

altas deformaciones e inclinaciones. Pero el hecho de tener que considerar la rotación y distorsión de la base ("cabeceo" y "balanceo", para hablar en términos náuticos), introduce inevitablemente ciertas limitaciones, sobre todo de altura (como en el caso de los barcos), además de nuevas exigencias de redundancia y de flexibilidad.

En tal caso, ¿cómo se explica que haya sobrevivido la mayoría de los edificios altos en el centro de la ciudad? Una respuesta posible es la siguiente. Toda onda superficial es, por definición, una onda cuya amplitud decae en la dirección vertical. A una profundidad de $\lambda/2$ el movimiento ya es muy pequeño en términos de ingeniería. Mientras la arcilla se comporta en forma lineal, con una longitud de onda de $\lambda = 150$ m, la capa blanda es afectada en su totalidad puesto que $\lambda/2 = 75$ m, que es del orden del espesor de la capa blanda. En cambio, si se suponen ondas no lineales de $\lambda = 20$ m, tenemos que $\lambda/2 = 10$ m; y en este caso las estructuras desplantadas o las tuberías cimentadas a más de 10 m de profundidad no habrían sido afectadas por los sismos.

Esto corresponde bastante bien a las experiencias recogidas en el sismo de 1985. En efecto, de los edificios de seis o más pisos, aquellos que poseían sótanos profundos para estacionamientos fueron los menos afectados. Ello se esperaría igualmente con base en la teoría lineal. Sin embargo, los túneles del Metro fueron poco afectados, y las estructuras de acceso a ese medio de transporte sí sufrieron daños. Las tuberías del Drenaje Profundo quedaron intactas; en cambio, las de distribución del agua potable fueron gravemente afectadas.

En resumen, la no linealidad del Comportamiento elástico del material sedimentario saturado bien pudo haber desempeñado un papel relevante en la distribución, índole y gravedad de los daños observados en el terremoto del 19 de septiembre de 1985.

Otras causas

Si revisamos la historia sísmica de nuestro país, nos percatamos de que el Valle de México ha sufrido daños con todos y cada uno de los grandes sismos que se originaron en la zona de subducción. Ya sea lineal o no lineal el mecanismo de

excitación en la arcilla del Valle de México, el hecho es que se generan grandes amplitudes con sismos provenientes de cualquier epicentro en la Zona de subducción con la posible excepción del segmento de Chiapas-Guatemala, que resulta muy lejano.

La zona de subducción representa con mucho la estructura sismogénica más activa del país. Puede afirmarse, por lo tanto, que el Valle de México es la zona más expuesta y de mayor riesgo sísmico en la República. En efecto, por muy elevado que sea el riesgo sísmico en alguna zona de la costa mexicana del Pacífico, el de la ciudad de México siempre lo excederá puesto que incluye, adicionalmente, el riesgo proveniente de las demás zonas.



Figura 6. Situación del Valle de México en relación a la zona de subducción del Océano Pacífico. El contorno sombreado corresponde a la zona de intensidad superior a VII en la escala de Mercalli, por causa de sismos con epicentro en las costas de Michoacán y Guerrero. La zona cubierta por líneas isosistas muestra las zonas focales que pueden originar sismos de consideración en la Ciudad de México

En la figura 6 vemos la situación general del Valle de México en relación con las fuentes sismogénicas del Pacífico. La hemos presentado bajo la forma de un mapa de isosistas combinado para resaltar la distribución probable de intensidades; sin embargo, dicho mapa no refleja la incidencia temporal relativa, que debe ser mucho más alta para el Distrito Federal.

Proponemos, entonces, como segunda causa de la catástrofe la situación excepcionalmente riesgosa y vulnerable a la acción de sismos del Valle de México. Esta situación apenas está siendo reconocida en el medio científico; aún falta mucho para que se traduzca en una política urbanística efectiva.

Los daños catastróficos provocados por el sismo de 1985 afectaron predominantemente edificios de 6 a 15 pisos, construidos bajo la vigencia de una norma sísmica considerada como una de las más avanzadas de su época.

Sabemos que ello no fue suficiente. Pero ninguna norma sísmica del mundo parece considerar rotaciones de la base por efectos de ondas no lineales de corta longitud. Si estas ondas desempeñan un papel importante en el origen de los daños, tal omisión debe ciertamente incluirse entre las causas de la catástrofe de 1985.

Los efectos de rotación y torsión de la base serían especialmente relevantes en edificios altos y cimentados a escasa profundidad; en edificios largos y poco redundantes en su diseño estructural, y en edificios frágiles o poco dúctiles. Por ejemplo, cuando un edificio alto y frágil es sometido a inclinaciones cíclicas repetidas, la estructura tiende a sacrificar sus pisos superiores con tal de bajar su centro de gravedad. Esto representa un dilema para el ingeniero, ya que al asignar coeficientes sísmicos más elevados a los pisos superiores se incrementa la rigidez del edificio y se requiere un empotramiento basal más profundo para prevenir el volcamiento. y como los pilotes confieren escasa rigidez lateral, ello podría implicar una limitación a la altura de los edificios en suelo blando.

No quisiéramos concluir esta sección sin mencionar un tema doloroso, que no se ha destacado suficientemente en los trabajos técnicos sobre el terremoto de 1985: el de las víctimas. Es difícil discutirlo sin parecer melodramático; sin embargo, es necesario.

La vivienda cuesta dinero; la seguridad también. Ambas son deseables. Por lo tanto, podría considerarse que un cálculo de tipo de costo-beneficio será eminentemente aplicable en este caso. Las normas sísmicas deben incorporar precisamente esta clase de cálculo. Esto significa que el costo de una catástrofe

como la de 1985 debe ser evaluada; dejar de hacerlo equivale a adoptar una actitud evasiva ante la realidad.

Pero, ¿cómo calcular el costo de las vidas humanas? Ninguna de las 20 000 víctimas en la tragedia del 19 de septiembre de 1985 quería morir; ninguna estaba preparada para este terrible desenlace. Al adquirir su departamento, a veces a costa de grandes sacrificios, ciertamente nadie pensó que se exponía a esta clase de riesgos; más bien, suponía que un edificio moderno representaba una vivienda más segura para él y su familia. Nadie sospechaba la posibilidad de la muerte de sus hijos, atrapados en los escombros de un cuarto vecino y sufriendo una lenta y atroz agonía en la oscuridad, sin poder socorrerlos. Estos miles de niños martirizados, a cuya memoria está dedicado este artículo, son las víctimas inocentes de un proceso que desgraciadamente está en peligro de repetirse .

Más de dos años después de la tragedia, México sigue careciendo de un programa efectivo de prevención en el ámbito de la comunidad en general. Parece evidente que ésta debe contarse entre las causas de la catástrofe. Las vidas de millares de ciudadanos representan necesariamente una pérdida más catastrófica e irreparable que los valores materiales de centenares de edificios destruidos.

El proceso normativo no solamente debe encarar estos hechos sin parpadear; también debe institucionalizar un proceso que permita la incorporación de nuevas tecnologías constructivas y de diseño en forma rápida y expedita. Nos referimos a un proceso como el que existe actualmente en la aviación civil, donde cada accidente se investiga en forma exhaustiva y, en lo posible, en forma accesible al público usuario. Una vez determinadas las causas, se introducen modificaciones inmediatas en las normas a escala mundial, y estos cambios son acatados por la industria en forma voluntaria y en un plano de cooperación mutua y buena voluntad, aun cuando eso signifique suspender los vuelos para cierto modelo de avión hasta subsanar el defecto.

Necesitamos el mismo tipo de proceso normativo en ingeniería sísmica. Por ejemplo, existe cierta incongruencia en establecer reglas rigurosas y detalladas de cálculo para edificios cuyo estricto cumplimiento incumbe al proyectista, y al mismo tiempo dejar a su plena discreción la única decisión que verdaderamente

importa, a saber: dónde pueden construirse edificios de determinadas características y dónde no.

Planear edificios sin salidas de emergencia accesibles y funcionales en caso de derrumbe equivale en cierto modo a diseñar un reactor nuclear sin circuitos secundarios. Una vez que se ha producido un colapso real, con víctimas reales, incumbe al proceso normativo estudiar todas las estructuras desde el punto de vista de lo que sucedería con los usuarios en caso de emergencia.

No es nuestra intención criticar lo mucho que se ha avanzado en materia de normas sísmicas desde la Ley Field en California (1933), pasando por el Código Unificado de Construcciones y sus equivalentes en México y en otros países. Pero es preciso reconocer que la catástrofe mexicana de 1985, precisamente por el tipo de construcciones afectadas y por el número de víctimas que tuvo, puede y debe significar un hito en el proceso normativo mundial en materia de protección sísmica.

Etica y causalidad

No sólo es difícil sino imposible dar una respuesta éticamente neutra a la pregunta sobre las causas de la catástrofe sísmica de 1985. Ya hemos identificado cuatro causas principales: la presencia de arcillas lacustres, el desconocimiento de los efectos de la no linealidad en suelos durante los grandes sismos, la posición geográfica vulnerable de la ciudad de México, y las carencias en materia de prevención de catástrofes. ¿En qué orden corresponde jerarquizar estos cuatro factores?

Sin la presencia de arcillas lacustres no hay catástrofe. Si no se considera la presencia de las arcillas, sus propiedades físicas y su distribución en los suelos de la ciudad de México no existe posibilidad de una zonificación efectiva. Hasta que se reconozca la primacía de este factor causal, se reglamentará el tipo de estructuras que pueda permitirse en dicha zona. Por tal motivo, proponemos citarlo en primer lugar .

La segunda prioridad corresponde necesariamente al factor conocimiento. Se desconocía y de hecho sigue desconociéndose- el efecto de la no linealidad en los

suelos durante los grandes sismos. Es posible que este efecto sea menor de lo que aquí suponemos pero todo indica que el efecto existe y que es importante. Es preciso averiguarlo.

Los últimos dos factores son de tipo político. La ciudad de México está situada en un foco de convergencia del riesgo sísmico desde las zonas activas del Océano Pacífico: ¿qué estamos haciendo al respecto? ¿Qué medidas de protección civil se están llevando a cabo en el ámbito de la comunidad? ¿Cuáles han sido los efectos de la política de descentralización? Es necesario proponer e impulsar alternativas urbanísticas imaginativas; por ejemplo, podría reservarse la zona baja de la ciudad para edificar el futuro centro administrativo, legislativo, jurídico y cultural de la nación.

La priorización de las causas de una catástrofe revela en ocasiones lagunas insospechadas en nuestros conocimientos y limitaciones en el seno de la propia sociedad. Supongamos, a título de ejemplo, una teoría causal que citara tres factores de la catástrofe: la gran magnitud del sismo, la amplificación del suelo y el crecimiento de la ciudad de México. Ninguna podría calificarse de desconocida o de imprevisible. Esto equivale a decir que la catástrofe fue resultado de la fatalidad: todo estaba previsto pero la desgracia sucedió a pesar de todo. Equivale, en cierto modo, a declinar toda responsabilidad.

Si partimos, por el contrario, de un punto de vista humanista (en oposición al fatalista), tenemos que comenzar por reconocer que toda catástrofe es, ante todo, evitable. La naturaleza no es nuestra enemiga, sino la necedad y la codicia del hombre. La civilización consiste en erigir normas para combatir estas tendencias. Guando existe responsabilidad social (dice una antigua fuente china) ni la muerte puede ser una calamidad.

Discusión

El presente trabajo plantea más preguntas de las que resuelve. No hemos discutido el problema del mecanismo mediante el cual se generarían las ondas no lineales. No hemos tratado la cuestión de la transición entre ondas elásticas y olas pseudo-gravitacionales, relacionada con la siguiente pregunta: ¿debe conceptualizarse a la arcilla como un sólido elástico, un cuerpo viscoelástico o

elastoplástico, o un líquido viscoso? Finalmente, no hemos hablado de los experimentos cruciales que tendrán que realizarse en el laboratorio y en el campo para resolver todas estas preguntas.

Supongamos que el sismo genera una onda estacionaria en el centro de la laguna. Las olas se propagarían lentamente en dirección a las orillas. Al adelgazarse la capa de arcilla, los frentes de olas se orientarían en forma paralela a la orilla y las amplitudes crecerían como en el caso de una rompiente. Esto explicaría los efectos extraordinarios observados en la orilla del lago (en la colonia Roma, por ejemplo). En el caso del edificio Nuevo León, su orientación paralela a la orilla, haciendo frente a una amplia zona lacustre de edificación baja, debió ser especialmente desfavorable, ya que hizo que la construcción absorbiera toda la energía de la ola en su costado.

La arcilla del Valle de México es un material singular, cuyas propiedades siguen siendo muy poco estudiadas. Su contenido de agua es muy alto (casi 400%), y su consistencia sólida se debe a enlaces químicos entre granos minerales; estos enlaces pueden perturbarse o romperse debido a la acción de las ondas sísmicas de cortante.

Matuzawa (12) y Gilbert(4) han desarrollado teorías acerca del tipo de ondas que puede existir en un suelo cuando la energía gravitacional empieza a predominar sobre la energía elástica. Pero ninguno de estos autores ha considerado el efecto de una eventual transición no lineal entre elasticidad e hidrodinámica. Es importante saber si esta transición puede ser gradual, como parece pensar Gilbert , o si es más bien similar a un cambio de fase. En este último caso, la onda se "congelaría" produciendo ondulaciones residuales del suelo como las que se han observado en los terremotos japoneses. (12) Urge realizar experimentos críticos para definir los fenómenos dinámicos que ocurren en la región de transición.

Conclusiones

En conclusión, podemos decir que las causas principales de la catástrofe sísmica del 19 de septiembre fueron las siguientes:

1. La presencia de arcillas blandas en una zona bien delimitada del Valle de México.

2. El desconocimiento de los efectos que pueden tener sobre las estructuras las ondas no lineales de corta longitud.
3. La situación excepcionalmente riesgosa, y vulnerable a la acción de los sismos distantes, del Valle de México.
4. La falta de instrumentación de un programa efectivo de defensa civil y de prevención contra catástrofes en el ámbito nacional y local.

Otras causas pueden haber desempeñado un papel relativamente secundario. Así, el sismo fue de elevada magnitud, aunque no mayor que otros que han afectado la ciudad en los últimos 100 años. Hubo amplificación de ondas de cuerpo, aunque ello no pueda explicar la aparición del tren de ondas superficiales que fue el causante de la catástrofe. También hubo crecimiento demográfico, aunque no tanto en la zona que sufrió los daños más graves. Podría decirse, sin exagerar, que el 185 cambio más significativo entre 1932 y 1985 consistió en la proliferación de un tipo de construcción más vulnerable la acción de las ondas no lineales. Los daños en edificios coloniales no fueron esencialmente mayores en 1985 que en los sismos de 1911 y de 1932.

Hubo edificios que adolecieron de graves defectos de construcción y diseño. Sin embargo, estas fallas no estaban circunscritas a una zona específica de la ciudad y no pudieron ser factores determinantes de una catástrofe de esta magnitud. Es importante investigar todas las causas y no solamente las que concuerdan con una determinada teoría de su origen. El estudio de una catástrofe requiere de la interacción de muchas disciplinas científicas y tecnológicas y no puede soslayarse la presencia de puntos de vista políticos, éticos y humanos que influyen en la selección de las causas y su categorización.

Agradecimientos

Agradezco la crítica oral y escrita del profesor Emilio Rosenblueth y de otros colegas, especialmente de Servando de la Cruz, Luis &teva, Alberto Jaime, Jorge Lomnitz Adler, Miguel P. Romo y Gerardo Suárez. La investigación básica para este trabajo fue apoyada por la Universidad Federal de Bahía, Brasil y la

Universidad de Kyoto, Japón. Agradezco a los profesores T. Mikumo de Kyoto, y E.E.S. Sampaio, de Bahía, su generosa hospitalidad.

REFERENCIAS

1. Suh, N.P., "Statement Before the Senate Subcommittee on Science, Technology and Space on Behalf of the National Science Foundation", United States Senate, Sesión del 3 de octubre de 1985.
2. Seed, H.B., M.P. Romo, J. Sun, A. Jaime y J. Lysmer, "Relationships Between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions in Mexico City in the Earthquake of Sept. 19, 1985", Earthq. Eng. Res. Center, Rept. núm. UCB/EERC-87/15, 1987.p.112.
3. Runcom, S.K. (editor), "Fluids", International Dictionary of Geophysics, 1,1967, p. 544.
4. Gilbert, F., "Gravitationally Perturbed P Elastic Waves", Bull. Seis. Soc. Am. , núm. 57, 1967, pp. 783- 794.
5. Jaime, A. y M.P. Romo, "Degradación del S módulo de cortante de las arcillas del Valle de México", Memorias VII Congr. Nac. Ing. g, Sirmica, Querétaro, Qro., 1987. E-31-44.
6. Singh, S.K. , E. Mena y R. Castro, "Some Aspects of Source Characteristics of the 19 September 1985 Michoacán Earthquake and Ground Motion Amplification in and Near Mexico City from Strong Motion Data", Bull. Seis. Soc. Am., núm. 78,1988, pp. 451-477.

7. Moreno, R. , Joaquín Velázquez de León y sus trabajos Científicos sobre el Valle de México, UNAM, México, D.F., 1977.
8. Holmberg, G. y otros, "Vibrations Generated by Traffic and Building Construction Activities", Swedish Council for Building Research, Estocolmo, Suecia, 1984, p. 114.
9. Richter, C.F., Elementary Seismology, W. Freeman, San Francisco, EE.UU., 1957.
10. Lomnitz, C., "Some Observations of Gravity Waves in the 1960 Chile Earthquake", Bull. Seis. Soc. Am. , núm. 60, 1970, pp. 669-670.
11. Jeffreys, H., The Earth, 5a. Ed., Cambridge, Gran Bretaña, 1970, p. 525.
12. Matuzawa, T., "On the Possibility of Gravitational Waves in Soil and Allied Problems", J. Inst. Astr. GeoPhys., núm. 3, 1925. pp. 161-174.
13. Mooney, H.M. y B.A. Bolt, "Dispersive Characteristics of the First Three Rayleigh Modes for a Single Surface Layer", Bull. Seismol. Soc. Am. .núm. 56, 1966, pp. 43-67.
14. Rojas, T., V. García, y J.M. Pérez Zevallos, "Los sismos en la historia prehispánica y colonial de México: una cronología", Centro Inv. Est. Sup. Antrop. Social, CIESAS. México. D.F., 1986.
15. Kokusho. T., Y. Yoshida y Esashi. "Dynamic Properties of Soft Clay for Wide Strain Range", Soils and Foundations, núm. 22, 1982, pp. 1-18.
16. Ohta, T., M. Motosaka, S. Hiehata, M. Kamata. K. Takahashi, E. Kitamura, y M. Miyamura, "Research on the Strong Ground Motion in Mexico City during the

Earthquake of September 19, 1985 Michoacán-Guerrero. México", Kajima Inst.
Constr. Tech. .Rept. 68. Revised Ed., Tokyo, Japón, 1987.
(Ciencia y desarrollo, septiembre/octubre 1988 Vol. XIV Núm 82, CONACYT