	0.246	---	110
Cóbano 25/mar/90	Hospital Puntarenas	N90E	0.68	1.30	29.44	9.64	0.25	0.449	6.9	42
San Salvador 10/oct/86	CIG	N90E	2.49	0.50	4.03	8.20	0.68	0.800	5.4	9.0
Imperial Valley 18/may/40	El Centro	NOOE	1.93	0.55	24.16	27.00	0.34	0.298	6.3	9.3
México 19/set/85	SCT	N90E	2.22	2.00	38.80	33.15	0.17	0.615	8.1	360

Los registros utilizados representan una muestra que contiene un amplio rango de variación de las características sísmicas como son las aceleraciones y velocidades máximas, duraciones, períodos predominantes e intensidades.

Se realizó un análisis sísmico no lineal para cada una de las estructuras y para cada uno de los sismos estudiados. El programa DRAIN-2D (9) fue utilizado para realizar los análisis con un paso de integración en el tiempo igual a 0,02 seg. Se supuso un modelo elastoplástico sin degradación de resistencia ni rigidez para considerar los efectos no lineales. Los defectos P-d no fueron considerados.

### ENERGIA PLASTICA COMO FUNCION DE LA RESISTENCIA Y LA POTENCIA DEL SISMO

Las energías de entrada por unidad de masa,  $E_i/M$ , y las energías plásticas se muestran en la Tabla 3 para cada estructura y sismo considerado. Esta última se muestra como fracción de la energía de entrada,  $E_p/E_i$ .

Se observa muy poca correlación entre la resistencia y la energía plástica disipada. Se destaca que el registro sísmico tiene una influencia muy marcada, y no es posible ignorar las características del mismo en dicha correlación.

La relación  $E_p/E_i$  también varía con el registro sísmico, es decir, para una estructura dada la relación  $E_p/E_i$  depende de las características del sismo (duración, amplitud y contenido frecuencial).

Puede observarse también que la estructura de período de 1 seg. con resistencia S4 muestra una relación  $E_p/E_i$  igual a 0,54 para el sismo de Alajuela, valor muy similar a 0,59 que la misma estructura muestra con el sismo de El Centro. Estos valores son similares a pesar de que las energías de entrada  $E_i/M$  sean muy diferentes, 0,166 y 0,625 para el sismo de Alajuela y de El Centro, respectivamente. Esto puede explicarse con el hecho de que mientras el sismo de Alajuela introduce la energía en un tiempo de 17 segundos (duración Bolt), el sismo de El Centro la introduce en 27 segundos. Lo mismo puede observarse en la

estructura de período 0,5 seg. y con resistencia S2 donde la relación  $E_p/E_i$  vale 0,70 y 0,72 para el sismo de Cóbano y de El Centro, respectivamente, y donde las energías de entrada valen 0.353 y 0.662 para los respectivos sismos. La duración del sismo de Cóbano fue estimado según la definición de Bolt en 9,6 seg. y la del sismo de El Centro en 27 seg.

A la luz de estos resultados puede pensarse que la relación  $E_p/E_i$  dependerá de la potencia media del sismo (energía de entrada por unidad de tiempo) y de la resistencia de la estructura. También se conoce que depende de la tasa de disipación de energía por amortiguamiento viscoso.

TABLA 3. Energías de entrada y disipadas (estructuras T025)

Nivel de Resistencia	Limón		Limón duplicado		Cóbano		Alajuela		San Salvador		El Centro		México	
	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei
S1	0.082	0.57	0.528	0.82	0.103	0.84	0.458	0.89	0.570	0.87	0.413	0.82	0.004	0.20
S2	0.065	0.32	0.449	0.75	0.040	0.63	0.515	0.87	0.596	0.88	0.367	0.73	0.0035	0.00
S3	0.054	0.05	0.376	0.65	0.029	0.38	0.550	0.90	0.590	0.87	0.302	0.59	0.0035	0.00
S4	0.053	0.00	0.300	0.47	0.025	0.13	0.532	0.79	0.588	0.78	0.294	0.45	0.0035	0.00
S5	---	---	0.271	0.35	0.023	0.0	0.456	0.73	0.630	0.78	0.303	0.30	0.0035	0.00
S6	---	---	0.246	0.12	0.023	0.0	0.369	0.66	0.673	0.73	0.310	0.21	0.0035	0.00

Unidades de :  $E_i=(m/S^2)^2$

TABLA 3.b. Energías de entrada y (estructuras T050)

Nivel de Resistencia	Limón		Limón duplicado		Cóbano		Alajuela		San Salvador		El Centro		México	
	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei
S1	0.179	0.55	0.601	0.68	0.310	0.78	0.526	0.78	0.930	0.89	0.642	0.78	0.076	0.54
S2	0.201	0.44	0.650	0.61	0.353	0.70	0.539	0.67	1.000	0.87	0.662	0.72	0.063	0.18
S3	0.201	0.31	0.702	0.57	0.347	0.56	0.565	0.59	1.110	0.86	0.692	0.65	0.061	0.00
S4	0.203	0.25	0.740	0.53	0.323	0.39	0.595	0.52	1.230	0.82	0.709	0.61	0.061	0.00
S5	0.195	0.13	0.784	0.48	0.304	0.30	0.629	0.46	1.320	0.79	0.716	0.54	0.061	0.00
S6	0.185	0.00	0.805	0.42	0.277	0.16	0.66	0.40	1.310	0.73	0.705	0.48	0.061	0.00

TABLA 3 c. Energía de entrada y disipadas (estructuras T100)

Nivel de Resistencia	Limón	Limón duplicado	Cóbano	Alajuela	San Salvador	El Centro	México							
	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei	Ei	Ep/Ei
S1	0.051	0.005	0.176	0.47	0.378	0.82	0.250	0.73	0.562	0.87	0.437	0.78	2.470	0.93
S2	0.051	0.00	0.191	0.31	0.370	0.80	0.209	0.65	0.634	0.86	0.514	0.71	1.640	0.92
S3	----	----	0.201	0.152	0.395	0.79	0.173	0.57	0.679	0.83	0.576	0.66	0.624	0.82
S4	----	----	0.206	0.059	0.395	0.76	0.166	0.54	0.684	0.81	0.625	0.59	0.199	0.41
S5	----	----	0.205	0.0	0.395	0.71	0.160	0.46	0.692	0.78	0.643	0.53	0.148	0.15
S6	----	----	0.205	0.0	0.397	0.62	0.152	0.33	0.692	0.74	0.655	0.47	0.130	0.00

## RELACION DE POTENCIAS

Si se considera una estructura dúctil que oscile libremente desde la deformación de cedencia  $u_y$ , en el siguiente máximo de desplazamiento se tendrá una pérdida de energía por unidad de masa, debido al amortiguamiento viscoso igual a:

$$\frac{E_p}{M} = \frac{1}{2} \frac{K}{M} u_y^2 \left[ 1 - \left( \frac{1}{e^{2\pi\zeta}} \right) \right] \quad (4)$$

donde  $K$  es la rigidez y  $\zeta$  el porcentaje de amortiguamiento.

La pérdida de energía, por unidad de masa, debida al amortiguamiento y por unidad de tiempo, para este ciclo desde la posición de cedencia, será entonces

$$\frac{E_p}{MT} = \frac{1}{4\pi\omega} C_y^2 g^2 \left( 1 - \frac{1}{e^{4\pi\zeta}} \right) \quad (5)$$

donde  $C_g$  es el coeficiente sísmico,  $T$  es el período de la estructura y  $g$  la aceleración de la gravedad.

Esta expresión involucra la resistencia y el porcentaje de amortiguamiento y representa la potencia de disipación por amortiguamiento viscoso desde la posición de cedencia.

Si el sismo introduce energía a una potencia mayor que la que se disipa por amortiguamiento, entonces los desplazamientos tenderán a ser mayores que  $u_y$ , y si por el contrario la potencia de entrada es menor que la disipada por amortiguamiento, entonces los desplazamientos no excederán  $u_y$  y por lo tanto no habrá disipación plástica de energía.

Por lo tanto y como ya se ha mencionado, es razonable pensar que  $E_p/E_i$  será dependiente de la potencia media del sismo y de la potencia de disipación por amortiguamiento. Para definir la potencia media del sismo se utiliza la energía de entrada, por unidad de masa  $E_i/M$ , dividida entre la

duración del registro sísmico  $T_D$ . Se ha utilizado la definición de duración de Bolt, pues la definición de Trifunac y Brady hace que los registros obtenidos en terrenos suaves tiendan a ser largos y a reducir la potencia media de entrada.

En las Figs. 2, 3, 4, 5 y 6 se muestran las relaciones  $E_p/E_i$  como función de la relación de potencias PR, definida como:

$$PR = \frac{E_i/T_p}{E_p/T} \quad (6)$$

Se observa que  $E_p$  tiene valores distintos de cero aun para valores de PR menores que uno. Esto sucede porque la potencia de entrada no es constante a lo largo del registro y porque la disipación por amortiguamiento difiere de la forma sencilla mostrada en las ecuaciones 4 y 5.

Puede observarse también que existe una tendencia bien marcada a que  $E_p/E_i$  aumente a medida que PR aumenta. La relación de potencias PR aumenta cuando la resistencia disminuye. Puede observarse que  $E_p/E_i$  parece tener un límite superior, para el cual los valores de esta relación dejan de crecer. Es decir, para un porcentaje de amortiguamiento igual al 2%,  $E_p/E_i$  no parece poder alcanzar el valor de 1.0. Esto puede explicarse por el hecho de que la energía de disipación por amortiguamiento no puede reducirse a cero y por lo tanto  $E_p$  no podría alcanzar el valor de  $E_i$ .

Como la energía disipada por amortiguamiento está dada por

$$E_D = \int_0^{\infty} C u \dot{u} dt \quad (7)$$

Se puede aceptar que esta energía será proporcional al siguiente parámetro:

$$DR = \frac{\sum \Delta u^2}{\Delta t} \quad (8)$$

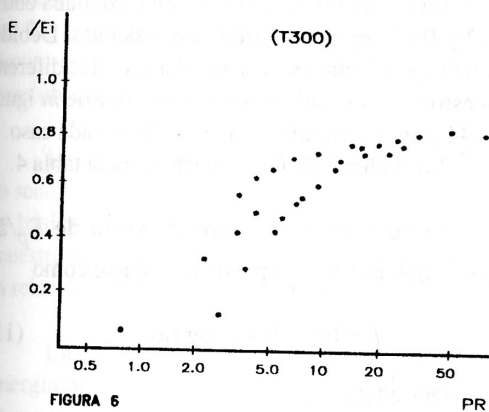
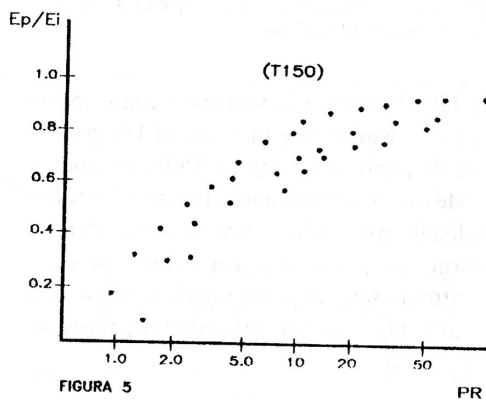
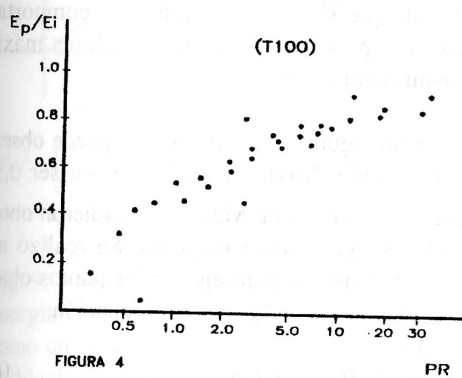
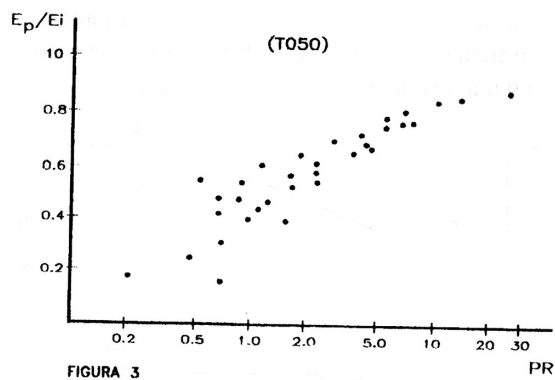
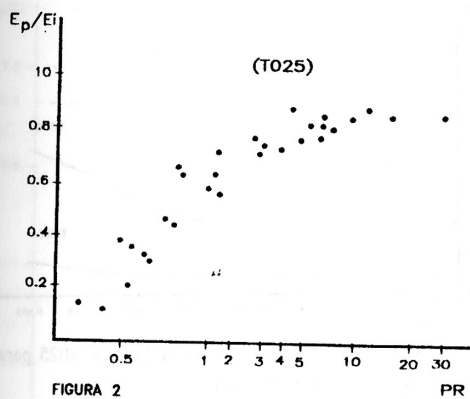


Fig. 2-6 Relación  $E_p/E_i$  VRS. PR. Para estructuras T025, T050, T100, T150, T300.



En estas expresiones  $u$  es el desplazamiento de la masa relativo al suelo,  $C$  es la constante de amortiguamiento viscoso, y  $dt$  es el valor del paso del tiempo en la integración numérica.

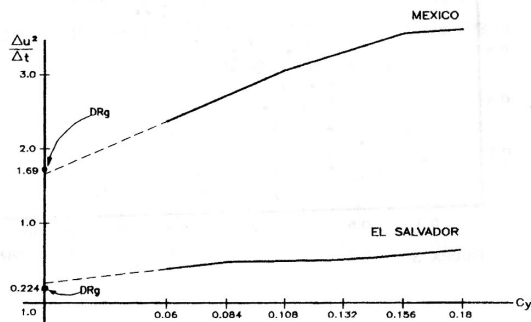


Fig. 7.  $\frac{\Delta u^2}{\Delta t^2}$  Vrs.  $C_y$  para estructura T150 para los sismos de  $\Delta t$  México y El Salvador.

La Fig. 7 muestra la variación con respecto al coeficiente sísmico que presenta el DR para la estructura de período 1,5 seg (T 150) con los sismos de México y El Salvador. Puede observarse que DR disminuye con la reducción de resistencia; sin embargo, no puede alcanzar valores de cero. El caso extremo sería el punto donde la resistencia es cero. En la Fig. 7 se han indicado los puntos correspondientes a

$$DR_g = \frac{\sum \Delta u_g^2}{\Delta t} \quad (9)$$

donde  $u_g$  es el desplazamiento del movimiento del terreno.

$DR_g$  corresponde a DR para valores de resistencia igual a cero y según se observa en la misma figura la tendencia de esta curva es hacia el punto marcado como  $DR_g$  en el eje de las ordenadas.

La Fig. 8 muestra la variación de DR para el caso de las estructuras de período 0,50 seg y de 0,25 seg con el sismo de San Salvador. Estas estructuras se muestran juntas ya que fueron diseñadas para los mismos coeficientes sísmicos. La tendencia antes mencionada es la misma. La evaluación del DR muestra que es imposible que la energía por amortiguamiento  $E_D$  sea cero, más bien

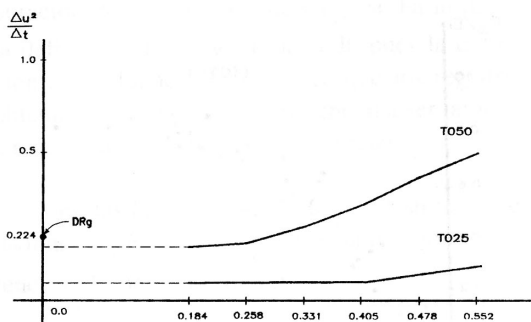


Fig. 8.  $\frac{\Delta u^2}{\Delta t^2}$  Vrs.  $C_y$  para estructura T050 y T025 para el sismo de El Salvador.

tiende a un valor mínimo y que en el caso del sismo de El Salvador esa tendencia es asintótica, de ahí que si  $E_i$  es constante, el comportamiento de  $E_p$  sea el de alcanzar valores máximos asintóticamente.

En las figuras mencionadas se puede observar que el valor límite de  $E_p/E_i$  parece ser 0,9, aunque con el sismo de México se pudieron obtener valores ligeramente mayores. Se realizó un análisis de regresión para ajustar los puntos obtenidos a una curva con la siguiente ecuación:

$$E_p/E_i = m \log PR + b \quad (10)$$

La pendiente  $m$  que se obtuvo oscilaba entre 0,42 y 0,47 según el período considerado. Debido a que la pendiente es muy similar para las diferentes estructuras se utilizó un único valor de  $m$  igual a 0,44 y se determinó el valor de  $b$  en cada caso.

Los valores de  $b$  se muestran en la tabla 4.

Si se acepta un valor máximo de  $E_p/E_i$  igual a 0,9, entonces  $b$  puede calcularse como

$$b = 0,9 - 0,44 \log (a) \quad (11)$$

donde  $a$  está dado por

$$a = 7,47 \log T + 13 \quad \text{si } T \leq 1,0 \text{ seg} \quad (12)$$

$$\text{y } a = 58,68 \log T + 13 \quad \text{si } T \geq 1,0 \text{ seg} \quad (13)$$

donde  $T$  es el período de la estructura.

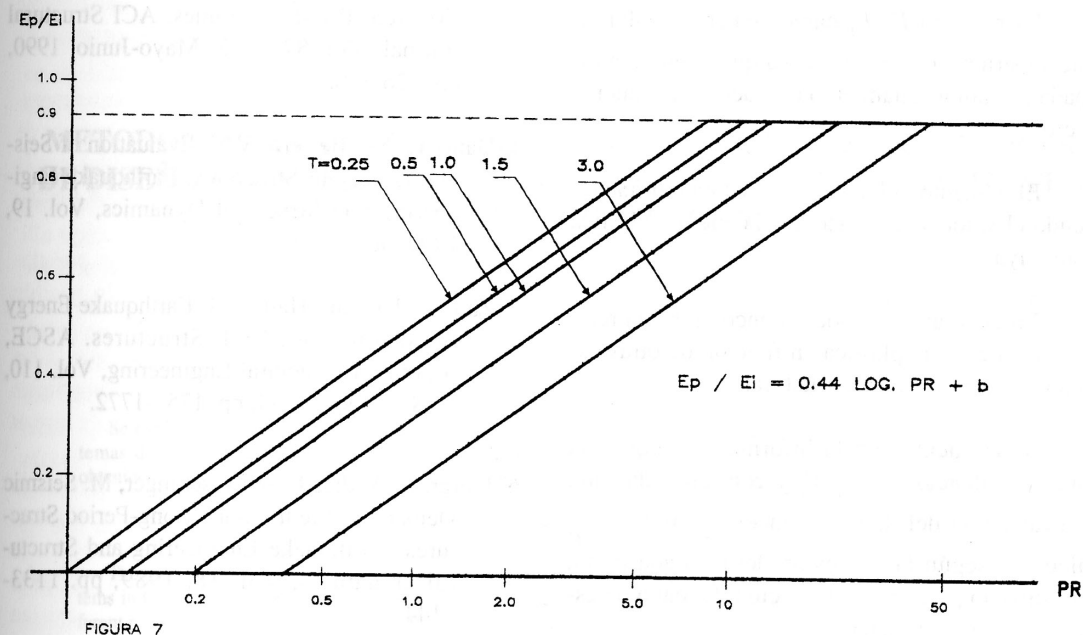


Fig. 9.  $\frac{\Delta u^2}{\Delta t}$  Vrs. Cy para estructura T050 y T025 para el sismo de El Salvador.

Las curvas así generadas se muestran en la Fig. 9. Esta figura permite conocer la cantidad de energía que se disipará plásticamente, expresada como una fracción de la energía de entrada, según la relación de potencias y el período de la estructura. Esta figura corresponde a estructuras cuyo porcentaje de amortiguamiento viscoso es igual a un 2% del amortiguamiento crítico. Alternativamente se pueden utilizar las ecuaciones 10 a 13 para obtener la relación  $E_p/E_i$ .

La relación desarrollada se basó en un modelo sencillo de disipación de energía y en un concepto básico de vibraciones lineales. Se utilizó una muestra de registros sísmicos muy variada y aun así la relación obtenida mostraba dispersiones bajas.

Las ecuaciones obtenidas para estimar la energía plástica disipada pueden ser utilizadas para evaluar el nivel de daño que presente una estructura sujeta a sismos. Parámetros o índices de daño como los presentados en las referencias 1 y 2 pueden ser evaluados una vez conocida la energía plástica.

Después de concluido un diseño se conocerá el coeficiente sísmico de cedencia y el período de la estructura, y se podrá estimar un porcentaje de amortiguamiento. Deberá contarse adicionalmente con la energía de entrada y la duración del sismo de diseño. Con toda esta información y con la expresión desarrollada podrá entonces estimarse la energía plástica y por lo tanto el nivel de daño.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha podido verificar que  $E_i$  es un parámetro relativamente estable.

La relación  $E_p/E_i$  se pudo expresar en función de la resistencia, de la duración del sismo, del período de oscilación y del porcentaje de amortiguamiento.

La relación  $E_p/E_i$  vrs PR permite conocer la energía plástica disipada  $E_p$  para un sismo con una  $E_i$  y una duración dadas y para un sistema con resistencia, período y amortiguamiento conocidos.

La relación  $E_p/E_i$  parece tener un valor límite superior y esto es debido a que la energía disipada por amortiguamiento no puede ser reducida a cero.

El aumento del período de vibración manteniendo el valor de PR hace que la energía plástica disminuya.

En general se ha podido encontrar una relación de la energía plástica en función de otras características sísmicas y estructurales.

Si se cuenta con la información requerida para la evaluación de  $E_p/E_i$  y con una expresión de evaluación del daño; entonces el valor de  $E_p$  calculado según la expresión desarrollada podrá ser utilizado para la cuantificación del daño de estructuras sujetas a sismo.

## BIBLIOGRAFIA

1. Banon, H., Biggs, J.M., and Irvine, H.M. Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames. ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 107, N° ST9, Setiembre, 1981, pp. 1713-1729.
2. Park, Y.-J. and Ang, A.H.S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, N° 4, Abril, 1985, pp. 772-739.
3. Chung, Y.S., Meyer, C. and Shinozuka, M. Automatic Seismic Design of Reinforced Concrete Building Frames. ACI Structural Journal, Vol. 87, N° 3, Mayo-Junio, 1990, pp. 326-340.
4. Uang, C.-M., Bertero, V.V. Evaluation of Seismic Energy in Structures. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 19, 1990, pp. 77-90.
5. Zahrah, T.F. and Hall, W.J. Earthquake Energy Absorption in SDOF Structures. ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 110, N° 8, Agosto, 1984, pp. 1757-1772.
6. Fajfar, P., Vidic, T. and Fischinger, M. Seismic Demand in Medium-and Long-Period Structures. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 18, 1989, pp. 1133-1144.
7. Kawamura, H. and Galambos, T.V. Earthquake Load for Structural Reliability. ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 115, N° 6, Junio, 1989, pp. 1446-1462.
8. Kato, B. and Akiyama, H. Seismic Design of Steel Buildings ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 108, N°ST5, Agosto, 1982, pp. 1709-1721.
9. Kanaan, A.E. y Powell, G.H. DRAIN-2D, A Gen. Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures., Reporte N° EERC 73-6. Universidad de California, Berkeley, Abril 1973.