

Estabilidad y asismicidad de las construcciones

POR JULIO IBÁÑEZ V.

(Conclusión)

ENERGIA DE LA ACCION SISMICA

Cuando el terreno de fundación en que descansa una construcción rígida, de masa m , comienza a moverse con movimiento oscilatorio, le imprime velocidades crecientes que llegan a un máximo, que designaremos por $v_{m\acute{a}x}$. La energía cinética que ha debido suministrarle vale, entonces:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{m\acute{a}x}^2$$

Si aceptamos para el movimiento de la tierra la expresión sinusoidal:

$$\Delta = \Delta_{m\acute{a}x} \text{sen } 2\pi \frac{t}{T}$$

la energía E es entregada a la construcción durante el primer cuarto de período, o sea, en el tiempo $T/4$ y su valor se obtiene derivando la ecuación que da el valor de Δ , como sigue:

$$v = \frac{d\Delta}{dt} = \frac{2\pi}{T} \Delta_{m\acute{a}x} \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

v es la velocidad del movimiento en un instante t cualquiera y toma su valor máximo cuando:

$$\cos 2\pi \frac{t}{T} = 1$$

Se tiene entonces:

$$v_{\text{máx}} = \frac{2\pi}{T} \Delta_{\text{máx}}$$

y la energía suministrada en ese primer cuarto de período es:

$$E = \frac{1}{2} m \frac{4\pi^2}{T^2} \Delta_{\text{máx}}^2$$

Como ya hemos visto que

$$\frac{4\pi^2}{T^2} \Delta_{\text{máx}} = A_{\text{máx}} \text{ (aceleración máxima)}$$

obtenemos, introduciendo este valor:

$$E = \frac{1}{2} m A_{\text{máx}} \Delta_{\text{máx}}$$

y llamando $A_1 = \frac{A_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$ aceleración eficaz del movimiento y $\Delta_1 = \frac{\Delta_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$ desplazamiento eficaz, se tiene:

$$E = m \cdot A_1 \cdot \Delta_1$$

La energía transferida a la construcción durante el primer cuarto de período, es pues, igual a la masa por la aceleración eficaz y por el desplazamiento eficaz.

Si la construcción es perfectamente rígida y resistente, esta energía, absorbida durante el primer cuarto de período es devuelta al terreno durante el cuarto de período siguiente, en que la velocidad del conjunto disminuye desde $V_{\text{máx}}$ hasta cero. Durante los dos cuartos de período que siguen, el fenómeno de transferencia de energía del terreno a la estructura y de ésta al terreno, se repite; pero el movimiento se hace en sentido contrario.

Veamos qué valores tiene la energía en la práctica: Supongamos que la construcción pesa 1,500 toneladas y que está sometida a las siguientes tres clases de ondas: A) con período de 0,2 segundos, amplitud de 0,3 centímetro y aceleración de 0,5 g; B) con período de 1,3 segundos, amplitud de 5 centímetros y aceleración de 0,12 g; y C) con período de 3,5 segundos, amplitud de 10 centímetros y aceleración de 0,033 g. Se ha procurado elegir tres tipos de ondas que representen, en lo posible las magnitudes de ondas típicas observadas en los sismogramas.

La energía máxima recibida por la construcción sometida a ondas A) es:

$$E_A = \frac{1}{2} m A_{\text{máx}} \Delta_{\text{máx}} = 675 \text{ Kgmrts.}$$

Sometida a ondas B) es:

$$E_B = 4,500 \text{ Kgrmts.}$$

y sometido a las ondas C) es:

$$E_C = 2,480 \text{ Kgrmts.}$$

Si la estructura es enteramente elástica el movimiento del terreno de fundación, tal como lo hemos visto, no es transmitido a la masa, la que permanece inmóvil, sino que deforma los elementos elásticos que la sostienen (pilares, muros transversales, etc.), y la energía transferida a la construcción durante el primer cuarto de período se reduce a la que se necesita para deformar esos elementos (Flexión y cizalle). Esta energía vale:

$$E = \frac{1}{2} F_{\text{máx}} \Delta_{\text{máx}}$$

en que $F_{\text{máx}}$ es el esfuerzo horizontal ejercido por la fundación sobre los pilares, etc., para producir la deformación máxima $\Delta_{\text{máx}}$. En el segundo cuarto de período esta energía elástica es devuelta por la estructura al terreno y en los dos cuartos de períodos siguientes las cosas pasan como en los dos primeros cuartos; pero el movimiento tiene sentido contrario. Sea, por ejemplo, una plataforma o cubierta de hormigón armado, apoyada únicamente en pilares, iguales y elásticos; sea h la altura de estos pilares, I la suma de los momentos de inercia de sus secciones transversales, E el coeficiente de elasticidad del material y α el coeficiente de encastramiento. La fuerza $F_{\text{máx}}$ está dada por la expresión:

$$F_{\text{máx}} = \frac{\alpha E I \Delta_{\text{máx}}}{h^3}$$

y la expresión de la energía elástica almacenada en los pilares es:

$$E = \frac{\alpha E I \Delta_{\text{máx}}^2}{2 h^3}$$

Si el peso de la cubierta es de 1,500 toneladas y los pilares son doce, de sección circular, de 0,80 m de diámetro y 20 m de altura, con articulación en la base y coeficiente $\alpha = 2$, se tiene:

Período T de vibración.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m h^3}{\alpha E I}} = 6.95$$

que corresponde al de una estructura elástica, como habíamos supuesto.

La energía transferida en este caso, por los tres tipos de ondas estudiados es:

$$E_A = 0,58 \text{ Kgms.};$$

$$E_B = 162 \quad \text{>}$$

$$E_C = 648 \quad \text{>}$$

Como estas energías son devueltas al terreno en el segundo semi-período de la onda, no se acumulan y constituyen el total o máximo transferido.

En las construcciones que están en perfecta resonancia con la onda sísmica, la energía transferida por el terreno a la construcción no es devuelta por ésta en el cuarto de período siguiente. Al contrario, en ese intervalo de tiempo otra cantidad igual de energía es entregada a la construcción, la que cada cuarto de período recibe la dosis ya expresada. La energía total recibida es tanto mayor cuanto más oscilaciones resonantes se produzcan.

Se obtiene así el siguiente cuadro de la energía total que transfiere el terreno a una construcción, cualquiera que sea el número de veces que se repita la onda.

Tipo de onda	Energía transferida a las construcciones rígidas del ejemplo	Energía transferida a las construcciones flexibles del ejemplo	Energía transferida a construcciones en resonancia
A (T = 0,2 seg.)	675 kgms	0,58 kgms	crece indefinidamente
B (T = 1,3 seg.)	4 500 kgms	162 kgms	crece indefinidamente
C (T = 3,5 seg.)	2 480 kgms	648 kgms	crece indefinidamente

Generalizando, se puede decir que las construcciones rígidas reciben más energía durante los temblores que las flexibles, lo que se traduce generalmente en un mayor costo para alcanzar la asismicidad.

Es claro que para alcanzar un conocimiento completo de las condiciones que posee una construcción para la emergencia sísmica sería necesario poseer una estadística completa de las ondas observadas en una gran cantidad de terremotos, con indicación de sus características y veces que se repiten ondas similares. Desgraciadamente, la estadística existente es demasiado pobre.

EFFECTOS DE LA PLASTICIDAD DE LOS MATERIALES

Siempre se ha considerado razonable perseguir, como finalidad de las construcciones anti-sísmicas, únicamente que no estén expuestas a derrumbarse con pérdida de vidas y de los bienes albergados. No se hace cuestión, por lo general, de los daños menores que pueden sufrir los edificios mismos, cuya reparación significa

un gasto moderado. Es lógico entonces aceptar que las fatigas desarrolladas en los materiales, alcancen durante los mayores sismos, la zona de plasticidad. Esto tiene dos consecuencias de importancia: 1.º Que las deformaciones y energía absorbida por los elementos soportantes de una construcción son mucho mayores que las elásticas; y 2.º Que el peligro de resonancia es aminorado, tanto porque al pasar el material del período elástico al plástico cambia su módulo de elasticidad E cambiando así el período propio de vibración de la estructura; como también por el hecho de que en las deformaciones plásticas la energía suministrada se transforma en calor, o sea que no puede acumularse en la estructura porque está siendo consumida.

En la fig. 1 se han construido curvas de período propio de vibración, deformación de los pilares y de capacidad de absorción de energía, para una estructura de hormigón armado de 1,500 toneladas de peso, constituida por una cubierta apoyada sobre 18 pilares, de alturas que varían entre 5 y 27 metros. Las dimensiones de los pilares se han establecido aproximadamente de acuerdo con las normas vigentes de hormigón armado, aunque se ha considerado siempre como resistente toda la sección del pilar, y se ha despreciado la sección de las armaduras. Ninguna de estas hipótesis altera las cosas en forma apreciable y, en cambio ellas proporcionan continuidad a las curvas. Las curvas b') y c'), se han dibujado en la hipótesis de que las deformaciones plásticas sean cuatro veces mayores que las elásticas y que la misma relación rija para la capacidad de absorber energía.

La curva a) es una tentativa de representación de las variaciones de los períodos y amplitudes de las diversas ondas sísmicas, tal como puede suponerse que se presentan, si nos atenemos a la experiencia acumulada hasta ahora. Para referir la curva directamente a la estructura se ha llevado en abscisas las alturas, en metros, de los pilares, en vez de los períodos de la onda. Cada altura de pilar corresponde a un período propio de la estructura (curva T) y son, en consecuencia, resonantes las ondas que tienen ese mismo período. En ordenadas se han llevado las amplitudes de la onda, expresadas en centímetros. Por ejemplo, la onda B de 5 centímetros de amplitud y 1,3 segundos de período se encuentra sobre la abscisa 3,6 metros del gráfico, aproximadamente.

La curva a') se ha dibujado en la hipótesis que la resonancia sólo pueda significar la acumulación de tres impulsos consecutivos, en atención a que, como lo hemos dicho, la plasticidad de los materiales hace imposible la acumulación de una cantidad indefinida de impulsos.

Las líneas $3\delta_A$, $3\delta_B$ y $3\delta_C$ corresponden a la deformación que producirían, en una estructura 100% elástica, 3 impulsos resonantes de las ondas A, B y C, respectivamente.

Las líneas $3E_B$ y $3E_C$ corresponden a la energía transferida por el terreno a una estructura rígida cuando se suman tres impulsos consecutivos de las ondas B y C, respectivamente.

El gráfico, en general, no tiene carácter de demostración ya que el movimiento sísmico en que se basa ha sido obtenido de una estadística insuficiente; pero permite apreciar en forma cuantitativa los efectos de acumulación de energía y de deformación, en estructuras de dimensiones conformes con las normas de hormigón armado, o sea, de proporciones reales.

En el gráfico se observa:

1.° Que en las estructuras cuyo período es de tres y medio o más segundos, toda la energía del sismo es absorbida por elasticidad y plasticidad, aunque haya resonancia;

2.° Que en las estructuras en que el período propio es de 0,3 segundos o menos, se producen, en caso de resonancia, deformaciones mayores que las plásticas; pero inferiores a un centímetro, de modo que no estarían expuestas a derrumbarse, aunque sí a agrietarse; y

3.° Que las construcciones de período propio comprendido entre 0,4 segundos (Abscisas 5 metros) y 3,5 segundos (Abscisa 28 metros), en caso de resonancia, reciben mucho más energía sísmica que la que pueden absorber y las deformaciones son del orden de los centímetros, o sea, capaces de producir el derrumbe total de la construcción. Las peores condiciones aparecen entre 0,9 segundos (Abscisa 6 metros) y 5,25 segundos (Abscisa 25 metros), entre cuyos límites el desplome es siempre superior a 5 centímetros.

Nos conduce esto a considerar como especialmente peligrosas las construcciones que pueden, en su conjunto o en sus elementos, resonar con las ondas de período comprendido entre los indicados límites de 0,9 segundos y 5,25 segundos.

Pensamos que si hay motivos especiales que obliguen a construir tales estructuras, es preciso darles resistencia adicional apreciable, o lo que es lo mismo, basar los cálculos de su resistencia en valores de la aceleración y amplitud de la onda sísmica, varias veces mayores que los usuales.

El análisis de la energía transferida por el terreno a las construcciones y del fenómeno de las deformaciones nos ha conducido, una vez más, a las conclusiones a que habíamos llegado estudiando el comportamiento de una cepa de puente. (Figs. 14 y 15).

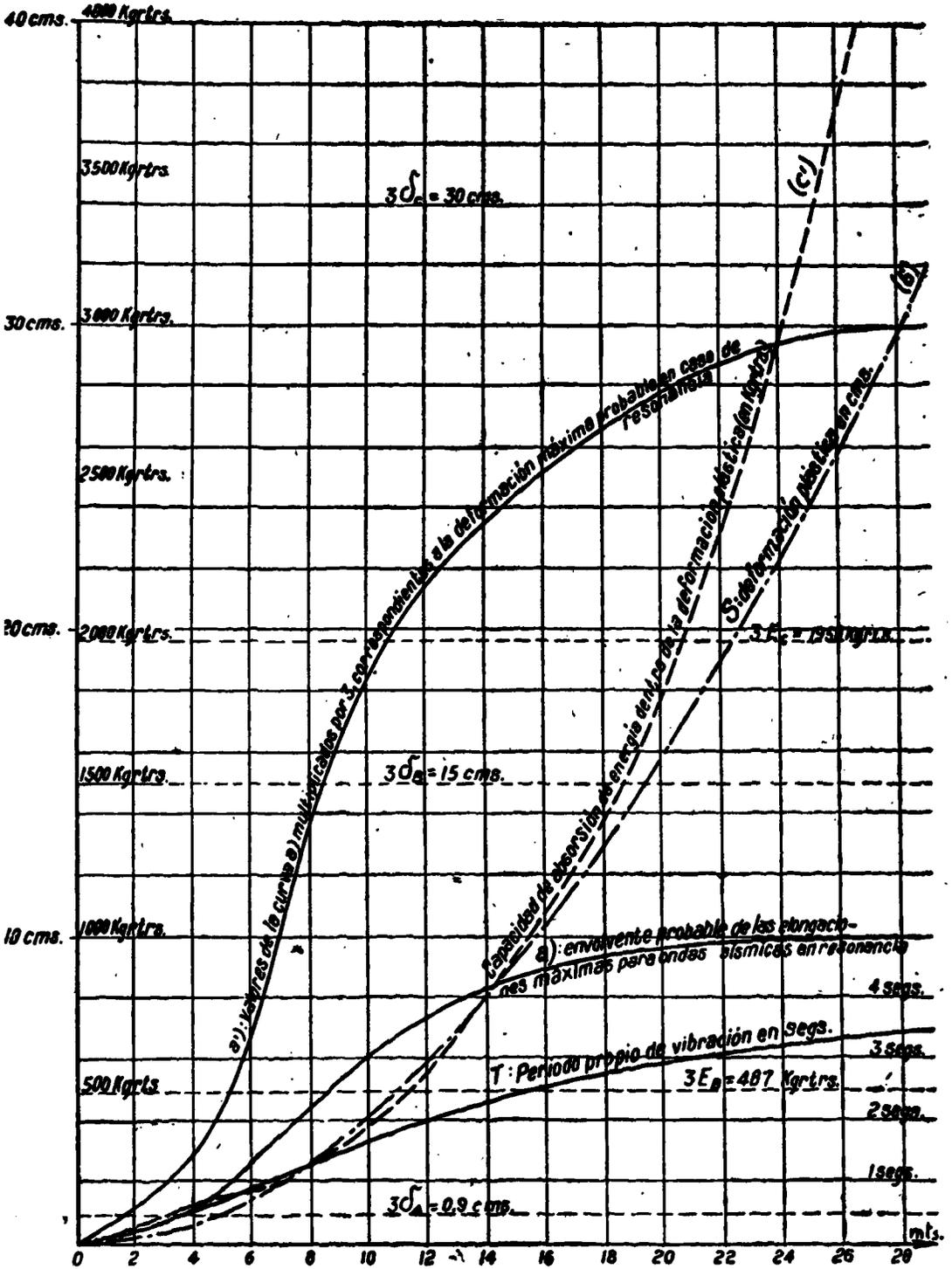


Figura 1.