

## REDUCCION DE SOLICITACIONES DE EDIFICIOS MEDIANTE UN ULTIMO PISO ELASTO-PLASTICO

Raúl HUSID\*  
Jorge P. URIBE\*\*

### RESUMEN

*Se estudia la respuesta exacta de estructuras de diez pisos deformables por corte cuando su base es sometida a la acción de cuatro terremotos reales, en función del tiempo, tanto para estructuras lineales como para estructuras análogas en las cuales se ha introducido un mecanismo de disipación de energía elasto-plástico en el último piso.*

*Se comparan las respuestas de las estructuras lineales y no lineales y se concluye que la estructura no lineal alcanza desplazamientos que en general son menores que los correspondientes a la estructura lineal sometida al mismo terremoto. La reducción de las deformaciones relativas al introducir el mecanismo no lineal resulta en general similar para los distintos pisos para cada terremoto. Dicha reducción es poco sensible a la variación de la distribución en vertical de masas y también a la variación de la distribución en vertical de rigideces para un terremoto dado.*

### INTRODUCCION

A raíz de numerosas observaciones, en distintos lugares del mundo, de los daños producidos por terremotos en edificios, se ha notado que en algunos casos en zonas de destrucción general ciertos edificios resultaron poco dañados. La energía

---

\*Decano Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Federico Santa María, Valparaíso, Profesor de Dinámica Avanzada y Jefe de la Sección Ingeniería Sísmica del Departamento de Geofísica, Sismología y Geodesia de la Universidad de Chile.

\*\*Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

que el sismo entregó a la estructura destruyó uno de los pisos o parte de él, pero el edificio se mantuvo en pie.

Este fenómeno fue observado luego de los sismos de Caracas<sup>1</sup>, Venezuela, en el año 1967 y Skopje<sup>2</sup>, Yugoslavia, el año 1963, donde varios edificios se escaparon del colapso gracias a que el primer piso disipó gran cantidad de energía. Esto se tradujo en una gran deformación de pilares y muros en ese piso y con ello las solicitaciones en los pisos superiores se redujeron. En la ciudad de Valdivia, Chile, luego del devastador terremoto del año 1960 se observó que algunos edificios permanecieron intactos y en todos ellos se destruyó el estanque de agua colocado en el techo. Esto hace pensar que el estanque disipó gran parte de la energía entregada por el sismo al edificio, protegiéndolo del colapso.

El mecanismo consistiría, en general, en la disipación de gran cantidad de energía en una zona de la estructura permitiendo que el resto de ella se comporte linealmente durante todo el terremoto.

Mecanismos del tipo bilineal o elasto-plástico representan en buena forma la disipación de energía que se produce en estructuras cuando son sometidas a la acción de terremotos destructores.

Varios estudios de respuesta de estructuras elasto-plásticas han sido realizados anteriormente. Podemos citar por ejemplo, entre otros, a Clough R.W., Benuska K.L. y Wilson E.L.<sup>3</sup>; Husid R.<sup>4</sup>; Giberson M.F.<sup>5</sup>, y Penzien J.<sup>6</sup>, quienes han analizado la respuesta de estructuras no lineales sometidas a terremotos.

Hay un trabajo reciente de Fintel M. y Khan F.<sup>7</sup> sobre reducción del movimiento de una estructura sometida a terremotos cuando se supone que la relación fuerza deformación es elastoplástica histerética; pero se hacen simplificaciones extremas en las hipótesis de cálculo, ya que se ha supuesto que es adecuado reemplazar toda la estructura por un sistema elasto-plástico o bilineal de un grado de libertad, cuya masa corresponde a la masa total de la parte de la estructura que queda sobre el primer piso flexible.

El modelo matemático escogido por Fintel y Khan es obviamente demasiado simplificado como para poder representar en buena forma a una estructura real.

En este trabajo se estudia el efecto que se produce al reemplazar el último piso de una estructura lineal por uno elasto-plástico, en relación al comportamiento de estructuras sometidas a terremotos.

## ANALISIS GENERAL

Se estudiará la respuesta de estructuras de diez grados de libertad lineales con diversas distribuciones de masas y rigideces, sometidas a terremotos; tratando en lo posible de cubrir las características de los edificios reales.

Paralelamente se hará el análisis del movimiento de las mismas estructuras cuando su último piso lineal ha sido reemplazado por un sistema elasto-plástico.

Las estructuras escogidas para realizar este trabajo fueron modeladas mediante un sistema mecánico deformable sólo por corte y con diez grados de libertad. Se desprecia la influencia de la gravedad y no se considera la interacción suelo-estructura.

Aun cuando sería conveniente utilizar terremotos provenientes de una misma población (terremotos artificiales) para así poder realizar estudios estadísticos significativos de la respuesta de estructuras cuya base es sometida a la acción de temblores, se ha decidido elegir cuatro terremotos reales para hacer este estudio. Esto se justifica haciendo presente que la finalidad de este trabajo es mostrar como se modifica la respuesta a un terremoto dado cuando se reemplaza en una estructura de diez pisos el piso superior por uno elasto-plástico.

### Sistema lineal

#### Ecuaciones diferenciales del movimiento

Se usará la siguiente notación:

- $k_i$  : rigidez del piso  $i$
- $m_i$  : masa del piso  $i$
- $x_i$  : abscisa del piso  $i$  (a partir de la posición de equilibrio)
- $F(t)$ : aceleración del suelo durante el sismo

La ecuación del movimiento de un piso queda determinada por la segunda ley de Newton:

$$m_i (\ddot{x}_i + F(t)) = -k_i (x_i - x_{i-1}) - k_{i+1} (x_i - x_{i+1}) \quad (1)$$

$i = 1$  a  $10$  con  $k_0 = k_{11} = 0$  y  $x_0 = 0$

#### Características fundamentales de la estructura

Las constantes  $k_i$  y  $m_i$  correspondientes a rigideces y masas de cada piso no serán definidas directamente para cada estructura. Se hará uso de una fórmula aproximada para estimar el período fundamental de una estructura deformable por corte<sup>8</sup>.

$$T_1 = 4 \sqrt{\frac{2\delta}{g}} \quad (2)$$

en que:  $g$  = aceleración de gravedad.

$\delta$  = deformación en el extremo superior del edificio cuando actúan a nivel de cada piso fuerzas laterales iguales a los pesos de los pisos.

$$\delta = g \left( \frac{m_{10}}{k_{10}} + \frac{m_{10} + m_9}{k_9} + \frac{m_{10} + m_9 + m_8}{k_8} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^{10} m_i}{k_1} \right) \quad (3)$$

Si referimos cada masa y rigidez a la del primer piso de modo que:

$$m_i = m_1 \cdot \alpha_i$$

$$k_i = k_1 \cdot \beta_i \quad (4)$$

reemplazando en (3)

$$\frac{\delta}{g} = \frac{m_1}{k_1} \left( \frac{a_{10}}{\beta_{10}} + \frac{a_{10} + a_9}{\beta_9} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^{10} a_i}{\beta_1} \right) \tag{5}$$

reemplazando  $\frac{\delta}{g}$  en (2)

$$T_1 = 4 \sqrt{\frac{2 m_1}{k_1} \left( \frac{a_{10}}{\beta_{10}} + \frac{a_{10} + a_9}{\beta_9} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^{10} a_i}{\beta_1} \right)} \tag{6}$$

despejando  $\frac{k_1}{m_1}$  de (6)

$$\frac{k_1}{m_1} = \frac{32}{T_1^2} \left( \frac{a_{10}}{\beta_{10}} + \frac{a_{10} + a_9}{\beta_9} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^{10} a_i}{\beta_1} \right) \tag{7}$$

Por lo tanto al elegir el período fundamental y la distribución en altura de masas y rigideces, se obtiene  $k_1/m_1$  de (7) y queda definida la estructura en forma completa.

En esta forma nos independizamos de las características físicas de la estructura y conocemos desde la partida el período fundamental aproximado y la distribución de masas y rigideces en la altura. Se puede así definir estructuras rígidas o flexibles imponiendo períodos bajos o altos respectivamente.

Si se reemplazan las relaciones (4) en el sistema de ecuaciones (1) se obtiene:

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = w \left[ \frac{\beta_{i+1}}{a_i} (x_{i+1} - x_i) - \frac{\beta_i}{a_i} (x_i - x_{i-1}) \right] - F(t) \tag{8}$$

con  $w = \frac{k_1}{m_1}$ , e  $i = 1$  a  $10$

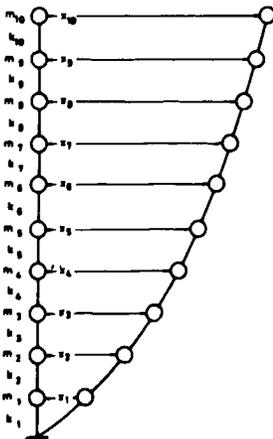


Fig. 1. Esquema de la estructura representada por ecuaciones (8).

La estructura representada por las ecuaciones (8) es la que se esquematiza en la Fig. 1.

Para este estudio se eligieron valores del período fundamental aproximado de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 segundos, tratando con esto de recorrer el rango posible de períodos fundamentales para edificios de diez pisos.

En cuanto a masas y rigideces se seleccionaron tres posibilidades de variación lineal en altura: creciente, constante o decreciente. Combinando estas tres posibilidades para masas y rigideces resultan nueve tipos de estructuras diferentes. De estos 9 tipos

de estructuras, cuatro corresponden a los diseños más comunes en edificios: son los de masas constantes o decrecientes en altura y rigideces constantes o decrecientes en altura; a estos cuatro tipos de estructuras se les dio preferencia en el estudio.

Numéricamente las distribuciones en altura escogidas son las que se presentan en la Tabla I.

TABLA I  
DISTRIBUCION DE MASAS ( $a_i$ ) Y RIGIDECES ( $\beta_i$ ) EN ALTURA

	$a_1$ $\beta_1$	$a_2$ $\beta_2$	$a_3$ $\beta_3$	$a_4$ $\beta_4$	$a_5$ $\beta_5$	$a_6$ $\beta_6$	$a_7$ $\beta_7$	$a_8$ $\beta_8$	$a_9$ $\beta_9$	$a_{10}$ $\beta_{10}$
A	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
B	1.0	0.944	0.889	0.833	0.778	0.722	0.667	0.611	0.556	0.5
C	1.0	1.111	1.222	1.333	1.444	1.556	1.667	1.778	1.889	2.0

Las estructuras mencionadas corresponden a las siguientes combinaciones de masas y rigideces: las numeradas 1, 2 y 3 tienen distribución de masas A y de rigideces A, B, C respectivamente; las 4, 5 y 6 tienen distribución de masas B y de rigideces A, B, C respectivamente, y las 7, 8 y 9 distribución C de masas y A, B, C de rigideces.

### Mecanismo elasto-plástico en el último piso

#### Ecuaciones diferenciales del movimiento

Se estudiará el movimiento de una estructura cuyos nueve primeros pisos, contados desde la base, tienen un comportamiento lineal, y el décimo el de un mecanismo elasto-plástico.

El sistema de ecuaciones diferenciales que describe el movimiento es:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= w \left[ \frac{\beta_{i+1}}{a_i} (x_{i+1} - x_i) - \frac{\beta_i}{a_i} (x_{i-1} - x_i) \right] - F(t); \quad i = 1 \text{ a } 8 \\ \frac{d^2 x_9}{dt^2} &= w \left[ \frac{\beta_{10}}{a_9} \phi (x_{10} - x_9) + \frac{\beta_9}{a_9} (x_8 - x_9) \right] - F(t) \\ \frac{d^2 x_{10}}{dt^2} &= -w \frac{\beta_{10}}{a_{10}} \phi (x_{10} - x_9) - F(t); \quad w = \frac{k_1}{m_1} \end{aligned} \right\} (9)$$

Donde  $\phi (x_{10} - x_9)$  sigue un ciclo histerético conforme a una publicación de Husid<sup>9</sup> y cuyo comportamiento se indica gráficamente en la Fig. 2.

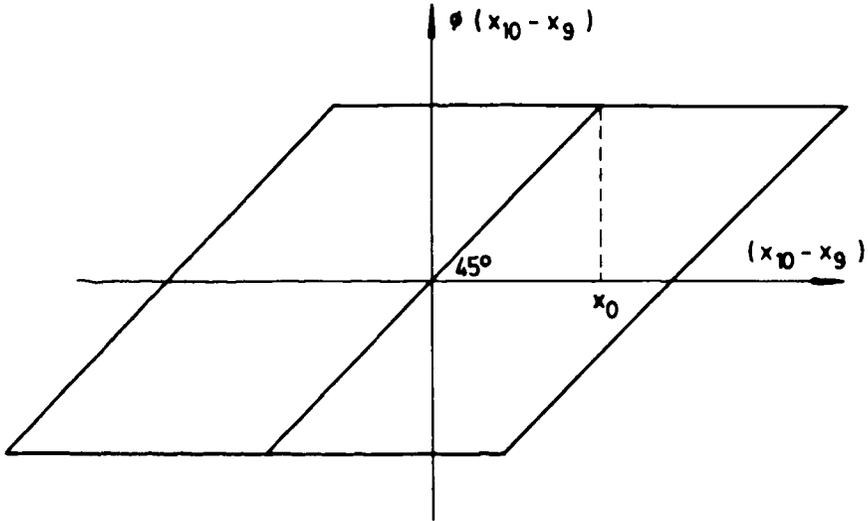


Fig. 2. Ciclo de histéresis del piso elástico-plástico.

El valor  $x_0$  que fija el comienzo de la fluencia se determinará para cada caso en particular.

#### Elección de la sollicitación lateral

En un estudio de respuesta de estructuras sometidas a la acción de terremotos, en que intervienen mecanismos de disipación, es importante la elección de los sismos. Tanto la duración como la intensidad del terremoto juegan un rol importante en el estudio de la respuesta de una estructura elasto-plástica.

Para este estudio se prefirió operar con acelerogramas de terremotos reales, y con el propósito de hacerlo más general se buscaron diferentes tipos de terremotos, cuyas características se indican a continuación.

Uno moderado, de duración mediana, 13 segundos, y que se puede considerar representativo de un sismo corriente. Es el ocurrido en Akashi, Japón, en 1963; este terremoto fue digitalizado por "SERAC"<sup>10</sup> y el acelerograma está reproducido en tarjetas perforadas por intervalos de 0.02 segundos.

Otro es el acelerograma del terremoto ocurrido en Koyna, India, el año 1967, en sus componentes transversal y longitudinal. Este sismo es, entre los que se han registrado hasta el momento en el mundo, el que posee las aceleraciones mayores. La duración de la parte importante del terremoto es de diez segundos aproximadamente para las dos componentes. Fue digitalizado por Jai Krishna, A.R. Chandrasekaran y S.S. Saini.<sup>11</sup>

Por último se utilizó la componente vertical del terremoto de Koyna, supuesta horizontal, cuya duración es de 10.35 segundos y que aparece en la referencia recién citada.

Las tres componentes del terremoto de Koyna tienen sus acelerogramas reproducidos en tarjetas perforadas; el intervalo de tiempo es variable entre punta y punta.

En el párrafo en que se analizan los resultados aparecen los espectros de aceleración absoluta, para distintos grados de amortiguamiento, de los cuatro terremotos utilizados para este estudio y los acelerogramas correspondientes, dibujados a partir de la digitalización mencionada más arriba.

#### Solución numérica del sistema de ecuaciones diferenciales

Características de las estructuras. Para las 36 estructuras que resultan de combinar los nueve tipos de estructuras y los cuatro valores del período fundamental, se determinaron las constantes  $k_1/m_1$  con la fórmula (7) en unidades de sistema M.K.S., las cuales se anotan en la Tabla II.

TABLA II  
VALORES DE LAS CONSTANTES  $k_1/m_1$

		$T_1 \sim 0.5 \text{ seg.}$	$T_1 \sim 1.0 \text{ seg.}$	$T_1 \sim 1.5 \text{ seg.}$	$T_1 \sim 2.0 \text{ seg.}$
Estructura No	1	7040.00	1760.00	782.22	440.00
	2	4693.33	1173.33	521.48	293.33
	3	11733.33	2933.33	1303.70	733.33
	4	8713.72	2178.43	968.19	544.61
	5	5698.43	1424.61	633.16	356.15
	6	14744.28	3686.07	1638.25	921.52
	7	5492.47	1373.12	610.27	343.28
	8	3732.46	933.12	414.72	233.28
	9	9012.47	2253.12	1001.39	563.28

Problema de valores y vectores propios. Para el sistema

$$[M] \{ \ddot{x} \} + [K] \{ x \} = \{ 0 \} \quad (10)$$

con  $[M]$  diagonal y positiva definida,  $[K]$  simétrica y  $\{ x \}$  vector columna que resulta de hacer nula  $F(t)$  en las ecuaciones (1)

hacemos:

$$\{ x \} = \{ \phi \} e^{i\omega t} \quad (11)$$

reemplazando en (10) se obtiene

$$-\omega^2 [M] \{\phi\} + [K] \{\phi\} = \{0\}$$

si hacemos  $\lambda = \omega^2$

$$-\lambda [M] \{\phi\} + [K] \{\phi\} = \{0\} \quad (12)$$

Para determinar  $\lambda$  y  $\{\phi\}$  mediante un computador digital es conveniente introducir un cambio de variables:

$$\{\phi\} = [M]^{-1/2} \{z\} \quad (13)$$

con  $[M]$  matriz de masas

reemplazando (13) en (12) y premultiplicando por  $[M]^{-1/2}$

$$[M]^{-1/2} [K] [M]^{-1/2} \{z\} = \lambda [M]^{-1/2} [M] [M]^{-1/2} \{z\}$$

pero  $[M]^{-1/2} [M] [M]^{-1/2} = [I]$

si hacemos  $[D] = [M]^{-1/2} [K] [M]^{-1/2}$

$$[D] \text{ es una matriz simétrica ya que } [D] = [D]^T$$

El problema se reduce a:

$$[D] \{z\} = \lambda \{z\} \quad (14)$$

Para resolver el problema de valores y vectores propios definido en la ecuación (14) se usa el método de Jacobi, aplicable a una matriz real simétrica, para lo cual existe la subrutina EIGEN de IBM.

**Solución numérica de las ecuaciones del movimiento.** Las ecuaciones diferenciales del movimiento se integraron numéricamente adaptando un método de Runge-Kutta de cuarto orden<sup>12,13</sup>. Este método permite la solución de ecuaciones diferenciales de primer orden. Haciendo un cambio de variables:

$$y_i = \frac{dx_i}{dt}$$

obtenemos un sistema de veinte ecuaciones de primer orden a las que es aplicable el método.

Debido a que el sismo digitalizado y reproducido en tarjetas perforadas da valores discretos de la aceleración del suelo, a intervalos de tiempo variable, fue necesario tomar un incremento de tiempo base para la integración numérica, pero tomando además las puntas del acelerograma.

Los cálculos fueron realizados en el computador IBM 360-40 de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

### Determinación de la respuesta de estructuras lineales de diez pisos

Se determinó la respuesta para todas las combinaciones de período fundamental aproximado impuesto, y de distribución de rigideces y masas, lo que da un total de treinta y seis estructuras, sometidas a los cuatro terremotos ya mencionados.

Se obtuvo las deformaciones relativas (piso a piso) en función del tiempo mediante el método de Runge-Kutta antes mencionado. La integración numérica se hizo para los siguientes intervalos de integración, ( $\Delta t$ ): 0.001 s, 0.005 s, 0.01 s.

Además se hizo la integración con  $\Delta t$  variable e igual al intervalo transcurrido de una punta a la siguiente. La resolución de una estructura con  $\Delta t$ : 0.001 s tomaba alrededor de cincuenta minutos de tiempo de computación. Al usar  $\Delta t$ : 0.005 s el tiempo de computación se reducía a diez minutos. Finalmente, al tomar  $\Delta t$ : 0.01 s, se determinaba la respuesta de una estructura en función del tiempo empleando cinco minutos de computación.

En cuanto a la exactitud lograda en cada intervalo de integración base, la diferencia entre los tres primeros casos, era tan pequeña (menos de un uno por ciento) que se decidió adoptar 0.01 s pues tenía la gran ventaja de acortar el tiempo de computación. El cuarto caso,  $\Delta t$  variable, no satisfizo en sus resultados ya que las discrepancias entre los resultados obtenidos en esta forma y aquellos logrados con un intervalo base de 0.001 s eran significativamente diferentes.

Los resultados se presentan más adelante.

### Determinación de la respuesta de estructuras de diez pisos con el último piso elasto-plástico

Para un gran número de estructuras y para los cuatro sismos se determinó la respuesta de la estructura, adoptando para el valor de desplazamiento de fluencia, aquel que en cada caso permitiese disipar suficiente energía al sistema elasto-plástico.

Para este estudio se dió preferencia a estructuras cuya distribución de masas y rigideces en altura estuviese más de acuerdo con las distribuciones corrientes de edificios.

El método utilizado para la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales del movimiento es el mismo que se describió en el párrafo anterior, y por eso no se discute ahora.

El intervalo de integración empleado fue de  $\Delta t$ : 0.010 s y fueron calculados todos los desplazamientos relativos, o sea,  $x_{i+1} - x_i$ , en función del tiempo.

Los resultados serán analizados en el párrafo siguiente.

### Comparación entre las respuestas de la estructura lineal y no lineal

#### Análisis general

Se pueden dar dos criterios de comparación entre las respuestas de la estructura lineal y no lineal, uno simplista y fácil de evaluar consistente en comparar lisa y llanamente la máxima deformación por piso que se produjo en la estructura durante el sismo, para cada estructura lineal y su análoga no lineal. Este método de comparación no muestra el efecto real del mecanismo elasto-plástico sobre

el movimiento de la estructura, solamente da una idea de la reducción de las deformaciones producidas por la introducción del mecanismo no lineal independientemente del tiempo, lo que, como se verá más adelante, es un factor secundario del efecto amortiguador que introduce el mecanismo elasto-plástico en la estructura.

Otro criterio de comparación consiste en superponer las curvas de desplazamiento relativo en función del tiempo para cada piso y cada estructura lineal con la no lineal correspondiente. Con esto se logra apreciar no sólo la reducción de las deformaciones relativas que da el primer criterio, sino además el comportamiento del mecanismo elasto-plástico y su efecto en cada piso de la estructura en función del tiempo.

### Análisis de los resultados

**Terremoto Akashi.** Se estudió la respuesta de las estructuras número 1, 3, 4, 5 y 6 sometidas a la acción del terremoto de Akashi. En cada caso se determinó para cada nivel el desplazamiento relativo de piso a piso como función del tiempo, tanto para la estructura lineal seleccionada como para la correspondiente no lineal.

En la Fig. 3 se muestra el acelerograma del terremoto de Akashi dibujado a partir de la digitalización publicada por SERAC<sup>10</sup>; el espectro de aceleraciones correspondientes aparece en la Revista del IDIEM, vol. 8, n° 2, p. 61.

Por razones de espacio se presentan sólo algunos de los gráficos obtenidos. En una misma figura se muestran con línea llena los desplazamientos correspondientes a un piso de la estructura lineal y con línea de puntos los correspondientes de la estructura no lineal.

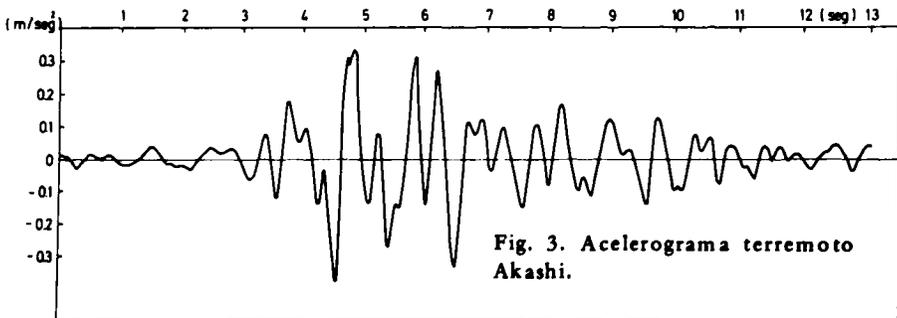
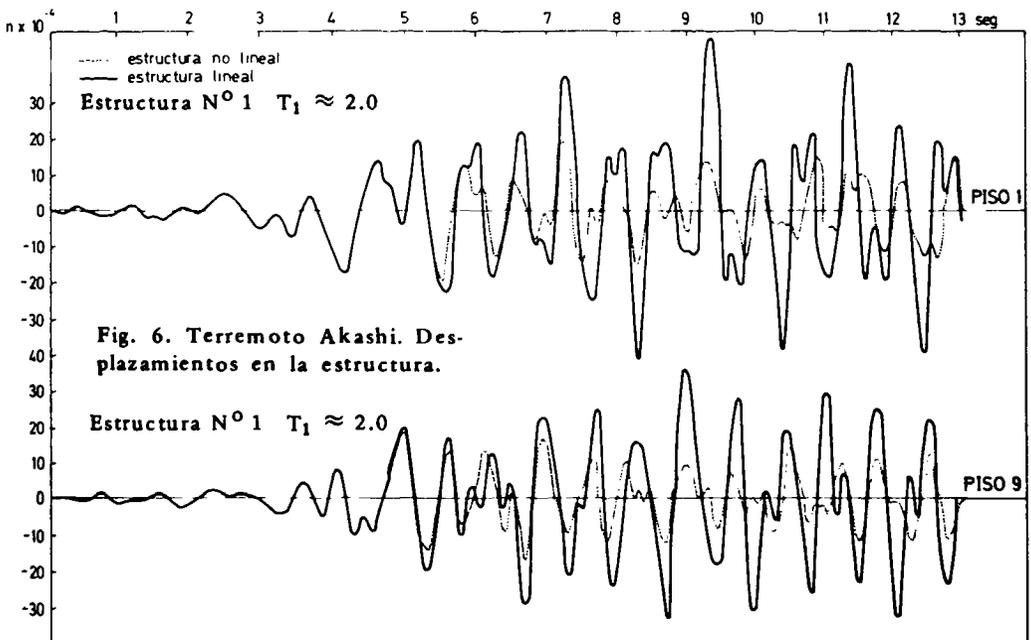
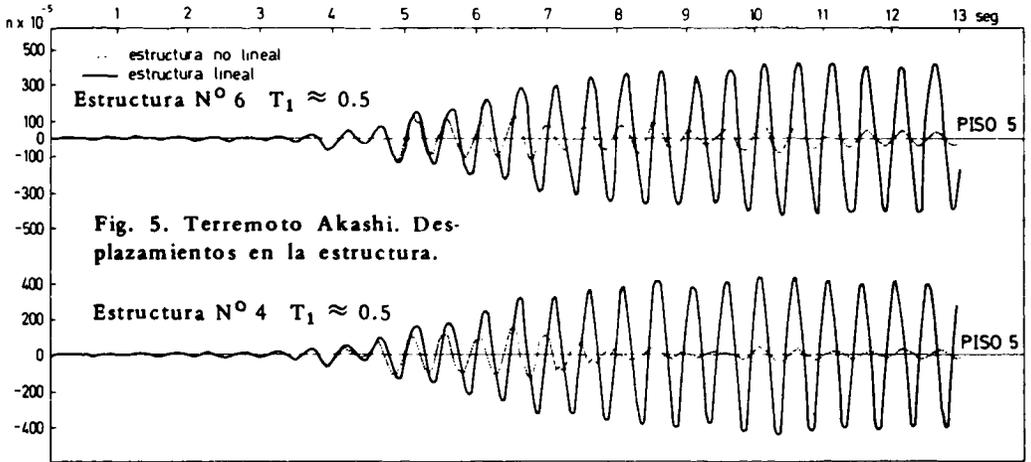
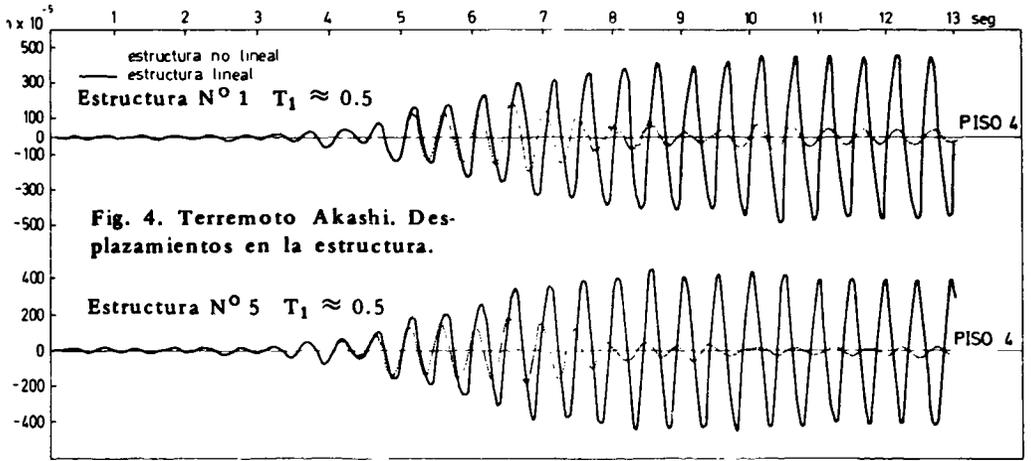


Fig. 3. Acelerograma terremoto Akashi.

Las Figs. 4 a 6 muestran algunos de los resultados obtenidos y en ellas se observa que el mecanismo no lineal considerado permitió reducir los desplazamientos relativos en forma apreciable.

Se hace notar que al cambiar el período fundamental de la estructura considerada, cuando se usa un mismo terremoto como excitación, se producen algunas diferencias en el monto de la reducción antes mencionada. Estas diferencias y otras que puedan presentarse en el futuro se deben sin lugar a dudas al contenido de frecuencias del terremoto considerado.

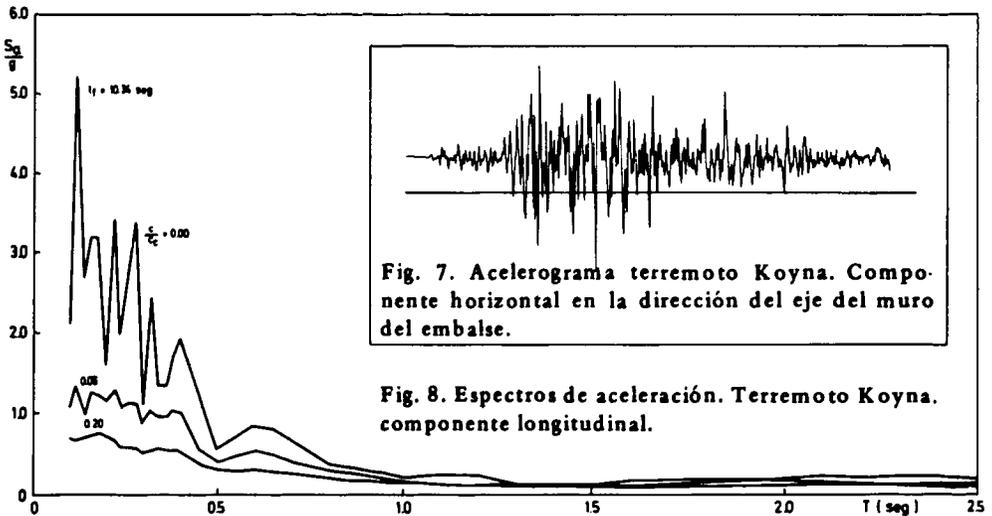
Para la estructura lineal número 1 y para  $T_1 \sim 2.0$  s se observó por ejemplo que el segundo modo de vibración fue excitado en forma muy notoria. Cuando a la misma estructura se le asigna un período  $T_1 \sim 0.5$  s se observa que la reduc-



ción es mucho mayor y que la estructura lineal vibra fundamentalmente en el primer modo.

Observando los resultados que se presentan en las Figs. 4 y 5 se aprecia claramente que la reducción obtenida al utilizar el mecanismo no lineal es muy poco sensible a las variaciones de las distribuciones de masas y rigideces, cuando el período del modo fundamental ha sido fijado en forma aproximada.

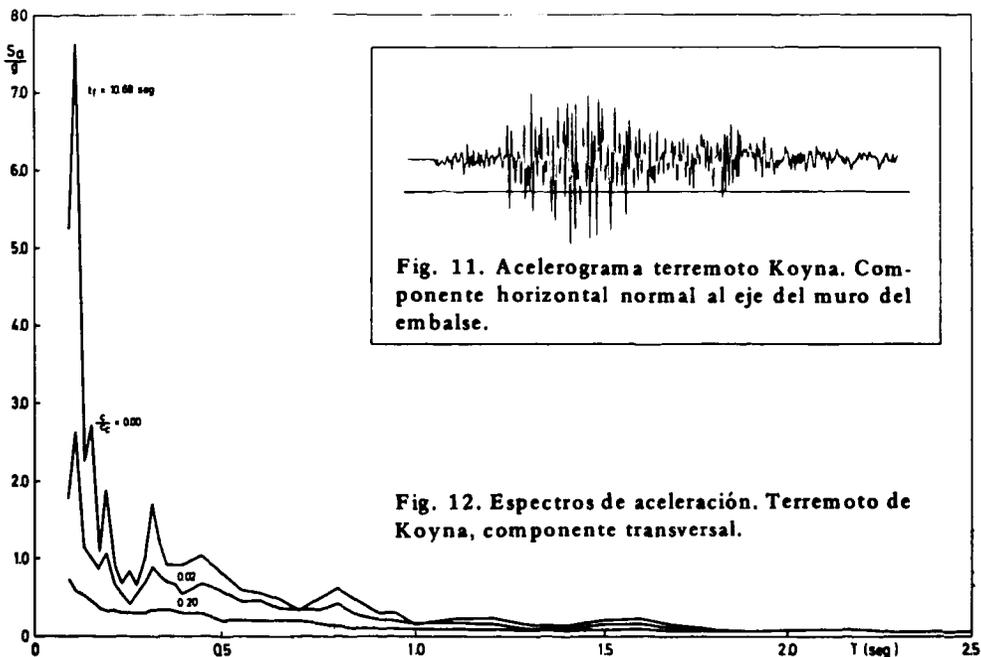
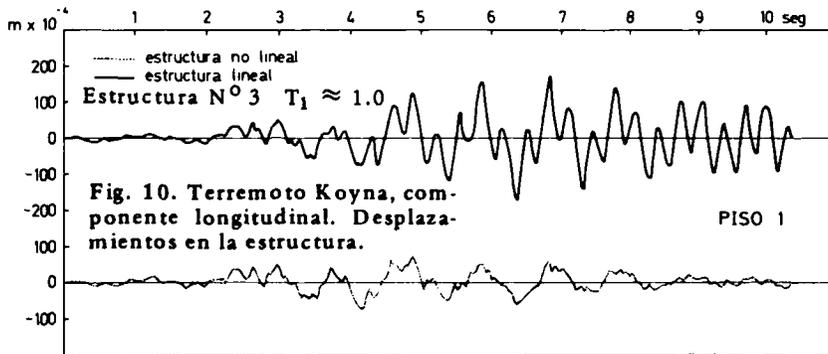
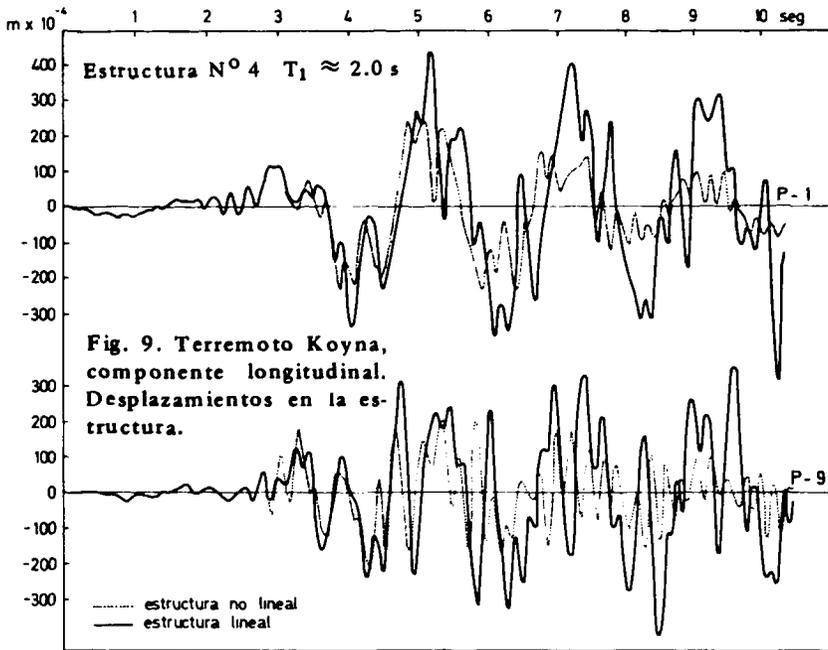
**Terremoto de Koyna - componente longitudinal.** El acelerograma de esta componente del terremoto de Koyna se presenta en Fig. 7 y el espectro de aceleraciones en Fig. 8. Con respecto a dicha componente se determinó la respuesta de tres estructuras de 10 pisos. Fueron ellas las designadas con el número 4 para  $T_1 \sim 2.0$  s, número 3 para  $T_1 \sim 1.0$  s, y la estructura número 6 para  $T_1 \sim 0.5$  s. En Fig. 9 se muestra en la parte superior la respuesta, en función del tiempo, del primer piso del edificio tanto para la estructura lineal como para la estructura con un último piso elasto-plástico histerético. En la parte inferior se muestran las respuestas comparadas de la estructura lineal y no lineal para el piso noveno. La figura corresponde a la respuesta de la estructura número 4 cuando se le ha asignado un período fundamental de 2.0 s aproximadamente.

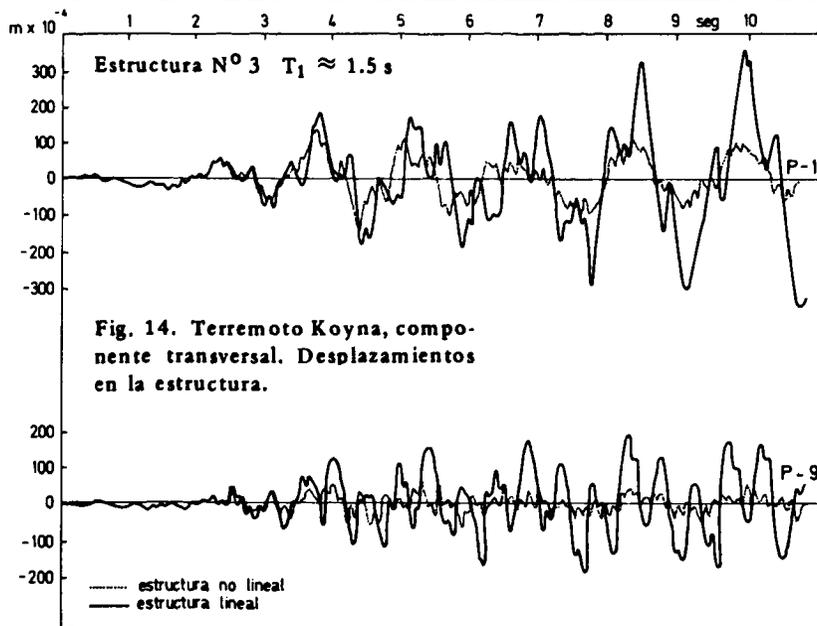
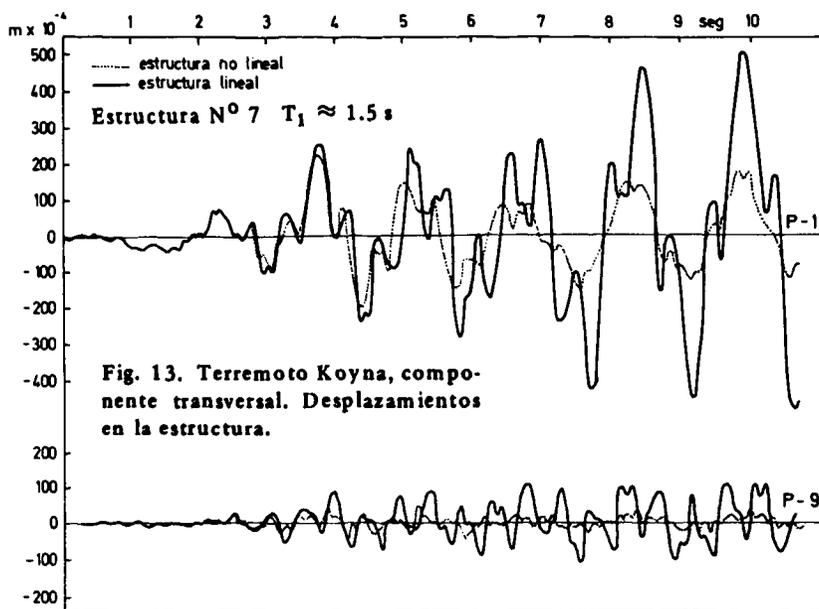


Además se muestra en la Fig. 10 la respuesta del primer piso de la estructura número 3 para  $T_1 \sim 1.0$  s en función del tiempo, apareciendo para mayor claridad separadas las respuestas de las estructuras lineal y no lineal.

**Terremoto de Koyna - componente transversal.** Utilizando el acelerograma de la componente transversal del terremoto de Koyna, cuyos acelerograma y espectro de aceleración se presentan en Figs. 11 y 12, se estudió la respuesta exacta de las estructuras número 1, 3 y 7 con período fundamental aproximado de 1.0 s, 1.5 s y 1.5 s respectivamente. Al igual que para las respuestas a las otras sollicitaciones laterales consideradas en este trabajo la respuesta se obtuvo utilizando el método de Runge-Kutta.

En todos los casos considerados se puede apreciar una reducción importante de los desplazamientos relativos para diferentes pisos de las estructuras estudiadas.





En la parte inferior de la Fig. 13 correspondiente a la estructura número 7 se puede apreciar que las deformaciones obtenidas cuando la estructura es no lineal alcanzan valores que en general son del orden de un tercio o un cuarto de las correspondientes a la estructura lineal. La Fig. 14 muestra las deformaciones de los pisos 1 y 3 de la estructura N° 3.

Terremoto de Koyna - componente vertical. El acelerograma y el espectro de aceleración de esta componente se muestran en Figs. 15 y 16 respectivamente. En forma análoga a lo realizado para los terremotos mencionados anteriormente, se determinó la respuesta lineal y no lineal de la estructura número 4 para  $T_1 \sim 1.5$  s y para la estructura número 6 cuando se utilizaba períodos aproximados del modo fundamental de 0.5 s y 1.5 s para estas estructuras solicitadas por

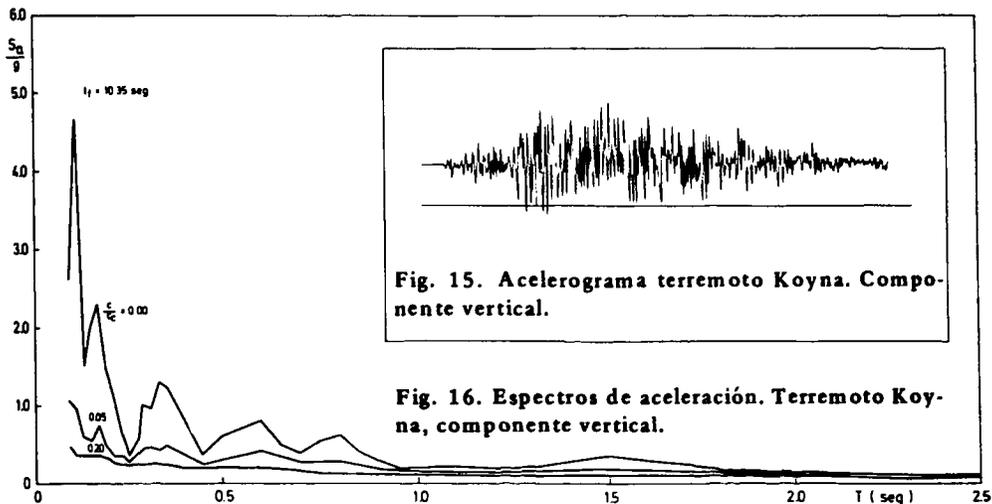


Fig. 15. Acelerograma terremoto Koyna. Componente vertical.

Fig. 16. Espectros de aceleración. Terremoto Koyna, componente vertical.

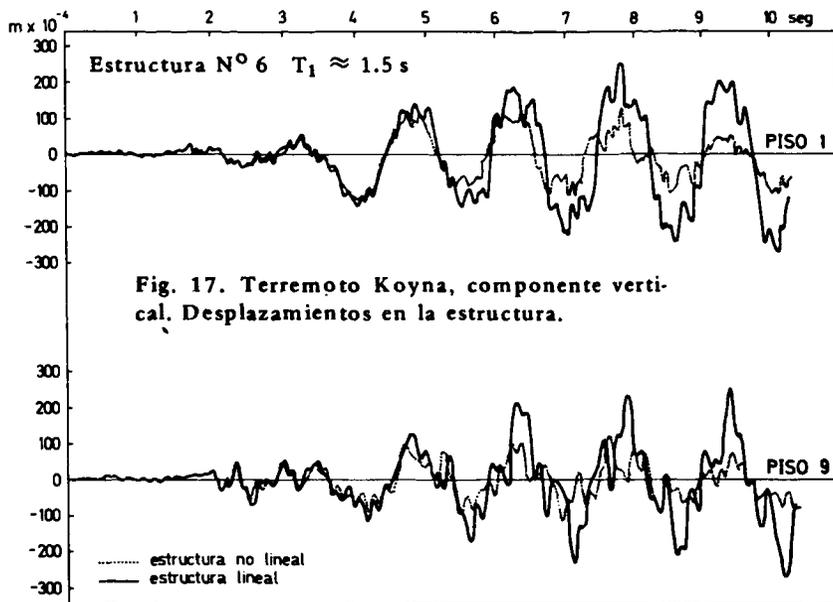


Fig. 17. Terremoto Koyna, componente vertical. Desplazamientos en la estructura.

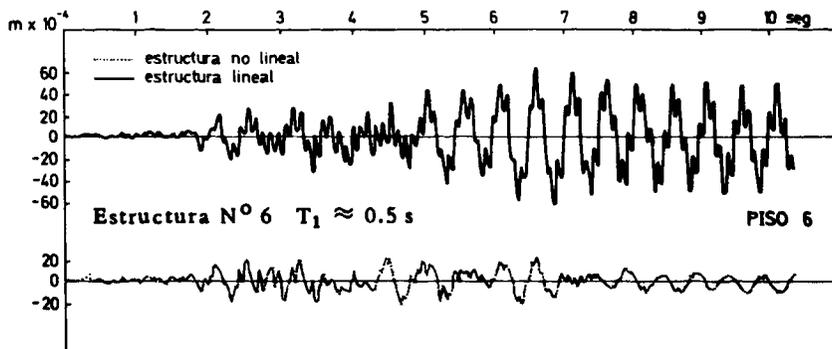


Fig. 18. Terremoto Koyna, componente vertical. Desplazamientos en la estructura.

una aceleración lateral que en realidad corresponde al registro obtenido para la componente vertical del acelerograma del terremoto de Koyna<sup>11</sup>. Los resultados obtenidos utilizando esta componente pueden considerarse análogos a los que resultarían de utilizar terremotos artificiales.

En las Figs. 17 y 18 se presentan para la estructura número 6 las respuestas de la estructura lineal y no lineal correspondientes al piso primero y noveno cuando  $T_1 \sim 1.5$  s y sexto piso cuando  $T_1 \sim 0.5$  s; en este último caso se dibujaron separadamente las dos respuestas para permitir mayor claridad en el dibujo.

De la observación de las dos figuras recién mencionadas se concluye que las reducciones en las sollicitaciones observadas al utilizar los acelerogramas de las componentes horizontales del terremoto de Koyna son análogas a aquellas obtenidas cuando se usa como excitación lateral la componente vertical del terremoto.

Se observa además que las reducciones no son muy diferentes para pisos distintos.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos al estudiar la respuesta de estructuras de diez pisos lineales y las correspondientes que se obtienen al reemplazar el último piso por un mecanismo elasto-plástico histerético, cuando la base es sometida a la acción de terremotos reales, indican que la estructura no lineal alcanza desplazamientos que en general son menores que los correspondientes a la estructura lineal sometida al mismo terremoto.

La reducción de las deformaciones relativas obtenidas al introducir el mecanismo no lineal, resultan en general análogas para los distintos pisos cuando la estructura es sometida a la acción de un terremoto dado.

De la observación de los gráficos de respuesta para cada estructura lineal y no lineal considerada en el estudio y sometida a cualquiera de los terremotos aplicados, se nota que el monto de la reducción es en general creciente a partir de aproximadamente la tercera parte de la duración del terremoto.

La reducción de las deformaciones obtenidas al usar un último piso elasto-plástico resulta poco sensible a la variación de la distribución en vertical de masas cuando la estructura es solicitada por un terremoto dado. Dicha reducción resulta también poco sensible a la variación de la distribución en vertical de rigideces para un terremoto dado.

Se hace notar que la disminución de las deformaciones obtenidas utilizando un último piso elasto-plástico resulta mayor cuando se trata de estructuras de período fundamental menor (0.5 y 1.0 s) y algo menor para períodos del orden de 1.5 y 2.0 segundos. Lo recién dicho se cumple para todos los terremotos y estructuras consideradas.

Los resultados aquí presentados son sólo un primer paso dado con el fin de estudiar la posibilidad de diseñar estructuras de modo que cuando ocurra un terremoto puedan controlarse en alguna forma las deformaciones.

Antes de llegar a conclusiones totalmente generales sería necesario estudiar estructuras con diferente número de pisos y sometidas a la acción de un número mayor de terremotos.

#### REFERENCIAS

1. FINTEL M. The Caracas earthquake of July 29, 1967. *Civil Engineering - ASCE*, vol. 38, n° 2, (febrero 1968).
2. KUNZE W.E., FINTEL M. y AMRHEIN J.E. Skopje earthquake damage. *Civil Engineering - ASCE*, vol. 33, n° 12, (diciembre 1963).
3. CLOUGH P.W., BENUSKA F.L. y WILSON E.L. *Inelastic earthquake response of tall buildings*. 3<sup>ra</sup> Conferencia Mundial de Ingeniería Antisísmica, Nva. Zelandia 1965
4. HUSID R. *Gravity effects on the earthquake response of yielding structures*. Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, 1967.
5. GIBERSON M.F. *The response of non-linear multistory structures subjected to earthquake excitation*. Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, 1967.
6. PENZIEN J. Dynamic response of elasto-plastic frames. *ASCE Structural Division Journal*, vol. 86, n° ST 7, (julio 1960).
7. FINTEL M. y KHAN F.R. Shock-absorbing soft story concept for multistory earthquake structures. *Journal of the American Concrete Institute*, vol. 66, n° 55, (mayo 1969).
8. HUSID R. *Cálculo del período fundamental de vibración de edificios con rigidez de corte*. 1<sup>as</sup> Jornadas Chilenas de Ingeniería Antisísmica, julio 1963, Santiago, Chile.
9. HUSID R. Colapso de estructuras elasto-plásticas. *Revista del IDIEM*, vol. 6, n° 2, (octubre 1967).
10. Earthquake Research Institute, Strong-Motion Earthquake Observation Committee. *Strong-motion earthquake records in Japan*, vol. 63, Oct. 1965, Japan.
11. KRISHNA, J.; CHANDRASEKARAN, A.R., y SAINI, S.S. Analysis of Koyna accelerogram of December 11, 1967. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 59, n° 4, (agosto 1969).
12. GRANDJOT C. *Complementos de Matemáticas Superiores (puras y aplicadas)*, Editorial Universitaria 1962.
13. *Scientific Subroutine Package of FORTRAN*, IBM.

#### EARTHQUAKE EFFECTS REDUCTION BY MEANS OF AN ELASTOPLASTIC TOP STORY

##### SUMMARY:

*The exact responses to four actual earthquakes of shear resisting structures ten stories high are studied, both linear structures and structures with an elasto-plastic energy dissipating top story are included and their corresponding responses are compared.*

*For a given earthquake non linear structures are subjected to much less deformation than the corresponding linear ones. The reduction of relative deformations are in general alike for all stories for a given earthquake and they are little dependent on variation of mass distribution and of stiffness distribution in height.*