

Efecto de los temblores en los puentes

ME ha sido conferido el honroso encargo de exponer un estudio sobre el efecto que producen los movimientos sísmicos en las construcciones en general y especialmente en los puentes.

Para poder comprender con mayor claridad estos efectos conviene tener una idea aproximada de la naturaleza de esos movimientos.

Es sabido que la corteza terrestre es un medio elástico capaz de transmitir vibraciones. Cuando ocurre un choque en las capas profundas, ora debido a la explosión de los gases y vapores comprimidos de un volcán, ora debido a la ruptura de una capa geológica comprimida, este choque se transmite en todas direcciones en forma de ondas vibratorias que, de acuerdo con los principios de la mecánica, se componen de ondas longitudinales y ondas transversales. El punto en que se produce el choque recibe el nombre de hipocentro del temblor, y el de la superficie de la tierra que queda sobre la vertical, epicentro. El hipocentro está generalmente situado a profundidades comprendidas entre 1.5 y 20 kms.

Tanto las ondas longitudinales como

las transversales se propagan en línea casi recta, y digo casi recta porque en su trayectoria asumen profundidades algo mayores que las de la cuerda, debido a que las capas más próximas al centro de la Tierra por razón de la mayor presión, poseen más elasticidad que las capas superficiales.

Llegadas las ondas a la superficie de la Tierra generan en ella las llamadas ondas superficiales, gravitacionales o de Lord Rayleigh, de acuerdo también con la mecánica de los cuerpos rígidos, como lo pudo establecer el ilustre matemático que les dió su nombre.

Resulta entonces que a cada punto de la superficie llegan ondas directas longitudinales y transversales y ondas de Lord Rayleigh.

Por medio de la observación directa se ha logrado medir la velocidad de propagación de las ondas y se ha establecido que ella depende grandemente de la clase de rocas que atraviesan. Las ondas directas longitudinales se propagan con velocidades comprendidas entre 3,5 y 15 kms. por segundo, y las transversales con velocidades que guardan la relación de uno a dos con las de las ondas longitudinales. Werthein en Alemania estableció que no era otra la relación que debía verificarse atenién-

dose a los principios de la mecánica. Las ondas de Rayleigh, que también se pueden dividir en vibraciones horizontales y verticales se propagan con velocidades medias de 4,4 y 3,9 kms, por segundo respectivamente. Los sismógrafos reciben pues las ondas longitudinales, las transversales y por último las ondas de Rayleigh. Los dos primeros grupos mencionados constituyen las ondas precursoras el último grupo es el de mayor amplitud y constituye el grupo de las ondas principales. La medida del tiempo que transcurre entre la llegada de unos y otros grupos de ondas permite determinar la distancia entre el sismógrafo y el epicentro del temblor.

Debido a la imperfecta elasticidad del medio hay un amortiguamiento gradual de las diversas clases de ondas, circunstancia que debemos considerar como extraordinariamente favorable pues si tal no ocurriera el temblor dejaría de constituir un fenómeno local y extendería su acción destructora a la superficie completa del globo.

No parece oportuno complicar este estudio con un análisis completo del sistema de ondas sísmicas observadas; nos bastará con manifestar que las ondas de mayor amplitud y de verdaderos efectos destructores son las horizontales de Rayleigh. En el epicentro estas se confunden con las directas. La componente horizontal de las ondas de Rayleigh ha alcanzado durante los grandes sismos amplitudes hasta de 22 cms. La aceleración máxima durante un temblor no ha sido bien determinada; pero se sabe que ella puede sobrepasar 5 m. seg./seg., alcanzándose tal vez a 10 m./seg./seg. Muy a menudo se asimila la onda sísmica a una sinusoida a fin de facilitar el análisis matemático. Queda finalmente por mencionar otro movimiento con que se agita la Tierra durante los grandes terremotos: me refiero a las ondas gra-

víficas; ellas se han presentado varias veces en el Japón: la tierra forma oleaje y las olas tienen hasta un metro y más de altura. Durante mucho tiempo se atribuyó a la nerviosidad de los observadores atemorizados por el terremoto que veían estas olas de tierra; pero más tarde el terreno mismo se ha encargado de dejar un testimonio en aquellas partes en que la consistencia de la capa superficial no le permitió recuperar la forma primitiva.

Ahora bien, si la Tierra se agita con tanta violencia fácil es comprender los destrozos que se deben producir en las construcciones: los hechos y la Historia lo comprueban. En la antigüedad muchas ciudades fueron destruidas por los terremotos. Según refiere Posidonio, Fenicia fué víctima de muchos y muy violentos sismos. Antioquía en tiempo de Trajano y de Justiniano fué tres veces arruinada muriendo en los dos últimos temblores más de cien mil personas. Casi todas las construcciones de la antigüedad han perecido a consecuencia de los terremotos. En los tiempos modernos sus efectos han sido aún más desastrosos: en 1703 un solo terremoto mató en el Japón ciento cincuenta mil personas en 1908 el terremoto de Sicilia causó doscientas mil víctimas. Chile misma ha sido muchas veces agitado por terremotos ruinosos: Valparaíso, Concepción, Chillán, Valdivia, Vallenar, Copiapó, Talca y Constitución han sido destruídos por terremotos, Santiago también fué víctima de un gran temblor la noche del 13 de mayo de 1648 la violencia del movimiento fué tal que grandes bloques se desprendieron del cerro Santa Lucía y rodaron por la ciudad.

Hasta hace pocos años bien pocos esfuerzos se habían hecho para evitar los efectos de los terremotos en las construcciones. Se limitaban ellos al empleo

de mejores materiales o bien a dar mayores dimensiones a las diferentes partes de la construcción. La explicación de esto se encuentra en que la falta de sismógrafos eficientes mantenía a los ingenieros a oscuras respecto a la naturaleza misma del fenómeno. Hoy día se miden los temblores y se tienen así los datos suficientes de cálculo para construir a prueba de terremoto: no nos referimos a aquellos casos en que se producen fallas en el terreno en que está fundada la construcción, o bien, en que se manifiestan las ondas gravílicas. Cualquiera de estos fenómenos produce la destrucción inmediata de la estructura aun la mejor construída.

La construcción asísmica debe ser apta para resistir por espacio de uno o dos minutos las oscilaciones del terreno de fundación: estas oscilaciones producen fatigas en los materiales que dependen: a) de la amplitud, aceleración y período de las ondas; b) del peso de la construcción y de su forma, y c) de la mayor o menor flexibilidad de las partes de la construcción. Conocidos estos tres factores se pueden determinar las fatigas. La amplitud, aceleración y período de las ondas principales son datos que suministran los sismógrafos. El peso y la forma de la construcción deben ser determinados previamente. En cuanto a la flexibilidad de la construcción debemos distinguir dos casos: 1) 1.º caso: la flexibilidad de las partes de la construcción que le sirven de unión con las fundaciones es tal que ella se mantiene ajena a la oscilación del suelo. En este caso la deformación elástica de esas piezas de unión no puede ser inferior a la máxima elongación de la onda, o sea de su amplitud. En este tipo de construcciones quedan generalmente comprendidas las estructuras metálicas. 2) segundo caso: la flexibilidad de las partes de la construcción que le sirven de unión

con las fundaciones es insignificante y la masa total de la estructura debe seguir los oscilaciones de la onda sísmica. En tal caso los esfuerzos de inercia provenientes de la aceleración máxima de la onda actuando sobre la construcción deben ser resistidos por los miembros de unión con las fundaciones. Tal es el caso que ocurre en las albañilerías. Las construcciones del primer tipo las llamaremos *flexibles* y las del segundo *rígidas*. Tanto las construcciones flexibles como las rígidas deben tener un período propio de vibración distinto del período de las ondas principales a fin de evitar el fenómeno de la resonancia que podría resultar de fatales consecuencias para la construcción. En efecto, los esfuerzos que se producen en tal caso crecen durante el desarrollo del temblor con tendencia a hacerse infinitamente grandes. Cuando se trata de una construcción rígida que oscila toda entera con el temblor, las diversas partes de que ella consta deben tener también por separado períodos propios de vibración distintos del de las ondas principales. Se dice que una construcción es de período corto cuando él es menor que el de las ondas principales, y de períodos largos cuando mayor.

Hemos indicado aquí algunos casos sencillos de construcciones que servirán como ejemplos de uno y otro sistema

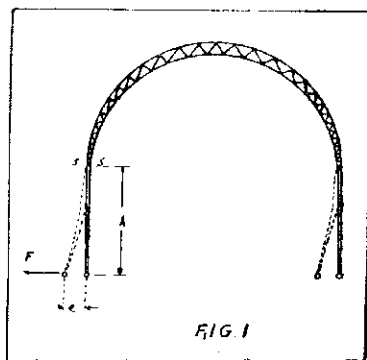


FIG. I

del procedimiento de cálculo que debe emplearse.

En la fig. 1 tenemos un ejemplo de construcción flexible. Un galpón de estación cuya parte flexible puede considerarse encastrada en S S y cuyo extremo libre se desplaza de una cantidad e igual a la amplitud de la onda. Se desarrolla un esfuerzo $F = \frac{3 E I}{l^3} e$ y el momento de flexión resulta en S S; $M_{SS} = Fh$.

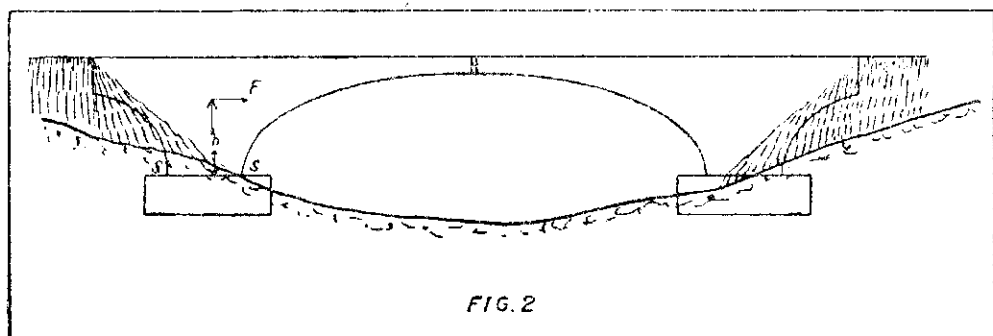


FIG. 2

En la fig. 2 tenemos un ejemplo de construcción rígida. Un puente de albañilería sometido a la aceleración a máxima de un temblor produce un esfuerzo F de reacción de inercia igual a $\frac{P}{g} a$ que actúa en el centro de gravedad del puente. Este esfuerzo produce en la sección S S un momento $M_{SS} = Fh$.

Se puede observar entonces que el cálculo de la sollicitación sísmica está distante de constituir un problema árduo. Estas sollicitaciones deben tenerse tan presentes como el peso propio, sobrecarga, etc., al calcular una construcción en un país eminentemente sísmico como el nuestro.

Con motivo del terremoto del 1.º de Diciembre último que arruinó las ciudades de Talca y Constitución, se presentó una magnífica oportunidad para observar la acción de los temblores en los puentes. Este temblor se produjo en una

zona en que había numerosos puentes de acero y de concreto armado. El acero resistió bien, pero su unión con las albañilerías fué rota en numerosas ocasiones debido a que al proyectarlas no se había hecho cálculo alguno de asismicidad. Si las uniones hubieran sido calculadas para resistir los esfuerzos de inercia desarrollados en las vigas durante el temblor, habrían resistido; pero el esfuerzo transmitido íntegro a la albañilería posible-

mente la habría hecho perecer. Los puentes de concreto armado también sufrieron desperfectos en los apoyos porque tampoco se tomó en cuenta la sollicitación sísmica cuando se proyectaron, sin embargo éstos presentaban la ventaja con respecto a los de acero que si se hubiera tomado en cuenta, habría podido ser recibida por la infraestructura sin peligro. Las perfectas condiciones en que resistieron los puentes en marco rígido son el mejor testimonio de la efectividad de nuestra afirmación.

Una última y valiosa lección sacada de este temblor fué la ruptura de numerosos muros de sostenimiento de tierras que formaban los estribos de los puentes. El empuje de estas tierras creció en forma inusitada y los terraplenes se sentaron considerablemente.

Ha sido satisfactorio constatar que el concreto armado dió pruebas de ser un excelente material contra terremotos y que

*subsana*dos los errores cometidos en los primeros proyectos, errores que consisten principalmente en la multiplicación de las articulaciones y apoyos simples, puede incorporarse en la lista de los buenos materiales sísmicos.

Cuando se comparan los diversos tipos de construcciones y los distintos materiales empleados, a la luz de las sollicitaciones sísmicas, se llega a conclusiones que no puede olvidar un ingeniero proyectista, y que podrían resumirse en la siguiente lista:

- 1) Deben emplearse preferentemente materiales homogéneos.
- 2) Las construcciones flexibles son las más aptas para resistir temblores.
- 3) Las construcciones rígidas, tales como las de concreto armado, deben disponerse en la forma más rígida posible.
- 4) Las albañilerías de ladrillo o de piedra no dan garantía alguna de seguridad.
- 5) Los empujes de tierra deben ser evitados en lo posible o resistidos por muros reforzados.

En numerosas ocasiones se ha afirmado que la construcción sísmica es onerosa. Basta meditar un poco sobre los preceptos sencillos de la sismología para comprender que no es onerosa. Si se pretende hacer construcciones sísmicas mejorando los materiales y aumentando sin medida las dimensiones de las piezas, y dejando a un lado el cálculo de asismicidad, entonces se llega a presupuestos elevados y a resultados prácticos bien dudosos. Es en este problema algo más complejo que el de las cargas verticales donde más necesaria se hace la actuación del ingeniero que elija y distribuya inteligentemente el material. La omisión de los cálculos de asismicidad en construcciones definitivas para Chile constituye en nuestra opinión un delito que resulta mucho más grave aun cuando se trata de edificios cuya caída puede producir víctimas. El estado actual de la sismología permite construir contra terremotos y nada justifica no hacerlo toda vez que el éxito depende de la bondad de los cálculos mucho más que del costo de la construcción.