

Perjuicios del terremoto del 24 de Enero último en las construcciones y como pudieron evitarse

A.—DE LOS TEMBLORES

I. *Causas de los terremotos.*—Los hombres de ciencia de hoy día admiten uniformemente una causa geológica de los temblores, esto es que, su origen, reside en el propio globo que habitamos y, que los terremotos, provienen de acciones tectónicas, o sea, del deslizamiento y plegamiento que constantemente se produce en los planos de falla de la corteza terrestre entre los inmensos e irregulares bloques que la constituyen, los que se hallan inestablemente equilibrados entre sí. Mientras el planeta sufra transformaciones orogénicas, esto es, de elevación de montañas y de formación de grandes depresiones marinas o continentales, habrá temblores. Según esto, un terremoto que se nos presenta de una manera sorpresiva y pavorosa, no es sino un fenómeno normal en la evolución de la Tierra. Hay regiones en que ya no tiembla. En ellas, el proceso de transformación más brusco ha cesado. En otras, por el contrario, los temblores y terremotos son frecuentes. Chile, desgraciadamente, se halla situado en una región de mucha actividad sísmica: en lo que pudiéramos llamar el faldeo existente entre la cordillera de los Andes y las fosas de la costa. Estas son profundas y largas depresiones formadas por hundimiento de cierta porción de suelo entre dos fallas o planos de deslizamiento.

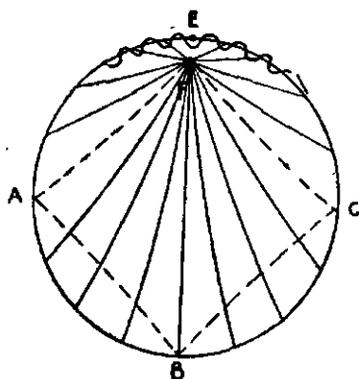
En el Pacífico continúa la faja inestable, por la costa occidental de América, sigue por Alaska, las islas Kuriles, el Japón, las Filipinas, las islas de la Sonda y Nueva Zelandia. La circunstancia de que en esta zona haya una nutrida serie de volcanes, muchos en actividad, por lo cual se la llama el «círculo de fuego del Pacífico», hizo pensar antes a algunos investigadores en un origen eruptivo de los terremotos. En la región sur de Italia y otras igualmente sísmicas, la situación es parecida a la del Pacífico. Sin embargo, si bien es cierto que a veces se producen temblores por erupción de volcanes, los terremotos no pueden atribuirse a ellas, porque la coincidencia es rara, el área que abarcan los grandes sismos, enorme y muy localizada la de los temblores debidos a actividad volcánica. Además, también tiembla en regiones desprovistas de volcanes. Por el contrario, dada la acción que puede ejercer un movimiento tectónico en las galerías de magma que comunican con un volcán, no es extraño que, a raíz de un terremoto, se ponga el volcán en erupción. Análogamente, pueden presentarse fenómenos luminosos y otros atmosféricos, no bien explicados todavía, pero con

seguridad, derivados de las considerables transformaciones de energía que han de producirse durante el sismo.

La antigua teoría del origen celeste de los temblores, rechazada por la observación, ha caído en desuso. Es indudable que al presentarse una conjunción, lunar, por ejemplo, que es la de efectos más potentes sobre la tierra, la acción adicional del satélite, puede precipitar una dislocación o deslizamiento capaz de generar un terremoto, pero la conjunción es un simple accidente acelerador, no la causa.

II. *¿Pueden predecirse los terremotos?*.—Dado su origen y el estado incipiente de la sismología, es imposible cualquier predicción. Lo único en que se ha podido hacer un anticipo, es en anunciar el número de temblores, cada vez más atenuados y menos frecuentes que se presentarán en una localidad en los días subsiguientes a un terremoto. Para esto, es necesario llevar un registro prolijo de los movimientos observados en los dos primeros días posteriores al sismo. Esos temblores, son producidos por las ondas que, directamente, o bien reflejadas o refractadas, vuelven a pasar por el punto de observación, después de haber dado la vuelta a la Tierra.

III. *Naturaleza del movimiento sísmico*.—El foco, centro de conmoción de la corteza terrestre o hipo-centro, parece hallarse siempre a pequeña profundidad, unos 4 a 5 kilómetros en los temblores pequeños y 20 a 30 y aun 50 kilómetros en los terremotos de áreas muy extensas (1). La capa de rocas sólidas, se estima en unos 60 kms., debajo de la cual, viene un manto muy elástico de 1,120 kms. A mayor profundidad, se hallan tres capas densas, que alcanzan un espesor de 1,680 kms. y finalmente, se llega al núcleo de hierro-níquel, de 3,490 kms. de radio; el radio de la Tierra, es pues de 6,370 kms.



Por efecto de la elasticidad de los materiales que constituyen el planeta, la conmoción, se transmite en todas direcciones y las trayectorias del movimiento, han sido determinadas por la observación y el análisis matemático. Así, las ondas elásticas que parten del hipocentro F, por una parte, se dirigen directamente por dentro de la Tierra y se reflejan atenuadas, en puntos como A, B y C. Su trayectoria, no es recta, como sería la cuerda, sino convexa hacia el interior, por la mayor densidad de la Tierra a medida que se avanza al centro. Tales vibraciones, por el hecho de transmitirse dentro de un medio sólido, son a la vez longitudinales o de compresión y dilatación y

transversales o de cizalle alternante, y la velocidad de propagación de las primeras es el doble de la de las segundas; unos 8 a 20 kilómetros por segundo en un caso y 4 a 10 kilómetros en el otro. La velocidad varía según la naturaleza del medio, que en la Tierra está lejos de ser homogéneo: es mayor en los materiales más rígidos. En el núcleo, la temperatura es de varios miles de grados y todos los cuerpos, ateniéndonos

(1) Hoy día creen algunos que los terremotos pueden tener su hipo-centro a profundidades mucho mayores.

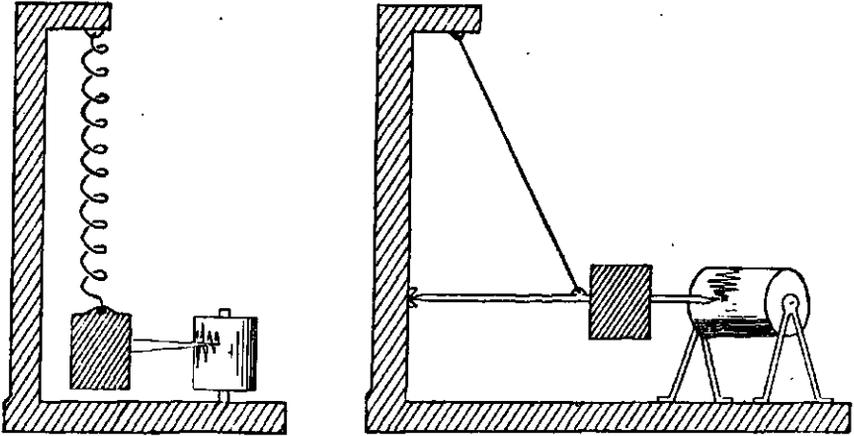
a nuestros conocimientos ordinarios, debieran hallarse licuados o gasificados. Pero, la presión fantástica ahí reinante, que los hace alcanzar densidades muy superiores a las de las rocas superficiales, induce a pensar en que los materiales del núcleo han de presentarse en un estado que no conocemos, pero que participa de ciertas propiedades de los sólidos. Los aparatos modernos de medida de las vibraciones, confirman esta hipótesis, pues la velocidad de propagación de las ondas no difiere mucho cuando ellas atraviesan el Globo o simplemente cruzan la corteza. El punto en que la vertical del foco llega a la superficie, el E de la figura, es el epicentro y corresponde al centro visible del temblor. Hay también otra clase de vibraciones, las superficiales, que se propagan por la superficie y parten del epicentro que hace de foco secundario de conmoción. La velocidad de propagación de estas ondas, es más o menos constante e igual a unos 3,5 kms. por segundo. Son ellas las más importantes en sus efectos y pertenecen como las de la segunda categoría de las mencionadas, a las ondas de cizalle alternante o transversales, pues las partículas se mueven perpendicularmente al sentido de propagación de las ondas. En las longitudinales, ambos movimientos se efectúan en la misma dirección. Sin embargo, en los temblores, las vibraciones no siempre son bien perpendiculares o bien paralelas al sentido de propagación, por lo cual, los nombres de transversales y longitudinales, son menos apropiados que los de oscilación de cizalle alternante y de compresión y dilatación o de ondas de condensación y rarefacción. La trayectoria de un punto cualquiera de la superficie terrestre, durante un terremoto, es de lo más complicada. El profesor japonés Sekiya, valiéndose de los sismogramas corrientes, obtenidos en tres planos perpendiculares, materializó en un alambre de cobre, a escala 50 veces mayor, la trayectoria en el espacio del movimiento del suelo, y el resultado fué sorprendente: el hilo adquirió el aspecto de esos ovillos de alambre de los basurales en que no hay irregularidad de dirección que no figure. Antiguamente, se creía que los movimientos de los temblores eran más o menos armónicos, porque aproximadamente así, aparecen los sismogramas o gráficos parciales sobre los tres planos de proyección.

La amplitud de la mayor parte de las vibraciones, es menor de 1 mm. y el período, una fracción de segundo. Es la aceleración o incremento de velocidad del movimiento, la que mide la intensidad o fuerza de los temblores.

Las ondas longitudinales poseen las amplitudes más pequeñas y los períodos menores. En las transversales, la oscilación es mayor y el período más dilatado. Ambas, producen pequeños efectos, salvo en el epicentro. Finalmente, las ondas superficiales, poseen los mayores períodos y amplitudes y son las perjudiciales a las construcciones. Si la longitud de las ondas es grande y el período pequeño, las aceleraciones serán considerables y el terremoto desastroso.

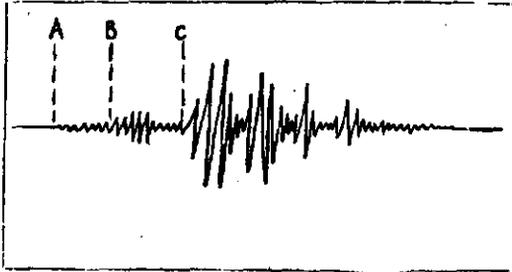
IV. *¿Cómo se registran los temblores?*.—La inscripción gráfica de las tres componentes del movimiento sísmico de un punto del suelo, se obtiene mediante los sismógrafos, aparatos constituidos, esencialmente, de una gran masa suspendida que, por su inercia, permanece prácticamente inmóvil en el espacio, provista de una aguja inscriptora y de un tambor giratorio, apoyado en el suelo. Los elementos fijos, son péndulos verticales u horizontales, según sea de uno u otro tipo el sismógrafo de que se trate. Las figuras ilustran lo dicho. En el sismógrafo vertical, la masa pende de un resorte sensible; en el horizontal, posee un eje apoyado en un quicio y sujeto en el otro extremo por un hilo fijo arriba. El quicio y el punto de sujeción del hilo no se

hallan en la misma vertical, pero ambos y el eje mencionado forman un plano vertical, que gracias a la masa citada, tiende a quedar fijo en la posición meridiana. Es el dispositivo usado en las mamparas de las iglesias. En los sismógrafos, el tambor



ahumado, es el que participa del movimiento del suelo, y éste se amplifica por juegos de palancas.

Sea el dibujado un sismograma típico:



De acuerdo con lo ya dicho, las primeras ondas que comienzan en A, son las longitudinales; las que principian en B, las transversales, y las que aparecen en C, las superficiales. Como se sabe aproximadamente la velocidad de propagación de estas tres ondas, se puede calcular la distancia del observatorio al epicentro, midiendo las diferencias de tiempo entre A, B y C. Estos resultados adolecen de errores de más o menos 100 kms. Mayor exactitud se consigue operando con las observaciones de más de una estación. Comúnmente los diagramas no son tan claros, por la superposición de ondas reflejadas o refractadas.

Por cálculos sencillos se determina también la profundidad del hipocentro, pero siempre con aproximación burda.

V. *Intensidad de los temblores y escalas sismométricas.* — Al tratar de intensidad, nos referimos a la aceleración máxima de las ondas superficiales, pues la fuerza que obra

sobre un cuerpo en reposo al que se imprime un movimiento, es el producto de la masa del cuerpo por la aceleración. Hasta no hace mucho, las escalas sismométricas eran cualitativas, o sea, que daban una idea relativa de la potencia de los temblores, basada en el efecto que producían en los seres vivientes, los objetos y las construcciones. Los grados de tales escalas, resultaban así algo arbitrarios por insuficiente explicación de lo que caracterizaba a cada uno.

Actualmente, las escalas son cuantitativas, fijan la aceleración para las distintas categorías y como dato complementario dan también una ligera información cualitativa. Señalemos suscintamente los principales grados de la escala del Dr. Sieberg basada en las de Mercalli y Cancani, que es una de las mejores.

Grado V.—Algo fuerte (26-50 mm/seg./seg.).

Los moradores de los edificios, notan perfectamente el terremoto: la inmensa mayoría de los que están durmiendo, despierta, y numerosas personas que se hallan al aire libre atestiguan la ocurrencia del fenómeno.

Grado VI.—Fuerte (51-100 mm/seg./seg.).

Todo el mundo nota con pavor el terremoto y algunos creen ser derribados. En los edificios sólidos no armados, se forman pequeñas grietas en los muros situados perpendicularmente al sentido de avance de las ondas sísmicas. En las casas inferiores, hay mayores daños, pero nunca llegan a tener graves consecuencias.

Grado VII.—Muy fuerte (101-250 mm/seg./seg.).

Los malos edificios y los caducos, sufren serios trastornos, entre los cuales hay que mencionar los de tapial, de adobes, y de piedras o ladrillos con barro. En cambio, los de madera y albañilería bien trabados, quedan indemnes.

Grado VIII.—Ruinoso (251-500 mm/seg./seg.).

Los troncos de los árboles, principalmente de las palmeras, oscilan fuertemente y aun llegan a troncharse. Las estatuas y esculturas de las iglesias y sitios públicos, giran o caen. Las casas de mejor fabricación, sufren serios desperfectos. En los edificios de armazón de madera y relleno, sale casi todo éste.

Grado IX.—Destructor (501-1000 mm/seg./seg.).

Muchos edificios de albañilería, de los mejor ejecutados, quedan inhabitables y se derrumban en parte. Las casas de madera, se desprenden de su basamento de mampostería.

Grado X.—Muy destructor (1001-2,500 mm/seg./seg.).

La mayor parte de las casas de la mejor albañilería y las de armazón de madera, son destruidas desde sus cimientos. Los tubos de las canalizaciones subterráneas de agua y gas, se rompen. En suelos sueltos se abren grietas de varios decímetros de ancho. En los pozos se modifican los niveles del agua.

Grado XI.—Catastrófico (2,501--5,000 mm/seg./seg.).

Nada queda en pie de toda la edificación de albañilería, por bien hecha que sea. De los edificios totalmente de madera y entramados de gran flexibilidad, sólo uno que otro queda en pie. En el suelo se producen importantes y variadas modificaciones morfológicas: grandes grietas, salidas de agua con arena y fango, deslizamientos, hundimientos, etc.

Grado XII.—Catastrófico en extremo (>5,000 mm/seg./seg.).

No queda en pie ni una sola de las obras ejecutadas por el hombre. Los efectos

y trastornos del suelo llegan al grado máximo; aun se rompen los peñascos, hay traslación de lagos y desviación de ríos, etc.

Los terremotos marinos mayores que el grado VIII de esta escala, producen tan serias sacudidas en las embarcaciones, que a veces éstas se hunden, por las vías de agua originadas en las juntas desquiciadas.

Con el empleo de acelerógrafos, aparatos recientes que miden la aceleración instantánea de las vibraciones, se han constatado valores tan altos como los de la gravedad, 9,8 m/seg./seg. y aún superiores, en terremotos de mediano poder destructor. Antes se creía que nunca la aceleración excedería de 0,5 g, porque no hay construcción corriente capaz de soportar una acción horizontal y permanente, superior a tal magnitud. Esta paradoja, se debe al efecto muy diferente producido en los materiales, por una fuerza casi instantánea que cambia de signo y otra igual permanente y de un solo sentido.

Para darse cuenta de la influencia que tiene el factor tiempo en el efecto de una acción dinámica, basta pensar en que un peso de 100 kgs. que cae de 1 m. de altura, clava un pilote, y uno de 1 kg. que cayera de 100 m. no lo desplazaría. La energía en ambos casos sería de 100 kilográmetros, pero en el segundo, la velocidad de 44 m/seg. con que llegaría la masa al pilote, produciría el efecto de un proyectil: desgarraría la cabeza, originaría calor, vibraciones, etc., y su efecto útil sería nulo.

En los movimientos armónicos simples, a los cuales se asimilan los sismogramas, la velocidad de una partícula es máxima, al cruzar la posición inicial de reposo, punto en el cual la aceleración es mínima. A la inversa, en los extremos, al cambiar de signo el movimiento, la velocidad es cero y la aceleración máxima. A ésta se refieren siempre las intensidades de los temblores.

En cuanto a las amplitudes de las componentes del movimiento sísmico, las verticales, son casi siempre una fracción de las horizontales, aunque a veces las igualan y aún superan.

VI. *Frecuencia de los temblores.*—En el Globo se registran unos treinta mil temblores al año, y terremotos destructores, en promedio, uno cada tres años. La repetición de estos fenómenos en un lugar, no obedece a ley periódica alguna. Sin embargo, después de un gran sismo, viene generalmente una época de calma.

En término medio, en las distintas regiones de Chile, ocurre un terremoto en los plazos que se indican, deducidos de la observación en cuatro siglos de historia del país:

En Santiago y Valparaíso, cada 43 años.

En Iquique, cada 98 años.

En Copiapó, cada 48 años.

En San Fernando y Curicó, cada 78 años.

En Talca y Linares, cada 65 años.

En Chillán y Concepción, cada 43 años.

En Los Angeles, cada 78 años.

En Temuco, cada 131 años.

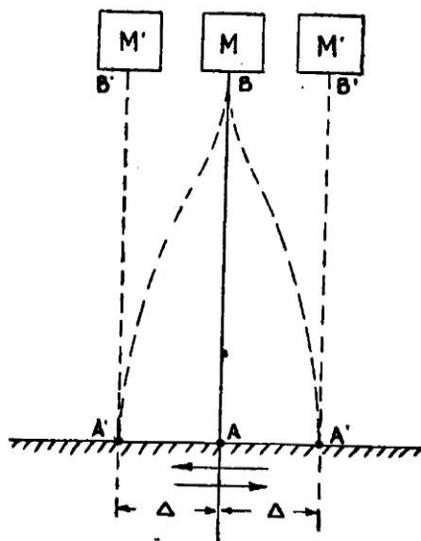
En Valdivia, Osorno, Puerto Montt y Castro, cada 93 años.

En Magallanes, no hay recuerdos de alguno.

B.—EFECTOS DE LOS TERREMOTOS EN LAS CONSTRUCCIONES

.. *Generalidades.*—Las acciones producidas por los temblores en el terreno y las construcciones, son esencialmente dinámicas y, por consiguiente, de efectos muy distintos de los producidos por las fuerzas estáticas o gradualmente variables que, comúnmente, se hacen intervenir en los cálculos de resistencia de materiales. Los cuerpos elásticos, pueden ponerse a vibrar y entonces se presentarán tasas y deformaciones que solamente los cálculos de movimiento oscilatorio explican. En la práctica, todos los materiales son más o menos elásticos, de modo que únicamente en los casos de construcciones de gran rigidez, se puede prescindir sin temor, del efecto de las vibraciones, en el cálculo de sus condiciones de resistencia.

Un elemento cualquiera, tal como ocurre en una varilla flexible clavada en el suelo, ejecuta vibraciones de período propio, cuando mediante una fuerza instantánea, se le saca de su posición de reposo y se la deja en libertad de moverse, oscilaciones que siempre son de amplitudes amortiguadas por histeresis, calentamiento, resistencia del aire, etc., y dependen de la forma del elemento y de su elasticidad. Los movimientos sísmicos, presentan amplitudes y períodos que varían aun dentro de un mismo temblor, pero las oscilaciones no son amortiguadas durante tiempos más o menos largos.



Cuando el período de vibración del suelo coincide con el propio de una construcción, se producen fenómenos de resonancia y en tal caso, las deformaciones crecen indefinidamente, y llegan a destruir la obra, si el temblor tiene la suficiente duración. En los demás casos, el suelo transmite simplemente su manera de oscilar a la construc-

ción y se tiene una vibración forzada, ya que el amortiguamiento de las oscilaciones de período propio, hace que éstas pronto dejen de intervenir.

II. *Elementos elásticos y rígidos.*—La común menor importancia de las componentes verticales de los temblores y la mucho mejor disposición de las obras para soportar cargas de esa naturaleza, hacen necesarios casi exclusivamente, la verificación de las construcciones, a las componentes horizontales de los sismos. Supongamos una gran masa M sostenida por un pilar ideal empotrado en el suelo. Si el pilar fuera absolutamente flexible, al moverse el suelo con la amplitud Δ la masa M , por efecto de su inercia, permanecería inmóvil y su soporte se deformaría como indican las líneas de puntos BA' .

Por la inversa, si el pilar fuera absolutamente rígido, las posiciones extremas de la masa M serían las M' y el pilar aparecería en $A'B'$.

Para los moradores de un edificio, la realización del primer caso, sería indudablemente preferida, pero, como dijimos, los materiales constructivos ocupan una situación intermedia, son más o menos elásticos o rígidos y, la flexibilidad es generalmente cara, si ha de actuar dentro de las debidas condiciones de seguridad. Por eso, poco se recurre a ella. El segundo caso, equivale a que la masa M descansara directamente sobre el suelo.

Ahora, en lo referente al cálculo, el pilar flexible, se verificaría a la deformación máxima Δ , despreciando el momento proveniente del desplome, que es pequeño y el rígido, al momento y esfuerzo de corte originados por la reacción de inercia de M , que es igual a la masa de ésta por la aceleración del movimiento que actúa sobre ella.

En el caso de una obra relativamente flexible, antes que nada, habrá que verificar que su período propio de oscilación, no coincida con el más peligroso de los terremotos, para evitar la resonancia (1).

III. *Períodos y amplitudes de los terremotos.*—Antes se creía que las ondas principales de los grandes sismos tenían períodos de 1 a 1,5 segundos. Hoy en día se considera restringido ese margen, el que debe ampliarse tal vez a 0,3-2 segundos. Las ondas más perjudiciales, son, en la mayoría de las veces, las de mayor amplitud, porque no diferenciándose mucho de las precursoras y siguientes en su período o frecuencia, producen mayores aceleraciones y también su duración es casi siempre de importancia. En realidad, para una obra en particular, o parte de ella, el período más peligroso de un sismo, es el que coincide con el propio de los elementos considerados. Esto explica el que, en ciertos casos, los mayores destrozos se produzcan con ondas que no son las principales, pero que han sido las más durables.

En cuanto a amplitud, el parámetro Δ de la figura precedente, se ha aceptado que la de 5 cms. o alrededor de esto, es un valor holgado en los terremotos. En efecto, el de septiembre de 1923 del Japón, que se considera el más grande de la historia, tuvo 8,86 cms. de desplazamiento (el doble de la amplitud), con período de 1,35 segundos. No obstante, ha habido sismos de desplazamientos de 22,3 cms. y mayores.

En el movimiento armónico simple, las magnitudes mencionadas se hallan ligadas por la conocida fórmula,

(1) La determinación analítica del período de vibración de una estructura, puede hacerse sin gran complicación, solamente en casos sencillos. En los demás, se procederá por comparación con obras existentes, a las cuales se les ha determinado su período experimentalmente.

$$\gamma = \frac{4 \pi^2 \cdot \Delta}{T^2}, \text{ en que:}$$

γ = aceleración máxima de la onda.

Δ = la amplitud, y

T = período o tiempo de una oscilación completa.

En el citado sismo del Japón, la aplicación de la fórmula indicada, da $\gamma = 96$ cms., o sea, aproximadamente 0,1 g.

Las estructuras que han probado resistir mejor a los terremotos, han sido las que se acercan más a las rígidas, o sea, aquellas que poseen mayor rigidez de conjunto y tienen períodos de vibración menores que los períodos de los sismos. Las construcciones llamadas flexibles, tienen frecuencias de oscilación más dilatadas que las de los temblores y, salvo en obras de madera o totalmente metálicas, son costosas y de difícil realización.

IV. *Influencia del medio en la amplitud y velocidad de propagación de las ondas sísmicas.*—Las ondas sísmicas se propagan con distinta velocidad en los diferentes medios, la que tiene por expresión $v = \sqrt{\frac{E}{d}}$, en que: E = módulo de elasticidad del medio correspondiente a la clase de vibración de que se trata, y d = densidad del medio.

Vimos que las ondas superficiales, que son transversales o de cizalle alternante, se propagaban con una velocidad media de 3,5 kms/seg. Los límites de tal velocidad son: 0,5 kms/seg. en arena, o bien en aluvión seco no consolidado y, 5,5 kms./seg. en rocas densas. Esto, por lo demás, es consecuencia de la fórmula precedente, puesto que en los materiales pétreos del suelo, a medida que se hacen más duros, crece más ligero E que d .

Los altos valores de esa velocidad, permiten admitir la simultaneidad de las oscilaciones de un temblor en los elementos de una estructura, o sea, que vibren en concordancia de fase o realicen una vibración normal.

La amplitud de las ondas, varía también con la clase del medio que les sirve de vehículo: es menor en los materiales rígidos y suelos duros, lo que es de grande importancia en las construcciones, ya que permaneciendo constante el período de las vibraciones de una determinada onda, al crecer su amplitud, aumenta también la aceleración y hay así dos causas de mayor efecto perjudicial en las obras situadas en terrenos blandos (1).

(1) Esto se demuestra analíticamente en el Curso de Física del profesor don Gustavo Lira, mediante la expresión $J = \frac{\Delta^2 \cdot \pi^2}{T^2} v \cdot d$ en que:

J = intensidad o cantidad de energía que pasa por 1 cm² en 1 seg.

Δ = amplitud.

d = densidad del medio en que se propaga la onda.

T = período, y

v = velocidad de propagación de la onda.

Como J ha de ser constante y siéndolo también T , se tiene: $\Delta = \frac{\text{Cte.}}{\sqrt{v \cdot d}}$ pero

$v = \sqrt{\frac{E}{d}}$, luego $\Delta = \frac{\text{Cte.}}{\sqrt[4]{E \cdot d}}$. Ahora, como dijimos que en los suelos duros E y d son mayores que en los blandos, Δ tiene que ser menor.

V. *Efecto amortiguador y efecto percusor de los terrenos.*—Los terrenos incoherentes, formados de partículas independientes, como los de aluvión por ejemplo, cuando se hallan comprimidos, producen amortiguamiento de las oscilaciones sísmicas, pues, a las causas de tal efecto ya dadas a conocer, se agregan los fuertes rozamientos y aún pequeños choques entre los fragmentos. Tal sería el caso de las capas de gran espesor de masas clásticas e igual efecto produciría la interposición de ripio o piedra chancada entre el terreno natural más o menos firme y la base de una estructura pesada. Según investigaciones norteamericanas, una capa de grava o piedra partida de 1 m. de espesor como asiento, ya produce un amortiguamiento apreciable. En el caso de compresión de las partículas por espesor considerable de la capa de ellas, el efecto amortiguador no puede realizarse sino en las ondas profundas que en general no interesan. Las ondas superficiales, o sea las principales, se desarrollarán en todo caso, sobre el material disgregado de encima que siempre es peligroso.

Ahora, una delgada capa de material ripioso suelto, que descansa en un yacimiento rocoso, es de efectos sumamente perjudiciales, porque las vibraciones del subsuelo provocan choques violentos y grandes desplazamientos en los fragmentos de la masa incoherente. Aquí conviene recordar que en las percusiones, la velocidad adquirida por el cuerpo que recibe la acción, depende, en mucha parte, de la masa del que la provoca. Esto explica el hecho de que elementos sueltos, experimenten a veces violentos lanzamientos en los terremotos y, que las personas, no puedan sostenerse en pie, aun cuando la amplitud de las ondas sea pequeñísima y la velocidad moderada. En estos casos, la masa chocante puede ser enorme, una gran porción terrestre y, al lado de ella, la masa del objeto que recibe la percusión resulta reducidísima. Lo mismo ocurre en una estructura, si en un sismo pierde su unidad: ya no vibra con ningún período, sino que sus distintos elementos inconexos, están sometidos a choques que los dislocan cada vez más, hasta convertirlos en un montón de escombros. Pero los diferentes materiales coherentes que constituyen la corteza terrestre, tienen períodos propios de vibración, como los elementos de cualquier edificio o estructura. Los numerosísimos casos que pueden presentarse por combinación de dos movimientos armónicos, amortiguados o no, cualquiera de ellos, o los dos simultáneamente, o bien, por combinación de un movimiento vibratorio amortiguado o no, con percusiones periódicas (consultar el Curso de Física del Profesor don Gustavo Lira), hacen ver lo difícil que es señalar las causas precisas de los deterioros producidos por los terremotos. Debemos contentarnos, pues, con dar explicaciones de carácter general y destacar los factores que más pueden haber influido en los perjuicios observados.

VI. *Ondas gravíficas.*—En los terrenos sueltos de la zona epicentral, aparecen en ciertas ocasiones, olas u ondas terrestres llamadas gravíficas, de reducida velocidad de propagación, unos 2 ó 3 m/seg. y de gran amplitud y período. En el Apostadero Naval de Talcahuano, quedaron, en el terremoto del 24 de enero último, claras demostraciones de ondas gravíficas de 0,30 m. de altura o desplazamiento vertical y 11 m. de longitud. Sus causas no se conocen. Algunos las atribuyen al paso de las ondas de profundidad, esto es, las longitudinales y las de cizalle alternante, de un terreno muy elástico a otro plástico. Es fácil comprender que las olas gravíficas, produzcan efectos peligrósimos en las construcciones.

VII. *Atenuación de las ondas superficiales con la hondura.*—Es un hecho notorio y sabido que, las ondas principales, que son las superficiales, disminuyen de amplitud

rápida-mente con la profundidad. Bastan muy pocos metros de hondura para que un temblor se note atenuado. Este fenómeno, es el mismo observado en las olas del mar, que también son de cizalle alternante y la misma teoría hidrodinámica puede explicar la atenuación de las olas terrestres.

VIII. *Coefficientes sísmicos y del subsuelo.*—Vimos que en las estructuras flexibles, el cálculo predominante de los efectos de un temblor, es el correspondiente al desplazamiento máximo del suelo respecto del centro de gravedad del edificio. En los terremotos de Chile, la amplitud máxima, tal vez pueda aceptarse de unos 5 cms. Llamaremos flexibles, a las construcciones de período propio de vibración, superior al período corriente de las ondas principales de los terremotos. El profesor de Puentes, don Julio Ibáñez, llegó a estas conclusiones, hace nueve años, en un estudio sobre asismicidad de las construcciones que hizo poco después de conocer el interesante trabajo del profesor don Gustavo Lira, sobre Estabilidad Sísmica de las Construcciones.

No se construirán obras de período propio igual al de las ondas principales de los grandes sismos. Ahora, en cuanto a las estructuras rígidas, el cálculo se haría, como también dijimos, determinando los momentos y esfuerzos de corte producidos por la reacción de inercia de la construcción, fuerza horizontal aplicada en su centro de gravedad e igual a la aceleración máxima del temblor, por la masa del edificio o parte de él que se considera. Pero vimos que esto conduce a una exageración y, en la práctica, basta, en general, suponer una aceleración constante igual a 0.1 de la gravedad.

Tratándose de elementos rígidos especiales, como torres, chimeneas, estanques elevados, muros cortafuego aislados, antetechos, marquesinas, etc., ese índice reductor de *g*, que se llama «coeficiente sísmico», puede aceptarse igual a 0.2 y aun superior. Llamaremos rígidas, a las obras de período propio de vibración inferior al corriente de las ondas principales de los terremotos.

Los efectos admitidos sobre las construcciones, mediante los coeficientes sísmicos mencionados, corresponden a fundación en roca sana y cristalina y se llaman «efectos verdaderos». Los observatorios sismológicos, se instalan siempre en suelo firme, para hacer comparables sus resultados. Los efectos en terrenos de inferior calidad, son mayores y se obtienen multiplicando los verdaderos, por índices correctivos superiores a uno, llamados «coeficientes de subsuelo».

IX. *Los incendios en los terremotos.*—Es frecuente que en los terremotos se produzcan incendios, por corto-circuitos, volcamiento de lámparas, desparramo de tizones encendidos, caída de objetos inflamables a los hogares, etc., y su efecto puede ser considerable, si además se rompen las redes distribuidoras de agua.

En el terremoto de Tokio de 1923, murieron cerca de 100.000 personas, poco más de esta cantidad resultó herida y hubo 43,400 desaparecidos. Pues bien, el 90% de las pérdidas de vidas y de la propiedad, se debió a los incendios. En el terremoto de San Francisco de 1906, las cosas ocurrieron en forma análoga. En los sismos chilenos, también ha habido incendios, pero nunca de importancia siquiera parecida a los citados. Además, las instalaciones de agua potable nuestras, se han comportado en general bien.

X. *Factores constructivos de resistencia a los temblores.*—Señalar los errores que se cometen en la construcción corriente, desde el punto de vista sísmico, sería cuestión interminable. Como consecuencia de lo que hemos expuesto en este capítulo, estableceremos, más bien, algunas reglas fundamentales, para la mayor estabilidad de las construcciones a los terremotos.

a) En lo posible, debe edificarse en terreno firme. Si esto no se consigue, conviene profundizar las fundaciones, ya sea directamente o mediante pilotes, si el suelo es arcilloso o fangoso.

b) Bien que se trate de construcciones rígidas o flexibles; deben poseer unidad, esto es, que sus distintos elementos no han de disgregarse ni separarse durante el temblor. Las uniones bien ejecutadas, constituyen, pues, factores decisivos de resistencia.

c) Las partes altas, como por ejemplo, los techos de edificios, deben ser rígidas y livianas y ayudar el arriostriamiento del conjunto.

d) El período de vibración del todo, ha de ser distinto del de las ondas principales de los sismos.

e) La obra debe ser homogénea, o sea, constituida en lo posible de los mismos materiales, en sus diferentes partes.

f) Tanto en planta como en elevación, conviene que el conjunto sea compacto y regular: cuadrado o rectangular.

g) Los elementos rígidos, que son la gran mayoría de los que constituyen la edificación corriente, se verificarán a los momentos y esfuerzos de corte producidos por una fuerza horizontal igual a una fracción de la gravedad, y las estructuras flexibles, se calcularán a una deformación igual a la amplitud ordinaria de las ondas principales de los terremotos.

h) Las fundaciones, dentro de lo posible, deben ser continuas o formar un empa-rrillado, no presentar cambios bruscos de profundidad y disponer superiormente de una cadena armada.

C.—EL SISMO DEL 24 DE ENERO DE 1939 Y SUS EFECTOS

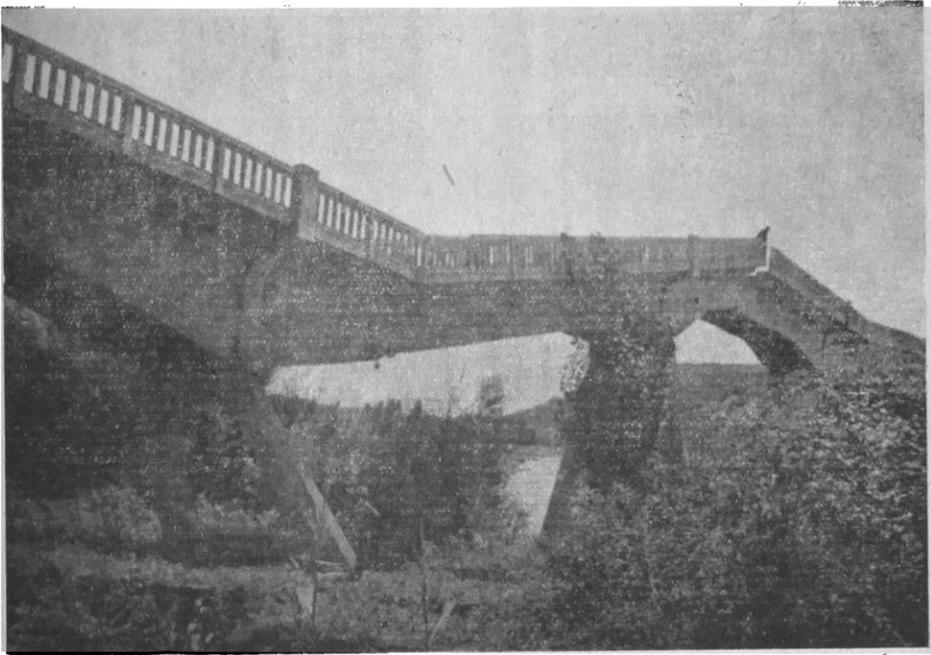
I. *Generalidades*.—La absoluta insuficiencia de las instalaciones de nuestro servicio sismológico, hace imposible la obtención de diagramas de un terremoto, registrados en una estación próxima al epicentro, pues, con la violencia del movimiento, saltan las agujas. Carecemos de sismógrafos para fuertes sismos. Los aparatos existentes, registran únicamente los innumerables temblores ordinarios.

Por estudios de sus efectos, parece que el terremoto del 24 de enero último, fué de grado X en la zona epicentral de Chillán, en donde ha alcanzado aceleraciones tal vez equivalentes a una continua de 1 a 2 m/seg²; amplitudes máximas de 5 cms. y períodos de 1 a 2 seg. En Cauquenes y Quirihue, ha tenido intensidad ligeramente menor, y tal vez grado IX, en Penco y Parral. En los demás pueblos, los efectos han sido más atenuados.

II. *La construcción afectada*.—La edificación de la zona afectada por el terremoto último, salvo contadas excepciones, era antigua, muy deficiente en cuanto a resistencia contra temblores y en su gran mayoría, lesionada por sismos anteriores, sea de la misma región o de los que tuvieron su epicentro en la vecindad. El penúltimo terremoto de la zona de Chillán y Concepción, fué el del 23 de julio de 1898, cuarenta y un años ha.

El tipo más frecuente de casa-habitación, era el de adobe, material que en una región que ya no es seca, como la central y norte del país, se altera con el tiempo, principalmente en la base de los muros. Si la construcción carece de cimientos o

éstos son superficiales y se hallan constituídos por ladrillos o piedras redondas, cualesquiera de los dos, unidos con barro, casos frecuentes en estos edificios, y el techo es pesado y sin rigidez de conjunto, la estabilidad contra los terremotos es ilusoria. Factores desfavorables han sido también diversos arreglos inconvenientes ejecutados por los propietarios en las casas de adobe, con el fin de modernizarlas. Tales son por ejemplo, la eliminación de los voladizos de techumbre, para colocar antetechos altos y pesados que oculten el tejado y den una aparente mayor altura al edificio; la construcción de zócalos exteriores de ladrillo o de revestimiento de tal material en toda la altura, perdidos en el espesor del muro, a fin de proteger a éstos de la lluvia y darles el aspecto de una albañilería.



N.º 1.—Puente sobre el río Itata en Ñipas

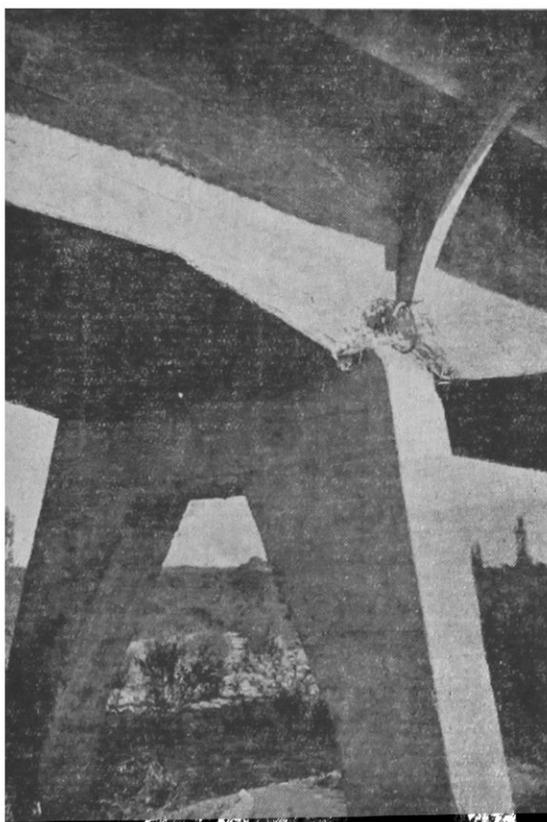
Los antetechos pesados, siempre sin anclajes en las fachadas, y los revestimientos embutidos, invariablemente han caído empujados muchas veces, en el primer caso, por los elementos desarticulados de la techumbre.

Los tabiques con armazón de madera, sin unión adecuada a los muros y a la cubierta, constituyen agentes desfavorables a la estabilidad sísmica de las construcciones de adobe.

Las casas de esqueleto de madera y relleno de adobes en pandereta, soportaron mejor el terremoto, pero sufrieron grandemente y, con frecuencia, su destrucción fué total. El relleno de adobes, si no se vacía, queda muy deteriorado y la estructura, cuando no está bien trabada, se desarma por completo, especialmente en edificios de más de un piso.

Las casas de ladrillo, sin refuerzo de cadenas y pilares de hormigón armado, se comportaron algo mejor que las de adobes, pero experimentaron considerables perjuicios y muchas veces su destrucción fué completa. Las reforzadas de acuerdo con las disposiciones de la Ordenanza de Construcciones, resistieron relativamente bien. Estas obras eran por lo general de un piso, pocas de dos y muy raras las de más pisos.

Las obras totalmente de madera o de hormigón armado, se comportaron satisfactoriamente, como era de esperarlo, salvo en los casos de presentar defectos notorios o poseer un período de vibración análogo al de las ondas principales del terremoto. Según los profesores don Pedro Godoy y don Julio Ibáñez, que visitaron Tomé, la



N.º 2.—Puente sobre el río Ñuble en Cocharcas

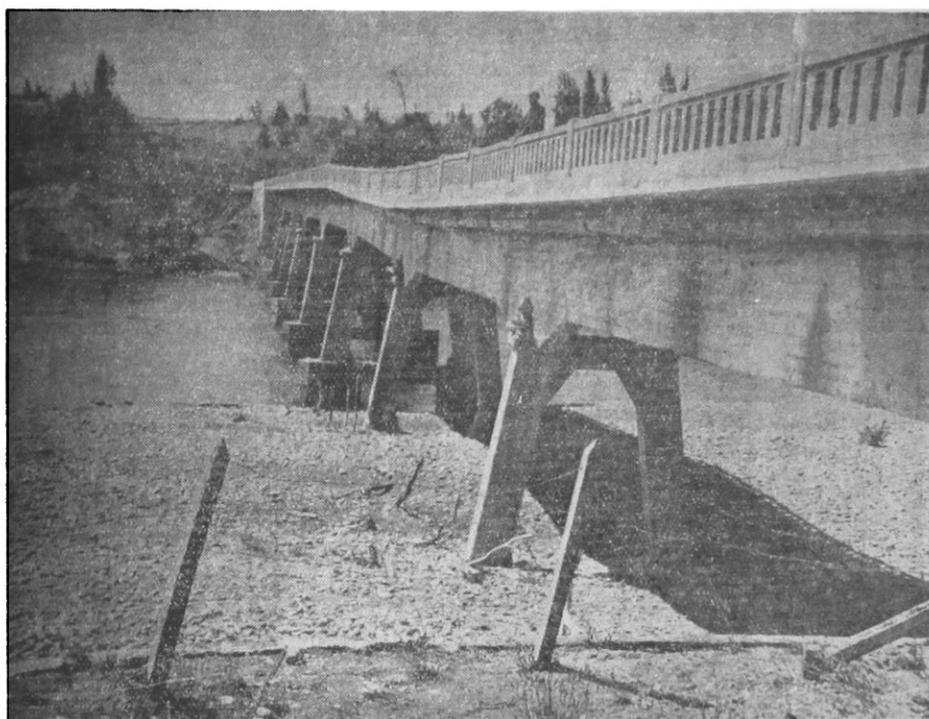
caída del pabellón de hilandería de la fábrica de paños Bellavista, obedece a la segunda causa; el edificio de la casa Williamson Balfour de Concepción, el estanque de los Ferrocarriles de Chillán, y la casa de máquinas de esta ciudad, todos de concreto armado, adolecían de errores evidentes.

Muy pocos edificios de esqueleto metálico había en la zona y se sabe que su com-

portamiento es bueno, cuando la estructura es adecuada y el relleno de hormigón armado, ligado al esqueleto.

Cuando el relleno es de ladrillo, la estructura metálica debe ser suficientemente rígida y la albañilería también convenientemente trabada para evitar grietas y dislocaciones. En obras de ingeniería de concreto armado, bien concebidas, ha habido también algunos perjuicios. Descartemos el caso grave del puente Ñipas sobre el río Itata, en que el deslizamiento del terreno y la formación de una enorme grieta en una de las cepas, originó el hundimiento de ella y la fractura total del tablero en varias partes, como lo muestra la foto N.º 1.

En otros puentes, como el Cocharcas sobre el río Ñuble y el Roble sobre el



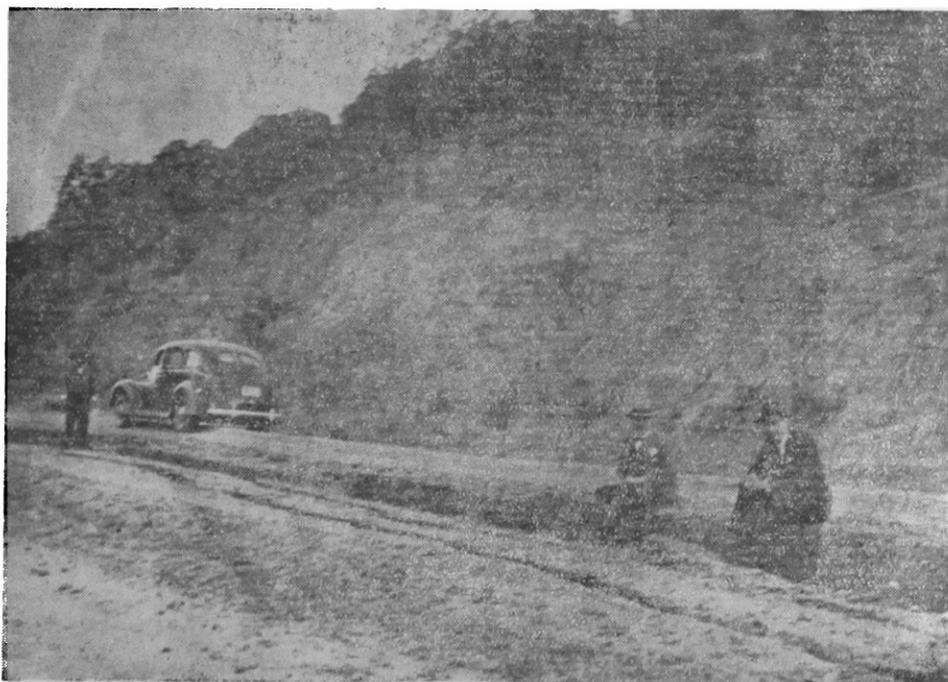
N.º 3.—Puente sobre el río Itata en El Roble (Camino de Bulnes a Concepción)

Itata, se ha observado que las cepas han penetrado hasta veinte y más centímetros en las longuerinas. Es lo que muestran las fotos N.ºs 2 y 3. Lo curioso del caso, es que, esa penetración, se advierte solamente en los paños en que el lecho está seco y no en las cepas en agua. Atribuyo el fenómeno a dos factores: 1) a la particular manera de vibrar del tablero por una parte y de las cepas por otra, y 2) al efecto que han producido sobre las cepas situadas en terreno seco, las percusiones horizontales alternantes de los bancos pedregosos sueltos ahí existentes. En las cepas que se hallaban en agua, la cota del terreno era siempre inferior y el suelo, poseía una consistencia manifiesta.

Unos elementos que en los puentes dieron muy buenos resultados, fueron las

llamadas «barras antisísmicas» que son tirantes cruzados anclados a los estribos destinados a impedir el desplazamiento lateral del tablero respecto de los apoyos extremos.

Las iglesias, por lo común de ladrillo, con mezcla de cal o barro, poseían torres de mejor calidad, sea de concreto reforzado con fierros perfilados o bien, de hormigón armado; en la mayoría de los casos, sufrieron considerablemente. Las torres irracionalmente pesadas y mal ligadas al resto del edificio, pronto se despegaron y en los recios choques recibidos durante el sismo, fueron lanzadas a distancia y cayeron a veces invertidas, como sucedió a la torre de la iglesia de la plaza del Mercado de



N.º 4.—Grietas en el camino de Bulnes a Concepción

Chillán. Muy parecidos, son los casos de la torre de la catedral de la misma ciudad y de la torre de la iglesia parroquial de Parral.

Las torres de la catedral de Concepción, solamente se inclinaron, a pesar de descansar en muros de ladrillos unidos con barro. Posteriormente fueron derribadas con explosivos. El suelo, en distintas zonas, fué removido y agrietado. En el camino de Concepción a Bulnes, se formaron grietas de 300 a 400 metros de longitud por 0,30 m. de ancho y varios metros de profundidad, en terreno correspondiente a un corte. A un lado de la grieta, la superficie del camino, que era plana, descendió como 0,30 m. Véase foto N.º 4.

III. *La corrección de los defectos observados, en las distintas clases de edificios.*—Lo dicho de las construcciones de adobe, conduciría a prohibir en Chile su empleo. Se

han propuesto tipos de casas de adobe reforzadas con elementos de madera, pero son caras. No obstante y principalmente en vista de que en ciertas zonas, no hay otro sistema barato de ejecutar viviendas, parece aconsejable tolerar aún la casa de adobe, eso sí que sometiéndola a estrictas condiciones. Fuera de las recomendaciones generales indicadas en el capítulo anterior, estos edificios no deben tener más de 3,50 m. de altura, han de poseer muros de 0,60 m. y no salvar longitudes mayores de 5 a 6 m. sin contrafuertes o muros intermedios.

Las casas de esqueleto de madera y relleno pesado, sea de adobes, ladrillos o concreto ordinario, deben reemplazar ese relleno por otro liviano y ligado al esqueleto, tal como ramas y doble enlucido de barro, concreto de escorias o piedra pómez, etc. También puede usarse con ventajas, un doble listoneado revestido con barro o yeso y relleno de cualquier material liviano e incombustible, como escorias o piedra pómez molidas. Los listones, en vez de tener sección cuadrada o rectangular, deben ser de sección trapezoidal y clavados en los pies derechos con su cara mayor hacia afuera.

Los edificios de ladrillo, no deben ejecutarse sino con pilares y cadenas de hormigón armado, y como lo prescribirán las nuevas disposiciones de la Ordenanza de Construcciones. El número de pisos también será limitado.

En cuanto a las construcciones de madera, de concreto armado o de estructura metálica y relleno de hormigón reforzado ligado al esqueleto, bastan las recomendaciones generales del capítulo B.

Se entiende, en todo lo dicho, que los materiales de construcción, han de cumplir rigurosamente con las condiciones exigidas en las obras de primer orden hasta aquí ejecutadas. Sin embargo, en un país sometido a terremotos como el nuestro, el edificio mejor hecho, según las reglas ordinarias, puede ser destruido si no se ha tenido la precaución de apartar su período de oscilación del correspondiente a las ondas principales de los grandes sismos. Al reparar una obra después de un terremoto, puede también reducirse su seguridad, si los elementos agregados hacen que el período del conjunto, caiga en resonancia con el temblor.

Dada la magnitud de los daños materiales hasta aquí producidos por los terremotos, se ve la necesidad de construir en forma racional y de que el Gobierno destine algunos millones de pesos a la instalación de observatorios sismológicos bien equipados y a la investigación permanente de los efectos de los temblores en las construcciones.

El valor de las obras de ingeniería y arquitectura del país, se estima en veinticinco mil millones de pesos, y casi todas están expuestas a sufrir seriamente con los grandes sismos. Los perjuicios materiales producidos por el terremoto de Chillán, fluctúan alrededor de mil quinientos millones de pesos. Si a esto se agrega el capital que representa la pérdida de vidas, se pasa de los dos mil millones. Al lado de estas cantidades, los dos o tres millones de pesos que puedan invertirse en el estudio de los temblores y su aplicación a las construcciones, son sumas insignificantes.

Santiago, marzo de 1939.