

## Capacidad de las construcciones para resistir ondas sísmicas resonantes

### Características de los temblores

El sismograma de un terremoto destructor, en que ha habido solamente un choque en el foco, puede representarse aproximadamente por un gráfico de la naturaleza del que se indica en la figura 1.

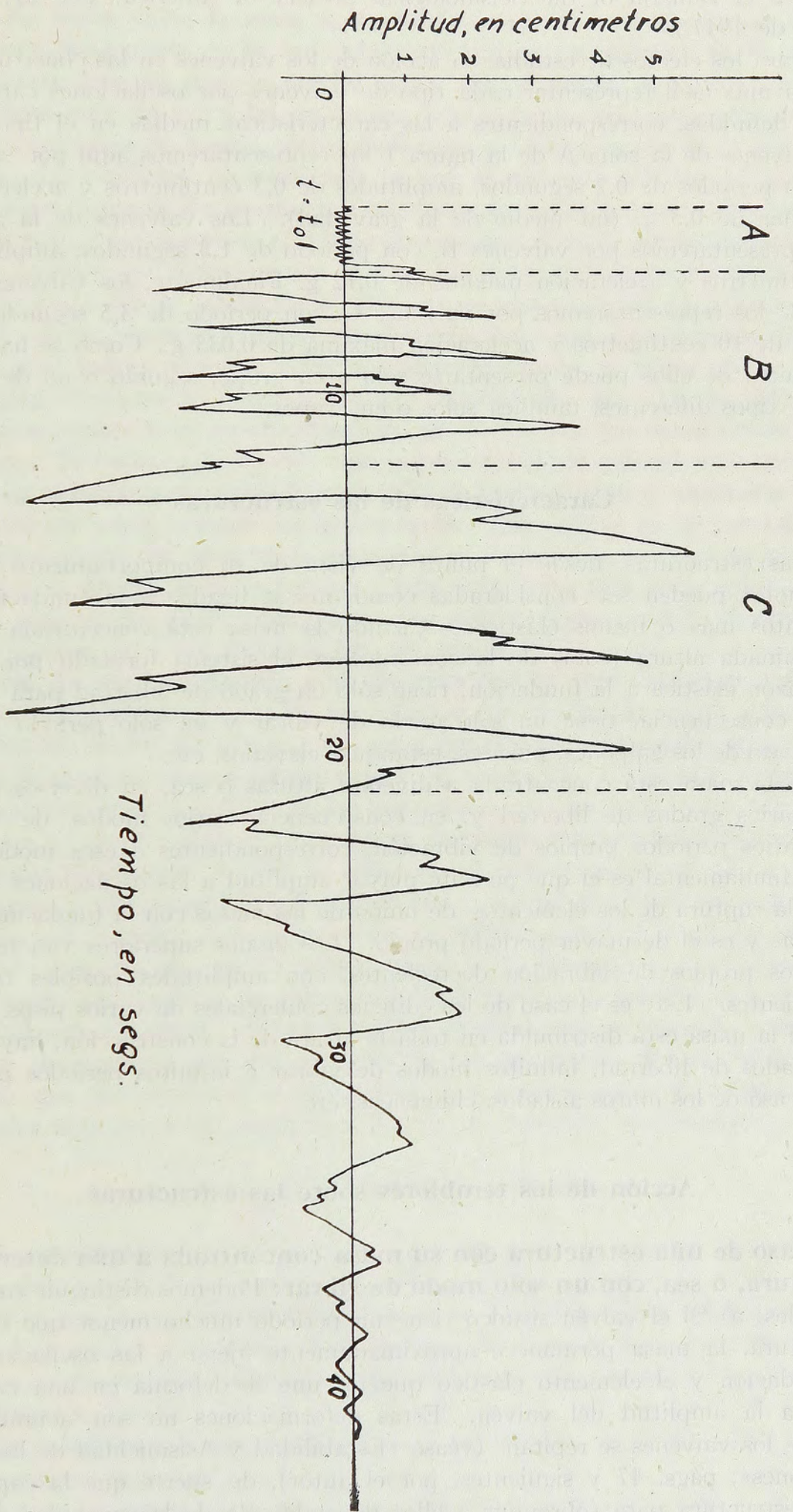
La forma misma de cada vaivén es irregular; pero puede admitirse que hay ahí la superposición de ondas diversas en magnitud y período, que llegan al lugar donde está el sismógrafo o el edificio, ya sea directamente desde el foco, reflejadas, refractadas, interferidas, etc. por efecto de la diversidad de las capas terrestres que atraviesan.

Si ha habido más de un choque en el foco o hipocentro, simplemente se sobreponen los sismogramas correspondientes.

De la observación de los pocos sismogramas de terremotos destructores de que se dispone se puede suponer que se presentan en ellos tres tipos principales de vaivenes, con efectos distintos en las estructuras: Los vaivenes de la zona A de la figura 1, con amplitudes del orden de los milímetros y con períodos del orden de los décimos de segundo; los vaivenes de la zona B, con amplitudes del orden de los centímetros (1 a 5 cms.) y períodos del orden de los segundos (0,8 a 2,5); y los vaivenes de la zona C, con amplitudes del orden de los centímetros (hasta 10 y más cms.) y períodos de varios segundos (2,5 a 10 y más segundos).

Si se hace una estadística de todos los vaivenes y se colocan en un gráfico en que se llevan los períodos como abscisas y las amplitudes como ordenadas se obtienen puntos distribuidos algo así como lo indicado en la figura 2, en que cada uno representa un vaivén. Se ha dibujado una línea llena que daría un valor medio de las características que puede esperarse que tengan los vaivenes.

La superposición de los efectos de choques sucesivos en el foco, la reflexión, refracción, interferencia, etc. de que hemos hablado, explica que la sucesión en que los vaivenes llegan al sismógrafo o a un edificio, sea cualquiera. Para los efectos de su acción en las estructuras debemos aceptar la posibilidad de que uno o un grupo de ellos, de un determinado tipo, se halle entre otros grupos o vaivenes aislados de tipos diferentes. (Véase la publicación: *Characteristics of Strong Motion Earthquake*, por George W. Housner, publi-



cada en el Bulletin of the Seismological Society of América, Vol. 37, N.º 1, enero de 1947.)

Para los efectos de estudiar la acción de los vaivenes en las construcciones resulta más fácil representar cada tipo de vaivenes por oscilaciones características, definidas, correspondientes a las características medias en el tipo. Así, los vaivenes de la zona A de la figura 1 los representaremos aquí por vaivenes A, con períodos de 0,2 segundos, amplitudes de 0,3 centímetros y aceleraciones máximas de 0,5 g. (un medio de la gravedad). Los vaivenes de la zona B los representaremos por vaivenes B, con período de 1,3 segundos, amplitud de 5 centímetros y aceleración máxima de 0,12 g. Finalmente, los vaivenes de la zona C los representaremos por vaivenes C, con período de 3,5 segundos, amplitud de 10 centímetros y aceleración máxima de 0,033 g. Como se ha dicho, cualquiera de ellos puede presentarse solo o en grupo, seguido o nó de vaivenes de tipos diferentes, también solos o en grupos.

### Características de las estructuras

Las estructuras, desde el punto de vista de su comportamiento en los terremotos pueden ser consideradas como masas ligadas a la fundación por elementos más o menos elásticos. Cuando la masa está concentrada a una determinada altura (cota) de la construcción, el sistema formado por ella y su ligazón elástica a la fundación, tiene sólo un grado de libertad para vibrar, y, en consecuencia, tiene un solo modo de vibrar y un solo período propio. Es el caso de los galpones, puentes, estanques elevados, etc.

Si la masa está concentrada a diversas alturas o sea, en diversos planos, hay varios grados de libertad y, en consecuencia, varios modos de vibrar, con varios períodos propios de vibración, correspondientes a esos modos. El modo fundamental es el que permite mayor amplitud a las oscilaciones sin llegar a la ruptura de los elementos de unión de las masas con la fundación o entre ellas y es el de mayor período propio. Los modos superiores van teniendo períodos propios de vibración decrecientes, con amplitudes posibles también decrecientes. Este es el caso de los edificios comerciales de varios pisos.

Si la masa está distribuída en toda la altura de la construcción, hay infinitos grados de libertad, infinitos modos de vibrar e infinitos períodos propios. Es el caso de los muros aislados, chimeneas, etc

### Acción de los temblores sobre las estructuras

**Caso de una estructura con su masa concentrada a una determinada altura, o sea, con un solo modo de vibrar:** Podemos distinguir tres posibilidades: a) Si el vaivén sísmico tiene un período mucho menor que el de la estructura, la masa permanece aproximadamente ajena a las oscilaciones de la fundación y el elemento elástico que los une se deforma en una cantidad igual a la amplitud del vaivén. Estas deformaciones no son acumulativas aunque los vaivenes se repitan (véase «Estabilidad y Asismicidad de las Construcciones», págs. 47 y siguientes, por el autor), de suerte que la capacidad de la estructura para sobrevivir a ellos depende sólo de la capacidad del ele-

mento de unión entre la masa y las fundaciones (pilares, machones, muros, etc.) para deformarse en la indicada cantidad, sin romperse. b) Si el vaivén sísmico tiene un período mucho mayor que el propio de la estructura, la masa sigue muy de cerca las oscilaciones de la fundación, desarrollándose en ella las reacciones de inercia correspondientes a la aceleración de la oscilación sísmica. La condición de resistencia es que el elemento elástico de unión de la masa con la fundación resista esas reacciones máximas de inercia sin romperse, c) Si el vaivén sísmico tiene el mismo período que el de la estructura (resonancia) se produce aproximadamente el caso a), en que el elemento elástico que une a la masa con la fundación se deforma en una cantidad igual a la amplitud del vaivén; pero en este caso las deformaciones son acumulativas, de suerte que, si el vaivén se repite  $n$  veces la deformación es  $n$  veces mayor (véase «Vibrating Problems in Engineering, por Timoshenko, pág. 18, fig. 13) siempre que se desprece el amortiguamiento producido por los rozamientos, histéresis, etc. Se deduce que en este caso la posibilidad de sobrevivir al terremoto que tiene la estructura ya no depende sólo de la elasticidad y resistencia de los elementos que unen la masa con su fundación, como sucede en los casos a) y b) sino que también del número de veces que se repiten los vaivenes de igual período que el propio de la estructura. Ella será tanto más antisísmica cuanto mayor número de oscilaciones resonantes consecutivas puedan absorber los pilares, muros, etc., por deformación, sin romperse.

**Caso de una estructura con diversas masas concentradas a distintas alturas:** Este es el caso de los edificios comerciales de varios pisos, etc., con diversos modos de vibrar. En estas estructuras se reproducen, en general, los mismos fenómenos vibratorios y de resonancia a que nos hemos referido anteriormente al hablar de las estructuras con un solo modo de vibrar. La figura a) esquematiza una estructura de cuatro masas concentradas a cuatro alturas diferentes: en a-1 se muestra el primer modo de vibrar (modo fundamental), de período propio más lento y mayor amplitud máxima admisible; En a-2 se indica el segundo modo, de período propio y amplitud máxima admisible menores que en el primer modo; y finalmente, en a-3 tenemos el tercer modo con período propio y amplitud máxima admisible aun menores que en el segundo modo. En cada uno de estos modos de vibrar la resonancia produce elongaciones que son la suma de las amplitudes del movimiento vibratorio que las produce, amortiguadas por los rozamientos internos. En los modos superiores las amplitudes máximas admisibles son menores.

### Modo de abordar el problema

El procedimiento más directo para formarse un juicio sobre el comportamiento de las estructuras ante la emergencia sísmica consiste en analizar la situación en que se encuentran varias de ellas, de dimensiones establecidas por el cálculo corriente y conforme a las normas en vigencia, cuando se las somete a uno o varios vaivenes sísmicos consecutivos de los que hemos indicado, ya sea del tipo A, B. o C.

Nos referiremos a una estructura con un solo grado de libertad para vibrar, o sea con un modo.

El caso b), como ya se sabe, debe asimilarse a la sollicitación proveniente de una aceleración uniforme igual a la máxima del vaivén, sin efecto acumula-

tivo (véase «Estabilidad y Asismicidad de las Estructuras», págs. 24 y siguientes).

El caso a) debe, asimismo, asimilarse a un desplazamiento horizontal del centro de gravedad de la estructura, con respecto a la fundación, igual a la amplitud máxima del vaivén, sin efecto acumulativo.

El caso c) de resonancia puede analizarse en un ejemplo, en la siguiente forma:

En la figura 2, la línea llena indica los valores medios probables de las características de amplitud y período de los vaivenes sísmicos, como se había visto anteriormente.

La figura 3 representa una estructura formada por una cubierta de 1.500 toneladas de peso, que actúa como dintel sobre 18 pilares de hormigón armado, de sección circular, encastrados en su parte superior al dintel y articulados en su base o cimiento. Las dimensiones de los pilares se han fijado de acuerdo con las normas para el Cálculo y la Construcción de Obras de Hormigón Armado, tomando en cuenta el pandeo en el caso de pilares muy altos, y limitando a 35 kgs/cm.<sup>2</sup> la fatiga de compresión axial en el hormigón. En el cálculo de fatigas debidas a la flexión en los pilares, que se hace al considerar las sollicitaciones horizontales, más adelante, se supone que toda la sección de hormigón colabora, y se prescinde de la sección de las armaduras. Esta suposición no altera las cosas en forma apreciable y, en cambio, proporciona continuidad a las curvas.

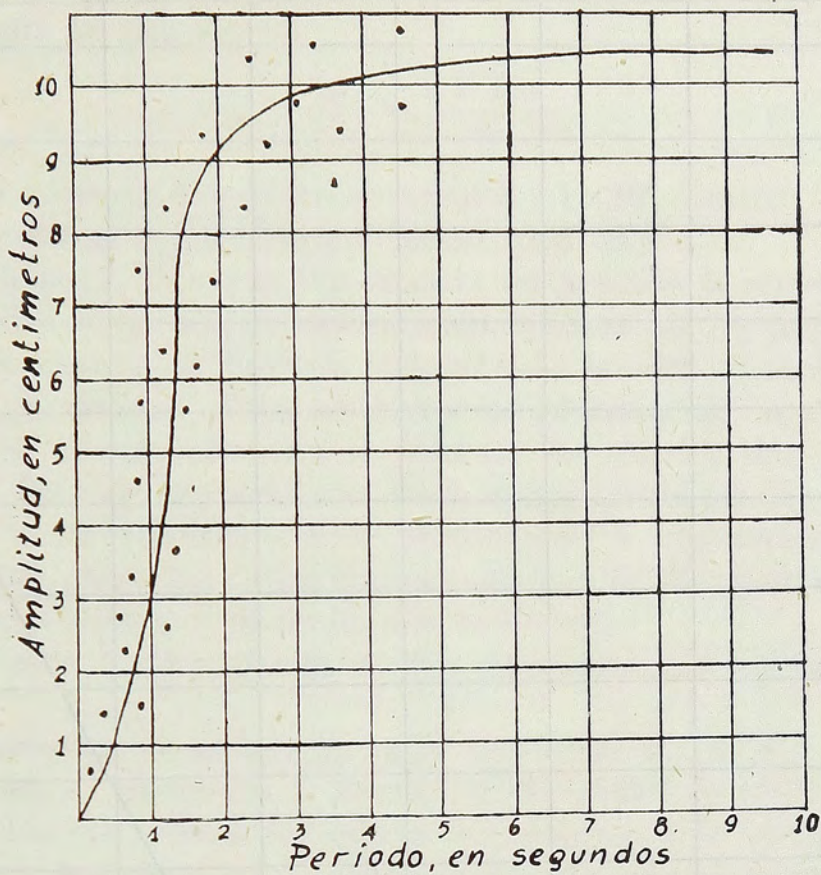
La figura 4 es el gráfico de variación del período propio de vibración de la estructura con las variaciones de altura de los pilares. El cálculo se ha hecho según la expresión:

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{MH^3}{\alpha E I}}$$

en que se ha supuesto  $\alpha=2$  y se ha despreciado la masa de los pilares,

En la figura 5 se ha llevado en abscisas la altura  $h$  de los pilares de la estructura y en ordenadas las amplitudes de los vaivenes sísmicos probables que tienen el mismo período que la estructura, o sea que resuenan con ella. Así, para pilares de seis metros de altura el período propio, según la figura 4, es de 2,5 segundos; y, según la figura 2, los vaivenes sísmicos de 2,5 segundos de período tienen una amplitud probable de 9,5 cms. que es la ordenada de la curva de figura 5.

En la figura 6 la curva  $w_1$  da, en abscisas, la altura de los pilares, y en ordenadas la energía de deformación que se acumula en ellos cuando el dintel se desplaza horizontalmente respecto de la fundación de una cantidad igual a la amplitud de un semivaivén resonante, deducida de la figura 5. Por ejemplo: la estructura cuyas columnas tienen 8 metros de altura, tiene 3,3 segundos de período propio de vibración, (Fig. 4). De la Fig. 5 se deduce que la onda en resonancia tiene 9,95 cms. de amplitud probable, y de la fórmula 2) se deduce que esta deformación de las columnas corresponde a un almacenamiento de energía de 2550 kilográmetros en ellas. Las curvas  $w_2$  y  $w_3$  corresponden a la energía acumulada en los pilares en dos y tres semiondas conse-



Probables valores medios de amplitud y periodo de ondas sísmicas. Cada punto representa una onda particular..

Fig. 2

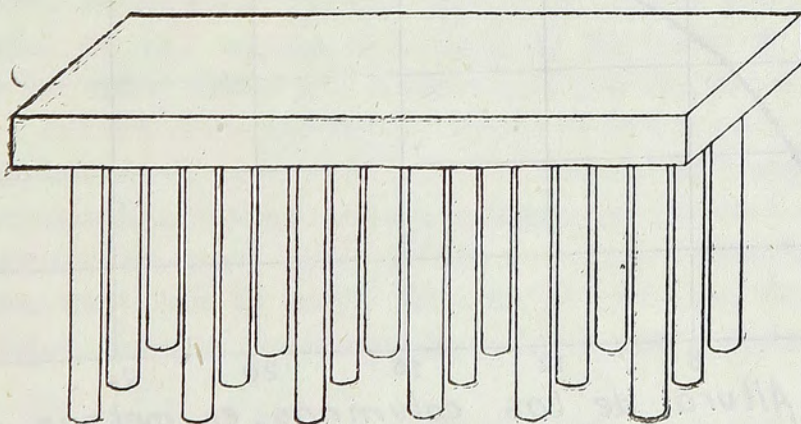


Fig. 3

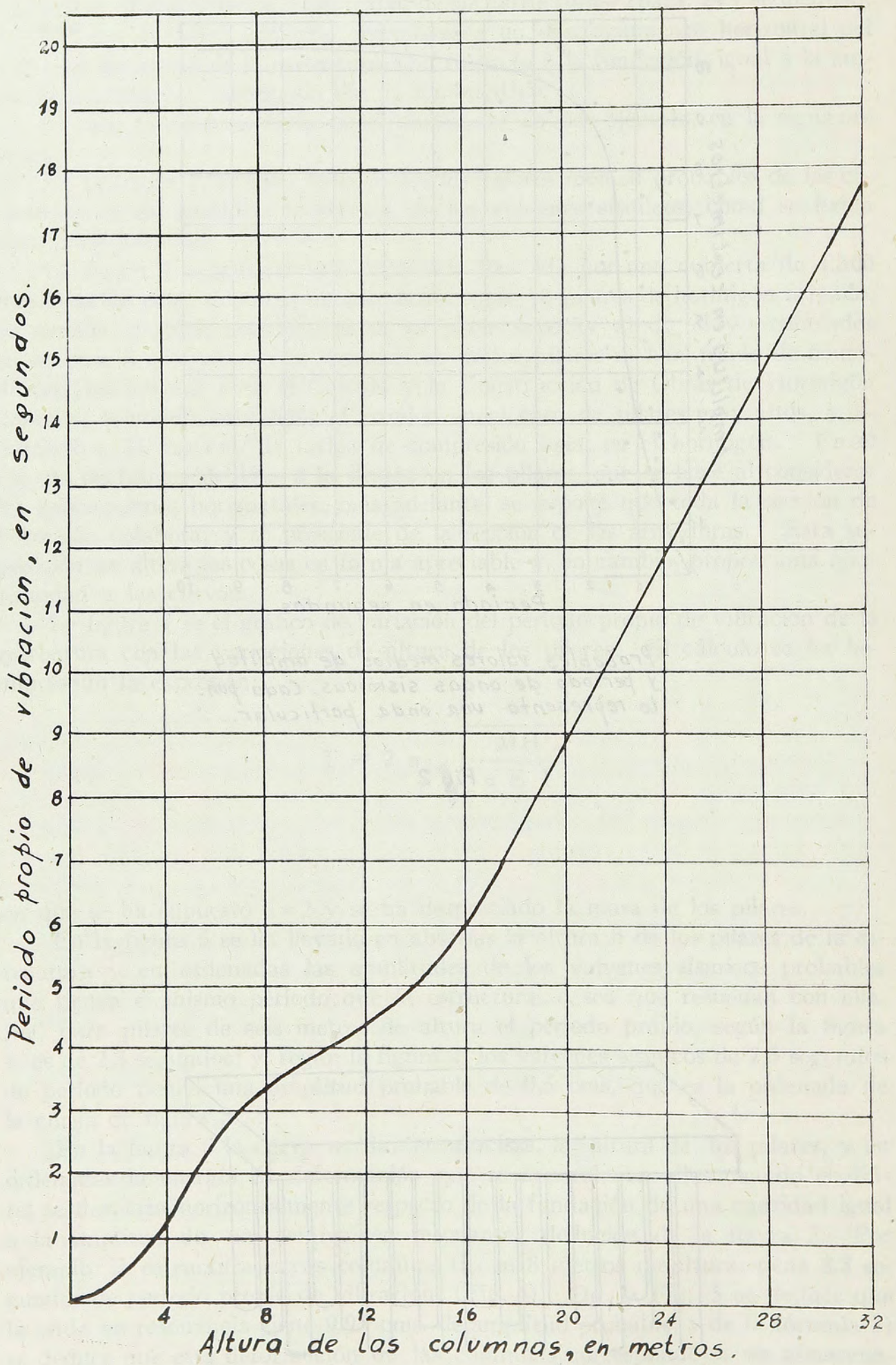


Fig. 4

cutivas que, como se sabe, tienen efecto acumulativo. Esta energía ha sido calculada según la expresión:

$$W = \frac{\alpha E I \Delta}{2h^3}$$

en que se ha supuesto  $E$  constante e igual a  $2,1 \times 10^3$  kgs/cm<sup>2</sup>. (Véase «Estabilidad y Asismicidad de las Construcciones», pág. 50.)

En la figura 7, la curva  $W_n$  muestra en abscisas la altura de los pilares y en ordenadas la energía de deformación máxima que se puede acumular en ellos, sin alcanzar a la ruptura, desplazando horizontalmente el dintel respecto de la fundación. Para establecer ese máximo se ha admitido que en los pilares no sólo se produzca la deformación elástica sino que también la deformación plástica, supuesta tres veces mayor que la elástica de acuerdo con experiencias de laboratorio. (Véase «Estabilidad y Asismicidad de las Construcciones», pág. 50.) La curva  $W_m$  es análoga a la  $W_n$ ; pero en la suposición de pilares de hormigón armado de alta resistencia.

En la figura 8 simplemente se han superpuesto las curvas de las figuras 6 y 7.

Las diferencias de ordenadas entre las curvas  $W_n$  y  $W_1$ , a la derecha de su intersección  $\alpha$ , representa el exceso de capacidad de absorción de energía de deformación que poseen los pilares con respecto a la que les suministraría un semivaivén resonante. La existencia de este exceso garantiza que la estructura no sufre daños por efecto del semivaivén. En el punto  $\alpha$ , el exceso se hace nulo, o sea que la energía suministrada es igual a la capacidad de absorción. A la izquierda de  $\alpha$ , la energía suministrada es mayor que la que pueden absorber los pilares y, en consecuencia, en esta zona la estructura se destruye.

Los puntos  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  en la intersección de  $W_n$  con  $W_2$  y  $W_3$  dan también la condición de igualdad entre la energía suministrada a la estructura por dos y tres semivaivenes resonantes, respectivamente y la capacidad máxima de absorción de los pilares. Las diferencias de ordenadas entre las curvas  $W_n$  y las  $W_2$  y  $W_3$  a la derecha de estos puntos representan el exceso de capacidad de absorción de energía de la estructura, o sea, que es zona de seguridad, y la zona de la izquierda es de ruptura.

Finalmente, los puntos  $\beta_2$  y  $\beta_3$  corresponden a los  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , y  $\alpha_3$  respectivamente, para la curva  $W_m$  con pilares de hormigón armado de alta resistencia.

Por ejemplo, en figura 8 tenemos que la estructura indicada en la figura 3, con columnas de 13,7 metros de altura, de hormigón de alta resistencia, puede resistir sin sufrir daños tres medias ondas consecutivas resonantes. Si esta estructura tuviera columnas de 9,2 metros o menos no resistiría ni siquiera media onda resonante; pero si la columna tuviera 20 o más metros, podría absorber un extraordinariamente grande número de vaivenes sin dañarse.

Las estructuras de acero dulce, debido a su gran capacidad para absorber energía, pueden constituir la mejor solución al problema de la construcción contra terremotos, siempre que su proyecto haya sido calculado en forma correcta.

La figura 8 demuestra que las estructuras de muy corto período propio de vibración no pueden absorber la energía suministrada por ondas sísmicas resonantes, y en consecuencia podría pensarse que es imposible construir edi-



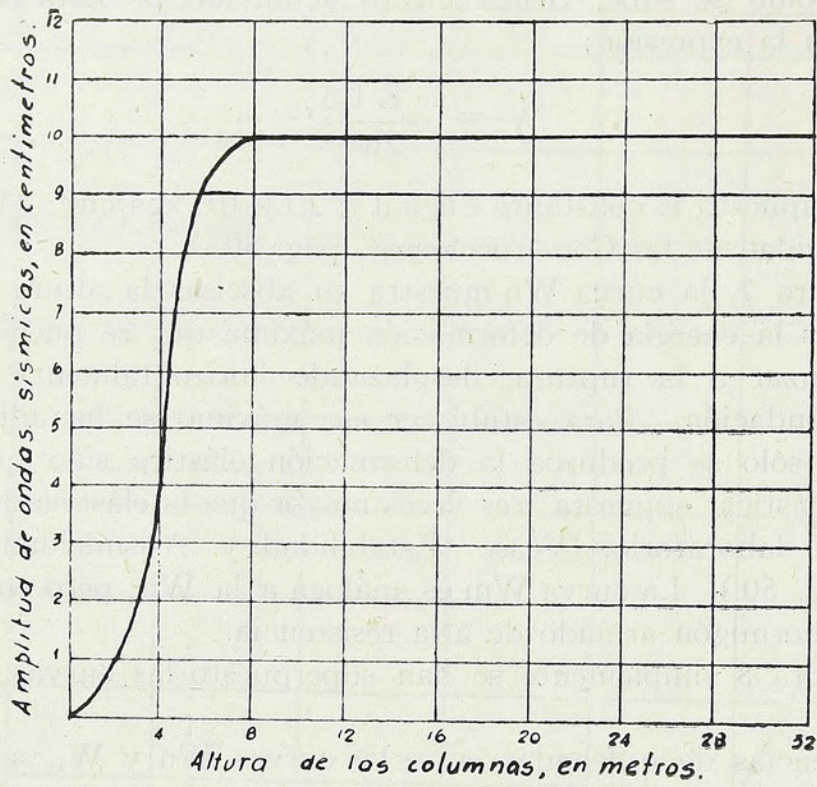


Fig. 5

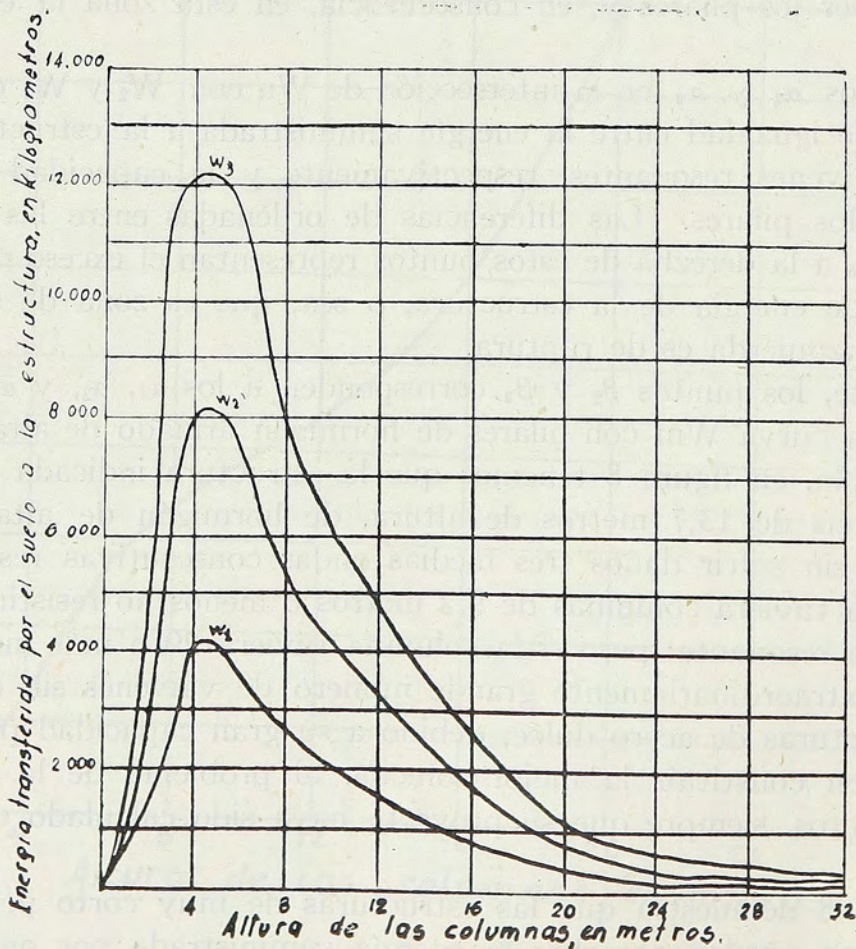


Fig. 6

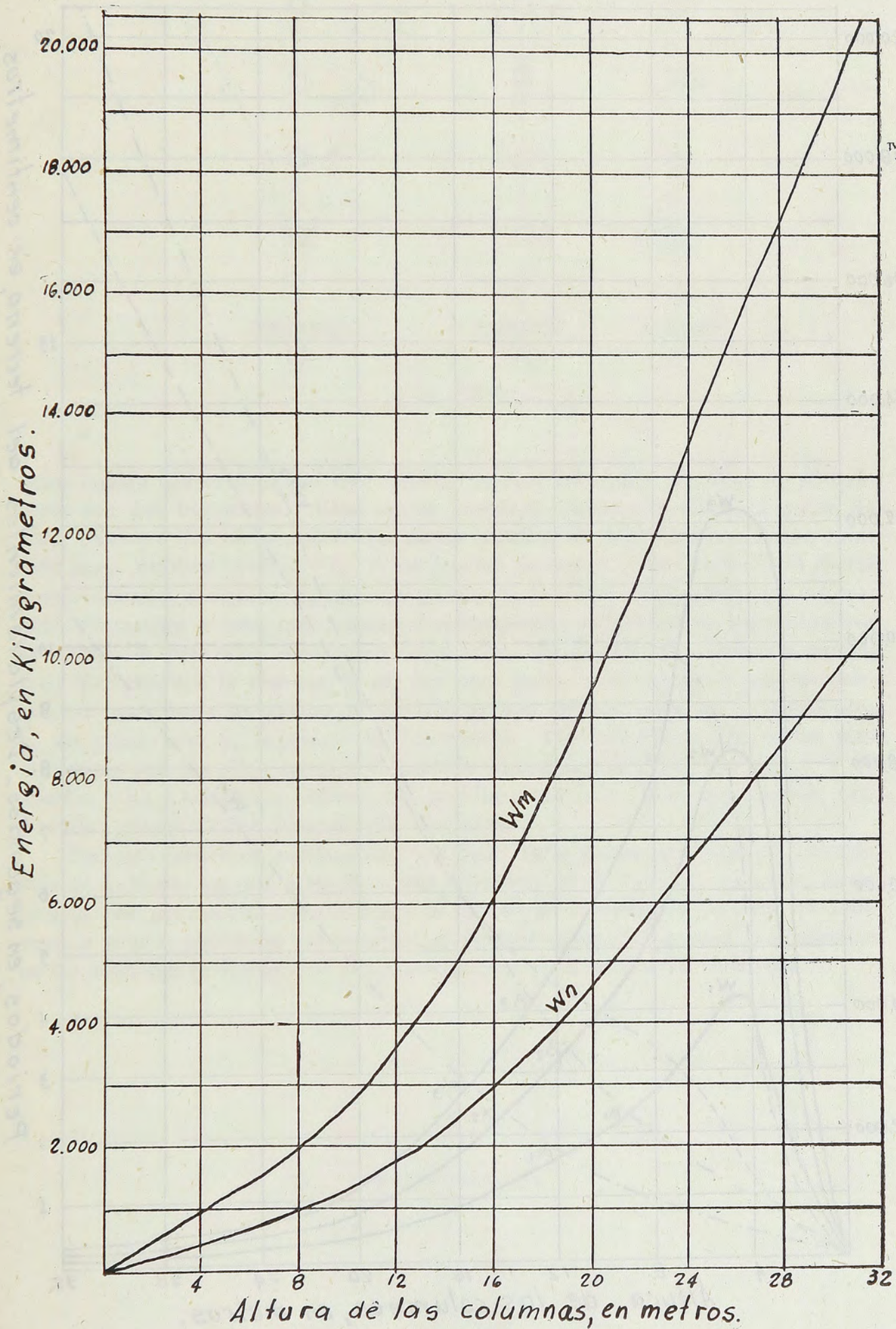


Fig. 7

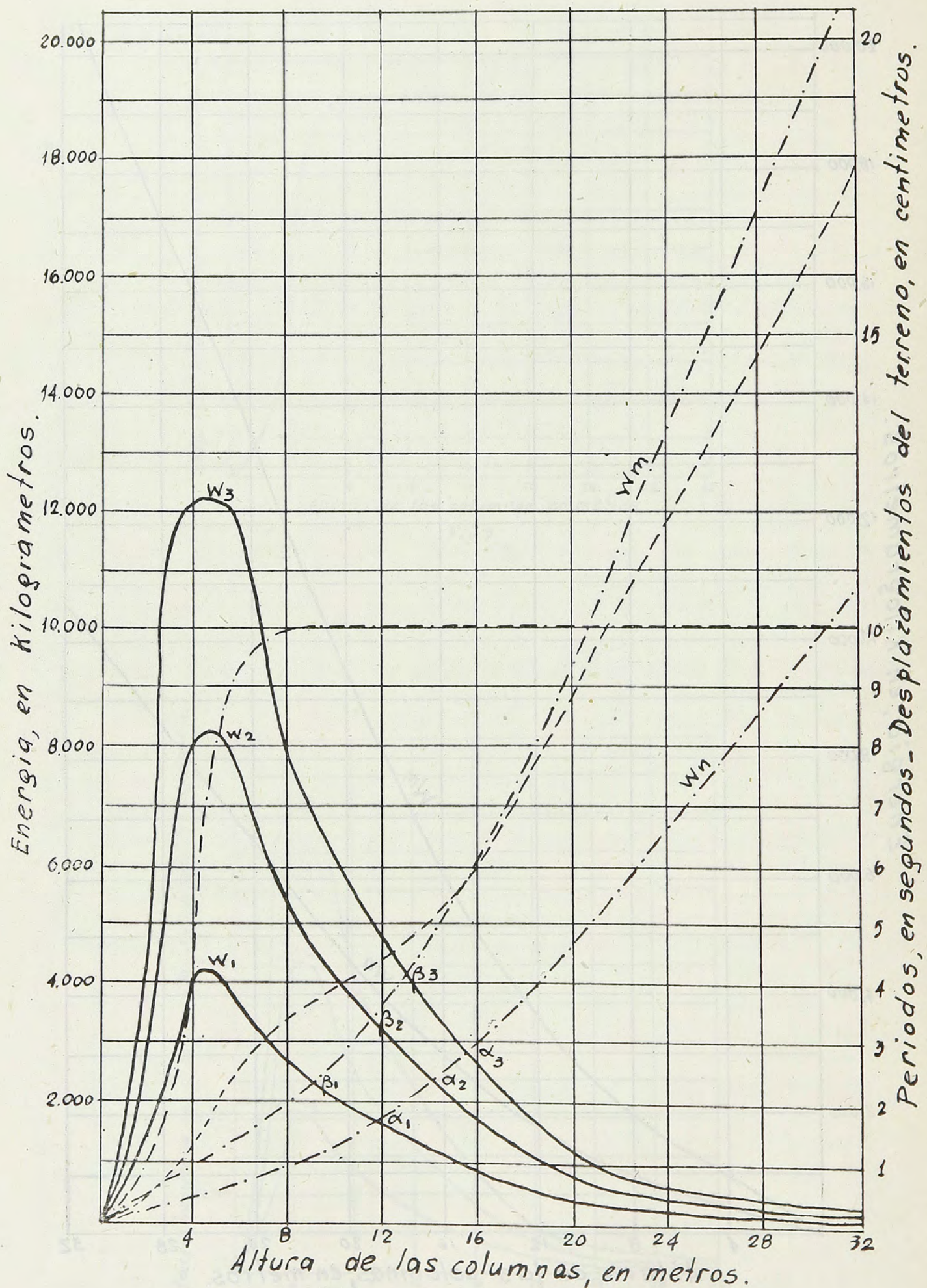


Fig. 8

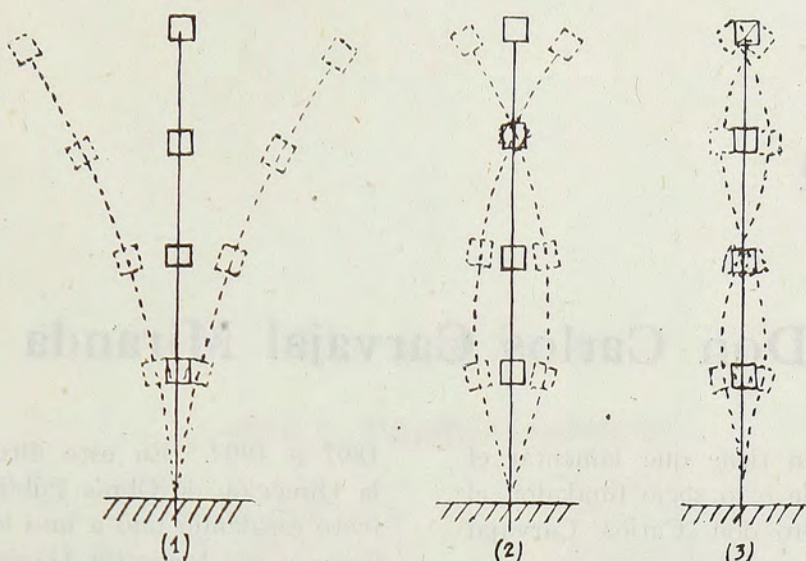


Fig. 2.

ficios contra terremotos del tipo rígido, ya que las ondas sísmicas de período corto son tan frecuentes. Esto es, sin embargo, cierto sólo desde el punto de vista teórico. En efecto, como las ondas sísmicas de período corto tienen también poca amplitud (véase Fig. 2) no pueden provocar el derrumbe total de las construcciones aunque se produzcan grietas en los elementos resistentes. Creemos, en cuanto a esto, que ningún desplazamiento del orden de los milímetros es capaz de provocar derrumbes completos. El peligro del efecto acumulativo que produce la resonancia es, por otra parte, muy reducido por las grietas, ya que éstas modifican el período propio de vibración de la estructura y, en consecuencia, suprimen la resonancia. Probablemente las ondas más peligrosas son aquellas en que el período está comprendido entre 0,7 y 3 segundos. La Ordenanza chilena no prohíbe construir obras que tengan este período propio; pero recomienda evitarlas.

En una próxima publicación veremos cómo puede aplicarse el procedimiento indicado en este artículo a una construcción de carácter comercial constituida por pilares de acero y losas de hormigón armado, en la cual los tabiques y muros exteriores constituyen elementos agregados o bien sobrepuestos en las losas con posterioridad a la construcción de la estructura resistente.

J. I. V.