

## EDIFICIOS SOMETIDOS A TERREMOTOS. REDUCCION DE SOLICITACIONES

Raúl HUSID\*  
Jorge BAKSAI\*\*

### RESUMEN

*En el presente trabajo se estudia la respuesta de edificios de 5, 10 y 15 pisos cuya base es sometida a la acción de terremotos reales. Se analizan tres tipos de estructuras para cada número de pisos: a) lineal, b) piso basal elasto-plástico y el resto de la estructura lineal, c) piso superior elasto-plástico y el resto de la estructura se mantiene lineal. Se han seleccionado 18 edificios diferentes, que cubren bien las estructuras chilenas, tomando valores del período fundamental, distribución de masas en la vertical y distribución de rigideces en altura. Los resultados muestran que las solicitaciones laterales generadas por los terremotos pueden ser reducidas considerablemente si se introduce ya sea el piso basal o el piso superior elasto-plástico.*

### INTRODUCCION

Cuando un edificio es sometido a la acción de un terremoto, la estructura usualmente se defiende recurriendo a su capacidad de soportar fuerzas laterales permaneciendo elástica, a su deformabilidad y a su capacidad de absorber energía. Como se ha encontrado que los edificios diseñados de acuerdo a las prescripciones de

---

\* Profesor de Ingeniería Sísmica, Departamento de Geofísica, Colorado School of Mines, Golden, CO. Actualmente en el U.S. Geological Survey; Branch of Earthquake Hazards, Denver, Colorado, E.U.A.

\*\* Investigador, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Trabajo presentado a las 2<sup>as</sup> Jornadas Chilenas de Ingeniería Antisísmica.

códigos de diseño sísmico, se deforman bastante mas allá del límite elástico durante terremotos destructores, se ha dado especial importancia a la deformabilidad y capacidad de absorber energía en el diseño sísmico<sup>1,2</sup>.

Varios autores han estudiado la posibilidad de reducir las sollicitaciones generadas por los terremotos en edificios recurriendo a un primer piso flexible o a un mecanismo disipador de energía ubicado en el primer piso de la estructura<sup>3,4,5</sup>. Han aparecido algunas proposiciones en el sentido de colocar amortiguadores histeréticos, en varios pisos simultáneamente, con el objeto de absorber energía durante terremotos<sup>6,7</sup>. Otros autores han prestado atención a la posibilidad de limitar la magnitud de las aceleraciones, velocidades y desplazamientos que la tierra entrega a la estructura durante un terremoto<sup>8</sup>.

Husid y Uribe<sup>9</sup> fueron los primeros que estudiaron la posibilidad de emplear mecanismos disipadores de energía ubicados en el piso superior de los edificios.

Husid y Sánchez<sup>10</sup> estudiaron la influencia que el grado de amortiguación viscosa tiene en la reducción de sollicitaciones laterales al emplear un piso capaz de disipar energía. Además propusieron<sup>10</sup> un esquema de un mecanismo no lineal práctico para ser ubicado en el primer piso de los edificios.

Es importante hacer notar que los estudios anteriores<sup>4,5,9,10</sup> fueron todos realizados fijando arbitrariamente en diez el número de pisos. Fintel y Khan<sup>3</sup> utilizaron un modelo demasiado simplificado para realizar el estudio.

En el presente trabajo se estudia la posibilidad de reducir las sollicitaciones laterales en edificios de 5, 10 y 15 pisos, sometidos a la acción de terremotos reales<sup>11</sup> tanto cuando se introduce un mecanismo elasto-plástico en el piso superior, como en el primer piso.

## Motivacion

Se ha observado que durante terremotos severos, en algunas zonas de gran destrucción, algunos edificios importantes han resultado poco dañados. La energía que recibió la estructura destruyó uno de los pisos, o parte de él, pero el edificio fue capaz de mantenerse en pie.

Este fenómeno fue observado luego de los sismos de Caracas<sup>12</sup>, Venezuela, en el año 1967 y Skopje<sup>13</sup>, Yugoeslavia, 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 sollicitaciones 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<sup>9</sup>. 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.

En este trabajo se estudia el efecto que se produce al reemplazar, ya sea el primer o el último piso de una estructura lineal, por uno elasto-plástico, cuando la base del edificio es sometida a la acción de terremotos reales.

ANALISIS GENERAL

Se estudiará la respuesta de estructuras de 5, 10 y 15 pisos 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 de la respuesta de las mismas estructuras cuando sea su primer o 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 solo por corte. Se desprecia la influencia de la gravedad y no se considera la interacción suelo-estructura.

La finalidad de este trabajo es mostrar cómo se modifica la respuesta a un terremoto real dado cuando se reemplaza en una estructura de 5, 10 o 15 pisos sea el piso superior o el inferior por uno elasto-plástico.

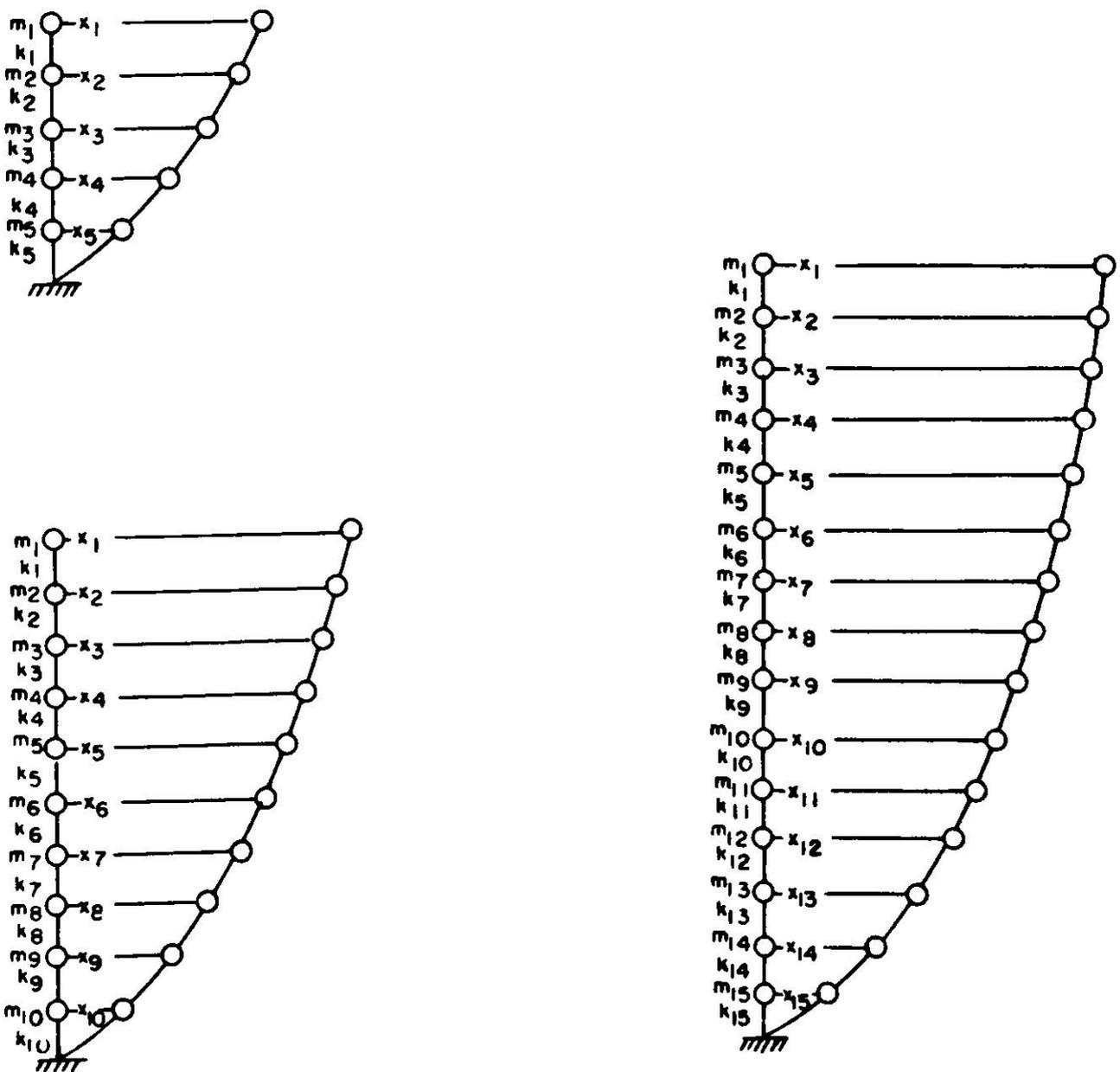


Fig. 1. Estructuras lineales consideradas.

## Estructura lineal

### Ecuaciones diferenciales del movimiento

La ecuación del movimiento de un piso está dada por la segunda ley de Newton:

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

$$i = 1 \text{ a } 5, \text{ con } x_6 = 0 = k_0 \text{ para } 5 \text{ pisos}$$

$$i = 1 \text{ a } 10, \text{ con } x_{11} = 0 = k_0 \text{ para } 10 \text{ pisos}$$

$$i = 1 \text{ a } 15, \text{ con } x_{16} = 0 = k_0 \text{ para } 15 \text{ pisos}$$

donde:  $k_i$  es la rigidez del piso  $i$ ,  $m_i$  es la masa del piso  $i$ ,  $x_i$  es la abscisa del piso  $i$  (a partir de la posición de equilibrio) y  $F(t)$  es la aceleración del suelo durante el terremoto, Fig. 1.

### 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>14,9</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.

$$\delta = g \left( \frac{m_1}{k_1} + \frac{m_1 + m_2}{k_2} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^5 m_i}{k_5} \right) \quad (5 \text{ pisos}) \quad (3)$$

$$\delta = g \left( \frac{m_1}{k_1} + \frac{m_1 + m_2}{k_2} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^{10} m_i}{k_{10}} \right) \quad (10 \text{ pisos}) \quad (4)$$

$$\delta = g \left( \frac{m_1}{k_1} + \frac{m_1 + m_2}{k_2} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^{15} m_i}{k_{15}} \right) \quad (15 \text{ pisos}) \quad (5)$$

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

$$m_i = m_1 \cdot \alpha_i \quad k_i = k_1 \cdot \beta_i \quad (6)$$

resulta fácil demostrar que

$$\frac{k_1}{m_1} = \frac{32}{T_1^2} \left\{ \frac{\alpha_1}{\beta_1} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\beta_2} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^5 \alpha_i}{\beta_5} \right\} \quad (5 \text{ pisos}) \quad (7)$$

$$\frac{k_1}{m_1} = \frac{32}{T_1^2} \left\{ \frac{\alpha_1}{\beta_1} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\beta_2} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^{10} \alpha_i}{\beta_{10}} \right\} \quad (10 \text{ pisos}) \quad (8)$$

$$\frac{k_1}{m_1} = \frac{32}{T_1^2} \left\{ \frac{\alpha_1}{\beta_1} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\beta_2} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^{15} \alpha_i}{\beta_{15}} \right\} \quad (15 \text{ pisos}) \quad (9)$$

Por lo tanto al elegir el período fundamental y la distribución en altura de masas y rigideces, se obtiene  $k_1/m_1$  y queda definida la estructura en forma completa. Esta consideración permite desligarse de las constantes físicas reales de los edificios en este estudio y definir estructuras más o menos rígidas utilizando períodos menores o mayores respectivamente.

Para este estudio se eligieron valores del período fundamental aproximado de 0.2 y 0.5 seg, 5 pisos; 0.4 y 1.0 seg, 10 pisos; 0.6 y 1.5 seg, 15 pisos. En cuanto a masas y rigideces se seleccionaron dos posibilidades de variación lineal en altura: constante o decreciente.

### Mecanismo elasto-plástico en el último piso o en el primer piso

En este trabajo se ha supuesto que la fuerza de restitución generada por desplazamientos relativos entre pisos consecutivos (disipación de energía en el primer o último piso) es elasto-plástico histerética. Introduciendo en ecuación 1 los términos no lineales correspondientes<sup>9,10</sup> y resolviendo numéricamente el sistema de ecuaciones del movimiento con un método de cuarto orden de Runge-Kutta<sup>15</sup>, es posible evaluar los desplazamientos relativos entre pisos, como función del tiempo para la estructura lineal, para la estructura con el mecanismo no lineal en el piso superior y la estructura con el mecanismo no lineal en el piso inferior.

Debido a que los sismos digitalizados y reproducidos en tarjetas perforadas dan 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<sup>11</sup>.

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<sup>11</sup>. Por razones de espacio, solo se presentan algunos resultados correspondientes al terremoto de Akashi, cuyo acelerograma aparece en Fig. 2. Se trata de un sismo moderado, de duración 13 segundos<sup>16</sup>, y ocurrió en Japón en 1963. Los espectros de aceleración absoluta para el acelerograma recién mencionado, así como varias otras características del terremoto, aparecen en un trabajo de Husid<sup>11</sup>.

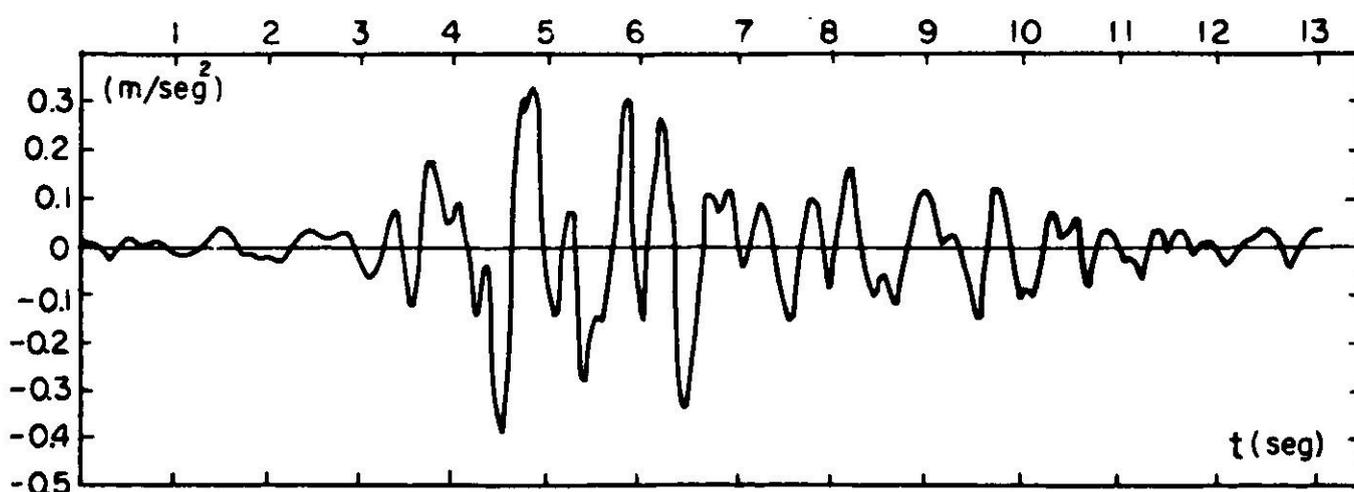


Fig. 2. Acelerograma terremoto Akashi.

## DETERMINACION DE LAS RESPUESTAS

### Estructuras lineales

Se determinó la respuesta para todas las combinaciones de período fundamental aproximado impuesto, y de distribución de rigideces y masas sometidas a los terremotos ya mencionados.

Se obtuvo las deformaciones relativas (piso a piso) en función del tiempo mediante el método de Runge-Kutta antes mencionado. Los cálculos fueron realizados en el computador IBM 360-40 de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Algunos de los resultados se presentan gráficamente en las Figs. 3, 4, 5 y 6.

### Estructuras con el último o primer piso elasto-plástico.

Para todos los casos anteriores 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. Se usó el mismo método de Runge-Kutta para calcular todos los desplazamientos relativos en función del tiempo. Algunos de los resultados aparecen en las Figs. 3, 4, 5 y 6.

# ESTRUCTURA 6 (5 PISOS)

$T=0.2 \text{ seg}$

DESPLAZAMIENTOS PISO 2

TERREMOTO AKASHI

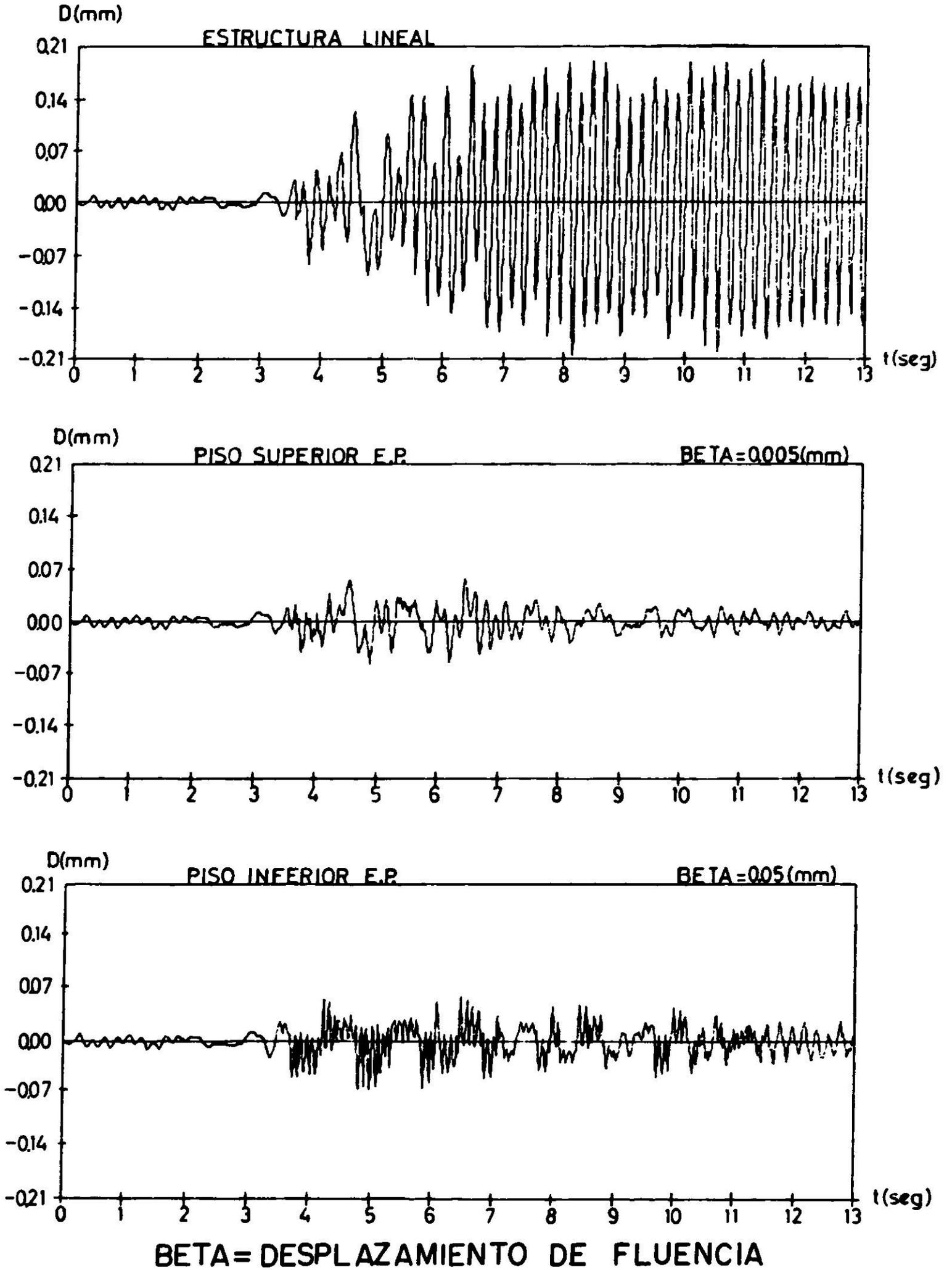


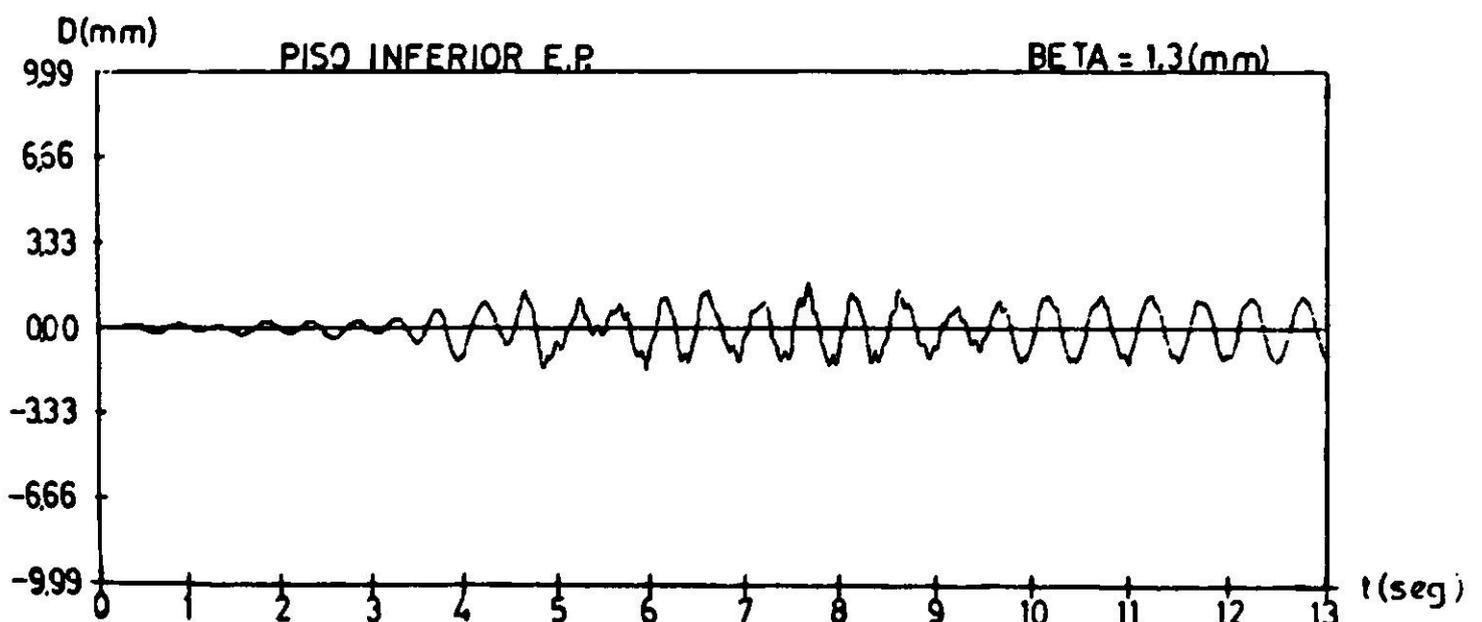
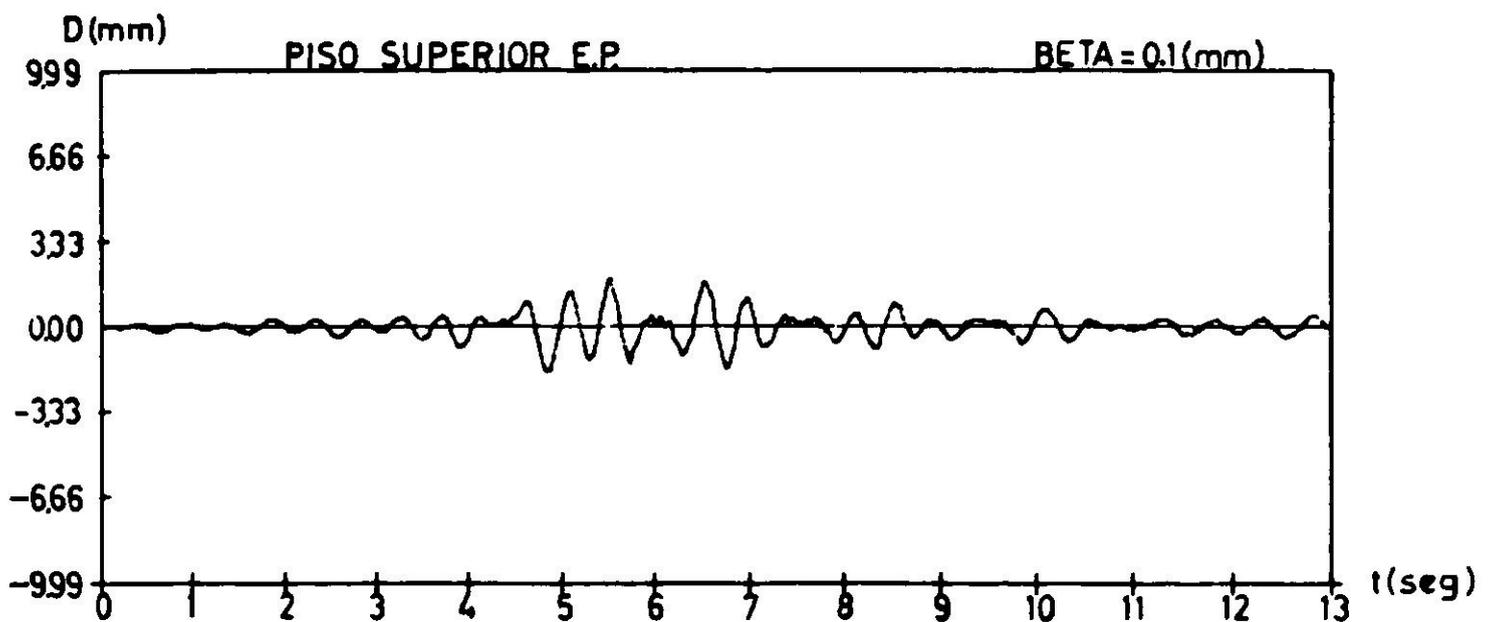
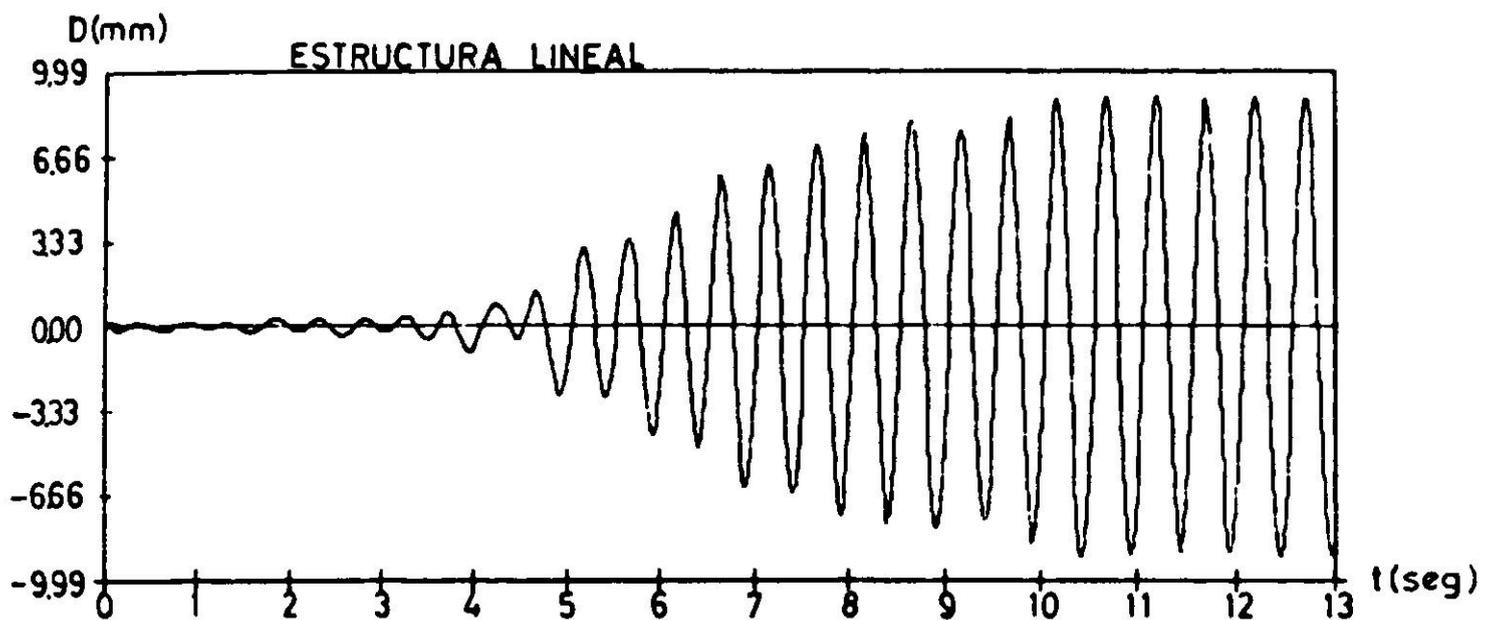
Fig. 3. Respuestas de desplazamiento de estructura lineal, estructura con piso superior elasto-plástico y estructura con piso inferior elasto-plástico.

# ESTRUCTURA 1 (5 PISOS )

$T=0.5 \text{ seg}$

DESPLAZAMIENTOS PISO 4

TERREMOTO AKASHI



BETA = DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA

Fig. 4. Respuestas de desplazamiento de estructura lineal, estructura con piso superior elasto-plástico y estructura con piso inferior elasto-plástico.

# ESTRUCTURA 7 (10 PISOS)

$T = 1.0 \text{ seg}$

DESPLAZAMIENTOS PISO 2

TERREMOTO AKASHI

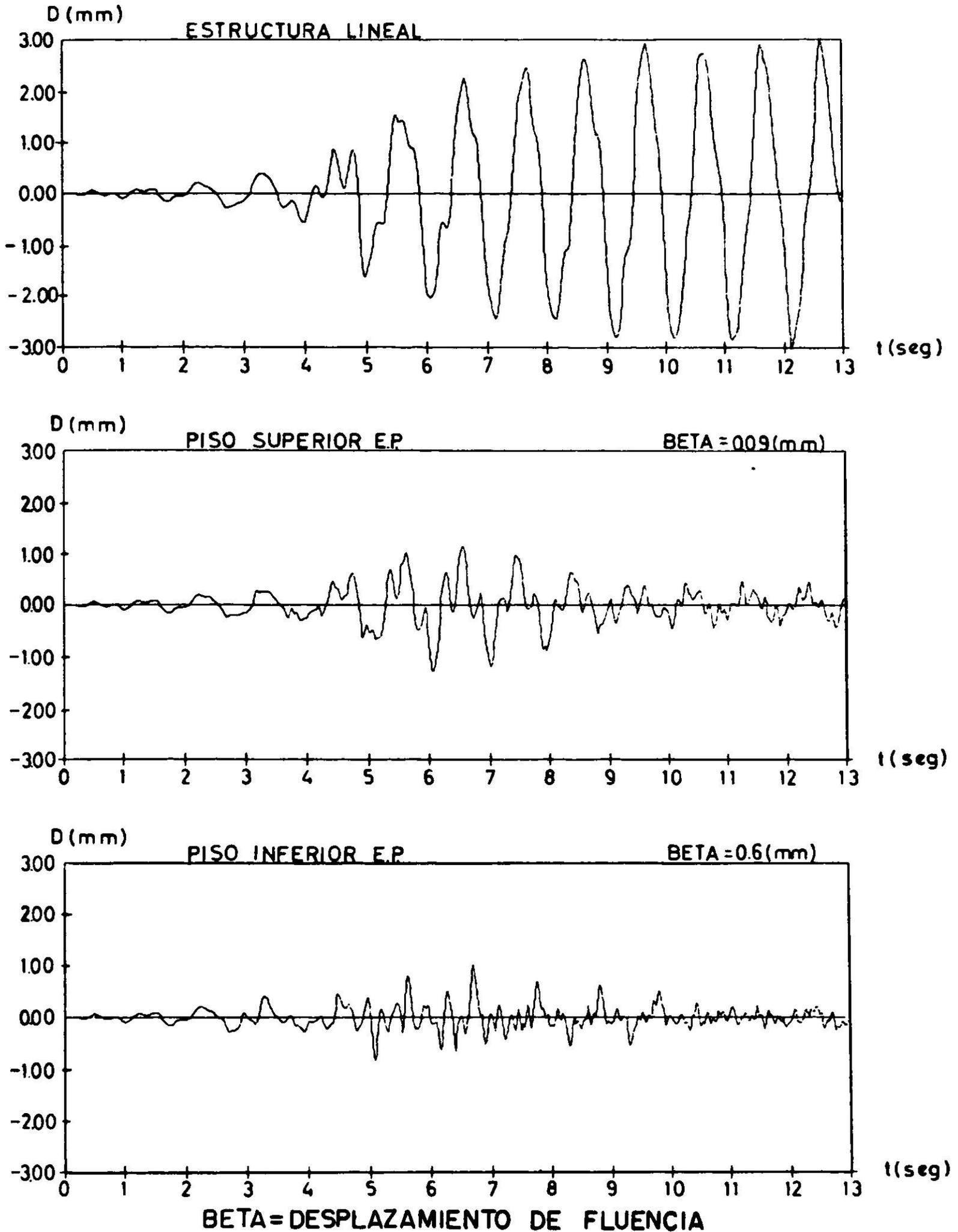


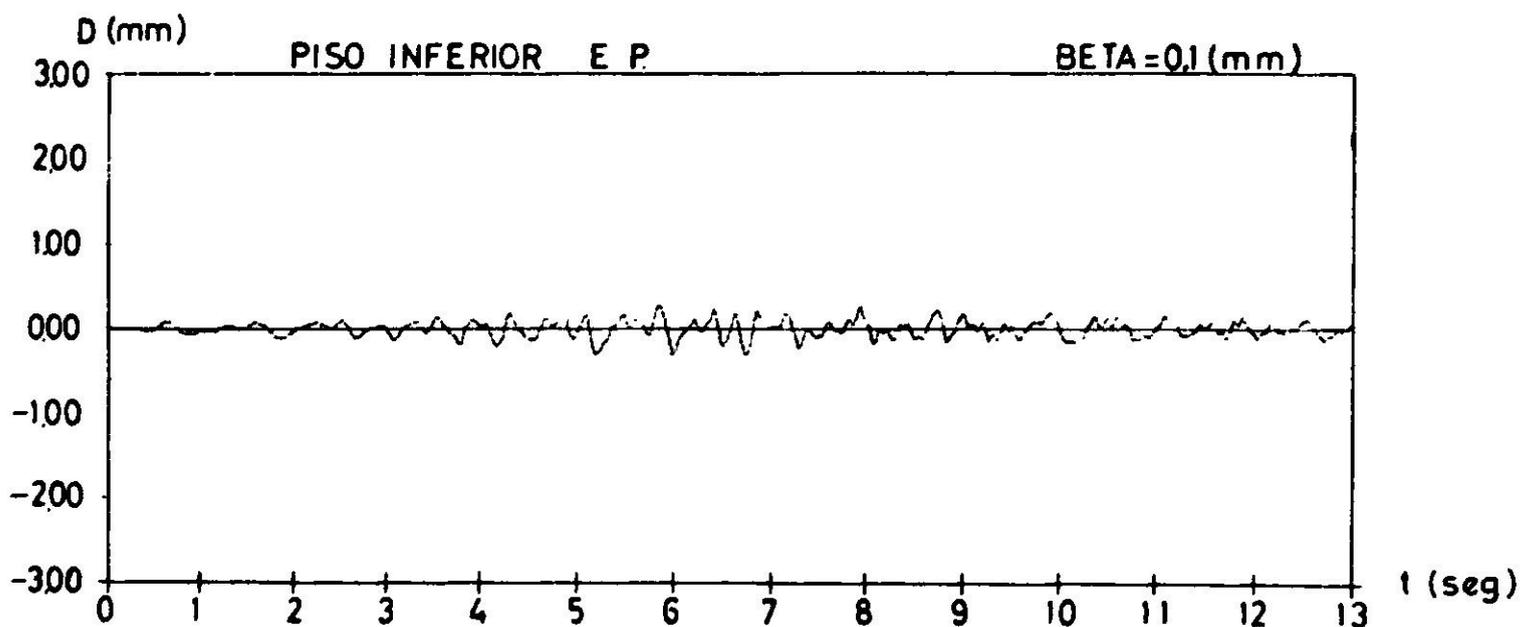
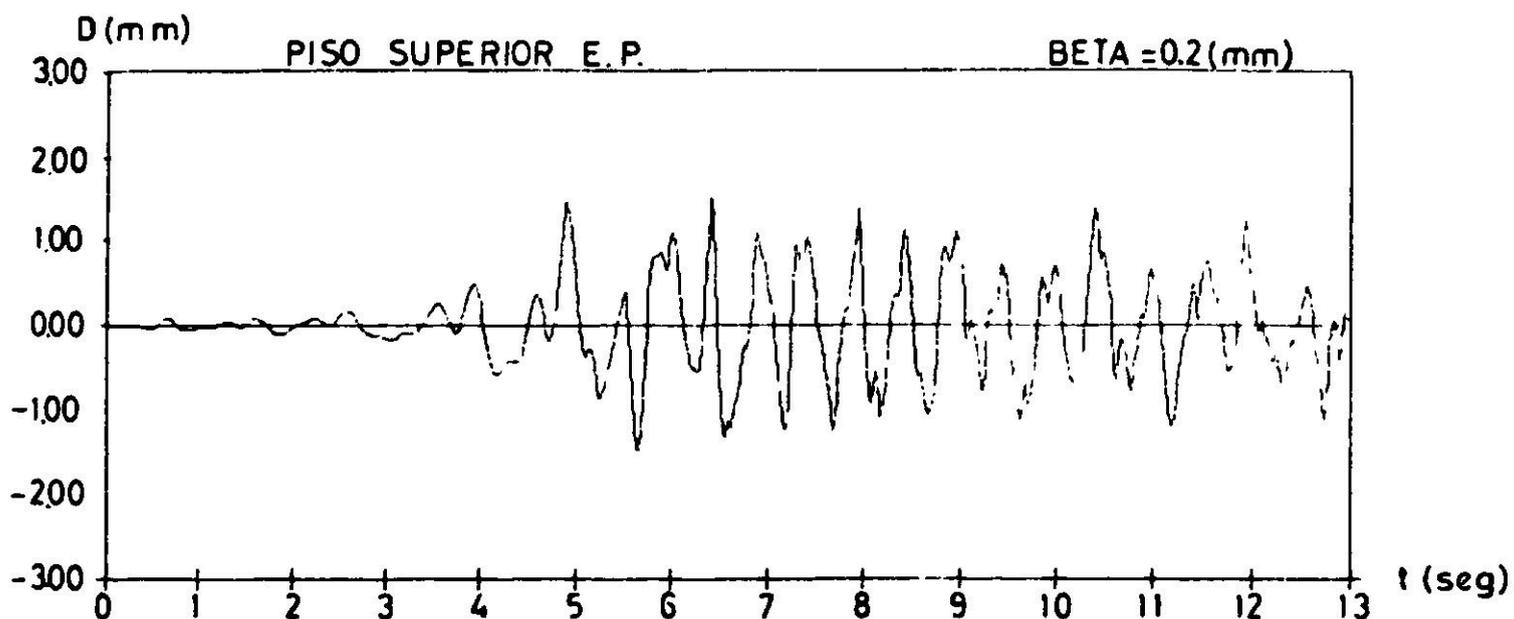
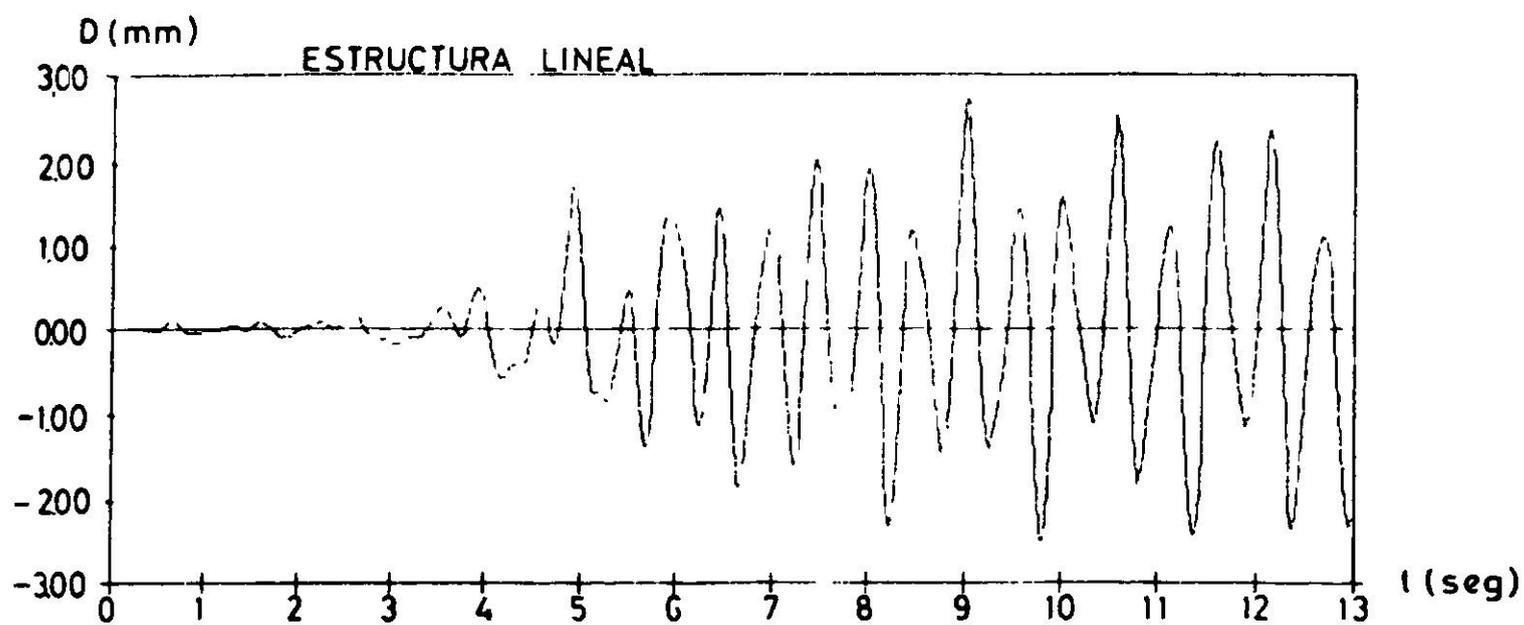
Fig. 5. Respuestas de desplazamiento de estructura lineal, estructura con piso superior elasto-plástico y estructura con piso inferior elasto-plástico.

## ESTRUCTURA 17 (15 PISOS)

T = 1.5 seg

DESPLAZAMIENTOS PISO 3

TERREMOTO AKASHI



BETA = DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA

Fig. 6. Respuestas de desplazamiento de estructura lineal, estructura con piso superior elasto-plástico y estructura con piso inferior elasto-plástico.

### Comparación entre las respuestas de la estructura lineal y de las dos estructuras no lineales correspondientes

La forma más simple de analizar los resultados obtenidos consiste en comparar las curvas de desplazamiento relativo en función del tiempo para cada piso y cada estructura lineal con las dos no lineales correspondientes. Con esto se logra apreciar no sólo la reducción de las deformaciones relativas sino además el comportamiento del mecanismo elasto-plástico y su efecto en cada piso de la estructura en función del tiempo.

Se estudiaron 18 edificios diferentes y se determinaron las respuestas a varios terremotos reales, cuando la estructura era lineal, o cuando ya sea en el primer o último piso se introducía un mecanismo disipador de energía. Las Figs. 3, 4, 5 y 6 son ejemplos de los excelentes resultados obtenidos y de su observación se concluye que la idea de reducir las solicitaciones laterales mediante disipadores de energía ubicados en el piso superior o inferior de un edificio merece ser llevada al campo experimental.

### CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos al estudiar la respuesta de estructuras lineales de 5, 10 y 15 pisos y las correspondientes que se obtienen al reemplazar el último piso o el primero por un mecanismo elasto-plástico, cuando la base es sometida a la acción de terremotos reales, indican que la estructura no lineal alcanza desplazamientos que en general son bastante 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.

La reducción de las deformaciones obtenidas al usar un mecanismo disipador de energía 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.

Si se considera que los disipadores pueden acarrear deformaciones relativas considerables, en el piso donde se les instala, resulta conveniente pensar en ubicarlos en el piso superior. Una falla parcial o total de la estructura tipo apéndice, construída en la parte superior de un edificio, generalmente no comprometerá su estabilidad y al término del sismo puede ser reconstruída con facilidad.

### REFERENCIAS

1. HOLLINGS, J.P. Reinforced concrete seismic design. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquakes Engineering*, vol. 2, n° 3, (septiembre 1969) pp. 217-250.
2. SKINNER, R.I., BECK, J.L. y BYCROFT, G.N. A practical system for isolating structures

- from earthquake attack. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, vol. 3 (1975), pp. 297-309.
3. FINTEL, M. y KHAN, F.R. Shock-absorbing soft story concept of multistory earthquake structure. *Journal of the American Concrete Institute*, vol. 66, n° 55 (mayo 1969).
  4. HUSID, R. y AMENABAR, F. Reducción de solicitaciones laterales en edificios mediante un primer piso elasto-plástico. *III Congreso Mexicano de Ingeniería Sísmica*, noviembre 1971, Acapulco, México.
  5. HUSID, R., URIBE, J. y AMENABAR, F. Local elasto-plastic behaviour of multistory structures to reduce lateral displacements during earthquakes. *Symposium on Plastic Analysis of Structures*, Jassy Rumania, septiembre 1972.
  6. KELLY, J. M., SKINNER, R.I. y HEINE, A.J. Mechanism of energy absorption in special devices for use in earthquake-resistant structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 5, n° 3 (septiembre 1972), pp. 63-88.
  7. SKINNER, R.I., KELLY, J.M. y HEINE, A.J. Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, vol. 3 (1975), pp. 287-296.
  8. GLICKSBERG, R.C. Earthquakes - insulation foundations. *United States Patent* n° 3748800, pp. 1-5 (julio 31, 1973).
  9. HUSID, R. y URIBE, J. Reducción de solicitaciones de edificios mediante un último piso elasto-plástico. *Revista del IDIEM*, vol. 9, n° 2 (septiembre 1970), pp. 61-77.
  10. HUSID, R. y SANCHEZ, J. Earthquake response reduction in building with an elasto-plastic story. *Regional Conference on Tall Buildings*, Bangkok, Thailand, enero 1974, pp. 671-682.
  11. HUSID, R. Earthquakes. *Spectral Analysis and Characteristics of accelerograms as a basis of earthquake-resistant design*. Bilingual edition, 447 pp., Editorial Andrés Bello, mayo 1973, Santiago, Chile.
  12. FINTEL, M. The Caracas earthquake of July 29, 1967. *Civil Engineering, ASCE*, vol. 38, n° 2 (febrero 1968).
  13. KUNZE, W.E., FINTEL, M. y AMRHEIN, J.E. Skopje earthquake damage. *Civil Engineering - ASCE*, vol. 33, n° 12 (diciembre 1963).
  14. HUSID, R. Cálculo del período fundamental de vibración de edificios con rigidez de corte. *14<sup>as</sup> Jornadas Chilenas de Ingeniería Antisísmica*, julio 1963, Santiago-Chile.
  15. *Scientific Subroutine Package of FORTRAN*, IBM.
  16. Earthquake Research Institute, Strong-Motion Earthquake Observation Committee. *Strong-motion earthquake records in Japan*, vol. 63, octubre 1965, Japón.

## BUILDINGS SUBJECTED TO EARTHQUAKES. RESPONSE REDUCTION

### SUMMARY:

*In this paper a study of the response of 5, 10 and 15 story structures is made when their base is subjected to the action of real earthquakes. Three types of structures for each number of stories are analyzed: a) linear, b) lower story elasto-plastic and the rest of the structure stays linear, c) upper story elasto-plastic and the rest of the structure remains linear. Eighteen different buildings were selected, which cover well Chilean structures, assigning values for the fundamental period of vibration and vertical distribution of masses and stiffnesses. The results obtained show that the earthquake response of buildings can be considerably reduced if an elasto-plastic mechanism is introduced, either in the first or upper story.*