

7
2ej.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ARAGON"

ANALISIS DE FALLAS ESTRUCTURALES OCURRIDAS
DURANTE LOS SISMOS DEL 19 Y 20 DE SEPTIEMBRE
EN LA CIUDAD DE MEXICO

INGENIERIA CIVIL

EMMANUEL CUBILLOS PARTIDA
M. en C. ENRIQUE DEL VALLE CALDERON

1988
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

"ANÁLISIS DE FALLAS ESTRUCTURALES OCURRIDAS
DURANTE LOS SISMOS DEL 19 Y 20 DE SEPTIEMBRE EN
LA CIUDAD DE MEXICO"

Pag.

INTRODUCCION	
CAPITULO I. ORIGEN DE LOS SISMOS	
1.1 Deriva continental	
1.1.2 Corrientes de convención	
1.1.3 Evidencias de la deriva continental	
1.2 Tectónica de placas y sismicidad	
1.3 Trinchera de Michoacán	
CAPITULO II. CARACTERISTICAS DE LOS SISMOS DEL 19 Y 20 DE SEPTIEMBRE	
2.1 Origen	
2.2 Registros	
2.3 Instrumentación sísmica	
2.4 Localización y características de las estaciones	
2.5 Principales características de los acelerogramas	
2.6 Magnitud e intensidades	
2.7 Aspectos geológicos de la Ciudad de México	
CAPITULO III. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL	
3.1 Estructuras de mampostería antiguas	
3.2 Estructuras de mampostería modernas	
3.3 Estructuras esqueléticas con losa maciza	
3.4 Estructuras esqueléticas con losa reticular	
3.5 Estructuras esqueléticas con losa maciza con elemen- tos rigidizantes	

3.6	Estructuras esqueléticas con losa reticular con elementos rigidizantes	
3.7	Resonancia en estructuras esqueléticas	
3.8	Estadísticas de la distribución y nivel de daño	
	CAPITULO IV. DESCRIPCION DE DAÑOS ESTRUCTURALES	
4.1	Daños en estructuras de mampostería antigua	
4.2	Daños en estructuras de mampostería modernas	
4.3	Daños en estructuras esqueléticas de losa maciza	
4.4	Daños en estructuras esqueléticas de losa reticular...	
	CAPITULO V. ANALISIS DE DAÑOS OBSERVADOS	
5.1	Irregularidades en geometría, resistencia y rigidez -- tanto en planta como en elevación	
	5.1.1 Aspectos arquitectónicos	
	5.1.2 Edificios en esquina	
	5.1.3 Piso suave	
	5.1.4 Falla en pisos intermedios	
	5.1.5 Falla en pisos superiores	
5.2	Influencia de los muros en la estructura	
	5.2.1 Muros de mampostería estructurales	
	5.2.2 Muros de mampostería divisorios	
	5.2.3 Columna corta	
5.3	Falla frágil en columna por flexión y/o cortante	
5.4	Alteraciones en estructuras	
	5.4.1 Sobre carga	
	5.4.2 Modificaciones y cambio de uso	
	5.4.3 Falta de mantenimiento	

5.5	Golpeteo con edificaciones adyacentes	
5.6	Problemas en cimentación	
5.7	Daños por sismos anteriores	
5.8	Efecto P'	

ORIGEN DE LOS SISMOS

Gran parte de la humanidad desde hace siglos, se ha sentido intrigada por la aparición de terremotos: su inesperabilidad, el gran daño que causan en breve tiempo y los problemas que se crean después que han terminado, han sido causas de miedo, y al mismo tiempo de curiosidad por buscar una explicación científica. En épocas pasadas los movimientos telúricos eran considerados como un castigo de los dioses, en otras se pensaba que las misteriosas sacudidas eran provocadas por seres gigantes y actualmente, gracias a los avances sismológicos el hombre sabe el origen y las repercusiones de los sismos.

El filósofo griego Aristóteles al examinar la causa de los sismos concluyó que su origen estaba en las vibraciones producidas por la salida de gases del interior de la tierra a través de los volcanes, esta idea fué modificándose y a mediados del siglo XVIII los observadores notaron que, en los sitios donde ocurría un temblor de tierra estaban alejados de las zonas volcánicas, en la mayoría de los casos.

Hoy podemos considerar varias clases de sismos, entre ellos distinguimos atendiendo a su origen, "los artificiales" y los naturales. Dentro de los primeros encontramos los sismos provocados con fines de investigación llamados microsismos, los ensayos nucleares y las explosiones accidentales químicas y de gas.

En los sismos de origen natural tenemos; el colapso del techo de cavernas, el deslizamiento de taludes, erupciones volcánicas que por lo general causan daños mínimos y los sismos tectónicos generados por fuerzas en el interior de la tierra deformando continentes y océanos, éstos son los de mayor interés debido a - las graves consecuencias que de ellos resultan, y de cuyo estu--dio se encarga la Deriva continental y la tectónica de placas.

1.1 DERIVA CONTINENTAL

Las teorías de la Deriva Continental y la Tectónica de placas, pueden explicar el origen del sismo del 19 de Septiembre de 1985, las cuales nos instruyen acerca del desplazamiento que experimentan los continentes.

Hace más de un siglo que se conoce la idea de que los continentes se han movido, notables observadores como: Francis Baccon, Placet, Buffon y Von Humbolt habían indicado el curioso encaje de entrantes y salientes de las costas Atlánticas de Africa y Sudamérica, (Fig. 1). En 1858 el francés, A. Sinder explicó que en otros tiempos los continentes habían estado ajustados unos a otros formando un solo supercontinente y desde entonces poco a - poco se han separado.¹⁾



Fig. 1. Las entrantes y salientes de las costas de América del Sur y África encajan de manera notable, sobre todo si esta unión se realiza a 2,000 metros bajo el nivel del mar. Redibujado de S. Warren Carey, "The Tectonic Approach to continental Drift, a Symposium, p. 223, fig. 21.

A principios del siglo XX el geólogo austriaco Edward Sues, había agrupado a los continentes Africano y Sudamericano, en una única masa de tierra a la que llamó Gondwana (Gondwana es una provincia de gran importancia geológica, situada en la parte centro-oriental de la India), (Fig. 2).

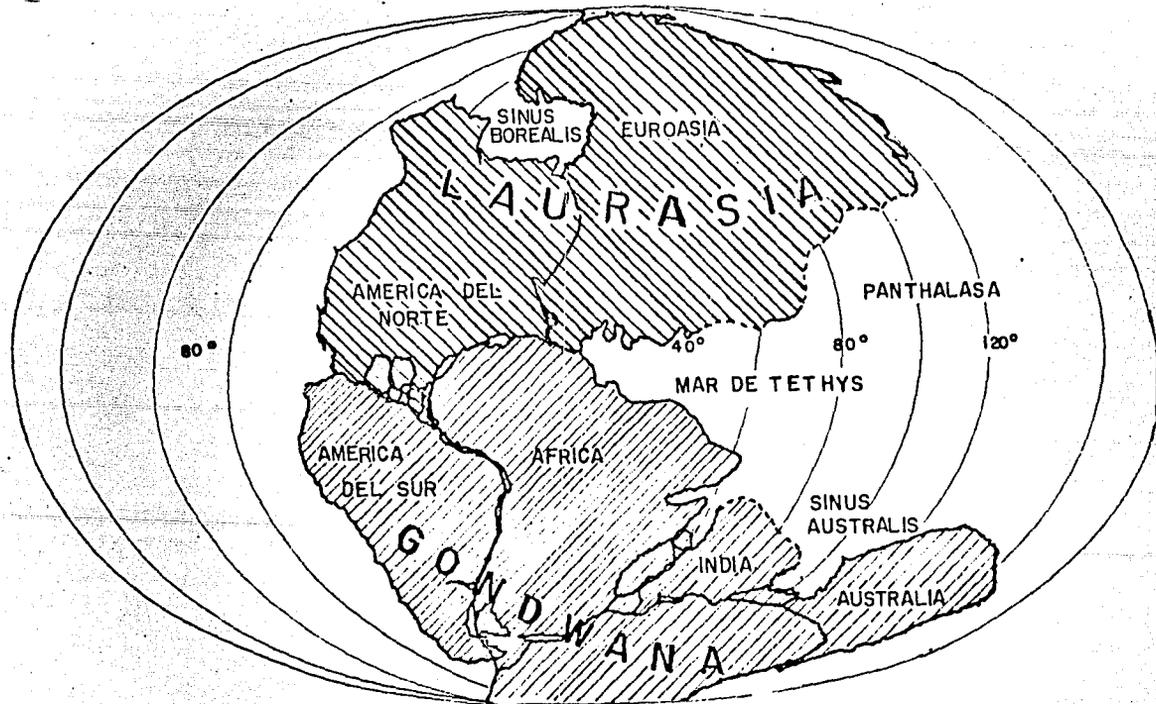
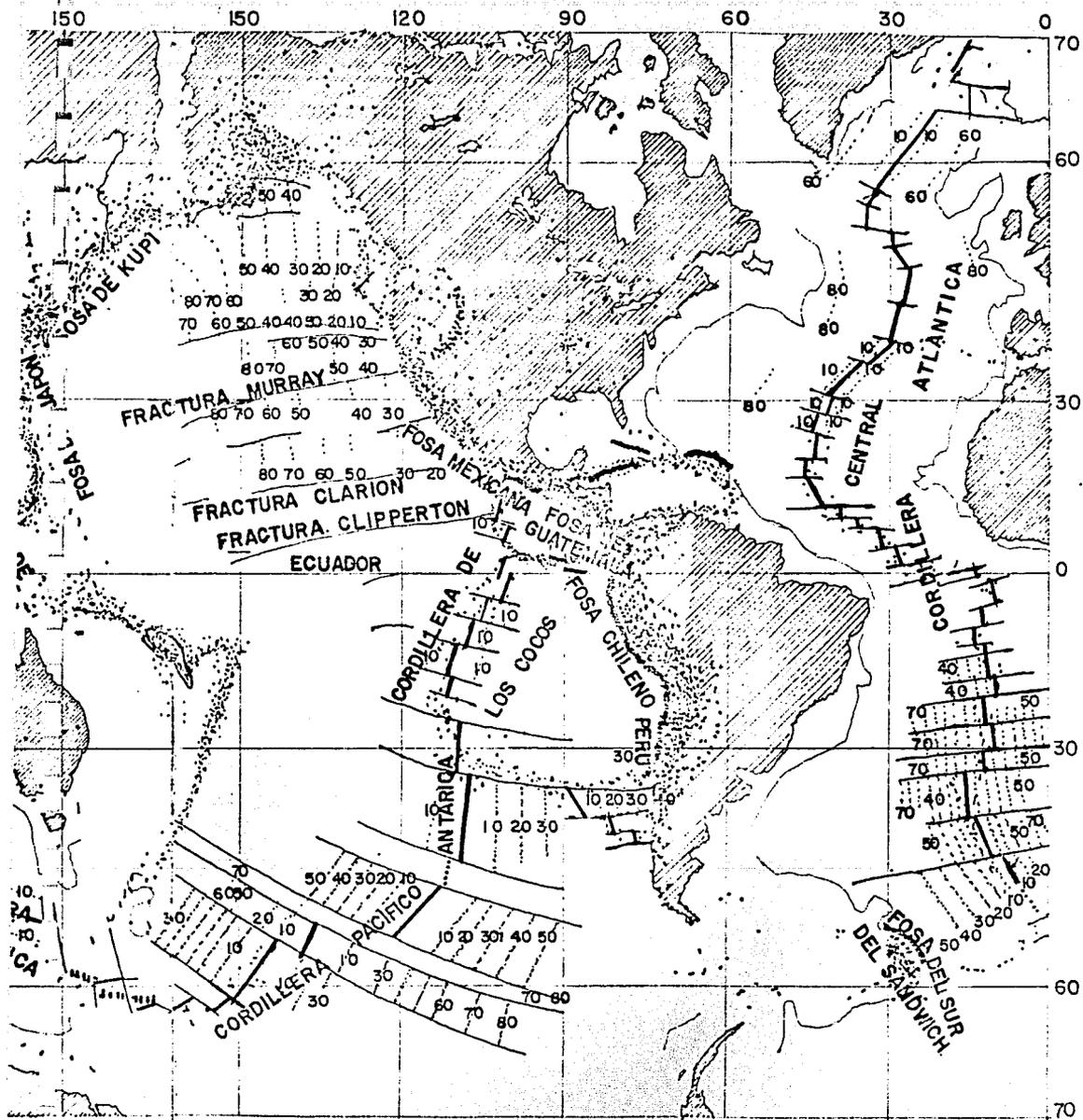


Fig. 2. Gondwana. Así pudo ser la tierra hace 200 millones de años.
Tomado de: Dietz, S., Robert y Holden, C., John. "La disgregación de la Pangea". Selecciones de Scientific American, *op. cit.*, p. 158.

La existencia de un solo supercontinente hace aproximadamente 200 millones de años y su separación hasta formar los actuales continentes fue dado a conocer por el meteorólogo Alemán Alfred Wegener en su libro "El origen de los continentes y los océanos", publicado en 1929, en el cual se difunde la primera teoría general de la Deriva Continental; Wegener argumentaba que si la corteza terrestre podía deslizarse en forma vertical en respuesta a fuerzas verticales, también podía hacerlo en sentido lateral.²⁾ El imaginaba la tierra como un vasto continente al que le dió el nombre de Pangea (del griego que significa "Todo y Tierra") (Fig. 3). En el transcurso de las eras geológicas cada continente se distanció en forma independiente, sobre un fondo oceánico dúctil en donde formaba un nuevo fondo oceánico a lo largo de las costas que se alejaban.³⁾



ICE_NICO

SIMBOLOGIA

•	Epicentro	---	Isocronas (Nos, en millones de años)
—	Cordillera centro-oceanica		Fosas oceanicas o zonas de subduccion
—	Borde continental	—	Fracturas (↓ a las cordilleras)

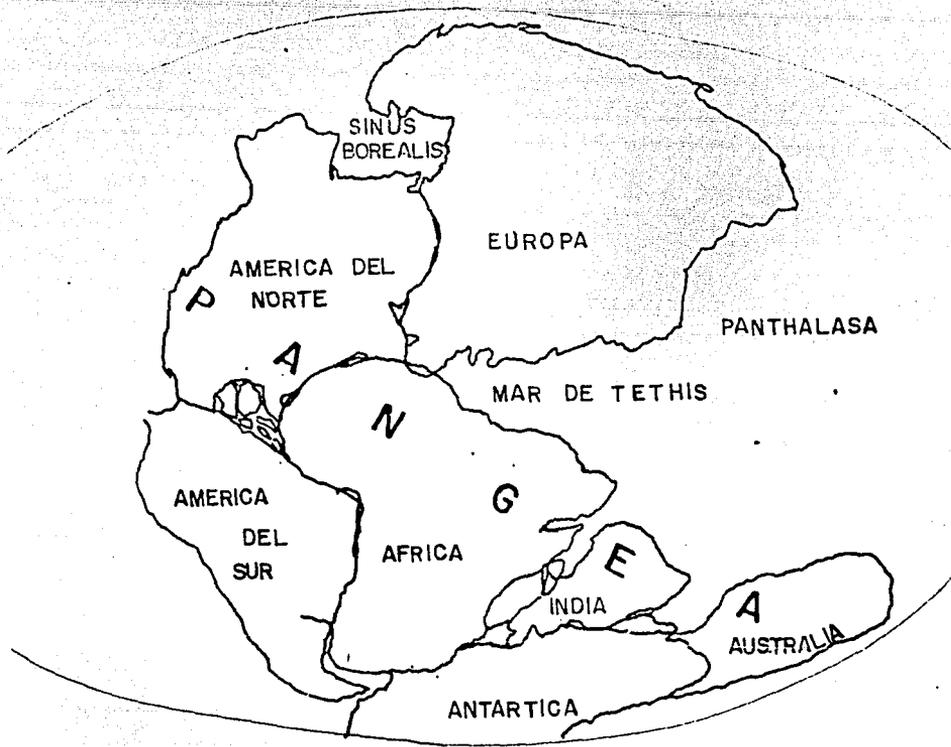


Fig. 3. En esta figura se observa el único supercontinente denominado Pangea, como se supone que era hace 200 millones de años. También apreciamos la Panthalasa, (ancestral océano Pacífico) y el mar de Tethys (antiguo mar Mediterráneo), el cual formaba una gran bahía que separaba África de Euroasia. Las posiciones relativas de los continentes excepto para la India, se han obtenido en base a datos suministrados por computadora, utilizando para ello la isóbata de 2,000 metros para definir los límites reales de los continentes. Tomado de "La disgregación de la Pangea", Selecciones de Scientific American, *op. cit.*, p. 158.

Esta teoría causó gran controversia y rechazo generalizado por la mayoría de geólogos, físicos e investigadores de Norteamérica y Europa, por no contar con un modelo adecuado que explicara el mecanismo de separación en los continentes, por lo que fue que

dando en el olvido.

A partir de dos importantes investigaciones realizadas en 1956, resurgió la teoría de la Deriva continental. La primera - efectuada por un grupo de geofísicos dirigidos por P. M. S. Blackett, Sir Edward Bulland, J. Hosper y S. K. Runcorn, "demostraron que las diferentes corrientes de magnetización de las rocas antiguas se podían reunir en un modelo estable si se suponía que los continentes se habían movido respecto al Polo Magnético".⁴⁾ El segundo estudio dirigido por Maurice Ewing y Bruce C. Heezen, aseguraba que hay un gran sistema de cordilleras centrales que recorre en forma continua todos los océanos del mundo con una -- longitud de 64,000 Km.⁵⁾ (Ver mapa, Fig.1.4).

Las afirmaciones anteriores provocaron la inquietud por conocer las causas reales de la separación de los continentes, y - en 1960 H.H. Hees afirmó: que en la parte central de las cumbres de la Cordillera Central Atlántica brotaba un nuevo suelo oceánico (Fig. 5-A), que empuja ambos lados de la cordillera, lo que - ocasiona desplazamientos de corteza terrestre perpendiculares a su eje longitudinal de tal forma que el suelo más antiguo se sumerge en las fosas marinas y debajo de los arcos insulares donde es absorbido por el manto. Este descubrimiento contribuyó de manera notable, a la aceptación de la teoría de la Deriva Continental, pues logró un mejor entendimiento del movimiento de los continentes. (Fig. 5-B).

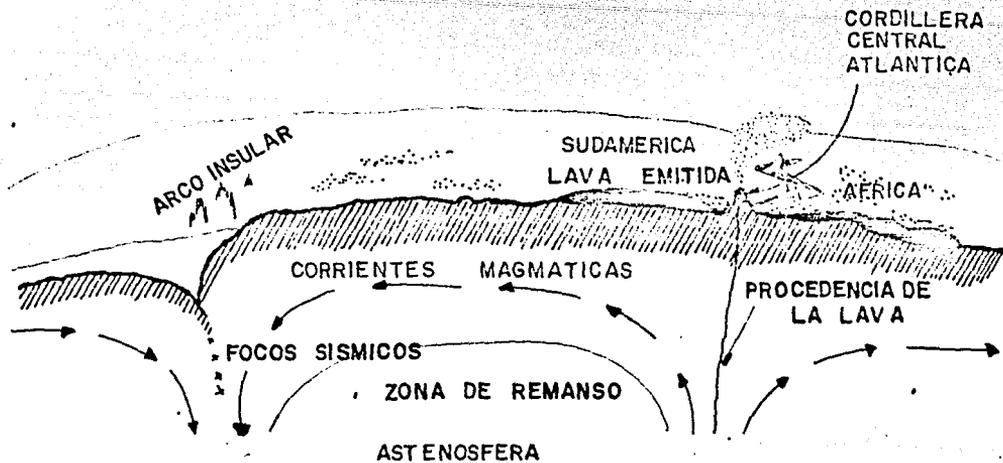


Fig. 5 (A)

Estos modelos de convección ilustran como la actividad en la astenósfera transporta las placas litosféricas, tomado parcialmente de: Wyllie, J., Peter, "El manto de la tierra", de Selecciones de Scientific American, *op. cit.* p. 255.

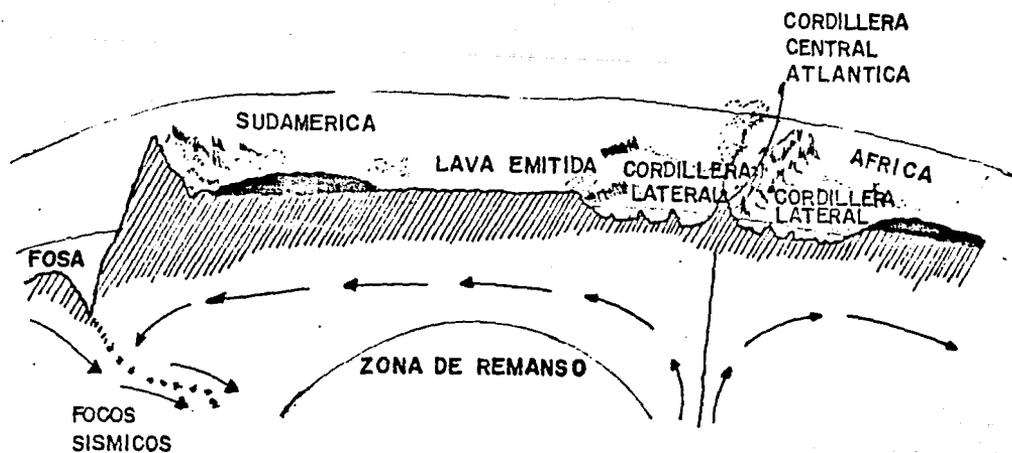


Fig. 5 (B)

En 1963 J. Tuzo Wilson señaló que la expansión del suelo oceánico desde la Cordillera Central Atlántica es causada por el movimiento de convección del manto, que es el fundamento de la teoría de la Deriva Continental.⁶⁾

Por lo anterior expuesto, la Deriva Continental nos permite conocer que la causa del movimiento de los continentes y océanos agrupados en placas, es el surgimiento de un nuevo fondo oceánico, producto de la ascensión del magma, y la formación de zonas de subducción donde son absorbidas las placas terrestres.

1.2 CORRIENTES DE CONVECCION

La posibilidad de movimientos laterales de la corteza terrestre es consecuencia de las corrientes de convección. El mecanismo de las corrientes ha sido propuesto por varios investigadores, entre ellos el oceanógrafo Menard y sus colaboradores, ellos han deducido que, en el interior de la tierra se llevan a cabo procesos de transferencia de calor, producidos por corrientes de convección magmática, cuyo funcionamiento es el siguiente: se cree que la temperatura del núcleo de la tierra (Fig. 6) es muy elevada, y el magma que se encuentra en el manto, rodeando al núcleo es calentado, por consiguiente es más ligero con menor densidad, por lo que es obligado a subir (Fig. 6) provocando empujes y desplazamientos sobre los bloques de la corteza de la tierra, a estos bloques los llamaremos placas debido a que su espesor es pequeño en comparación con su área. El deslizamiento de placas se realiza encima de una capa denominada Astenófera, que es más ca-

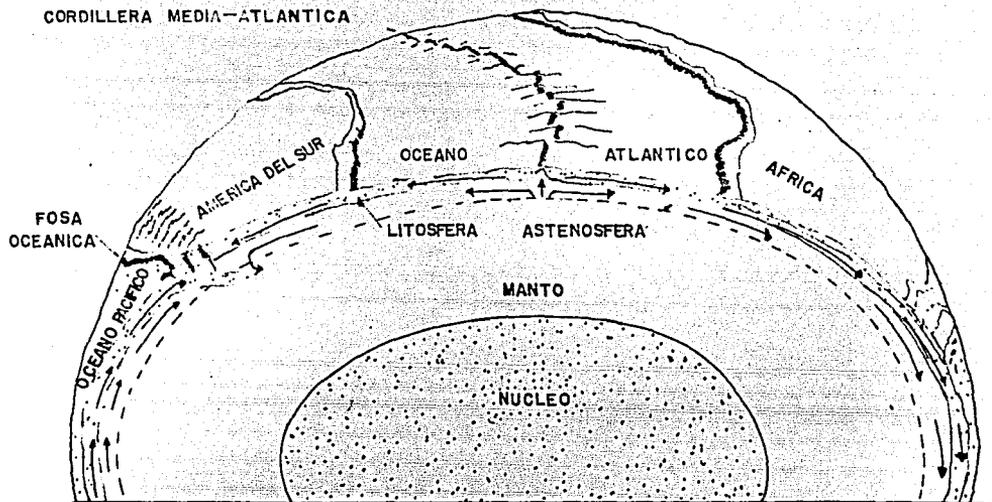


Fig. -6. Sección transversal de la tierra, mostrando la dinámica de las placas litosféricas, formadas por la corteza y parte del manto superior, que se desplazan lateralmente sobre la astenosfera, capa del manto a mayor temperatura y quizás parcialmente fundida. El material de la astenosfera asciende fundido, por debajo de las crestas de las cordilleras oceánicas, produciendo emisiones lávicas que al solidificar dan lugar a nueva corteza oceánica. Las placas litosféricas divergen allí donde se genera esta nueva corteza a partir del material ascendente. El crecimiento de la litósfera por este nuevo material emanado se ve compensado por la destrucción de una cantidad equivalente de litósfera allí donde las placas convergen y se hunden en el manto.

Fuente: Peter J. Wyllie. *El manto de la tierra*. pag. 245.

liente y más plástica que la corteza terrestre y el fondo marino, éstos son fríos y densos comparados con la corriente de magma ascendente, al bajar son absorbidos en las zonas de subducción en las fosas oceánicas, creando un proceso cíclico de corrientes magmáticas ascendentes (calientes) y descendentes (frías), formando una circulación continua de corrientes de convección. (Fig. 6) ⁷⁾.

1.3 EVIDENCIAS DE LA DERIVA CONTINENTAL

El proceso cíclico de las corrientes magmáticas ascendentes y descendentes, crean las fuerzas responsables del movimiento de las grandes placas terrestres, pues hace unos 200 millones de años las placas formaban un solo supercontinente en el que las placas tuvieron un desarrollo común en ciertos aspectos; paleontológicos, geográficos, botánicos, geológicos, glaciales y zoológicos. Estos datos son utilizados como pruebas a favor de la Deriva continental.

Evidencias Paleontológicas

Nuevos conocimientos acerca del magnetismo de las rocas y la paleontología, han despertado el interés por la teoría de la Deriva continental. La paleontología comprende el estudio del campo magnético de la tierra que ha existido a través del tiempo geológico, por ejemplo: nos enseña los aparentes cambios de posición que ha tenido el polo geomagnético en relación al actual polo rotacional y geomagnético.⁸⁾

Si suponemos que el polo geomagnético se ha desplazado, este movimiento nos es más evidente mientras más remontamos al pasado, en épocas geológicas anteriores al oligoceno. En la (Fig. 7) se nos muestra el recorrido que han tenido los polos geomagnéticos para Europa y Norteamérica, "primero estuvieron en el Pacífico oriental durante el precámbrico, posteriormente se desplazaron hacia el suroeste y cruzaron el Ecuador, pasando al hemisferio Sur antes de dirigirse al noreste, hacia Asia y de ahí a su posición actual".⁹⁾

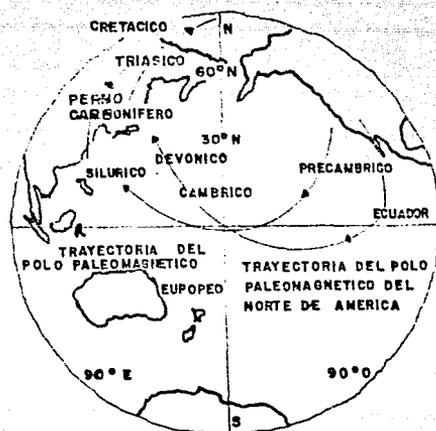


Fig. 7. Las medidas paleomagnéticas de las rocas de Norteamérica y Europa indican las trayectorias seguidas por los polos magnéticos de estos dos continentes desde el precámbrico hasta el presente. Redibujado de Xo y Doell, *ibid.*, p. - 758. Fig. 33.

El largo recorrido de los polos geomagnético y rotacional, aunado a la observación de que las trayectorias de migración polar de los diferentes continentes coinciden, prueban que los continentes tienen movimientos de rotación y translación independientes, demostrando así la validez de la teoría de la Deriva Continental.

Evidencias por la analogía de las costas de los continentes

Cuando observamos en un mapa las costas de América del Sur con las de África, notamos que muestran cierta coincidencia, más si giramos el extremo oriental de América del Sur, colocándolo en la gran entrante de África (Ver Fig. 1), uniéndolos a 2,000 metros bajo el nivel del mar, se verá con mayor claridad el acoplamiento de los litorales.¹⁰⁾

Evidencias por la última glaciación del Paleozoico

En la India se encuentra una gran serie de rocas llamadas sistema Gondwana, cuya formación se calcula desde el paleozoico superior hasta principios del Cretácico. Este tipo de rocas se ha observado también en: Africa del Sur, Madagascar, América, - Islas Malvinas, Australia y Antártica (Fig. 8). A pesar de las grandes distancias que separan estas regiones, las rocas tienen características afines por ejemplo: en los lugares mencionados se han encontrado depósitos glaciales litificados, los cuales -- descansan sobre rocas más antiguas, estriadas y pulidas por es-- tos glaciales ahora inexistentes. Estos depósitos se ubican en zonas tropicales o semitropicales en donde hoy no se encuentran glaciales ni pudieron haber existido en la edad del hielo del - Pleistoceno.

Al observar la dirección del flujo glacial, nos señala la formación de un bloque único de hielo sobre los continentes de - América del Sur y Africa.

La existencia de testimonios de regiones glaciales del pasado, en zonas tropicales de América del Sur se explica situando cerca de Africa del Sur el Polo Sur. Por otra parte, para entender la aparente continuidad del flujo glacial, se necesita de un solo continente, el cual se partió hasta formar los continentes actuales. 11)

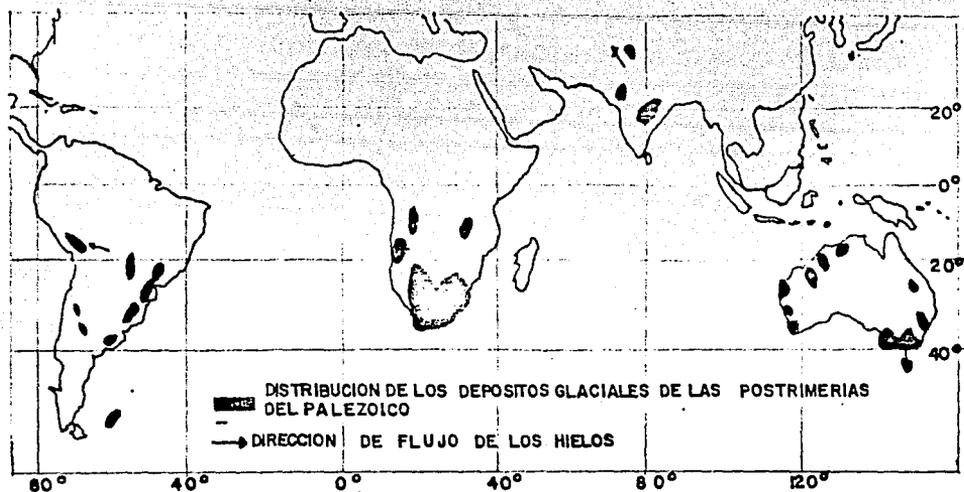


Fig. 8. — Dirección del movimiento del manto de hielo del paleozoico superior y distribución de las tilitas que se conocen del paleozoico superior. Obtenido de: Leet, Don, L. y Judson, -- Sheldon. "Fundamentos de Geología Física", *op. cit.*, p. 36.

Evidencia por rocas evaporitas

Las evaporitas son rocas sedimentarias compuestas de minerales precipitados a partir de soluciones concentradas por la evaporación de solventes, su creación implica generalmente climas áridos y calurosos. Se han encontrado depósitos evaporíticos en las cercanías del polo Norte. Con el paso del tiempo geológico estos depósitos se han desplazado a las zonas Ecuatoriales del presente, dicha trayectoria nos indica el recorrido de los continentes.¹²⁾

Evidencias por arrecifes de coral

El crecimiento de corales se produce en aguas cálidas (en--

tre los 30° de la latitud Norte y al sur del Ecuador). Si aplicamos esta restricción, en la formación de los antiguos corales encontramos, que en la actualidad los corales se encuentran aproximadamente en la franja de los 40° a 70° de latitud Norte, es decir, afuera de la zona cálida, por lo que su desarrollo en el pasado estuvo en sitios más al norte de donde se encuentran en la actualidad.

Evidencias por plantas y reptiles

Una variedad de planta denominada *glossopteris* semejante a los helechos, (Fig. 9) se ha localizado en lugares tan distantes como Sudamérica, Antártida, Africa del Sur, India y Australia. Esta flora se caracteriza por tener una composición muy uniforme a diferencia de las plantas modernas, dicha uniformidad no se pudo alcanzar en zonas tan alejadas. Se puede admitir que sólo unidas las masas de tierra señaladas anteriormente, se llegó a alcanzar tal uniformidad, al paso del tiempo geológico la corteza transitó hasta la posición actual.

De los vertebrados fósiles del Paleozoico que existieron en América del Sur y Africa, se encuentra un reptil llamado *mesosuaris*, se alimentaba de peces y sólo se le conoce en Brasil y Africa. Aunque este animal vivía en agua dulce, no se cree que haya atravesado el Atlántico, por lo anterior se concluye que Sudamérica y Africa del Sur estuvieron unidas.

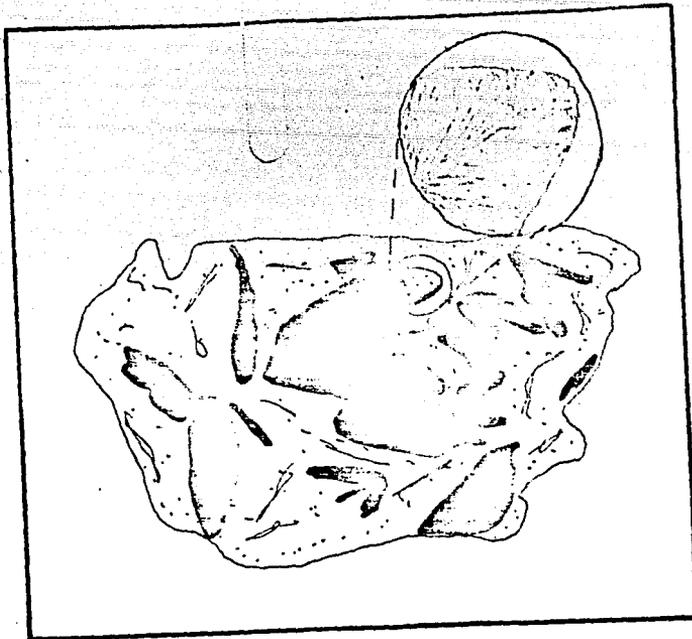


Fig. 9. Estas hojas de la planta fósil *glossopteris*, proceden de estratos de edad pérmica, de Australia. La flora de *glossopteris* se encuentra también en América del Sur, África, India y la Antártica. La amplia distribución de esta flora muy uniforme ha sido utilizada como evidencia tanto por los defensores como por los detractores de la teoría de la deriva continental, para reforzar sus respectivos argumentos. Ejemplar de los Jardines Paleobotánicos, Universidad de Princeton. Foto por: Willard Starks.

Los argumentos presentados como: los campos de lugar de -- los polos magnéticos y rotacional, la gran similitud entre las costas Atlánticas de Sudamérica y África, la única dirección del flujo glacial en Sudamérica, Madagascar, África, Australia y Antártida, las formaciones coralinas fuera de las zonas cálidas entre los 40° y 70° de latitud Norte, la uniformidad de crecimiento

de algunos animales y plantas en Africa y América del Sur, son testimonios en favor de la Deriva Continental.

1.2 Tectónica de Placas y Sismicidad

Desde la fragmentación del supercontinente Pangea las placas han seguido trayectorias independientes; cuando las placas dejan de moverse empiezan a acumular energía potencial en sus bordes. Al continuar los esfuerzos las deformaciones se incrementan al ser mayores éstas que su resistencia se produce en las rocas una ruptura violenta y repentina, liberando energía en forma de ondas elásticas, a este proceso se le llama sismo. Algunas veces este súbito rompimiento deja atoradas partes de placa, por lo que no se logra liberar toda la energía, y es mediante nuevos movimientos o réplicas que se establece el equilibrio, para volver a acumular energía potencial en sus fronteras, a estos límites se les llama fallas. Se ha establecido tres tipos de fallas.

1. Fallas de Divergencia o apertura, se tiene este tipo de falla cuando dos placas se separan una de la otra, generando un nuevo suelo oceánico por la salida continua de magma en los bordes de ambas placas. (Por ejemplo, en la zona de cumbres de la cordillera Central Atlántica).
2. Fallas de subducción: aquí los límites de placas convergen y chocan, por consiguiente una de las placas se subduce, es decir una de ellas va desapareciendo y poco a poco se consume conforme se desliza hacia el interior del manto superior, ba

jo y frente a el borde de la otra placa, formando una fosa - denominada: zona de subducción (este tipo de falla se encuentra en la placa de cocos que se subduce bajo la de Norteamérica).

3. Fallas de Transformación o Laterales: llamadas así cuando - los límites de las placas rozan y se deslizan entre sí, en - ellas no se crea ni se destruye material alguno (por ejemplo, la falla de San Andrés en California).

La teoría de la tectónica de placas se inició en la década de los sesentas, en la revolución científica orientada al conocimiento de nuestro planeta. La corteza terrestre se encuentra dividida, semejante a un gran rompecabezas, formado por 12 placas constituidas por inmensas áreas continentales que pueden estar - unidas a cuencas y fondos oceánicos con pequeñas porciones terrestres, los límites de las placas no siempre coinciden con las riberas de los continentes. En el mundo podemos considerar 6 placas grandes que son: la placa de América, del Pacífico, Africana, Euroasiática, Antártica y la Australiana. Y seis menores llamadas: la placa de Cocos, del Caribe, Nasca, del Mar Egeo, Arábica y de Filipinas (Fig. 1.10).

En las fronteras de las placas se realiza la liberación de energía sísmica, distribuida a nivel mundial en un 80% en el cinturón circunpacifico (Fig. 1.4) destacando, Japón, Melanesia, México, Perú, Chile y las Filipinas con una mayor actividad sísmica. Un 15% recae en las zonas Mediterráneas y Transasiática y el

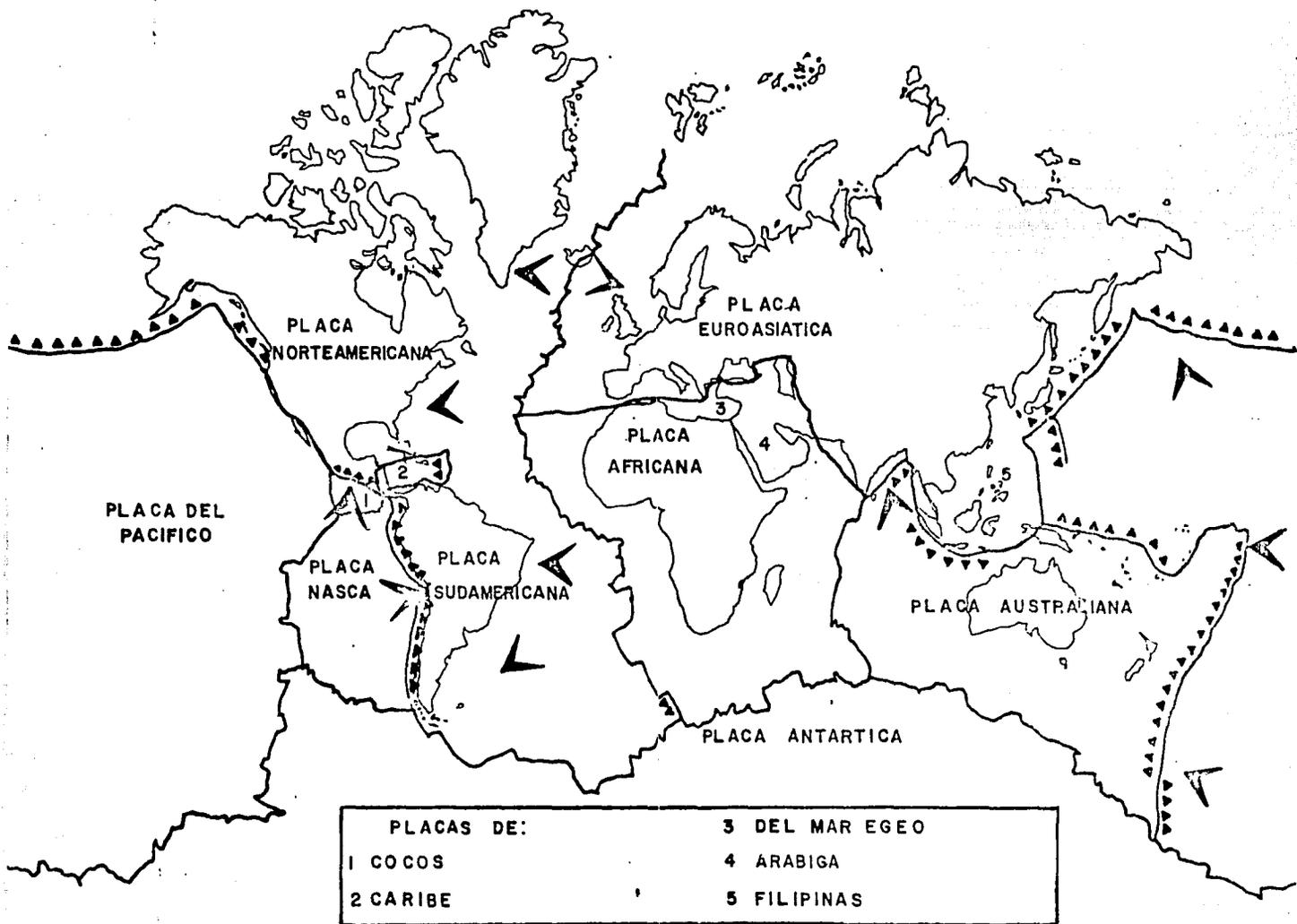


FIG. 1.10. Tectónica de Tonda, Juan. "Las características del terrior", ICYT del CONACYT, Vol. 7, Núm. 110, 1985 - 9

5% restante es liberado en el resto del mundo.

Las ondas elásticas producto del rompimiento de las rocas se clasifican en: ondas de cuerpo que viajan por el interior de la tierra y ondas superficiales que se transmiten a lo largo de la superficie. A su vez las ondas de cuerpo se clasifican en - dos tipos, las primeras son ondas de compresión-expansión y las segundas ondas transversales.

Las ondas de compresión, también llamadas ondas sonoras, o longitudinales, se propagan en sólidos, líquidos y gases. Estas ondas comprimen y expanden a las moléculas alternativamente (Fig. 1.11). Viajan a una velocidad promedio de 8 Km/seg. siendo las - primeras en llegar a las estaciones sismológicas por eso se lla-- man ondas P (primus), su velocidad está en función de la masa, -- rigidez y densidad de las rocas¹³⁾ en el apéndice A se encuentra una manera de obtener la velocidad.

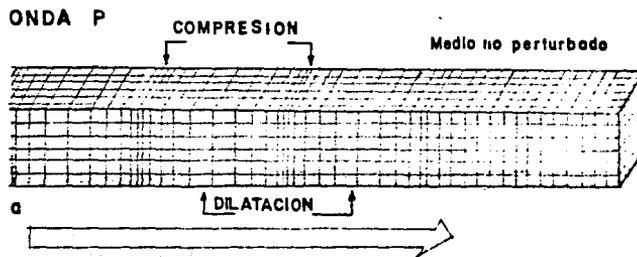


Fig. 1.11. Idealización de la trayectoria de la onda P (De Bruce A. Bolt, Nuclear Explosions and Earthquakes. W. H. Freeman and Company, 1976) de su libro "Terremotos", op. cit., p. 27.

Las ondas transversales o de cortante sólo pueden propagarse a través de los sólidos. Estas ondas mueven a las partículas en forma perpendicular a la dirección de propagación, (Ver Fig. 1.12) llegan después de las ondas P por lo que se les ha denominado ondas S (secundus). La velocidad de propagación es aproximadamente de 4 Km/seg. determinada por la rigidez y densidad de las rocas.

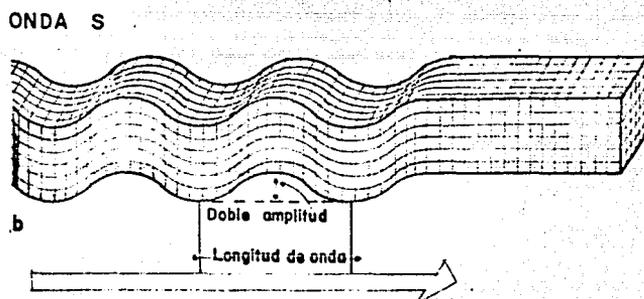


Fig. 1.12. *Ibidem.*

El tercer tipo general de ondas sísmicas se conoce como, onda superficial ya que su movimiento está restringido a la superficie del suelo. El movimiento debido a estas ondas se localiza principalmente en la superficie libre, y según aumenta la profundidad, el desplazamiento debido a ellas disminuye. Estas ondas superficiales se dividen en dos tipos: la onda Love y la Rayleigh.

El movimiento de la onda Love según Bruce A. Bolt, es, esencialmente el mismo que el de las ondas S que no tienen despla--

mimiento vertical; mueve el suelo de lado a lado en un plano horizontal paralelo a la superficie de la tierra, pero en ángulo recto a la dirección de propagación, como puede apreciarse en la figura 1.13.

ONDA LOVE

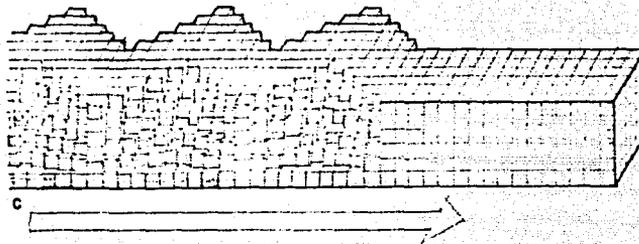


Fig. 1.13. Los efectos de las ondas Love son el resultado de la sacudida horizontal que actúa sobre los cimientos de las estructuras y, por lo tanto producen daños. *Ibidem*.

El movimiento en las ondas Rayleigh es semejante a las olas del mar, las partículas de material perturbadas por una onda Rayleigh se mueven vertical y horizontalmente en el plano vertical orientado en la dirección en que viajan las ondas, como señalan las flechas de la fig. 1.14.

ONDA RAYLEIGH

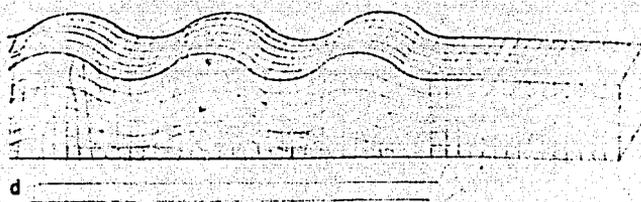


Fig. 1.14. *Ibidem.*

El estudio del mecanismo de propagación de las ondas ha determinado parcialmente la estructura interna de la tierra. Las ondas al atravesar diferentes tipos de materiales sufren reflexiones y refracciones por lo que se supone la existencia de discontinuidades en la frontera de las capas terrestres.

Las ondas superficiales viajan más despacio que las ondas internas y de las dos ondas superficiales, las ondas Love viajan generalmente más de prisa que las ondas Rayleigh. De este modo, como las ondas se propagan a partir del foco sísmico a través de las rocas de la corteza terrestre, los diferentes tipos de onda se separan unos de los otros en una forma predecible.¹⁴

Las ondas Rayleigh, debido a la componente vertical de su movimiento, pueden afectar a partes de agua, tales como lagos, -- mientras las ondas Love (que no se propagan a través del agua) -- pueden afectar a la superficie del agua sólo en tanto que los la-

dos de los lagos y bahías oceánicas se muevan de acá para allá, - empujando el agua, como los lados de un tanque en vibración.

Se ha descrito en forma breve el movimiento de las placas - tectónicas y los cuatro tipos de ondas que generan. Estas al refractarse y reflejarse combinan sus movimientos que afectan a la superficie terrestre y por lo tanto a las construcciones.

Los sismos que más daño causan al país son los provenientes de la zona de subducción de las placas de Cocos y Norteamérica. En particular los sismos de Septiembre tuvieron su origen en una región de la zona de subducción llamada Trinchera de Michoacán.

1.3 Trinchera de Michoacán

Los terremotos del 19 y 20 de Septiembre de 1985 ocurridos - en la desembocadura del Río Balsas, se debieron a corrimiento poco profundo, en la intersección de la fractura de Orozco con la - Trinchera Media de América (T.M.A.) (Fig. 1.15). Esta área fue - designada como una zona de quietud sísmica, a la que llamaremos - brecha de Michoacán por que previos al evento de 1985, habían transcurrido al menos 74 años desde el terremoto más grande (1911) con $M_s = 7.5$.¹⁵

Los periodos de recurrencia para terremotos en otros de lugares de TMA son de 33 ± 8 para este siglo y 35 ± 5 desde 1542.¹⁶ - Sin embargo el registro sísmico por sí solo, no era suficiente para determinar si la subducción de la zona de Orozco era sísmica o asísmica. Se cuenta con tres observaciones que indican el alto - potencial sísmico de la brecha de Michoacán: 1.- Grandes y recién-

tes terraplenes costeros sugiriendo levantamientos tectónicos fueron encontrados tierra adentro cerca de la zona de la fractura de Orozco.¹⁷ 2.- La distribución de epicentros (Fig. 1.16) y mecanismos focales de terremotos a lo largo de la TMA (en México) sugieren una subducción normal.¹⁸ 3.- El origen del mecanismo del terremoto de Playa Azul en 1981 $M_w = 7.5$ localizado en medio de la brecha, fue similar a otros terremotos a lo largo de la costa Oeste de México; excepto que el declive de tensión calculado era más alto que el promedio de la región.¹⁹

La documentación de observaciones similares en otros lugares donde las brechas sísmicas son asociadas con la subducción de grandes características topográficas, como cumbres oceánicas, debería influir apreciablemente en la evaluación del potencial sísmico regional.

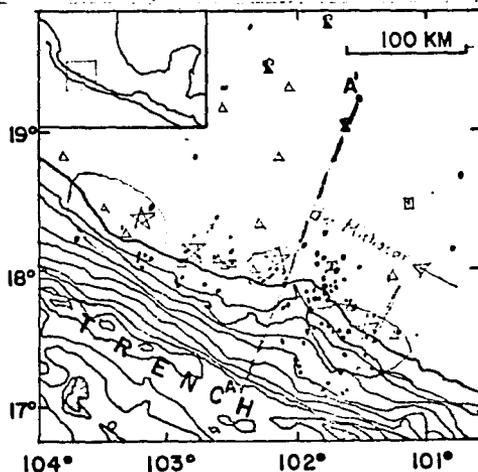


Fig. 1.16. Ubicación de los principales epicentros ocurridos en la brecha de Michoacán. El corte 'A-A' se muestra en la fig. 1.17. Ilustración tomada de Mc Nally, C., Karen, Stalte, Christian y González-Ruiz, Jaime, "Fine structure of a post failure Wadati-Benioff zone", Geophysical Research Letters, Vol. 13, No. 6, p. 577, fig. 1.

El ancho de inclinación entre las placas descendente y ascendente en la Trinchera de Michoacán está restringida a 75 km. y de 25 a 30 km. de profundidad (Fig. 1.17). Es posible que esta restricción sea el resultado de una estrechez mecánica de la porción rígida de la placa de Norteamérica,²⁰ así mismo un movimiento mayor, la porción asísmica de la interplaca, quizá actúe como una barrera de baja tensión con un desplazamiento substancial previo a un evento sísmico.

Para sismos significativamente mayores, por ejemplo, - en 1932 y 1985, de $M_w = 8.0 - 8.1$,²¹ son producidos por la - falla de múltiples asperezas, las consecuencias de este mode lo son;

- 1.- Los terremotos producirán mayor duración en el origen - de la ruptura.
- 2.- La magnitud de los sismos tendrá hacia el límite supe-- rior (tal vez $M_w = 8.0 - 8.1$) con una probabilidad reducida de que más de dos asperezas con áreas correspondientes a terremotos de $M_w = 7.7$ fallarán simultáneamente.

Abajo de la profundidad de la intersección de placas - se suponen desplazamientos asísmicos. Según las 2 evidencias siguientes:

- 1.- Los movimientos finales están bien localizados - y registrados en una antena de campo²² e indican un decrecimiento de la pendiente, alrededor de 25 km. de profundidad.

- 2.- Es posible que esta localización corresponda a - un límite entre fallas predominantes hacia arriba formando un ángulo el plano de falla con la horizontal (buzamiento) - y predominantemente fallas normales hacia abajo encontradas en datos de todo el mundo ($M_b = 4.0$).

La consistencia de datos alrededor del mundo, refleja los

mecanismos de todos los eventos mayores durante un periodo de 20 años, previos al movimiento principal.²³ Además los epicentros obtenidos por estudios especiales de antena de campo están contenidos en la zona de Wadati-Benioff, se puede deducir que las tensiones dentro de la placa descendente por debajo de las profundidades de 25-30 km. son previas extensiones al movimiento principal, porque todos los eventos más grandes tienen mecanismos normales de falla, y ningún mecanismo de corrimiento se ha observado. Deducimos entonces que, la mayoría de los deslizamientos cercanos a las interplacas son asísmicas.

A consecuencia del gran terremoto, ha surgido información que nos permite llegar a algunas conclusiones preliminares con relación al origen y a la complejidad del movimiento principal, - la acumulación de energía de deformación y la distribución de tensiones previas al suceso. Tales conclusiones son; La brecha de Michoacán cerca de la factura de Orozco tiene un alto potencial sísmico; el ancho del área de contacto entre las dos placas mide - - aproximadamente 75 km; abajo de la interplaca se supone un comportamiento asísmico; los eventos de $M_w = 8.0-8.1$ son producto de la falla de múltiples asperezas. Estas observaciones pueden ser útiles para poder anticipar futuros terremotos, como el ocurrido en Michoacán en 1985, cuyas características específicas se describen en el siguiente capítulo.

NOTAS BIBLIOGRAFICAS
ORIGEN DE LOS SISMOS

1. Urey, C. Harold. "La movilidad de la tierra", en J. Tuzo Wilson en *Deriva Continental y Tectónica de Placas*, p. 1.
2. Wegener afirmaba que nacía un suelo oceánico, lo cual es --- cierto, sin embargo, no donde él lo afirmaba, frente a las - costas Atlánticas, sino que brota en la línea de cumbres en la Cordillera Central Atlántica. Wilson, J. Tuzo, *Deriva -- Continental y Tectónica de Placas*, p. 48.
3. *Ibidem.*, p. 42.
4. *Ibidem.*, p. 52.
5. *Ibidem.*, p. 42.
6. *Ibidem.*, p. 53.
7. Tazieff, Haroun. *Cuando la tierra tiembla*, p. 160 y Wilson, J. Tuzo, *Op. Cit.*, p. 52.
El flujo de las corrientes de convección magmáticas se realiza en forma muy lenta y a grandes profundidades por lo que - su movimiento se estima de manera indirecta.
8. Leet, Don. L. y Judson, Sheldon. *Fundamentos de Geología -- Física*, p. 359.
9. *Ibidem.*, p. 358.
10. *Ibidem.*, p. 359
11. *Ibidem.*, p. 361.
12. *Ibidem.*, p. 362.
13. Bolt, A. Bruce. *Terremotos*, p. 28.
14. Bolt, A. Bruce. *Terremotos*. Véase: Apéndice G "Cálculo sencillo de las magnitudes y de la energía de un terremoto", p. 239.
15. Kelleher, J., J. Savino, H. Rowlett y W. Mc Cann. "Why and - where great thrust earthquakes occur along island arcs". J. Geophys Res. 79, 4889-4899, 1974.
16. Mc Nally, K. C., y J. González-Ruíz, "Predictability of the whole earthquake cycle and source mechanics for large (7.0 - 8.1) earthquakes along the Middle América trench off shore México", *Earthquakes Notes, Seismol. Soc. Am*, 22, 1986.

17. Minster, J. B., and T. H. Jordan. "Present-day plate motions", J. Geophys. Res., 83, 5331-5334, 1978.
18. Le Fevre, L. V., y K. C. Mc Nally, "Stress distribution and - subduction of aseismic ridges in the middle America subduction zone", J. Geophys. Res., 90, 4495-4510, 1985.
19. *Ibidem.*
20. *Ibidem.*
21. Wang, S., K. C. Mc Nally, y R. Geller. "Seismic strain release along the middle America trench, Mexico", Geophy. Res. - Lett., 9, 182-185, 1981.
22. Los movimientos de los sismos han sido reubicados, usando el método JHD., de Dewey, J., "Seismicity studies with the method of joint hypocenter determination", Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 1977.
23. *Ibidem.*

CAPITULO II

CARACTERISTICAS DE LOS SISMOS DEL 19 Y 20 DE SEPTIEMBRE

2.1 Origen

El 19 de Septiembre de 1985 se originó un sismo, cuyo epicentro fue localizado por el Servicio Sismológico Nacional a una latitud de 17.68° Norte y una longitud de 102.47° Oeste en el Océano Pacífico, frente a la desembocadura del Rio Balsas (Fig. 1), a 30 km de la ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán y a 400 km aproximadamente de la capital del país.¹⁾

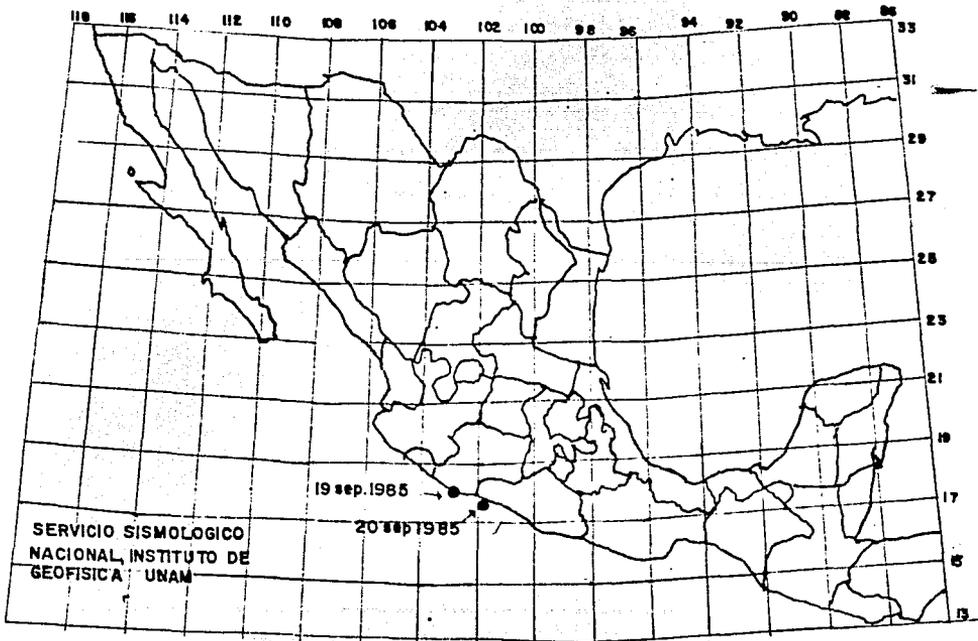


Fig. 1. Localización de los dos principales movimientos sísmicos en la República Mexicana.

El sismo comenzó a las 07:17:48 hora local (13:17:48 - - G.M.T.) con una magnitud de 8.1 (mw). Lo que originó un maremoto; el primero observado en México con olas de dos metros de altura.²⁾

La zona que se rompió se estima de 180 a 200 km a lo largo de la falla, por 75 km de ancho resultando un área de 13500 - km² de superficie de falla la cual penetró 1.40 m abajo de la -- placa de Norteamérica; la cantidad de energía que se liberó es - difícil de imaginar, no obstante se han establecido equivalen--- cias utilizando como modelo la bomba nuclear de Hiroshima,³⁾ uti- lizada en 1945, cuya magnitud es igual a 20 kilotoneladas de TNT. En el sismo del 19 de Septiembre se liberó una cantidad de ener- gía bastante grande que equivale a 8500 bombas nominales del ti- po Hiroshima. La réplica del 20 de Septiembre produjo una libe- ración equivalente a 2150 bombas, cantidad igual al "Sismo del - Angel" ocurrido el 28 de Julio de 1957, ambos con una magnitud - de 7.5° en la escala de Richter. Ver apéndice A.

El sismo del 19 de Septiembre era un sismo esperado, ya - que se había instrumentado la zona costera del Pacífico pues se conocía la posibilidad de que ocurriera un gran sismo.

El epicentro se encuentra en el borde de la zona de sub-- ducción, correspondiente a la placa de Cocos, ésta se introduce bajo la placa de Norteamérica, con una velocidad relativa de 6 - a 7 centímetros por año.

En la zona epicentral se ubica en una región conocida co- mo la "Brecha de Michoacán", limitada aproximadamente por los me- ridianos 101.5° y 103° Oeste (Figs. 2 y 3). Dentro del área -

de subducción activa.

Debido a que existen zonas de quietud sísmica en las cuales no se han registrado sismos fuertes mayores de 7° en la escala de Richter que hayan roto la corteza terrestre, a estas zonas se les llama "brechas" localizadas sobre las áreas de contacto de las placas tectónicas en el Océano Pacífico.

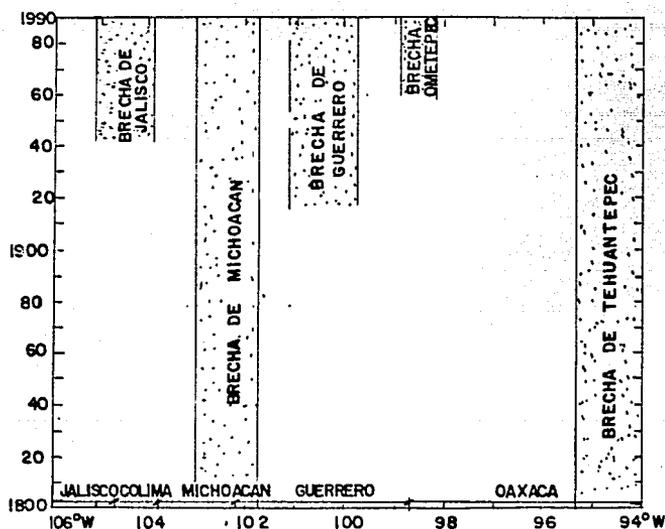


Fig. 2.2 Se muestra el estado en que se encontraban las brechas del Pacífico Mexicano, hasta antes del 19 de Septiembre de 1985. (Tomada de S. K. Singh, L. Astiz y J. Havskov, 1981).

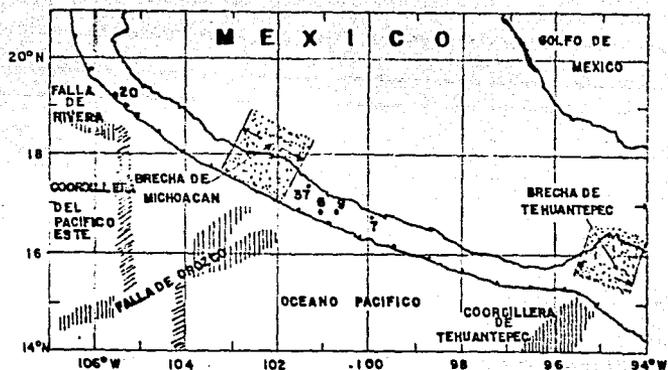


Fig. 3. Localización de las dos principales brechas en el Pacífico Mexicano, tomada de S.K. Singh, L. Astiz y J. Havskov, 1981.

En la historia de la brecha de Michoacán no se conocían sismos con alto grado de liberación de energía, pues desde 1800 no se registran movimientos telúricos de tal magnitud, por lo que se consideró esta zona como de quietud sísmica; en donde se fue acumulando energía, que tenía que ser liberada. Al producirse el sismo dicha liberación produce una ruptura en la corteza terrestre.

El proceso de ruptura estuvo formado aparentemente por un evento principal y otro complementario. El primero ocurrió el 19 de Septiembre, el cual consta de dos etapas, la primera sucedió a las 07:17:48 y la segunda 29 seg. después de iniciada la primera. El área de ruptura fue entre las fronteras de las placas de Cocos y Norteamérica, y abarcó, desde las colindancias de los estados de Colima y Michoacán hasta Zihuatanejo. El

segundo evento (es factible que sea continuación del principal) se suscitó el día 20 de Septiembre, continuando la ruptura hasta Petatlán⁴). Ver Fig. 4.

LOCALIZACION DE ESTACIONES PORTATILES

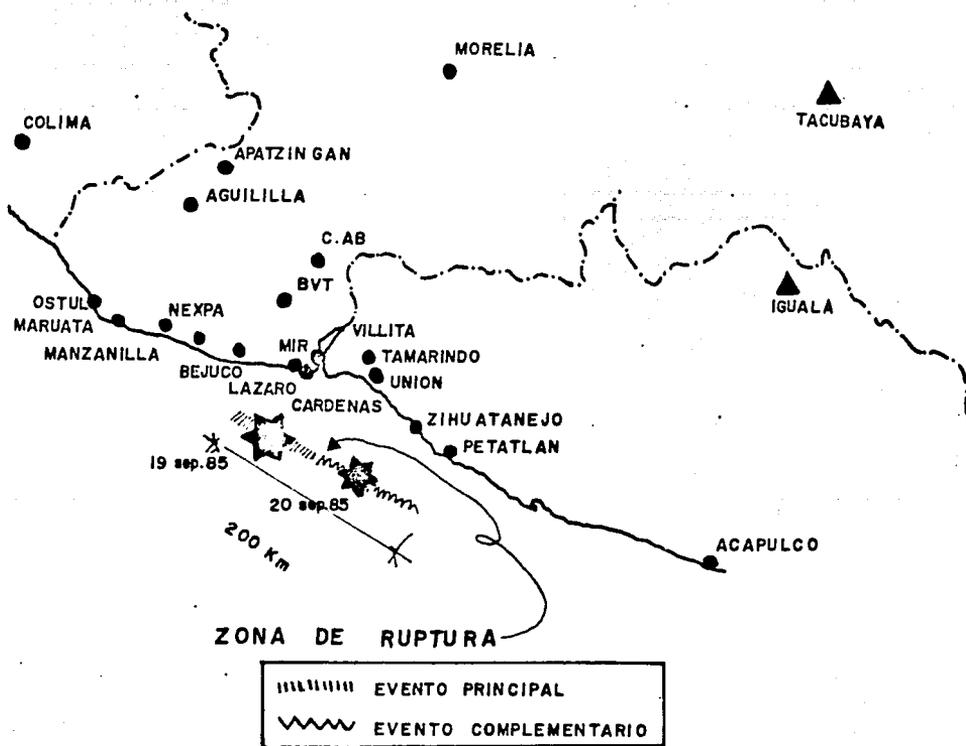


Fig. 4. Se muestra la zona de ruptura dividida en dos partes, la primera corresponde al evento principal del 19 de Septiembre y la segunda ocurrida el 20 del mismo mes. Las dos rupturas ocuparon un área aproximada de 13,500 km².

La culminación del evento principal ocurrió al presentarse un sismo el 20 de Septiembre de 1985 a las 19:37:13 hora local (01:37:13 G.M.T.). El epicentro fue en el Océano Pacífico en las coordenadas 17.8° Norte y 101.67° Oeste, a 105 km del epicentro del evento mayor, frente a las costas de Zihuatanejo y -- aproximadamente a 340 km del Distrito Federal.

Es posible que los dos sismos principales hayan sido en realidad uno, pues el segundo corresponde a la parte complementaria del primero, sólo que demorada. Además las réplicas fueron menores de 2 ó 3 grados.

Al ocurrir un sismo tectónico de magnitud mayor a 7, las placas que lo produjeron no entran en equilibrio inmediato, pues quedan atoradas en la nueva posición, quedando zonas en superficie sin descargar energía. A través de reajustes paulatinos de los bloques en la zona de ruptura, se libera la energía residual en forma repetitiva. A estos reajustes se les llama réplicas, por lo general menores a los sismos principales. Las nuevas posiciones influyen en la distribución del esfuerzo de los bloques adyacentes.

El estudio de las réplicas es importante porque proporciona datos para entender el movimiento general de la placa, indica el área general de la zona de ruptura, la distribución espacial de las réplicas nos da idea del grado de heterogeneidad de las rocas en el área de ruptura y sus alrededores.

2.3 Instrumentación Sísmica

Para conocer los diferentes aspectos del movimiento del terreno durante un sismo, se utilizan instrumentos que miden diferentes aspectos, los más importantes en Ingeniería Sísmica son:

a) Sismógrafo, es un instrumento que permite conocer los movimientos sísmicos fuertes, pero lejanos o débiles cercanos, ampliando la onda sísmica. Se emplea para estudiar la propagación de las ondas en el interior de la tierra y en las capas superficiales, ayuda en la determinación de la dirección, distancia y profundidad a la que se ha originado el movimiento⁵⁾, ver Figura 9.

Fig. 9. Sismógrafo de Tacubaya.

La alta sensibilidad del sismógrafo provoca que bajo sismos intensos no se pueda obtener la totalidad del registro pues la aguja se sale de sus límites o el registro se satura. Esto ha originado el desarrollo del acelerógrafo.

b) El Acelerógrafo permite estudiar los sismos fuertes y cercanos, pues son los que más interesan a la Ingeniería Sísmica. Este aparato mide la aceleración del terreno y las características del movimiento, cuando se presenta un sismo. (Ver Fig. 10). De acuerdo con la segunda Ley de Newton $F=Ma$ si conocemos la aceleración y las masas, podemos estimar las fuerzas y esto es fundamental para el cálculo de las respuestas estructurales y en el diseño sísmico del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (RCDF).

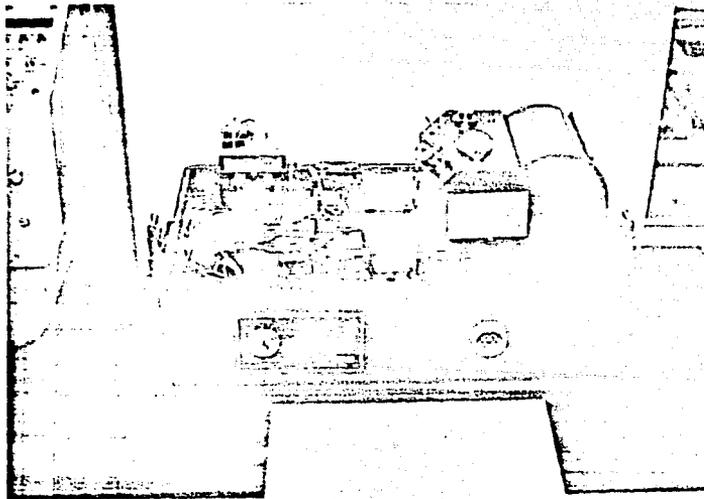


Fig. 10. Acelerógrafo portátil modelo SMA-1, - propiedad del Instituto de Ingeniería UNAM.

Este aparato está constituido "por tres pequeños tambores con un sistema oscilante en su interior que proporcionan una señal electrónica que permite el registro digital o analógico, - en ocasiones con acoplamiento a una computadora".⁶⁾

Los acelerógrafos cuentan con un dispositivo que se dispara cuando el sismo adquiere una aceleración de 5 gals. La aceleración del suelo es registrada continuamente en cinta magnética, que se utiliza de nuevo si no ha temblado.

2.4 Localización y características de las estaciones

Los lugares donde se colocan los acelerógrafos son llamados "estaciones".

Al ocurrir el sismo se encontraban funcionando 17 de un total de 30 estaciones, en el estado de Guerrero como parte de un proyecto conjunto entre el Instituto de Ingeniería (I de I), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad de California en San Diego (UCSD). Las aceleraciones máximas medidas en la región epicentral fueron aproximadamente 0.15 g. y la duración del sacudimiento principal excedió los 10 segundos, con aceleraciones mayores a 0.10 de g.

En la ciudad de México el movimiento fue captado por 12 estaciones. Fig. 11 y Tabla 1.

Las estaciones de "campo libre" son aquellas que operan sin la influencia del movimiento de construcciones cercanas, por lo que se considera que los acelerogramas obtenidos son una representación fiel del movimiento en el lugar.⁸⁾

Los aparatos de campo libre son digitales, marca Terra Technology y tienen una capacidad de medición hasta ± 1 g.

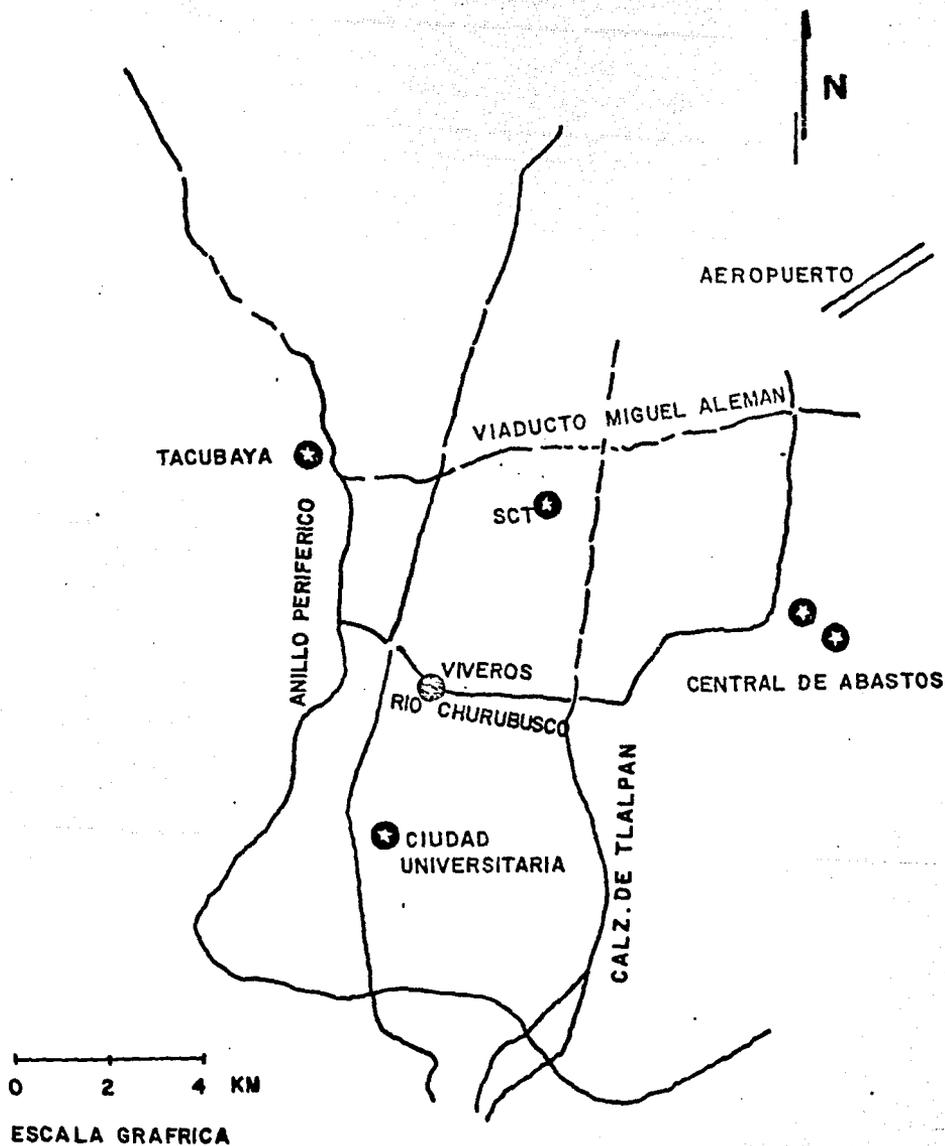


Fig. 11. Localización de acelerógrafos digitales en México, D.F.

T A B L A 1

ESTACION	CLAVE	LAT. NORTE	LONG. OESTE	TIPO Y No.	ACELEROG. COMPONENTE	TIPO DE TERRENO
C.U. D.F.	CU01	19.330	99.183	DCA333 -121	NOOE VERT N90E	Roca basáltica. Planta baja del edificio 1 del IdeI
IdeI Patio	CUIP	19.330	99.183	DCA310 -154	SOOE VERT N90W	Roca Patio del IdeI C.U.
Mesa Vibrado- ra C.U.	CUMV	19.330	99.183	DCA333	SOOE VERT N90W	Roca Mesa vibradora de C.U.
Madin Margen Izquierda	MADI	19.536	99.261	SMAI -3385	N60E VERT N30W	Roca fracturada. Presa Madin, Naucalpan Edo. de México
Tacubaya D.F.	TACY	19.403	99.194	DCA333 -168	SOOE VERT N90W	Suelo duro Zona de Lomas, D. F.
Sismex Viveros	SXVI	19.358	99.171	DCA310 -133	NOOE VERT N90W	Suelo arcilloso Zona de Transición, D.F.
C. de Abastos Frigorífico	CDAF	19.368	99.088	DCA333 -114	SOOE VERT N90W	Suelo arcilloso Zona del exlago de Texcoco
C. de Abastos Oficina	CDAO	19.368	99.088	DCA333 -115	SOOE VERT N90W	Suelo arcilloso Zona del exlago de Texcoco
Sría. de Comu- nicaciones y - Transportes	SCTI	19.393	99.147	DCA333 -144	SOOE VERT N90W	Suelo arcilloso Zona del exlago de Texcoco

TABLA 1 (Cont.)

ESTACION	CLAVE	LAT. NORTE	LONG. OESTE	TIPO Y No.	ACELEROG. COMPONENTE	TIPO DE TERRENO
Tláhuac Bombas	TLHB	19.279	99.008	SM1 -4590	NOOE VERT N90W	Suelo arcilloso Zona del exlago de Xochimilco
Tláhuac Deportivo	TLHD	19.293	99.035	SM1 -4591	NOOE VERT N90W	Suelo arcilloso Zona del exlago de Xochimilco

Esta tabla muestra los datos de la estación en donde se registró el sismo: nombre, clave, coordenadas geográficas, instrumento instalado en el sitio y tipo de terreno donde se encuentra el aparato registrador. (Tomado de Catálogo de acelerogramas procesados del sismo del 19 de Septiembre de 1985. Mena, E., et. al. Series del Instituto de Ingeniería No. 497).

2.5 Principales características de los acelerogramas

Mediante la interpretación de los acelerogramas se puede conocer el movimiento real del suelo cuando ocurre un terremoto.

Un acelerograma es una gráfica donde se registra el comportamiento que tiene el terreno cuando es sometido a fuerzas sísmicas en función del tiempo.

El registro del acelerograma del sismo más significativo fue el proporcionado por la estación Centro SCOP o la actual Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT, situada sobre avenida Universidad, y al sur del edificio que alberga a la máquina universal de 200 Tn de la SCT en la Ciudad de México. Figs. 12 y 13.

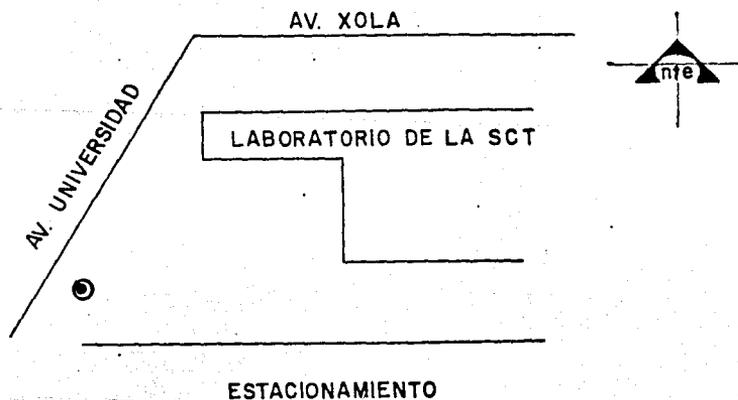


Fig. 12. Croquis de localización del acelerógrafo DCA-333 N/S 144 cerca del laboratorio de materiales de la SCT. Tomado de IPS-10B del Instituto de Ingeniería UNAM, p. 9.

GRAFICA DE TRES ARCHIVOS DE ACELERACION (gals)

Componente:	Long	Vert	Tran
Max.Min:	-97.85	-36.43	-167.79

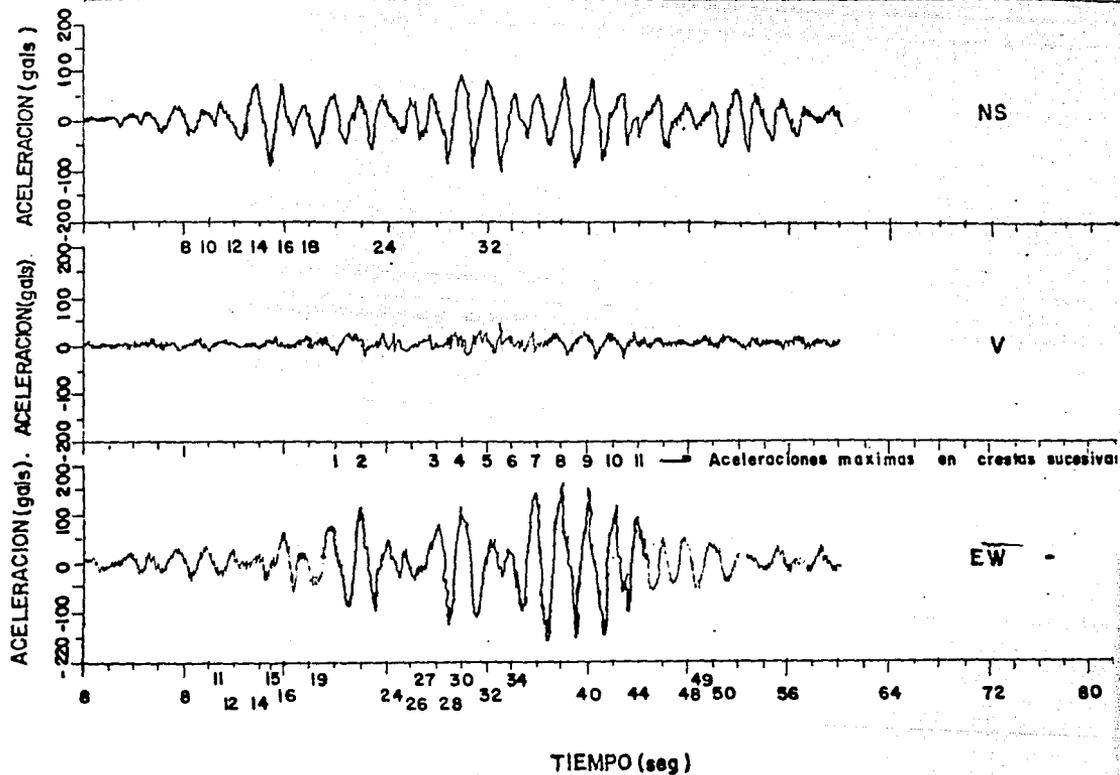


Fig. 13. Acelerograma del sismo del 19 de Septiembre de 1985, obtenido cerca del laboratorio de resistencia de materiales de la SCT, en Xola y Av. Universidad, en la Ciudad de México.

La trascendencia de dicho registro es debida a que el acelerógrafo se localiza en un suelo muy similar a los lugares donde se localizaron los mayores daños. Se considera que los acelerogramas obtenidos en SCT son los que representan con mayor fide

lidad el movimiento que causó el colapso de numerosas estructuras.

En la figura 13 se muestra el acelerograma que en su parte principal duró 60 segundos, nos presenta tres componentes de la aceleración, dos son en el sentido horizontal en las direcciones E-W y N-S y la otra en el sentido vertical.

Al analizar el movimiento de las componentes horizontales del acelerograma observamos que es casi armónico debido a, un periodo dominante de dos segundos con pequeños cambios, y amplitudes que varían con relativa lentitud, sobre todo para la dirección E-W que es mayor en un 70% a la N-S.

El movimiento en el sentido E-W tiene características adversas para estructuras con periodos de vibración de dos segundos, semejantes al periodo fundamental del suelo blando que es alrededor de 2 segundos.

En el Valle de México, el movimiento se inició en forma leve y se fue incrementando gradual y paulatinamente y casi lineal durante los 40 segundos que tardó en llegar al pico máximo. Este aumento progresivo de amplitud se ve interrumpido dos veces, en el intervalo del segundo 23 al 27 y del 31 al 35 aproximadamente, pero esos intervalos son de 2 en 2 seg. por lo que la fase de excitación, no altera la respuesta a esos periodos, sino contribuye a su elevado incremento a partir del seg. 35 cuando se inician los tres ciclos más fuertes de la excitación.

"Las aceleraciones máximas de crestas sucesivas positivas y negativas que se mantienen cercanas al 10% de la aceleración de

la gravedad durante más de 22 seg. aproximadamente 11 oscilaciones de dos seg. en promedio".

"La componente N-S no llega a un 10% de la gravedad pero las oscilaciones se mantienen cercanas a ese nivel durante un lapso similar".⁹⁾

2.6 Magnitud e Intensidades

Para medir los sismos se usa la intensidad y la magnitud.

Con frecuencia los conceptos de intensidad y magnitud -- suelen confundirse.

La intensidad es una cantidad no instrumental que se fija de acuerdo con los efectos geológicos observados, con los daños a las estructuras y con la percepción individual de las sacudidas, y se expresa en grados de una escala de intensidad.¹⁰⁾

Por lo común, en una escala de doce grados, la intensidad puede ser estimada con una precisión de la mitad de un grado. En nuestro país se utiliza la escala de Mercalli Modificada MM. Consultar el apéndice A.

La intensidad cuenta con las siguientes características:

- Es un valor sumamente variable y subjetivo pues depende de la calidad empleada en la construcción, el proyecto, el cálculo, el uso, la superficie de la tierra, etc.
- Se asigna
- Está acotada
- Es diferente para cada lugar en un mismo sismo
- Es subjetiva

- Mide el efecto
- Empieza a ser importante en el grado VI de M.M.
- Las intensidades decrecen a medida que nos alejamos del epicentro.
- Las intensidades se utilizan en la regionalización sísmica - -
pues nos permiten realizar mapas de isosistas (líneas de - -
igual intensidad).

Las intensidades que se presentaron en ciudades del interior de la República fueron las siguientes:

Lázaro Cárdenas, Mich.	VIII - IX
Zihuatanejo, Gro.	VII
Ixtapa, Gro.	VII
Acapulco, Gro.	VI
Ciudad Guzmán, Jal.	VIII

En el Distrito Federal la intensidad superó los valores que se podían suponer para un sismo de esa magnitud, alcanzando valores de VI en la periferia del Valle de México, y de VIII-IX en zonas cercanas al centro de la Ciudad. En algunas partes de la colonia Roma se llegó a los X grados.

La magnitud es una medida instrumental bastante independiente de todo criterio subjetivo.

En la práctica se cuenta con varias escalas de magnitud, que se han basado en la medición de varios tipos de onda. La escala original de magnitud fue creada por C.F. Richter en la cual la magnitud se define como el logaritmo decimal de la máxima amplitud registrada a una distancia de 100 km del epicentro,

medida en micras, en un sismógrafo de torsión del tipo Wood-Anderson con determinadas constantes de instrumentación (amortiguamiento igual a 0.8). El error de patrón en la determinación de la magnitud es por lo común de ± 0.3 unidades de escala.

2.7 Aspectos Geológicos de la Ciudad de México

Bosquejo Geológico

La cuenca de México se sitúa en el borde sur de la mesa central entre las latitudes Norte $19^{\circ} 03' 53''$ y $20^{\circ} 14' 55''$ y entre las longitudes $98^{\circ} 11' 53''$ y $99^{\circ} 30' 24''$ al Oeste del meridiano de Greenwich.

Es una cuenca cerrada de forma elipsoidal, cuyo eje mayor es de 110 km en el sentido SO-NE y su eje menor es de 80 km aproximadamente en el sentido O-E.

Esta cuenca conforma una estructura geomorfológica con un parte aguas cerrado que la define como una cuenca endorréica rodeada por todos lados por cadenas montañosas: al Norte por las sierras de Tezontlalpan y Pachuca, al Este por la sierra Nevada, Río Frío y Calpulalpan; al Sur por la sierra de Chichinautzin; al Suroeste por las sierras de Las Cruces y al Noroeste por la de Tepozotlán.

En particular, la cuenca de México se originó a partir de los procesos endógenos por medio de los cuales primeramente se inició un levantamiento regional de los materiales depositados en cuencas oceánicas, y la posterior emisión de enormes volúmenes de materiales volcánicos.

La secuencia de eventos volcánicos frecuentemente accepta da marca su inicio a fines del Eoceno.

Durante el Oligoceno y hasta el Mioceno medio se originó la formación Xochiltepec, la cual está afectada por dos sistemas de fallas, una de Suroeste y otra de Sureste a Noroeste, que -- provocaron fosas y pilares. Este evento está representado por las sierras de Tezontlalpan, de Tepozán y gran parte de las sierras de Guadalupe.

Durante el Mioceno superior continuó formándose la Sie--rra de Guadalupe y se originan la de Pachuca, la de Tepozotlán, y otras que están ligadas a fosas individuales.

En el Plioceno inferior se inició la formación de las -- sierras de las Cruces y Nevada, que son el producto de numero-- sos volcanes, así como fracturas dirigidas esencialmente Oeste-Este en la zona de La Malinche, al Norte de Toluca, -- observándose una deflexión hacia el Suroeste en la parte inter-- media.

El Cuaternario abrió paso a las grandes emisiones volcá-- nicas que constituyeron propiamente a la sierra de Chichinaut-- zin, y que en opinión de la mayoría de los geólogos, cerró defi-- nitivamente la cuenca de México propiciando el depósito de mate-- riales sedimentarios y volcánicos en las zonas dependientes --- abruptas y en áreas lacustres.

Es importante mencionar que la opinión generalizada es -- que durante todo este ciclo evolutivo, el desplazamiento del basamento Cretácico debió continuar, o como alternativa suponer --

un salto muy grande en el evento tectónico original, ya que en áreas cercanas se encuentran rocas sedimentarias del Cretácico superior, a más de 2500 m sobre el nivel del mar mientras que en la perforación del pozo Texcoco No. 1 que se profundizó a 2065 m, lo que sugiere que la Ciudad de México se localiza en una fosa tectónica limitada por dos sistemas de fracturas, tanto al Norte como al Sur.¹¹⁾

La presencia de anhidrita y clásticos que contienen microfósiles en el fondo del pozo Texcoco No. 1, ha permitido definir a Oviedo de León que el pozo alcanzó un conglomerado posterior al Cretácico superior y anterior al Oligoceno superior, mientras que Schlaepfer ha sugerido que parece corresponde al grupo Balsas.

Lo anterior proporciona elementos suficientes para suponer que debajo del paquete de material volcánico deben existir depósitos sedimentarios de origen marino y continental que super yacen a material metamórfico, condiciones que resultan de gran importancia para explicar las características tan especiales del comportamiento sísmico del subsuelo de la cuenca de México.¹²⁾

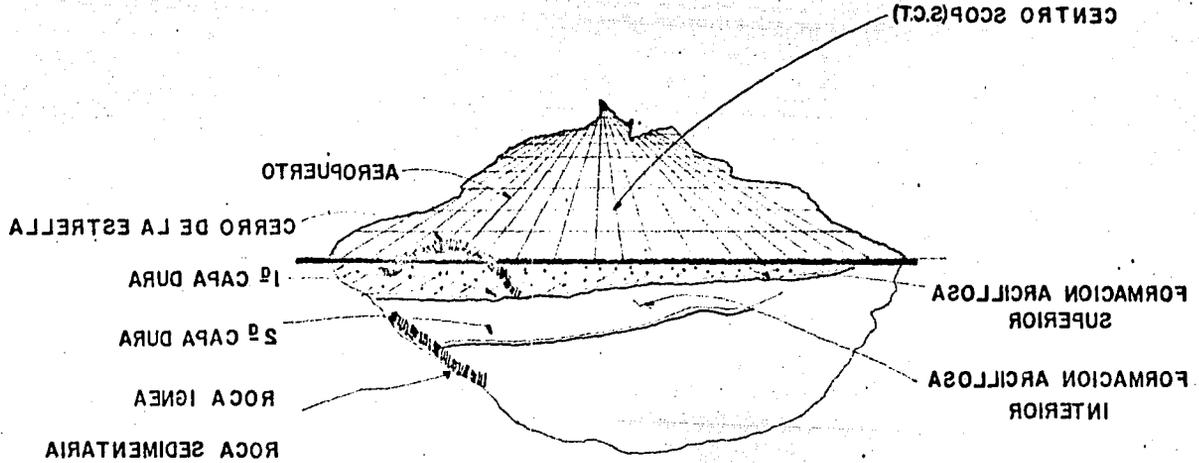
Además por su génesis, los depósitos lacustres tienden a ser homogéneos y a formar estratificaciones de extensión similar al lago que las contiene y de espesores importantes, en los que la homogeneidad, por lo menos relativa, prevalece. En efecto estos depósitos se forman por la lluvia de cenizas volcánicas producto de erupciones; otra parte por aportación de materiales similares acarreados por las corrientes que mueren en el lago. Las

Las arcillas blandas contribuyeron con las capas de arenas volcánicas a proporcionar en las fundaciones arcillosas masivas. Prácticamente todo el material depositado es de origen volcánico. Tal como tal fue con el tiempo y la descomposición química deviene en arcillas intensamente activas.

Lo anterior nos lleva al difícil y mundialmente famoso - subsuelo del centro de la Ciudad de México,¹²⁾ el cual influyó directamente en el comportamiento de las ondas sísmicas. Es va lioso hacer mención pues tiene semejanza con un tazón relleno - de un material gelatinoso, cuya estructura se menciona brevemente a continuación. (Fig. 14).

La mayor parte del centro y oriente de la Ciudad se encuentra asentada en lo que antes era el lecho de un lago. Ver fig. 15. La metrópoli está rodeada por lomas y sierras. Entre el viejo lecho del lago y las lomas, se encuentra una zona de transición. Gran parte de la Ciudad está cimentada en un subsuelo consistente en las siguientes capas:

1. Relleno, que varía de 5 a 10 metros de espesor.
2. Una capa de arcilla blanda, llamada "formación arcillosa superior". El espesor de ésta primera capa de arcilla varía desde sólo unos metros en las afueras de la ciudad, hacia el poniente, hasta unos 30 metros debajo de la parte oriental de la Capital, cercana al centro del antiguo lago.
3. Una capa de arcilla y arena cementada conocida como "primera capa dura", usualmente de uno a dos metros de espesor, - aunque con más de cinco metros de espesor en algunos sitios.



La profundidad desde la superficie a la parte superior varía desde 10 m al poniente hasta más de 30 m hacia el oriente de la Ciudad, cerca del aeropuerto.

4. Una segunda capa de arcilla denominada "formación arcillosa inferior", que varía de 5 a 10 metros de espesor.
5. Depósitos profundos de arena llamados "depósitos profundos", la profundidad desde la superficie hasta la parte inferior de estos depósitos profundos varía desde menos de 20 metros en la parte Suroeste de la Ciudad hasta más de 58 metros en la parte Este.

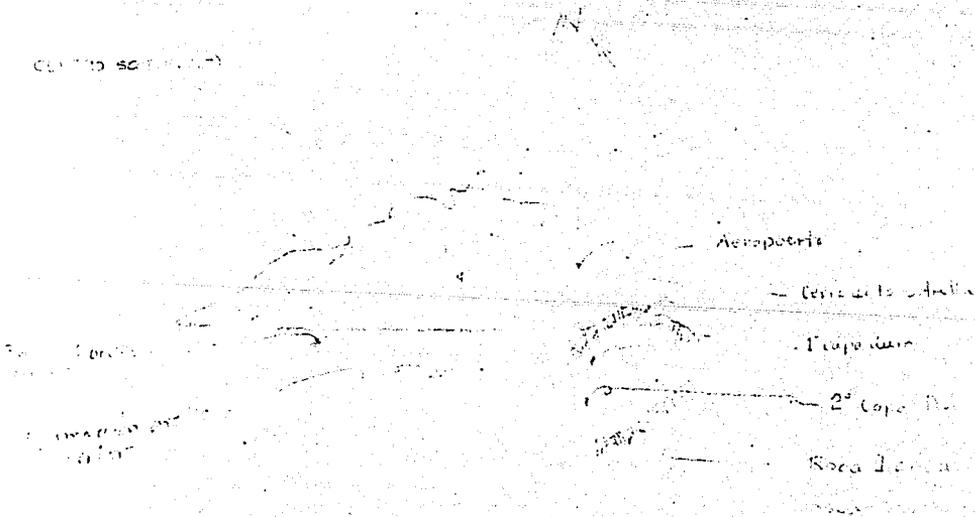


FIG. 14

Observaciones: (text partially obscured)

Fig. 14.

Las profundidades hasta la primera capa dura y hasta los depósitos profundos son importantes, porque influyen significativamente en las características de cimentación y en la respuesta del subsuelo de edificios ubicados en diferentes áreas de la Ciudad de México. Cuando se visualiza el subsuelo de la Ciudad como un tazón de arcilla, la profundidad hasta los depósitos -- profundos corresponde a la profundidad del tazón.

La mayoría de los edificios de altura media y elevada en la Ciudad están cimentados en pilotes que descansan sobre la -- primera capa dura. La profundidad hasta dicha capa es, por lo tanto, un factor importante para determinar las características vibratorias de las cimentaciones de los edificios.

CAPITULO III

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

El 14 de Marzo de 1979 ocurrió un sismo en la Ciudad de México de una magnitud, en la escala de Richter, igual a $M_s = 7.6$. Dicho sismo no rebasó el espectro de respuesta del RCDF.¹⁾ Debido a que las estructuras presentaron un comportamiento adecuado por lo que se pensó que el RCDF era conservador en algunas partes, por ejemplo, en los coeficientes sísmicos existió la tendencia a que fueran disminuidos. Fig. 3.1

Fig. 3.1

El terremoto del 19 de Septiembre vino a crear una mayor conciencia del RCDF no estaba excedido en fuerza sísmica, como se creía, pues el sismo de diseño que se había previsto en el RCDF fue superado ampliamente por el terremoto, al no conocerse

registros de sismos anteriores similares a él, y a sus características excepcionales:

- Gran magnitud $M_s = 8.1$.
- Diferentes intensidades en la zona del lago.
- La distancia del epicentro al área de desastre fue aproximadamente de 400 km.
- Las ondas sísmicas al llegar al Valle de México, fueron amplificadas y filtradas por los estratos arcillosos - - creando un movimiento rítmico casi senoidal en el suelo.
- Con una duración en su fase intensa de 40 seg. según el registro de SCT.
- Con aceleraciones máximas en el suelo del orden del 20% de g.
- Periodos de vibración del suelo próximo a los dos seg. - semejantes a los periodos del sismo, favoreciendo así el efecto de resonancia en estructuras con periodos similares.

Por lo anterior no es motivo de asombro, la cantidad y nivel de los daños, para la descomunal fuerza del movimiento, lo realmente insólito es que no se hayan destruido más edificaciones en la zona del lago.

Descripción de los sistemas estructurales.

Para explicar el comportamiento estructural, podemos clasificar y describir a las estructuras básicamente en seis sistemas estructurales: 2)

- Tipo 1, Estructuras de mampostería antiguas;
- Tipo 2, Estructuras de mampostería modernas;
- Tipo 3, Estructuras esqueléticas de losa maciza;
- Tipo 4, Estructuras esqueléticas de losa reticular;
- Tipo 5, Estructuras esqueléticas de losa maciza con -- elementos rigidizantes;
- Tipo 6, Estructuras esqueléticas de losa reticular con elementos rigidizantes.

Tipo 1, Estructuras de mampostería antiguas. La mampostería está constituida por elementos de adobe, tabique y piedra. Estructurada a base de muros de carga de espesores considerables (algunas veces hasta de un metro) con sistemas de piso formados por vigas de madera o acero sobre las que se apoyan bóvedas catalanas de ladrillo o tablones de madera o a base de piedra, este sistema se usa en construcciones de uno a tres niveles.

Estas estructuras presentan problemas de comportamiento estructural, frente a cargas laterales ocasionadas por: falta de confinamiento por elementos estructurales, escaso mantenimiento, agrietamientos producidos por hundimientos diferenciales y/o sistemas anteriores, carecer de un diafragma rígido en la parte superior de los muros que distribuya la fuerza sísmica a los distintos muros orientados en dos direcciones perpendiculares. Algunas veces se realizan remodelaciones en las que se cambia de lugar a los muros o se quitan creando discontinuidades en resistencia y rigidez. Estas estructuras se han empleado en templos y edificios coloniales (algunas de ellas con varios cientos de años) residencias, edificios comerciales, por lo general de tres pisos. Fig. 3.2.

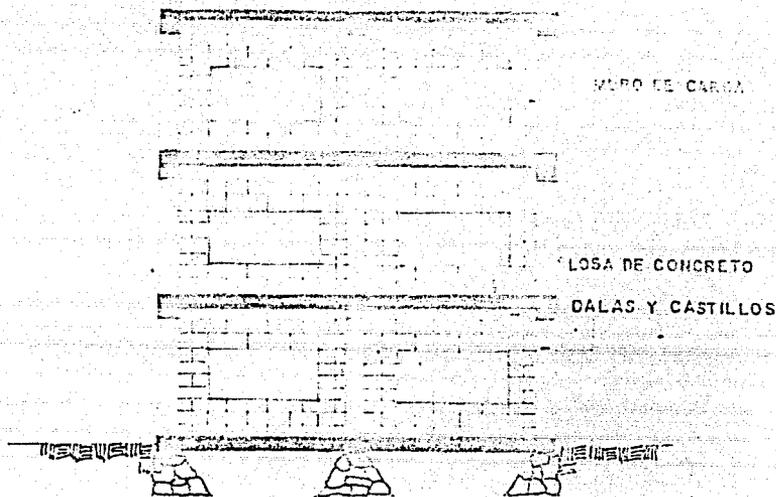


Fig. 3.2 Modelo de una estructuración antigua realizada en mampostería. Tomado de Del Valle, C.E., Comportamiento de las estructuras, Revista Mexicana de la Construcción No. 347, p. 38.

Tipo 2, Estructuras de mampostería modernas. Los muros de carga tienen espesores más delgados, reforzados con elementos verticales (castillos) y horizontales (viqas y dalas) de concreto reforzado confinando a la mampostería y mejorando el comportamiento bajo acciones sísmicas y hundimientos diferenciales. Con sistemas de piso de concreto reforzado colado en sitio, trabajando como un diafragma rígido que transmite efectos sísmicos a los muros, si se utilizan elementos prefabricados como sistema de piso se coloca un firme en algunos casos reforzado con malla de acero lo que ayuda a un mejor comportamiento; esta estructuración se utiliza para la vivienda unifamiliar, en el caso de edificios es multifamiliar, el número máximo de niveles es cercano a los ocho pisos.

Las estructuras de mampostería presentan ventajas y desventajas. Una ventaja importante es que al emplear muros de carga se tienen varios usos a la vez, sirve para subdividir los espacios, dar aislamiento, como elemento decorativo y función estructural.

Además es de fácil instalación, no requiere de equipo costoso, la mano de obra no es especializada.

Las desventajas son, la falta de flexibilidad en las subdivisiones, no se cuenta con un adecuado control de calidad tanto en los materiales como en el proceso constructivo, "baja resistencia en tensión y la fragilidad ante deformaciones en su plano que obligan al empleo de refuerzo y limitan su aplicación en zonas sísmicas".

Los tipos uno y dos tienen una gran densidad de muros en ambas direcciones y continuos en elevación. Son bastante rígidos siendo sus periodos de vibración relativamente cortos por lo que su respuesta dinámica fue moderada, en la zona del lago hubo algunas excepciones como el barrio de Tepito y zonas aledañas las cuales no tenían mantenimiento, encontrándose muy deterioradas sin resistencia frente a sismos. Fig. 3.3. "En general estas edificaciones sufrieron pocos daños. Esto pudo deberse no tanto a su integridad estructural, sino al hecho de que sus periodos fundamentales de vibración fueron más cortos que los periodos característicos de los movimientos del suelo de la zona del lago".³⁾

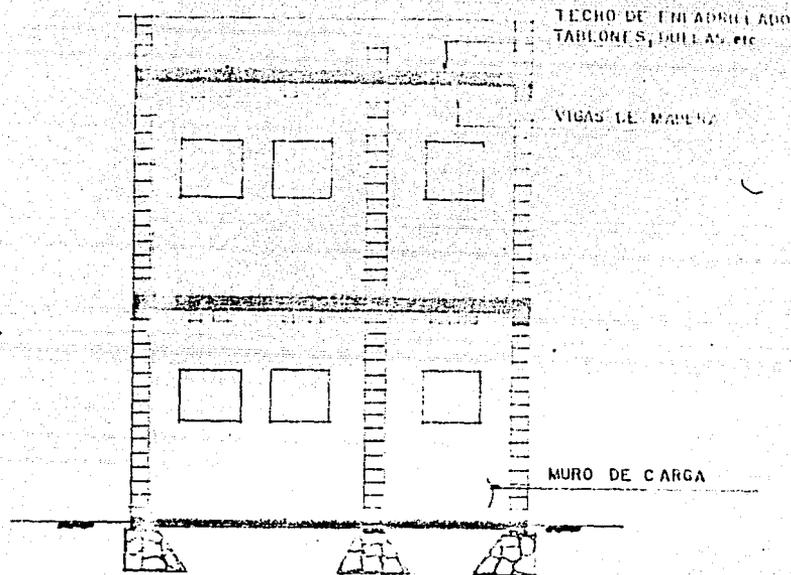


Fig. 3.3 Ejemplo de una estructura de mampostería moderna.

Tipo 3, Estructuras esqueléticas de losa maciza. Este sistema consta de columnas y trabes peraltadas de concreto reforzado o de acero formando marcos rígidos, el sistema de piso puede ser: losa maciza perimetralmente apoyada, de 8 a 15 cm. de espesor de concreto reforzado; elementos prefabricados con malla de acero y firmes y el sistema de viqueta y bovedilla; algunas veces con vigas secundarias. Existen pocas estructuras de acero, por lo general utilizadas cuando se requieren alturas mayores. Su elevada flexibilidad lateral tiende a colocarlos en un periodo que los hace susceptibles a fuerzas de inercia elevadas, una de las fallas más graves que causó el sismo comprendía un edificio con marcos de

acero. Estos edificios se emplean para estacionamientos y comercios en los primeros niveles, los pisos restantes se utilizan como oficinas y vivienda. El número de niveles es de tres hasta más de cuarenta. Fig. 3.4.

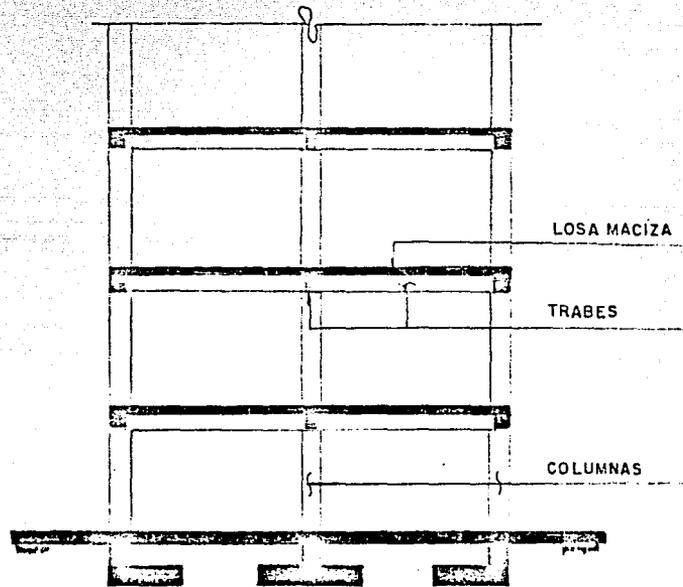


Fig. 3.4 Estructura esquelética con losa maciza.

Tipo 4, Estructuras esqueléticas de losa reticular. Formadas por un sistema de piso, que es bastante común en el cual las trabes se encuentran dentro del espesor de la losa de concreto reforzado, formando retículas en donde quedan ciertos huecos: por lo que también se les denominan losas aligeradas, de nervaduras, tipo wafle, etc. Están apoyadas sobre columnas de concreto reforzado o acero. Se emplea ábaco y capitel en ocasiones. Este sistema se ha utilizado en estructuras hasta 20 niveles de altura

con los muros distintos al tipo 3. Ver Fig. 3.5.

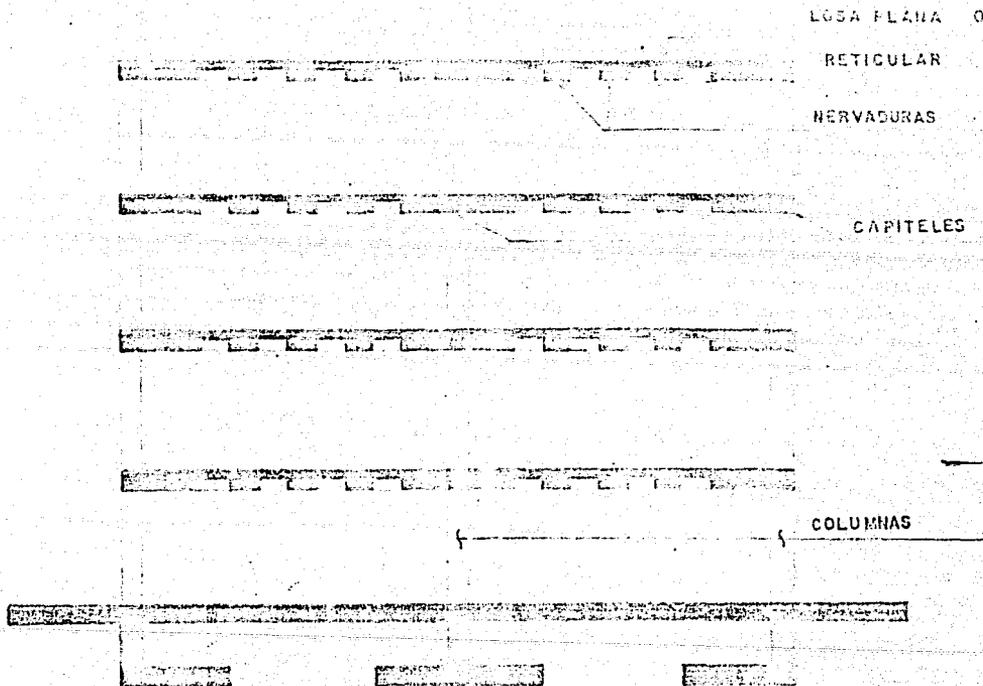


Fig. 3.5 Modelo típico de una estructura esquelética con losa reticular.

Disponer de espacios cada vez más amplios en los pisos; - hacer modificaciones en la distribución según convenga a las necesidades del usuario sin tener muros de carga fijos; y la facilidad en el proceso constructivo son algunas de las ventajas que popularizaron la edificación de estructuras del tipo 3 y 4. Además

la optimización de las áreas útiles en planta ha conducido a que la distancia entre columnas aumente de 3 a 4 metros en edificios antiguos a más de 10 en la actualidad. Lo que produce una disminución en la cantidad de columnas que debe ser compensada con aumentos en el peralte de las trabes como sucede en el tipo tres. Esto no acontece en el tipo 4, pues se tienen alturas máximas alrededor de 50 cm. resultando momentos de inercia pequeños, en consecuencia la rigidez lateral disminuye y durante temblores de mediana intensidad se forman grietas diagonales en muros divisionarios y de colindancia los cuales no fueron tomados en cuenta tanto al realizar el análisis como el diseño, pero durante el movimiento sísmico trahen en forma estructural al no dejar holguras necesarias, o el material que se coloca de relleno en la junta se endurece, con el paso del tiempo el muro se vuelve parte del marco, y cuando tiembla la estructura esquelética empuja al muro que es más rígido y menos dúctil que el marco, atrayendo sobre sí mismo más fuerza provocándole daños. Cuando la distribución de muros no es simétrica ni -- continua en planta y elevación, se añaden problemas por torsión o fallas de piso suave (esto se trata en el siguiente capítulo).

Los tipos 3 y 4 fueron los más afectados por el sismo. Ya que en muchos casos se tuvieron similares periodos de vibración - sismo-suelo-estructura.

Los tipos 5 y 6 son parecidos a los dos anteriores, si -- agregamos a ellos elementos de rigidez adicionales diagonales de contraventeo de concreto reforzado o acero y muros de rigidez de mampostería o concreto reforzado, ubicados en algunas crujeas, -

cuya existencia es tomada en cuenta en el análisis. La estructura es menos sensible a la presencia y colaboración de muros divisorios. Pocos edificios, con estos sistemas estructurales presentan daños. Fig. 3.6 y 3.7.

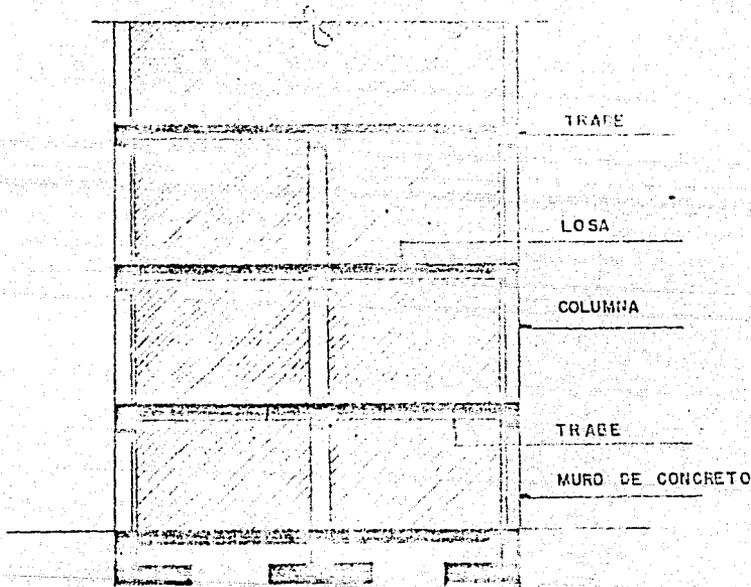


Fig. 3.6 Estructura esquelética con losa maciza y elementos rigidizantes. Tomado de Del Valle, C., Enrique "Comportamiento de las Estructuras", Revista Mexicana de la Construcción No. 374 p. 38.

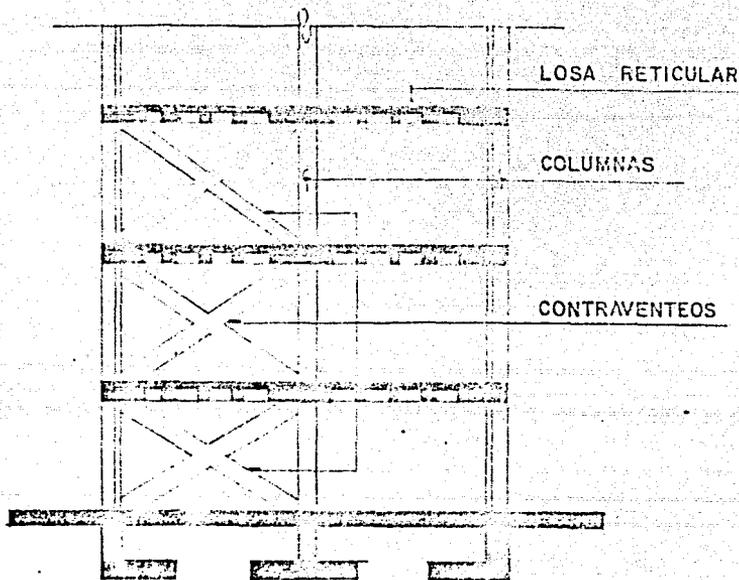


Fig. 3.7 Estructura esquelética con losa reticular y elementos rigidizantes.

Resonancia en Estructuras

Una de las mayores desgracias durante un terremoto es la pérdida instantánea de la estabilidad en una estructura, pues se pone en peligro la vida humana.

Por desgracia esto sucedió en el sismo del 19 de Septiembre. Entender las causas que produjeron tales colapsos y poner en práctica soluciones es prioritario para la tranquilidad y seguridad de la sociedad.

Aparentemente la causa fundamental de la caída total o parcial de muchas edificaciones de 6 a más de 15 niveles puede atribuirse a un fenómeno físico llamado "Resonancia". Este fenómeno

se explica con el siguiente modelo: "cuando un sistema capaz de oscilar, está accionado por una serie periódica de impulsos que tengan una frecuencia igual o cercana a una de las frecuencias naturales de vibración del sistema, este sistema empezará a oscilar con una amplitud relativamente grande.⁴⁾ Ejemplo: como un sistema oscilante utilizaremos un columpio o péndulo⁵⁾ ocupado por una señora que pese 100 kilos que será impulsado periódicamente, los pequeños impulsos serán realizados por un niño de unos 6 años que inicialmente empezará a mecer con gran dificultad.

Si se deja que el péndulo vaya y vuelva o sea, se complete un ciclo, y nuevamente empuja el péndulo con una frecuencia apropiada, se desplazará distancias mayores con menos esfuerzo por parte del niño que ha sincronizado sus esfuerzos con los movimientos del columpio. Se dice que el péndulo ha entrado en resonancia. Figs. 8 y 9.

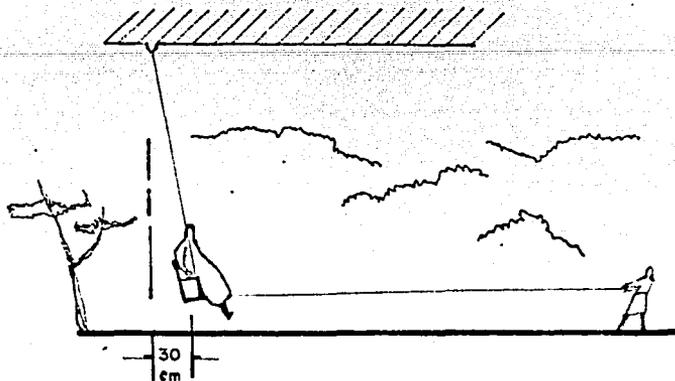


Fig. 8

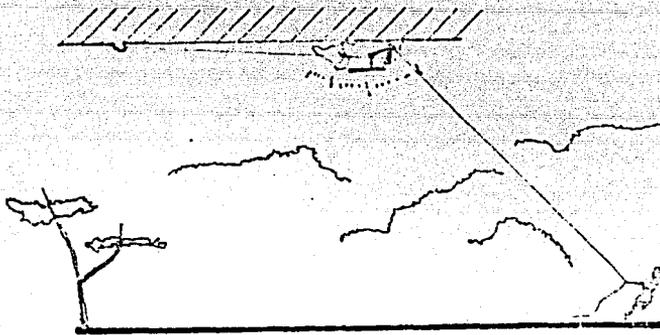


Fig. 9 -

Los movimientos cercanos al epicentro eran rápidos, cortos e irregulares (ver registro de acelerograma, Fig.). Cuando el tren de ondas sísmicas atraviesa las arcillas de la zona del lago, las ondas son filtradas, amplificadas, transformándose paulativamente en un movimiento que crece en forma suave y rítmica -- (Ver registro del acelerograma de SCT, Fig.). volviéndose armónico con un periodo dominante de dos segundos. Para algunas zonas del lago la presencia de contenidos de agua y tamaño de espesores predispone a las arcillas a vibrar en forma excesiva, entrando en resonancia. Estas primeras aceleraciones causan daños iniciales en estructuras esqueléticas (sobre todo para los tipos 3 y 4) de 6 a 20 niveles. La mayoría de edificios iguales o mayores a 20 niveles, con daños iniciales o sin ellos, se salen de la "condición de resonancia" pues su periodo de vibración aumentó, dejando de coincidir con los movimientos del suelo. No pasa lo mismo con las estructuras esqueléticas de 6 a 20 niveles pues los daños se incrementan, mientras la resistencia y rigidez dis-

mínuyen aumentando su periodo de vibración, se producen grandes desplazamientos laterales originados al chocar con edificios vecinos, la pérdida de resistencia y rigidez es mayor, en consecuencia se extienden los daños provocando desplazamientos excesivos (efecto P Δ , Chicoteo en plantas superiores) resultando así el colapso en menos de un minuto. Ver figura 3.10

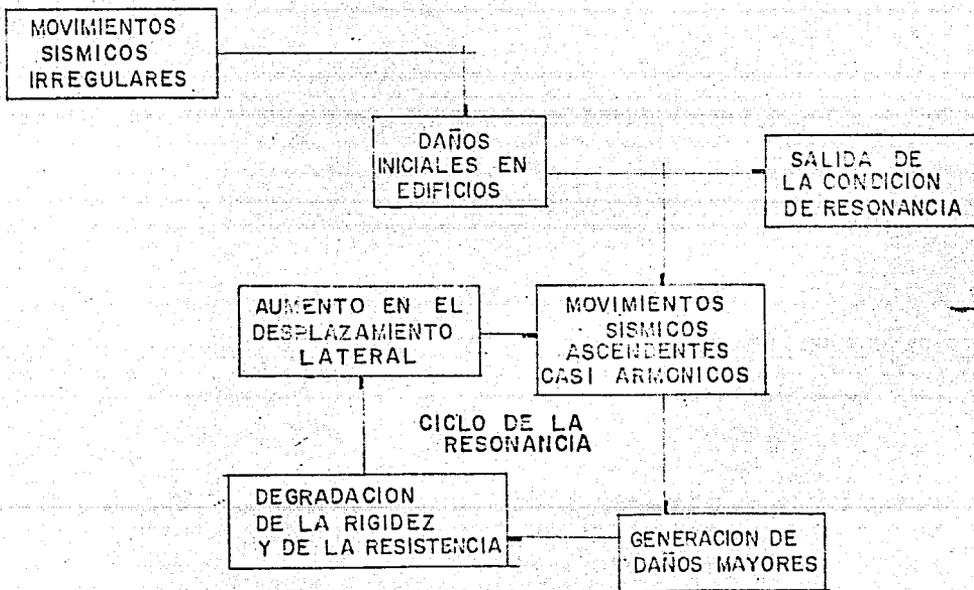


Fig. 3.10 Mecanismo de la respuesta estructural.

3.8 ESTADÍSTICAS DE DISTRIBUCIÓN Y NIVEL DE DAÑOS

Una de las áreas con mayor densidad de población en el mundo es el área metropolitana de la Ciudad de México, con un millón de edificaciones, aproximadamente, de las cuales un reducido número fue dañado en forma considerable.

Los sitios donde se localizan los mayores deterioros, abarcan una superficie de 27 Km^2 que coincide con las áreas dañadas por los sismos del 28 de julio de 1957 y el 14 de marzo de 1979, Ver fig. 3.11.

En el estudio estadístico se ha recurrido a dos informes, uno realizado por el Instituto de Ingeniería y el otro por el grupo ICA. Ambos trabajos aportan una evaluación cuantitativa de daños estructurales, de una manera limitada se describen los problemas del suelo y en las cimentaciones. Los informes difieren en; criterios de evaluación, áreas estudiadas, clasificación de daños y números de niveles.

En el informe del grupo ICA⁶⁾ la zona afectada de la Ciudad de México fue "sectorizada" y está delimitada al norte y al poniente por el Circuito Interior, hacia el sur por la avenida División del Norte y avenida Eugenia, y hacia el oriente por la Calzada de la Viga. La zona fue dividida en 10 sectores, que ocupan una superficie de 43 km^2 de los 1100 km^2 con que cuenta el área metropolitana.

En esta evaluación se distinguieron 3 niveles de daños; -- colapso total, colapso parcial y daño estructural grave. Ver Tabla 3.1.

El levantamiento de daños se realizó dentro de la zona -- "sectorizada". En los sectores del 1 al 4 se concentró el 86% -- del total de las averías.

Se reportaron 757 casos de fallas estructurales, de los -- cuales 133 correspondieron a colapso total (18% del total), 357 se adjudicaron al colapso parcial (47% del total) y 271 fueron daños graves (35% del total); la suma de estos casos representan el 1.4% del número total de edificaciones existentes en la zona afectada, ya que se registraron 53,358 edificaciones existentes, Ver tabla 3.1.

TABLA 3.1. ESTADO DE LOS EDIFICIOS													
TIPO DE DAÑO	S E C T O R E S												EDIFICIOS EXISTENTES
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	SUMA	%	
COLAPSO TOTAL	24	24	20	46	3	5	1	-	1	7	133	18	0.28%
COLAPSO PARCIAL	59	102	106	41	6	28	-	4	2	5	353	47	0.65%
DAÑOS GRAVES	31	39	99	57	3	21	1	-	2	18	271	35	0.49%
SUMA	114	165	225	146	12	54	2	4	5	30	757	100	1.4%
	650 86%												

Con relación al número de niveles se puede comentar que en las casas habitacionales hasta de dos niveles, presentaron problemas 346 casos de un total de 37,484 lo que representa el 1.0%, el elevado número de casas dañadas se debe al interperismo y a la falta de mantenimiento; de 3 a 5 niveles fallaron 179 de un total de 13,498 dando un porcentaje de 1.3%; de 6 a 8 presentaron problemas 136 de un total de 1,616 que arroja el 8.4%; del 9 al 12 se tuvieron 72 edificios averiados de un total de 531 que dan el porcentaje más alto 13.5%; las edificaciones mayores de 12 pisos con daños fueron 24 de un total de 229 que representa el 10.4%.

Se puede asegurar que las estructuras de periodos de vibración similares al del suelo mostraron mayores daños. Ver Tabla 3.2

TABLA 3.2 ALTURA DE LOS EDIFICIOS													
NUMERO DE NIVELES	S E C T O R E S											EDIFICIOS EMISORES DE DAÑOS	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	SUMA		
HASTA 2 (HABITAC.)	13	111	128	35	1	44		2		12	346	46	37 484 1.0
DE 3 A 5	30	24	61	44	5	8		1		6	179	24	13 498 1.3
DE 6 A 8	38	18	18	47	3	2		1	1	8	136	18	1 616 8.4
DE 9 A 12	26	6	12	18	3				3	4	72	9	531 13.5
MAS DE 12	7	6	6	2			2		1		24	3	229 10.4
S U M A	114	165	225	146	12	54	2	4	5	30	757	100	53 356 1.4

Según el tipo de estructuración tenemos los siguientes datos, para las estructuras de mampostería con un total de 43,038 - se reportaron averiadas 393 lo que da un porcentaje del 1%. En estructuras esqueléticas con losa reticular se presentaron con daños 125 de un total de 2,127 lo cual da 6%; en las estructuras esqueléticas con losa maciza de un total de 8,038 mostraron problemas 236 obteniendo un 3% y las estructuras rigidizadas con muros de concreto tuvieron problemas 3 de 155 con un porcentaje del 2%.

En general se observa que los sistemas estructurales con un mejor comportamiento fueron los de mampostería y estructuras rigidizadas.

El peor sistema fueron las estructuras esqueléticas con lasas reticulares. Ver Tabla 3.3.

TABLA 3.3. RESUMEN DE DAÑOS									
SISTEMA ESTRUCTURAL	NUMERO DE NIVELES						TOTAL	ESTRUCTURAS DAÑADAS	%
	1 a 2	3 a 5	6 a 8	9 a 12	más 12				
ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA	35 115	7 731	165	21	6	43 038	393	1	
COLUMNAS E ESQ CON LOSA MACIZA, TRAVES	1 961	4 764	966	265	82	8 038	236	3	
E ESQUELETRICAS CON LOSA RETICULAR	384	943	462	231	107	2 127	125	6	
CON MUROS DE CONCRETO	24	60	23	14	34	155	3	2	
T O T A L E S	37 484	13 498	1 616	531	229	53 358			
ESTRUCTURAS DAÑADAS	346	179	136	72	24		757		
%	1	1.3	8.4	13.5	10.4		1.4		

En la evaluación realizada por el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.,⁷⁾ que abarcó una superficie con alta densidad de daños de aproximadamente 27 Km² dividida en 17 zonas, se distinguieron los siguientes niveles de daño:

- 1) Colapso total o parcial; se incluye daños inducidos por la falla de edificios adyacentes, no se incluyen fallas en estructuras pequeñas constituidas por materiales deficientes y deteriorados.
- 2) Daño grave; incluye edificios con fallas en columnas, con distorsiones importantes en los entrepisos y con inclinaciones graves.

Se considera que la información estadística es completa para colapso total o parcial y daño grave.

- 3) Daño estructural intermedio; incluye fallas locales en columnas y vigas que representan en general una pérdida significativa de capacidad de los elementos.
- 4) Daños menores; incluye agrietamientos de abertura pequeña y daños locales. La recopilación estadística en el caso anterior y en este fue muy limitada pues estos tipos de daños no son detectables y se pasan desapercibidos.

Para entender las fallas en las construcciones en forma global se analizan las características que influyeron en el comportamiento estructural, como son, sistema estructural, tipo de daño, año de construcción, número de pisos y tipo de suelo. Existen otras características que también fueron decisivas las cuales serán tratadas posteriormente.

En base a su estructuración se distinguieron los siguientes sistemas estructurales; *estructuras de mampostería* aunque son las estructuras más abundantes, su reducido número de pisos y su gran rigidez hacen que se encuentre en el intervalo de periodos de vibración cortos por lo que presentaron menos daños de lo que podía esperarse.

Dentro de las estructuras esqueléticas se tienen; las formadas por marcos de concreto, las estructuras a base de columnas metálicas y vigas de perfiles laminados o de alma abierta de acero, y las formadas por columnas con losas reticulares. En esta subdivisión existe gran densidad de muros de mampostería de diferentes calidades lo que modifica su rigidez.

El número de estructuras rigidizadas con muros de concreto dañado ha sido pequeño, además existen pocos edificios en la zona afectada.

Con base en los datos estadísticos proporcionados por la Tabla 3.4 se resume lo siguiente:

Las estructuras de mampostería presentaron un comportamiento adecuado y el número de daños fue relativamente bajo, debido a sus características como: alta densidad, elevación reducida y gran rigidez, causan que se encuentren en el intervalo del espectro de respuestas estructurales bajas.

En los tres tipos de estructuras esqueléticas analizadas encontramos una gran densidad de muros de mampostería de diferentes calidades que modificaron la rigidez de estas estructuras.

En las estructuras formadas por marcos de acero presentaron pocas fallas, se trató de construcciones bajas y antiguas con conexiones inadecuadas entre vigas y columnas. Cuatro casos de colapsos corresponden a estructuras modernas.

El porcentaje más elevado de fallas se presentó en las estructuras esqueléticas de concreto, siendo mayores en los edificios con losa reticular, del censo de construcciones existentes mencionado.

En la tabla 3.4 notamos que ocurrieron mayores daños en los sistemas estructurales con losa reticular sobretodo para las fechas de construcción que van de 1957 a 1976, esto indica posiblemente su popularidad por su facilidad en proyecto y construcción con los otros sistemas.

Con respecto a la fecha de construcción se escogieron tres intervalos correspondientes a los periodos de vigencia de los reglamentos de construcciones de la ciudad. Antes de 1957 puede considerarse que no existía una reglamentación racional relativa al diseño sísmico; entre 1958 y 1976 estuvieron vigentes las normas de emergencia y el reglamento subsecuente que contenían requisitos detallados de diseño sísmico. En esa última fecha entró en vigor el reglamento actual, que contiene modificaciones sustanciales.

Para interpretar la distribución anterior hay que tomar en cuenta que la menor densidad de daños en algunas zonas puede deberse a que el número de construcciones del tipo más afectado por el sismo era reducida y no necesariamente a que la intensi-

dad del movimiento fuese menor.

Sobre el número de pisos se observa que las edificaciones menores a 5 niveles presentan los menores daños a pesar de que representan el 95% del total de las construcciones dañadas. Esto se explica debido a que en su diseño rigen las cargas verticales, se utilizan factores de seguridad elevados, cuentan con gran densidad de muros y sus periodos de vibración fueron menores al del suelo.

Por lo que toca a las construcciones mayores de 15 niveles mostraron un comportamiento aceptable, debido a que sus periodos de vibración fueron mayores al movimiento en el suelo -- donde están desplantadas.

Los edificios entre 5 y 15 niveles dieron una respuesta -- más fuerte, ante la excitación sísmica, pues sus periodos de vibración eran similares a los del suelo y al originarse daños -- disminuyeron su rigidez, aumentando sus desplazamientos y en la mayoría de los casos entraron en resonancia.

Es posible que el número relativamente bajo de fallas de edificios posteriores a 1976 refleje una mejora de la calidad de la construcción, mientras que el número también relativamente bajo de fallas de edificaciones anteriores a 1957 se deba a que pocos fueron los edificios altos construídos antes de esa -- fecha.

TABLA 3.4 CARACTERISTICAS DE LAS CONSTRUCCIONES DAÑADAS

SISTEMA ESTRUCTURAL	TIPO DE DAÑO	AÑO DE CONSTRUCCION			Nº. DE PISOS				TOTAL
		<1957	57 - 76	>1976	≤ 5	6-10	11-15	>15	
Estructuras de -- Mampostería Anti- guas y Modernas	Colapso	6	5	2	11	2	0	0	13
	Grave	9	13	1	22	1	0	0	23
Estructuras Esque- léticas de Marcos de Concreto	Colapso	27	51	4	27	46	8	1	82
	Grave	16	23	6	10	28	6	1	45
Estructuras Esque- léticas con Losa Reticular	Colapso	8	62	21	36	49	5	1	91
	Grave	4	22	18	5	26	12	1	44
Estructuras Esque- léticas de Marcos de Acero	Colapso	7	3	0	4	3	1	2	10
	Grave	1	1	0	0	0	2	0	2
O t r o s	Colapso	4	8	2	12	2	0	0	14
	Grave	0	4	2	2	4	0	0	6
T o t a l	Colapso y Daños Graves	82	192	56	129	161	34	6	330

El Instituto de Ingeniería realizó un interesante trabajo sobre los porcentajes de casos en que se observaron fallas características como:

Edificio de esquina	42%
Falla en pisos intermedios	40%
Falla en pisos superiores	38%
Choque con edificios cercanos	15%
Asimetría notable de rigidez	15%
Problemas de cimentación	13%
Sobrecarga excesiva	9%
Primer piso flexible	8%
Daños previos por sismo	5%
Punzonamiento de losas reticulares	4%
Columnas cortas	3%
Hundimientos diferenciales previos	2%

NOTAS BIBLIOGRAFICAS
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

1. Del Valle, Calderón E. "Apuntes de la materia de Ingeniería Sísmica I de la División de Estudios de Posgrado". Facultad de Ingeniería. UNAM. 1987.
2. Del Valle, Calderón E. "Comportamiento de las estructuras". en: *Revista Mexicana de la Construcción* No. 374, Diciembre 1985, Pag. 37.
3. International Masonry Institute (IMI). *Report of Mexican - - (Earthquake of September, 19, 1985) IMCYC*. p. 67.
4. Resnick, R. y Halliday D. *Física*. Compañía Editorial Continental, p. 213, 335, 336, 439, 441, 445, 456, 457, 459.
5. Creixell, M. J. *Construcciones Antisísmicas*. CECSA, p. 31.
6. Del Valle, Calderón E. *et. al.* "Estadísticas de los daños - causados por el sismo del 19 de septiembre de 1985 en la -- Ciudad de México". I.C.A. Pag. A7-01-03, 5° Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Veracruz, Ver. 1986.
7. Instituto de Ingeniería UNAM. "Informe Preliminar", México, 1986.

ANALISIS DE DAÑOS OBSERVADOS

El estudio de los efectos del terremoto in situ sobre las construcciones brinda una singular oportunidad conocer a fondo - los mecanismos reales de falla, para encontrar una solución.

Está fuera del alcance de la presente tesis, el describir en su totalidad el gran número de fallas y los complejos mecanismos que las generaron en cada caso. Sin embargo se intenta mostrar los casos más frecuentes, así como, sus posibles orígenes.

5.1 Irregularidades en geometría, resistencia y rigidez tanto en planta como en elevación.

En la observación del comportamiento sísmico en la mayoría de los casos se notó que las variaciones en las formas geométricas interiores y de colindancia, así como, los cambios de resistencia y rigidez, originaron esfuerzos torsionales, cortantes y flexocompresionales que influyeron decididamente en el colapso total o en los daños estructurales graves.

Dentro de estos daños podemos citar; importantes torsiones en los edificios de equina, piso suave, daños en pisos intermedios y superiores, fallas de columnas y discontinuidades en elevación de muros.

5.1.1 Aspectos arquitectónicos

El patrimonio arquitectónico y cultural de la Ciudad de México sufrió la pérdida de varios inmuebles¹⁾, que de alguna manera representaban momentos interesantes en la historia de la ciudad, entre ellos; el hotel Regis, el Centro SCOP, el centro urbano Presidente Juárez, las secretarías de Comercio y Fomento Industrial y la del Trabajo y Previsión Social, el edificio Nuevo León y algunos otros más del conjunto habitacional Nonoalco-Tlatelolco, el Centro Médico Nacional y el Hospital Juárez.

La arquitectura colonial del centro histórico mostró un buen comportamiento excepto, viejas casonas convertidas en vecindades de renta congelada sin mantenimiento. La arquitectura religiosa no sufrió desperfectos de importancia.

La arquitectura y la ingeniería sísmo-resistente deben trabajar unidas para lograr espacios interiores, para la realización de actividades humanas bajo condiciones de bienestar, funcionalidad, economía y seguridad razonable. El sismo del 19 de septiembre evidenció la desvinculación entre ambas ramas; por ejemplo, en algunas ocasiones el arquitecto se encarga de proyectar soluciones a las necesidades humanas y estéticas relegando la seguridad estructural al ingeniero, una vez que el proyecto arquitectónico está terminado y sin la posibilidad de hacer cambios importantes, que, de haberse realizado en un principio redundarían en mayor seguridad para la sociedad. El resultado de esta falta de comunicación entre ambos gremios contribuyó en algunos casos a la falla de edificios. Por ejemplo, el diseño de las uniones --

trabes-columnas fuera de los sistemas de piso, como se aprecia en la fotografía 5.1 la transmisión de las cargas a las columnas se realiza por medio de trabes que salen del sistema de piso, estos elementos aumentan su rigidez, careciendo de resistencia y ductilidad necesaria para soportar adecuadamente las fuerzas sísmicas.

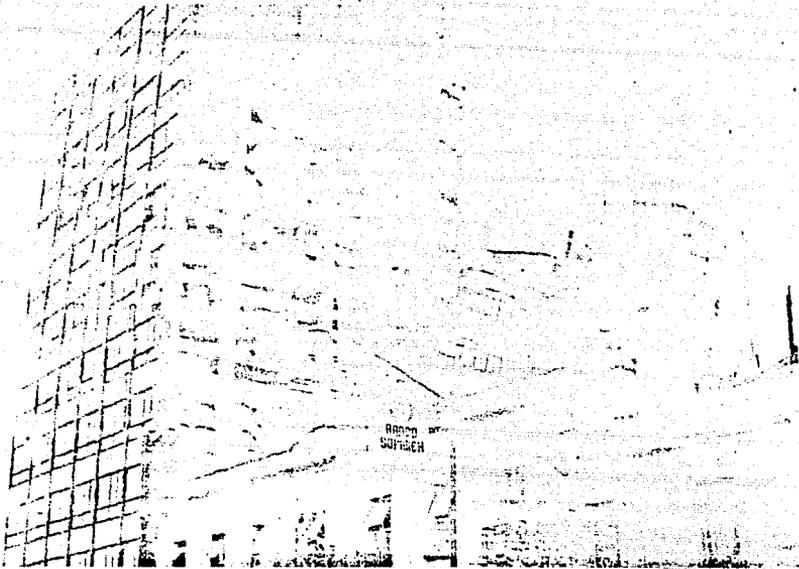
Fotografía 5.1 Daños por esfuerzos cortantes en las trabes ocasionados por torsión.

Las irregularidades en planta causaron algunos daños importantes en las estructuras, tal es el caso de edificios en esquina con grandes claros para iluminar las fachadas, de los ubicados -- en cuchillas, o con planta triangulares en "L", pues sujetan a la estructura a efectos torsionales. También el uso en plantas bajas de áreas libres de muros de carga o de relleno, por necesidades arquitectónicas.

5.1.2 Edificios en esquina

El grupo de los edificios en esquina presentó el mayor porcentaje de daños sufridos en los sismos de Septiembre (el 42% de los casos observados en daños graves según el informe del Instituto de Ingeniería).

En general los problemas que presentan obedecen a sus características de colindancia, se requiere que los lados adyacentes a las construcciones vecinas sean cerrados y aislen a la estructura del intemperismo. Los lados con vista a la calle proporcionan luz y ventilación natural, además dan belleza a las fachadas. (Fot. 5.2)



Fotografía 5.2 Se observa la destrucción de algunos muros de colindancia debido a la torsión en planta del edificio en esquina; al fondo se nota otra estructura con un gran desplome producido por el colapso de un piso intermedio.

Para comprender el efecto de torsión en edificios, es necesario definir centro de masa y de rigidez.²⁾ El centro de masa (C.M.) es un punto teórico en planta donde se concentra la masa del modelo estructural. El centro de rigidez (C.R.) es el punto teórico en planta donde se concentra la distribución de la rigidez. Si suponemos que bajo acciones sísmicas la estructura se comportará siempre en el intervalo elástico, las rigideces de los elementos no cambiarán durante la excitación, por lo tanto la posición del centro de rigidez no se alterará, entonces podemos idealizar la estructura como un modelo formado por un solo elemento resistente ubicado en el centro de rigidez, con rigidez

casos tales que se producen las mismas fuerzas restitutivas que en el caso real.

Al coincidir los centros de masa y rigidez se tiene un edificio que, si es excitado por un movimiento de traslación en la base, las fuerzas inerciales generadas en la masa coinciden en posición y dirección con las restitutivas y no es necesario la aparición de fuerzas adicionales para satisfacer el equilibrio. (Fig. 5.1)

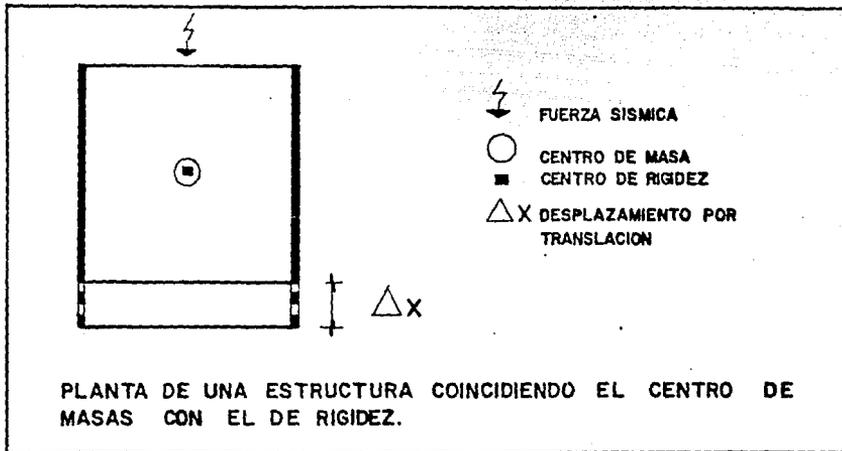


Fig. 5.1

Se presenta el problema de torsión, cuando se somete la base a un movimiento de traslación y no coinciden los centros de masa y rigidez, generándose un par en función de la excentricidad o distancia entre los centros mencionados, que produce rotaciones alrededor de un eje perpendicular al plano del diafragma de la -

estructura, las rotaciones hacen que se presenten grandes deformaciones sobre algunos elementos resistentes. Fig. 5.2.

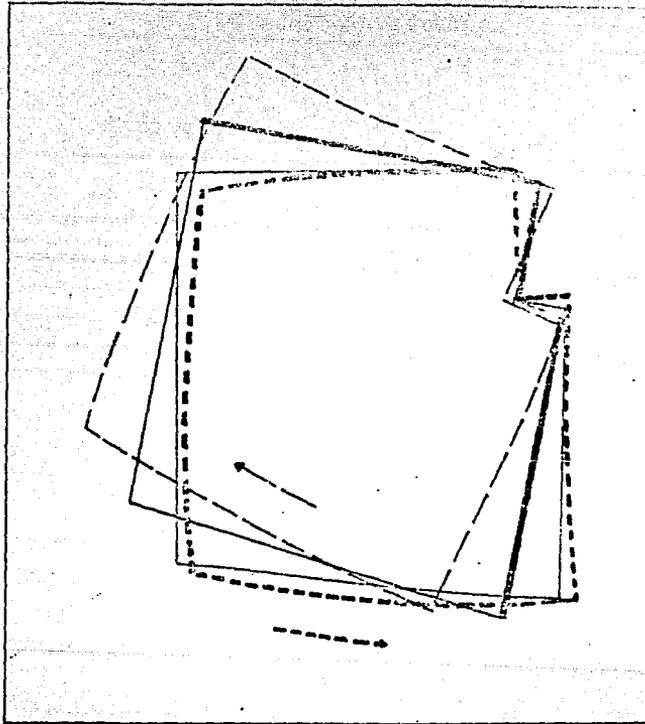


Fig. 5.2

Este tipo de falla se ejemplifica con el edificio mostrado en la fotografía 5.2, cuya descripción se dá a continuación:

DESCRIPCION DEL INMUEBLE

El edificio se localiza en la zona del lago. Consta de -- trece niveles; en planta baja se encuentra el receptor, seguido del mezzanine, las siguientes diez plantas tipo se utilizaron -- como oficinas y el último se destinó al penhouse y caseta del -- elevador. Ver su planta tipo en la figura 5.3.

Está estructurado a base de marcos ortogonales de concreto reforzado formados por columnas (de dos tipos de sección, circulares y rectangulares) y trabes, el sistema de piso es de losa maciza apoyada en trabes principales y secundarias, se cuenta con muros de mampostería divisorios "no estructurales", ligados a la estructura, las rampas de las escaleras son de concreto reforzado. Se supone que la construcción fue realizada en 1956.

Visto por fuera parece ser simétrico en resistencia, rigidez y masa; sin embargo, se trata de una falsa simetría pues revisando sus plantas tipo notamos en la parte noroeste alta densidad de muros de mampostería utilizados en el área de servicios y en los cubos de escaleras y elevador. Cuenta en las colindancias vecinales con muros de mampostería "no estructurales" y en los lados opuestos cancelería de aluminio y cristales, (esta distribución de muros de mampostería hace que el centro de rigidez se separe del centro de masa, y se recorra hacia los muros divisorios creando excentricidad torsional). Además las columnas rectangulares de los muros de colindancia son menores a las interiores.

Con el fin de dar ventilación e iluminación al área de servicios y el cubo de las escaleras se observa un remetimiento en planta.

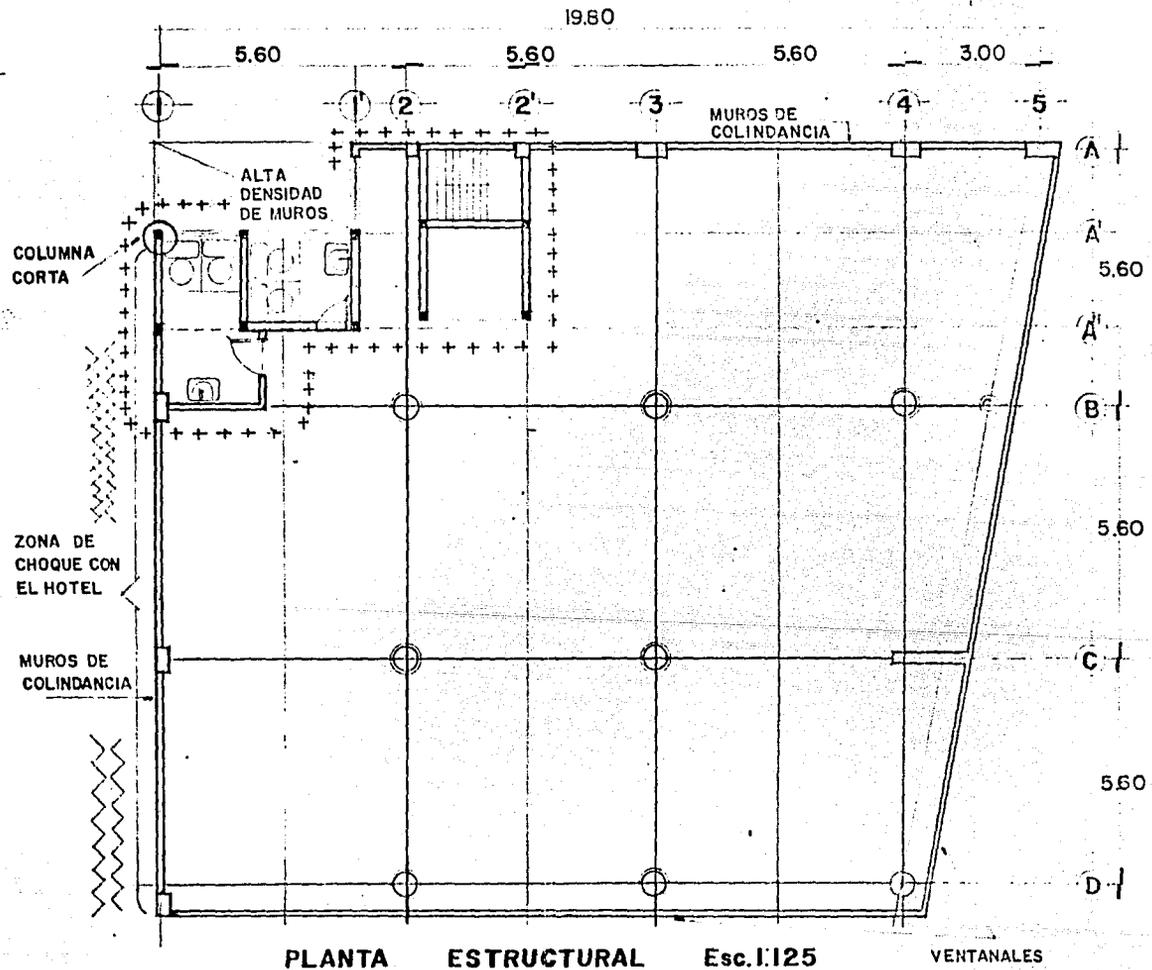
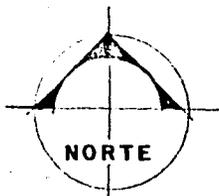


Fig. 5.3

DAÑOS DURANTE EL SISMO

Para entender en forma global los deterioros estructurales ocurridos en el edificio en esquina es necesario incluir a las construcciones vecinas que interactuaron en el golpeteo. A estas les llamaremos estructuras A, B y C (Fig. 5.4) correspondiendo la estructura C a nuestro modelo en estudio.

De manera simplificada suponemos que durante el sismo la estructura C, recibió empujes de la estructura B, que pudieron haber amplificado los giros y desplazamientos torsionales, tanto en planta como en elevación.

Es posible que al chocar simultáneamente las estructuras A y C contra la edificación B influyeron en la pérdida de resistencia en columnas y muros de carga propiciando el colapso del cuarto nivel.

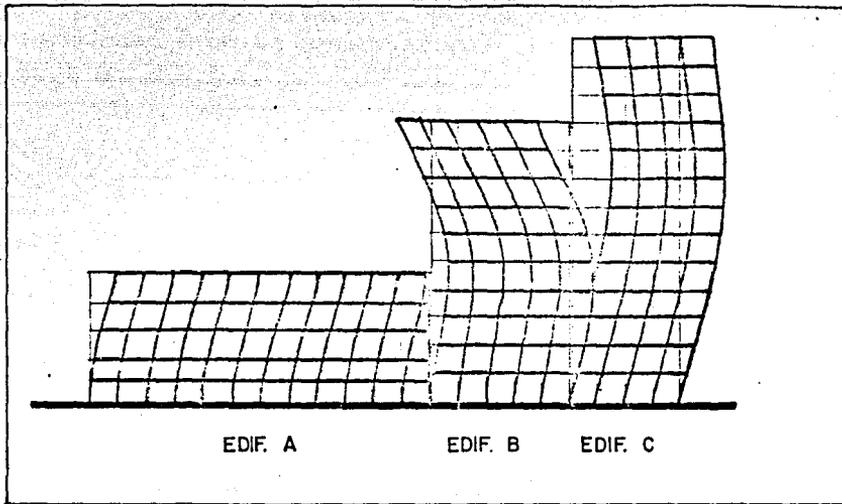


Fig. 5.4 Se representa una idealización de las estructuras que intervinieron en golpeo que supuestamente causó el colapso parcial del edificio B atribuido a la no coincidencia de entrepisos (edificios A y B) y a las diferentes configuraciones de los edificios A y C.

En el edificio de esquina, los muros de mampostería interiores y exteriores, "no estructurales" pero ligados a la estructura, se opusieron a los desplazamientos, tratando de "ayudar" a la estructura. Al colaborar de esta manera absorbieron sobre ellos elevadas fuerzas sísmicas y como no fueron diseñados para resistir tales fuerzas se agrietaron.

El golpeo en las estructuras B y C incrementó los daños en los muros de mampostería de colindancia a partir del cuarto piso en el edificio de esquina, las rotaciones que experimentaron los entrepisos en parte se reflejaron en la destrucción de las columnas extremas en el área de servicios, pues junto a las

columnas se tiene un muro de altura interrumpida para permitir la ventilación. La columna adquirió gran rigidez en comparación a su resistencia original, provocando gran absorción de energía sísmica que, hizo fallar a estas columnas.

En la zona de alta densidad de muros, las trabes mostraron fallas por cortante.

El edificio "C" recibió daños por el choque mutuo y el colapso parcial del edificio B, sobre todo en los niveles cuarto, quinto y sexto, caracterizándose por la relativa destrucción de muros y columnas de colindancia, que propició una disminución en la altura de las columnas y muros, acentuando el desnivel de los pisos superiores y el efecto de torsión vertical.

5.1.3 Piso Suave

Gran parte de los edificios destinados a oficinas y viviendas se estructuraron considerando que la planta baja podrá ser destinada a: estacionamiento para vehículos (exigido por el R.C.D.F.); locales comerciales; recibidores; oficinas y talleres. En los pisos superiores se tiene una gran densidad de muros (ya sean estructurales o divisorios). Esta parte es utilizada para departamentos habitacionales u oficinas.

En la planta baja se requieren grandes espacios para maniobrar los automóviles y/o facilitar la modificación de espacios interiores en, oficinas, talleres y locales comerciales por lo que son eliminados los muros, (Fig. 5.5.a). A este piso libre de muros se le conoce como piso suave o blando. Este cambio brusco de rigideces y resistencias entre dos o más pisos consecutivos -

provocó durante el terremoto que las columnas de planta baja (piso suave) fueran sometidos a grandes concentraciones de esfuerzos, éstos elementos necesitaron haber desarrollado extraordinarias ductilidades locales, para evitar o retrasar el colapso. A las columnas les es muy difícil desarrollar altas ductilidades -- por la forma en que trabajan. Pues además de recibir y transmitir carga axial fueron sometidos a varios ciclos de flexo-compresión (Fig. b) por la acción sísmica, aparecen en el recubrimiento de las columnas de concreto, fisuras, al continuar con los ciclos, éstos se multiplican, aumentando en espesor y longitud reduciendo el momento de inercia, la rigidez y la resistencia disminuyen, -- propiciando mayores desplazamientos. Aquí puede acontecer que la resistencia de una columna ubicada en algún lugar estratégico se haya agotado, produciendo su colapso, así se crea una zona de inestabilidad local, la carga que soportaba dicha columna, se reparte en las columnas adyacentes que al incrementar su peso se harán más vulnerables a las fuerzas sísmicas. El temblor descubrirá fallas en columnas que aceleraran el proceso de colapso. También puede suceder que el desplazamiento sea tal que (combinado con los efectos P-), no permitan regresar a la estructura a su posición de equilibrio, generándose el colapso. Fotografía --

5.3.

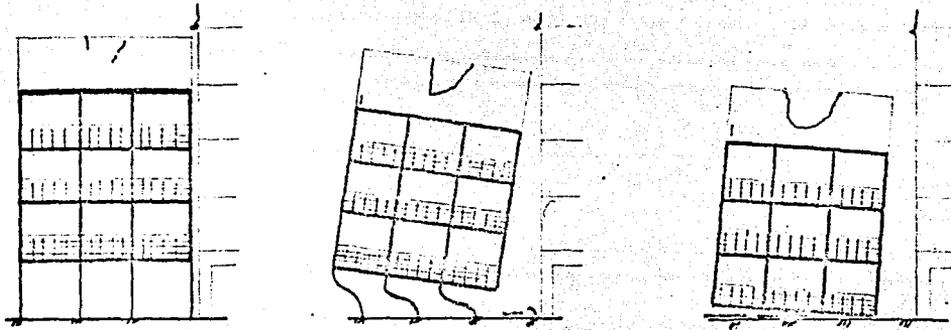
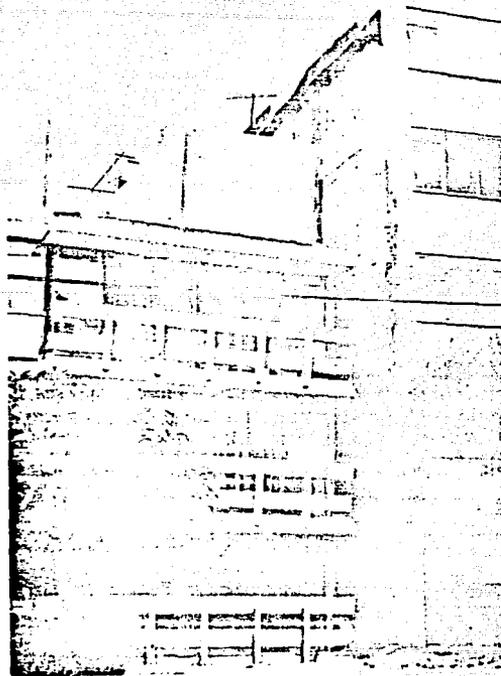


Fig. 5.5 (a)

(b)

(c)



Fotografía 5.3 Este edificio de apartamentos perdió la planta baja utilizada como estacionamiento.

5.1.4 Falla en pisos superiores

Fue significativa la cantidad de daños localizados en la parte superior de las estructuras, pues un 40% se atribuye a algún tipo de colapso comprendido entre el tercio superior de la altura del edificio hasta el último nivel.

Las causas pueden ser imputadas a reducciones bruscas en las secciones de los elementos estructurales, que ocasionaron disminuciones en resistencia afectando a los últimos niveles, también al colocar menores cantidades de acero de refuerzo transversal y longitudinal.

Se cree que las aceleraciones que recibieron ciertas estructuras en sus bases se amplificaron dinámicamente en sus últimos niveles (fotografía 5.4). Si la edificación tenía apéndices constituidos por tanques de almacenamiento de agua o casetas de elevadores es posible que hayan sido diseñados para resistir cargas laterales mucho menores a las que les impuso el sismo.



Fotografía 5.4 Colapso de los últimos niveles a consecuencia posiblemente de amplificaciones dinámicas.

5.2 Influencia de los muros en la estructura

A simple vista la existencia de muros en un edificio parece no cambiar radicalmente su comportamiento dinámico. Sin embargo, las fallas estructurales ocasionadas por la presencia y colaboración de muros de mampostería confirmaron lo que, en algunos círculos de ingeniería ya habían observado en sismos anteriores; la presencia de muros de tabique desarrolla un papel determinante en la respuesta de edificios, pues en algunos casos ayuda (junto con las columnas) en resistencia y rigidez, y en otros, contribuyó a su falla.

Los muros pueden clasificarse por su funcionamiento estructural en: muros estructurales y divisorios o de relleno.

5.2.1 Muros estructurales

Los muros estructurales están ligados permanentemente a la estructura, pueden estar formados por piezas de mampostería unidas con mortero y dos elementos diagonales de concreto reforzado (actuando como puntales) dentro de un marco del mismo material (fig. 5.6.a); muros de concreto con dos capas de acero de refuerzo que cubren todo el muro (fig. 5.6.b); muros de mampostería unidos con mortero con una capa de malla electrosoldada en cada lado, unida con concreto o mortero. (fig. 5.6.c).

Los muros estructurales que se concibieron para resistir cargas laterales y verticales, estaban reforzados y colocados para que cumplieran con dicho propósito. Su presencia fue benéfica y evitó el colapso de un gran número de edificios en la zo

na dañada.

Esto ocurrió cuando dichos muros estaban colocados en forma simétrica, regular y sin discontinuidades tanto en planta -- como en elevación. Estos muros absorbieron una porción mayoritaria de las cargas laterales debidas al sismo y protegieron a las columnas de su posible falla. Aún cuando ésto dió lugar en muchos casos a agrietamientos diagonales en los muros, estos si guieron contribuyendo con resistencia, rigidez y disipando ener gía inducida por el sismo.

Dentro de los muros estructurales también podemos considerar a los muros de carga de mampostería. Distinguimos 2 casos de muros de carga: antiguos y modernos.

Los edificios con muros de carga antiguos se caracterizan por tener una alta densidad de muros en dos direcciones ortogonales, con periodos de vibración cortos ($T \approx 0.5$ seg.) provocando respuestas dinámicas reducidas en la zona lacustre. Su comportamiento en general fue adecuado, sin embargo algunos daños se debieron a su notable falta de mantenimiento; que el sistema de piso no es lo suficientemente rígido para que trabaje como diafragma; carencia de confinamiento adecuado en las esquinas, remates de muros, además, falta de unión entre éstos y las losas. Ver fotografía 5.5.



Fotografía 5.5

Parte superior de una construcción antigua, sin mantenimiento, nótese la falta de confinamiento que provocó la caída parcial de muros.

Por lo anterior no es recomendable el empleo de la mampostería no reforzada, en zonas sísmicas.

La mampostería presenta por lo general 3 tipos de fallas; - compresión, flexión y cortante. La primera se presenta en muy pocas ocasiones.

La falla por flexión se identifica por las grietas horizontales que se abren en un extremo del muro sobre las juntas de mortero situadas en la parte inferior, mientras que en el otro extremo del muro ocurre una variante de la falla por flexión que se identifica por grietas verticales en la parte inferior del muro, ésta se debe básicamente a hundimientos del terreno ocurri-

dos en un lapso considerable de tiempo.

La falla por cortante se identifica porque son grietas diagonales sobre el muro, que pueden seguir dos trayectorias: - - -
1) sobre las juntas del mortero, en cuyo caso se dice que es una falla por cortante (ver fotografía 5.6), o sobre piezas y juntas, dando lugar a la denominada falla por tensión diagonal. Cuando se tiene esta falla se ha agotado la resistencia de la mampostería. Fotografía 5.7.

Una causa frecuente de daños es la presencia de vanos para las puertas y ventanas no reforzados, en los que la concentración de esfuerzos que se presenta en las esquinas provoca la iniciación de grietas diagonales que llevan a la falla a todo el muro.



Fotografía 5.6 Falla por cortante en un muro "confinado" sólo por un castillo (en la parte superior derecha de la fotografía) con un estuerzo longitudinal dado por 2 varillas de ϕ 3/8".



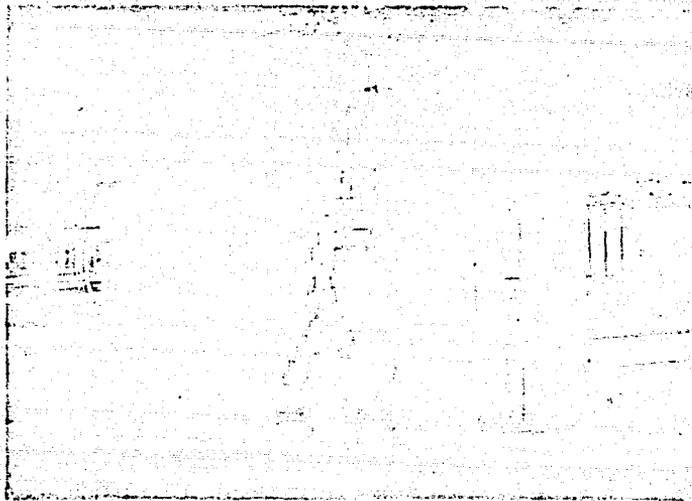
Fotografía 5.7 Se muestra una falla por tensión diagonal

DAÑOS EN ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA MODERNA

Los edificios con muros de carga de mampostería moderna tu vieron en general un comportamiento satisfactorio debido a que sus periodos de vibración fueron también cortos, con relación - al periodo de vibración del suelo de la zona del Lago. (Presentan las ventajas de tener muros confinados por castillos y da-las). Los daños se presentaron al caer una estructura, por golpeteo con edificaciones adyacentes al carecer de la separación necesaria, hundimientos diferenciales provocados por edificios altos contiguos originando grietas diagonales en muros.

5.2.2 Muros divisorios o de relleno

Los muros no estructurales que fueron diseñados para separar espacios interiores y/o exteriores se llaman muros de relleno o divisorios. Estos muros al ser idealizados en el diseño, como no estructurales deben tener una separación entre ellos y el marco, que permita el desplazamiento de los marcos bajo acciones sísmicas sin lastimar a los muros. Pero durante la edificación, el constructor, lo ignora por lo que en la mayoría de los casos no se observó dicho requisito, pues la holgura (si es que tenía) no fue suficiente ante el movimiento horizontal de las construcciones. Se encontró que en algunos edificios el material de relleno se encontraba endurecido por el paso del tiempo, por lo que el muro "colaboró" negativamente en la resistencia de la estructura, lo que trajo como consecuencia la aparición de agrietamientos diagonales en ambas direcciones. (En algunas ocasiones los muros trabajaron como puntales diagonales que ocasionaron daños a la estructura). El mismo efecto aunque de menores dimensiones, causó la presencia de muros divisorios en los cubos de elevadores y escaleras.

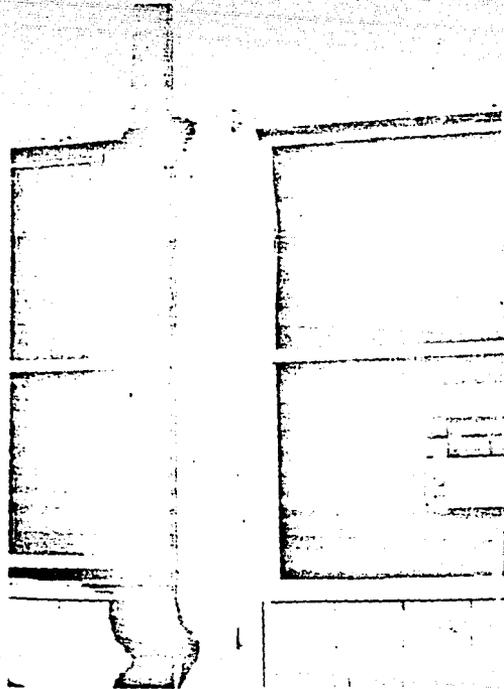


Fotografía 5.8

No obstante el incremento de rigidez aportado a la estructura por este tipo de muros las deformaciones de conjunto fueron excesivas, más aún en los casos en que los muros de relleno eran frágiles, mal anclados o sumamente ligeros destruyéndose totalmente por la falla de flexión normal a su plano o por cortante; esto hizo que se perdiera la contribución a la resistencia frente a cargas laterales de los muros que eran vitales para mantener la simetría, lo que incrementó notablemente las fuerzas sobre las columnas.

5.2.3 Columna corta

Otra falla debida a discontinuidades de muros en elevación es la denominada "columna corta" que se describe a continuación. Los muros de altura incompleta, con relación al entre piso, restringen en forma parcial la deformación lateral de las columnas de algunos ejes por medio de antepechos, mochetas, pretiles de fachada, etc. Esta situación las hace mucho más rígida que las de otros ejes, por lo que en sus extremos absorben una fracción mayoritaria de las fuerzas laterales para lo cual no están generalmente diseñadas, dando lugar a una falla frágil generalmente por cortante.



Fotografía 5.9

5.3 Falla frágil en columnas por flexión y/o cortante

Un considerable número de daños que se presentaron en estructuras formadas por marcos de concreto reforzado, se originó por la falla frágil en columnas debida a flexocompresión o cortante o a una combinación de ambas, lo cual implica casi siempre el colapso total o parcial de la estructura, situación que ocurrió en la mayoría de los edificios con daños severos.

Se observó que la fluencia del refuerzo se desarrolló primero en las columnas y después en las trabes (y en algunos casos en losas) siendo que el reglamento implica lo contrario, que las estructuras deben tener columnas fuertes y trabes débiles,¹⁾ para desarrollar un comportamiento más dúctil, el cual ayuda a disipar con mayor eficiencia la energía que el sismo le transmite a la estructura, razón por la cual el reglamento permite utilizar factores de reducción.

La escasa ductilidad en columnas se pudo deber, entre otros factores a un sobrefuerzo en vigas y losas, a la colaboración perjudicial de elementos no estructurales que no fueron considerados en el análisis original del edificio, y por la falta de acero de refuerzo longitudinal y transversal, además de la colocación de las barras en paquetes en las esquinas.

El tipo de falla observado con mayor frecuencia en columnas es la pérdida de la capacidad de carga vertical debido al progresivo deterioro del concreto de las columnas por la repetición de un elevado número de ciclos de carga lateral que ex-

cedieron a su resistencia en flexocompresión o en cortante. - Lo anterior lo propició la escasez de refuerzo transversal y demasiada separación del refuerzo longitudinal, lo que dió lugar al pandeo de las barras y a un confinamiento muy pobre -- del concreto contenido en el núcleo de la columna, ver fotografía 5.10.

Un ejemplo de falla frágil en columna lo encontramos en la siguiente descripción de daños, de un inmueble planeado como un conjunto de salas de espectáculos, con cuatro niveles en la zona de estacionamiento, la estructura está constituida a base de marcos formados por columnas circulares en su mayoría y losas reticulares. Con una planta y elevación irregular.

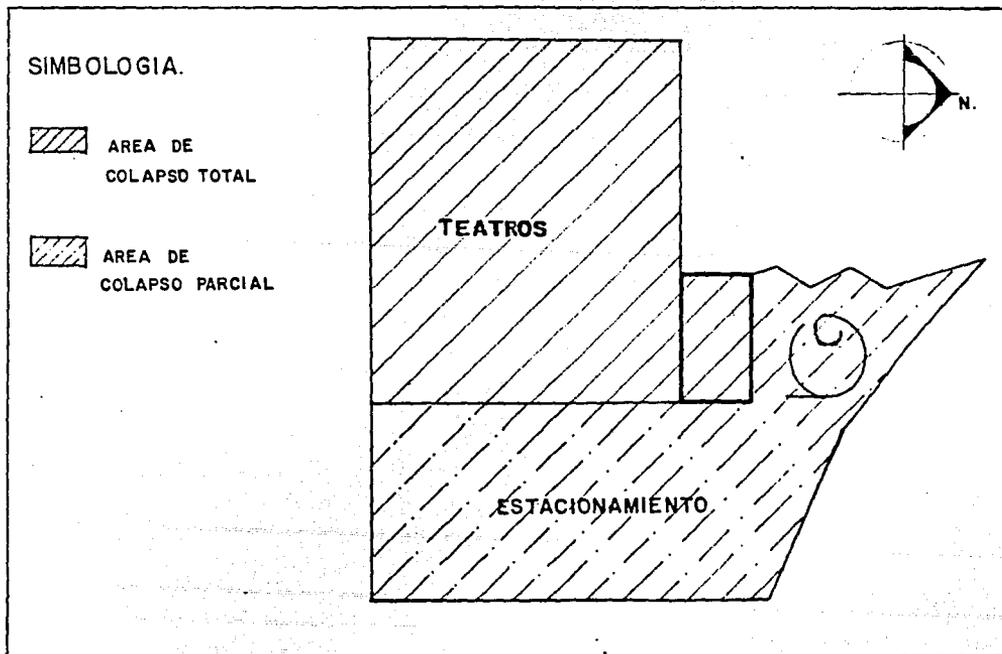


Fig. 5.10

Es posible que el origen del colapso sea la falla frágil de columnas, causada por grandes deformaciones en las columnas por la torsión, pues ante las fuertes solicitaciones sísmicas acompañadas de numerosos ciclos empezaron a formarse grietas que el acero transversal no pudo contener. Se nota que el diámetro del zuncho es muy pequeño, con relación al área de acero longitudinal. Además el paso de la hélice es demasiado amplio como se puede apreciar en la fotografía 5.10, lo que ocasiona un reducido confinamiento al concreto.



Fotografía 5.10

5.4 Alteraciones en estructuras

Fue común notar que en las construcciones dañadas existían variaciones en el diseño original, en algunos casos los edificios proyectados para viviendas, se acondicionaron para el establecimiento de industrias ligeras como fábricas de ropa (sin que se verificaran las condiciones de servicio y seguridad), en otros se utilizaban como bodegas. Se cree que algunos departamentos se unieron mediante la eliminación de elementos estructurales, sin la revisión por parte de un ingeniero.

5.4.1 Sobre Carga

En la mayoría de las edificaciones dañadas, y por lo menos en 39 colapsos o daños estructurales severos se observó -- que la causa del deterioro estructural fue el incremento excesivo en cargas gravitacionales. Muchos edificios fueron diseñados bajo determinadas estimaciones de cargas verticales; sin embargo, estas se modificaron sin que el estructurista tuviera conocimiento de ello; algunos cambios se realizaron en obra -- por descuido de los constructores y una deficiente o nula supervisión, por ejemplo, el empleo de rellenos en pisos y azoteas, acabados, muros divisorios y fachadas con un peso mayor al usual en las consideraciones. Las cargas vivas también experimentaron aumentos, sobretodo en inmuebles diseñados para departamentos habitacionales, que fueron ocupados para oficinas, con varios pisos destinados a archivos muertos, ver fotografía 5.11 en otros edificios se instalaron fábricas de ropa

con bodegas de telas en los últimos pisos; se dió el caso en algunas construcciones de almacenar costales de granos, rollos de papel y talleres.



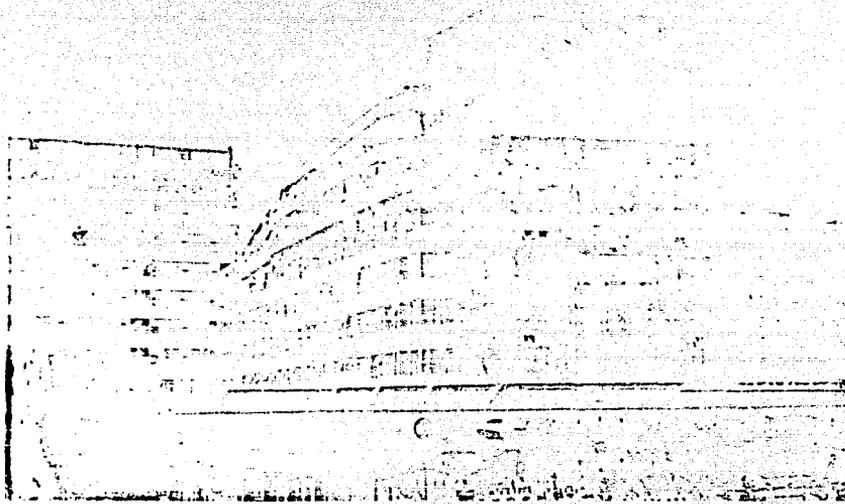
Fotografía 5.11 Conjunto de archiveros localizados en una zona crítica.

Este incremento exagerado de peso sobretodo en pisos superiores provocó, que bajo acciones sísmicas se multiplicaran las fuerzas de inercia, y al añadir los efectos verticales de la sobre carga, la estructura no pudo resistir, resultando dañada.

5.4.2 *Modificaciones y cambio de uso*

Ocurrió que en muchos edificios concebidos originalmente para un determinado fin; fueron empleados como fábricas, bodegas, archivos y talleres, por lo que la carga excedió con

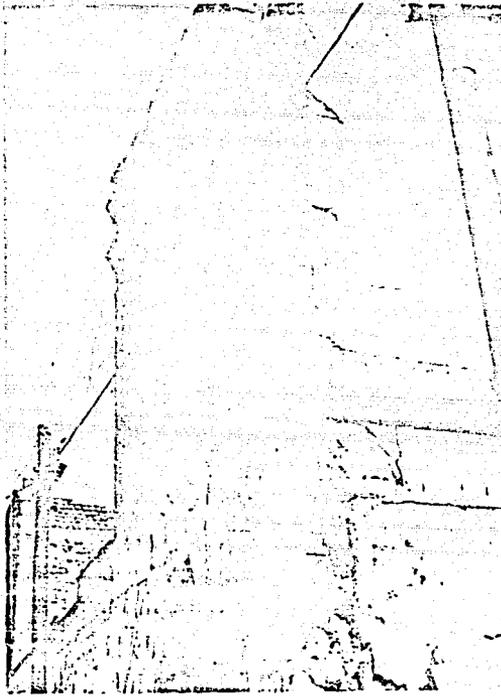
siderablemente a la destinada, además en algunos casos la estructura también fue modificada eliminando muros de carga para tener espacios más amplios.



Fotografía 5.12 El Centro SCOP fue diseñado como edificios para vivienda.

5.4.3 Falta de mantenimiento

En bastantes casos se manifestó que la falta de mantenimiento adecuado produjo el deterioro de los materiales de construcción y fue causa importante de innumerables daños ocurridos en edificaciones antiguas, ver fotografía 5.13. También se observó esto en estructuras cimentadas sobre pilotes de control.



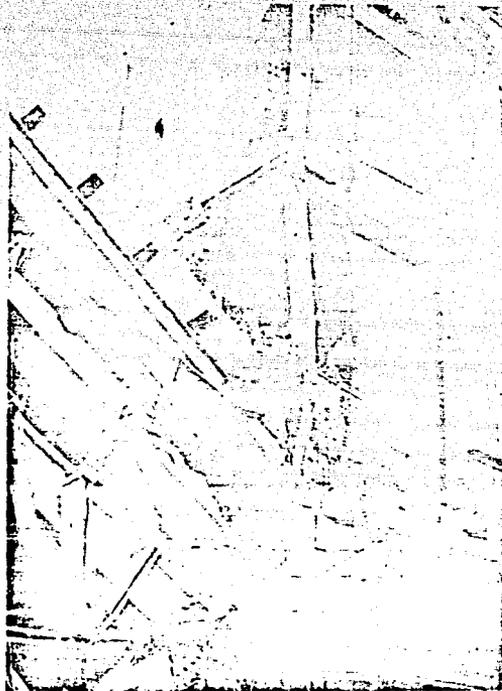
Fotografía 5.13 Aspecto de una edificación de principios de siglo sin un mantenimiento adecuado.

5.5 Golpeteo con edificaciones adyacentes

Un número considerable de fallas (cerca de un 40% de los daños totales observados), se pueden atribuir a, choques repetitivos de edificios contiguos ocasionadas por: la magnitud del sismo, los grandes desplazamientos del terreno, la es casa o nula separación entre las construcciones y al insuficiente mantenimiento para conservar las juntas libres de rellenos y desperdicios de diversa índole.

Los choques produjeron desde daños mínimos en acabados y recubrimientos, hasta el colapso de pisos intermedios o superiores. En algunos casos se tuvieron diferentes alturas entre los pisos de edificios contiguos, los frecuentes impactos provocaron un debilitamiento en columnas y muros de carga en colindancia causando daños graves o el colapso de los mismos. Este aspecto fue común para edificios pequeños junto a otros mayores, al no coincidir las losas de ambos los primeros recibieron daños en el nivel de azotea mientras que los segundos tuvieron desperfectos en niveles intermedios. El golpeteo fue más evidente en las estructuras flexibles que en las rígidas, debido a que en las primeras los desplazamientos y deformaciones son mayores y en consecuencia alcanzaron a pegarse unas contra las otras, creando con ello fracturas en los muros colindantes y también la falla de elementos estructurales. Se supone que el choque de edificios es responsable de un buen número de fallas observadas en los pisos superiores, estas fallas se deben en parte a que muy pocos edificios respetaban

las separaciones mínimas, pues se notó una separación promedio de 10 cm. constantes en elevación.



Fotografía 5.14 Al no coincidir las alturas de los niveles en edificios contiguos los daños aumentaron como se ilustra - en esta fotografía.

5.6 Problemas en cimentación

El sacudimiento sísmico hizo que el suelo tuviera desplazamientos máximos de 42 cms. pico a pico según el registro --- SCT E-W (ver capítulo II). Evidencias palpables de estos desplazamientos fueron: los choques de estructuras a nivel cimentación y las deformaciones permanentes en rieles, guarniciones y aceras que interactuaron con el suelo.

En la zona orient de la ciudad aparecieron en el suelo grietas de varios metros de profundidad delimitando una depresión con un desnivel de 80 cms. Es posible que la aparición de estas grietas se deba a esfuerzos de tensión inducidos en el suelo por el sismo.¹⁾ Sin embargo en esta zona abundan las llamadas grietas de tensión, aparentemente causadas por las -- presiones hidrostáticas que se generan en el suelo a consecuencia del encharcamiento del agua pluvial en la superficie.²⁾ Es posible que el sismo haya puesto en evidencia unas grietas pre-existentes, disimuladas por los rellenos superficiales colocados al urbanizar la zona.

En el diseño de cimentaciones desplantadas en la zona -- del lago se debe tomar en cuenta la baja resistencia al esfuerzo cortante de las arcillas, alta compresibilidad, el hundimiento regional y la frecuencia e intensidad de los sismos. -- Estos factores han obligado a desarrollar diferentes cimentaciones, las cuales presentaron diversos comportamientos.

Cimentaciones compensadas.

Este tipo comprende a las cimentaciones que minimizan -- los incrementos de peso al suelo mediante el uso de cajones -- de cimentación. Cuando el incremento en la base del cajón resulta positivo, nulo o negativo se le conoce como cimentación parcialmente compensada, compensada o sobre compensada respectivamente. En particular se desea que la presión inducida en el suelo a cualquier profundidad no rebase la presión de preconsolidación.³⁾

Es posible que incrementos excesivos de presión de contacto hayan provocado hundimientos previos al sismo, sobre todo en plantas de grandes dimensiones (que son más sensibles a pequeños errores en estimaciones de cargas y compensación), que en áreas pequeñas. Otros factores que se conjetura su -- participación fueron: la no coincidencia entre el centro de -- gravedad y el de reacción, especialmente en estructuras esbeltas; en muchos casos se detecta la presencia de agua en los -- cajones (efecto de estanqueidad) añadiendo más peso a la construcción; se encontró en algunas estructuras que el diseño de la superestructura no correspondía a la subestructura.

Cimentaciones sobre pilotes de punta

Se observó un comportamiento adecuado por esta clase de pilote apoyado en la primera o segunda capa resistente.

Entre la periferia de la cimentación y el suelo se registraron hundimientos, que probablemente se originaron por:

1. una contracción del suelo sustentante al ser sometido a asentamiento brusco por los pesos propio y de la estructura durante el sismo. 2. Separación del grupo de pilotes con el suelo. 3. Desaparición parcial o total de la fricción negativa.

También es posible que el origen de la falla de estos pilotes sea el no poder resistir las solicitaciones sísmicas de flexocompresión inducidas por el momento de volteo y de la fuerza cortante a nivel de cimentación. (Fig. 5.7). En particular se notaron fallas en la cabeza de los pilotes, se cree que al emerger la estructura (a consecuencia del hundimiento regional) las cabezas de los pilotes y las contratraves estén en una situación desfavorable frente a cargas sísmicas, por lo que, se supone que este problema se pudo haber presentado en otros casos sobretodo en estructuras esbeltas de gran altura.

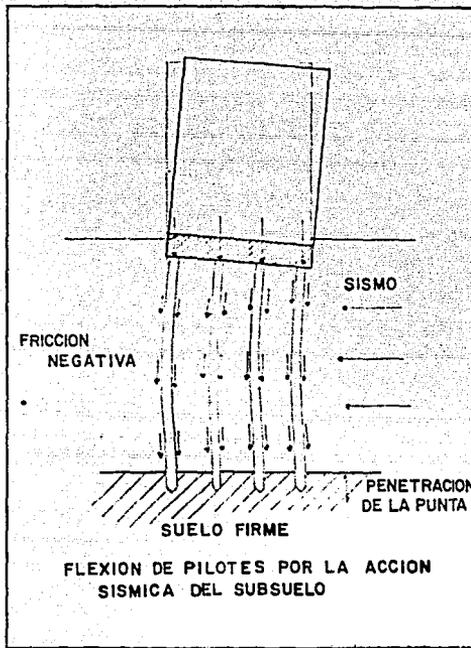


Fig. 5.7 Se observaron daños en la unión de la cabeza del pilote con la losa de cimentación, -- originados por fuerza cortante.

Los desplomes en edificaciones con pilotes de punta pudieron crearse al penetrar el pilote en la capa resistente, o al pandeo y colapso de los mismos.

Pilotes de fricción

Estos pilotes transmiten las cargas al suelo a través de su superficie lateral de contacto, a lo largo del suelo, generalmente se ocupan en combinación con una cimentación parcialmente compensada. Esta cimentación presentó las siguientes fallas: en edificios pesados, altos y esbeltos, cuya relación altura-ancho menor de la cimentación, mayor de tres y hasta --

15 niveles sobre el desplante, con elevadas presiones de contacto en el sistema losa-suelo ocasionaron un repentino hundimiento, hasta de un metro. (Ver fotografía 5.15)⁴⁾ Aún suponiendo que los pilotes trabajaron a su máxima capacidad de carga; desplomes permanentes; volcamiento de edificios (entre otras causas por un mínimo número de pilotes); la disminución en resistencia y capacidad de carga por el remoldeo que experimentó la arcilla, influyó en la reducción de la capacidad de adherencia entre el suelo y los pilotes (Ver fig. 5.15). Durante el terremoto hubo concentraciones de esfuerzos en la zona perimetral de la cimentación generados por excentricidades asociadas al momento de volteo.

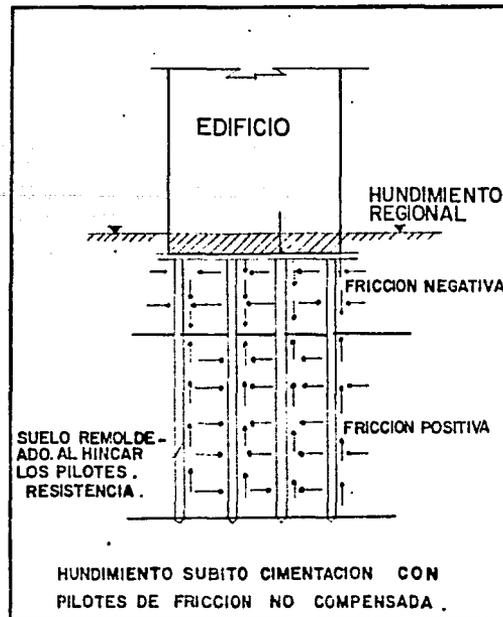
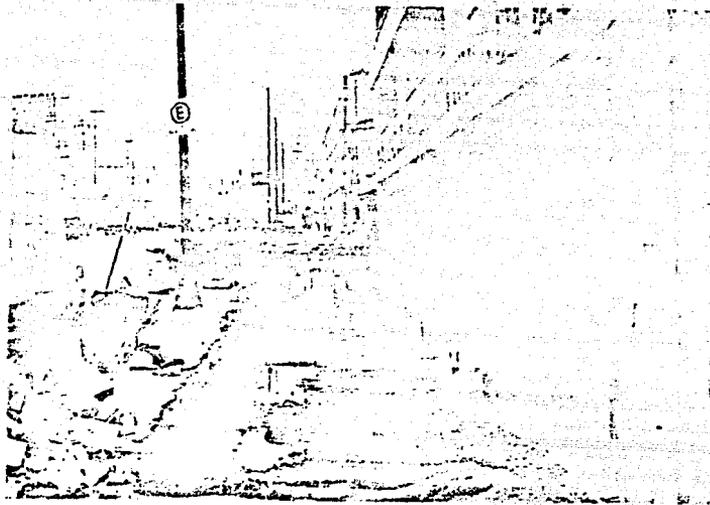


Fig. 5.8



Fotografía 5.15 Se muestra el hundimiento aproximado de un metro, de un edificio apoyado en pilotes de fricción.

Pilotes de Control

Es posible que la falta de mantenimiento, los defectos constructivos y a la manera de absorber energía sísmica haya originado concentraciones de carga en algunos pilotes, resultando grandes deformaciones y en varios casos la falla o el volcamiento de la estructura.

5.7 Daños por sismos anteriores

Era conocido que cierto número de edificios fallados habían tenido daños en sismos anteriores (1957, 79 y 81), y que en algunos casos la reparación se limitó a renovar los acabados ocultando las grietas, en otros la reparación se realizó sin analizar las causas que produjeron los daños y sin eliminar las condiciones desfavorables (como pueden ser problemas en la cimentación o semejansas en los periodos de vibración).

5.8 Efecto P-Delta

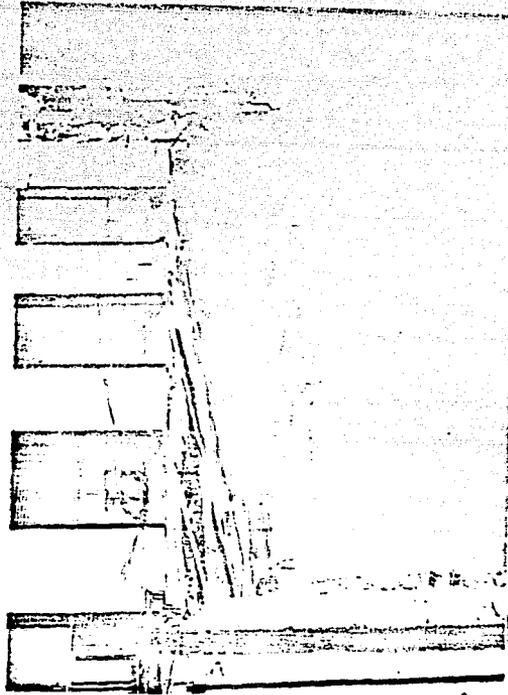
La respuesta dinámica de edificios bajo sollicitaciones sísmicas está influenciada por las cargas gravitacionales sobretodo para estructuras diseñadas para disipar energía mediante deformaciones inelásticas.

Al someter una estructura a cargas sísmicas, experimenta desplazamientos laterales y por efecto de las cargas verticales se producen momentos adicionales llamados momentos de segundo orden o efecto P-Delta.

Sin embargo no existe evidencia directa de que solo el efecto P-Delta haya causado colapsos, pero el hecho de que algunos edificios presentaron fallas al desplazarse lateralmente hace suponer que, los momentos flexionantes en las columnas de los pisos inferiores fueron incrementados por este efecto en combinación con otros parámetros. Ver fotografía 5.16.

En el estudio del efecto P-Delta se debe considerar las variables que más influyen en el comportamiento estructural como;

- tipo de sismo,
- interacción suelo-estructura,
- período de vibración del suelo y de la estructura,
- sesistencia en el diseño,
- variación del factor de seguridad con relación a la altura
- altura de entrepiso,
- cambios de sección en elevación,
- porcentaje de amortiguamiento,
- degradación de la rigidez.



Fotografía 5.17. La influencia del efecto P-Delta fue determinante en el colapso de los últimos cuatro niveles. Se observa - que la penúltima losa se desplazó lateralmente 3.6 m de su posición original.

C O N C L U S I O N E S

El origen de los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985, estuvo formado aparentemente por un evento principal y otro complementario; el primero ocurrió el 19 de septiembre, a las 7:17 hora local, (dividido en dos etapas con una diferencia de 29 - - seg). Su epicentro se localizó a una latitud de 17.68° Norte y - una longitud de 102.47° Oeste, en el océano Pacífico a 400 km de la capital del país. El evento complementario se desarrolló el - 20 del mismo mes a las 19:37, el epicentro se ubicó en las corde - nadas 17.8° Norte y 101.67° Oeste a 105 km del epicentro mayor, y a 340 km del Distrito Federal.

El sismo del 19 de septiembre liberó una energía equivalente a 8 500 bombas atómicas; la réplica del día siguiente produjo una liberación similar a 2 500 bombas, cantidad igual al "sismo del Angel" ocurrido el 28 de julio de 1957.

En la ciudad de México, el movimiento fue captado por doce estaciones. Se considera que de todos los registros obtenidos en ellas, el de la SCT es el más significativo, debido a que representa con mayor fidelidad el movimiento en la base de las cons - trucciones y a que dicha estación se localiza en un suelo simi - lar al que tuvo los mayores daños. Al analizar la componente E-W se observa que tuvo incrementos graduales y lineales interrumpi - dos dos veces, pero sin perder el ritmo; durante su fase intensa las aceleraciones estuvieron cercanas al 20% de la gravedad con oscilaciones de dos segundos en promedio, produciendo un movi - - miento casi armónico a causa de un filtrado de ondas.

Antes del 19 de septiembre se pensaba que al suelo blando - le era muy difícil filtrar y amplificar las ondas ya que, no habían antecedentes de estos movimientos, en los catálogos y registros de nuestro país.

Este movimiento afectó menos a las estructuras de mampostería menores a cinco niveles que en general mostraron un comportamiento adecuado, con un porcentaje de daños del uno por ciento con respecto al total de construcciones censadas. En las construcciones formadas por marcos de acero se presentaron pocas fallas; eran construcciones bajas y antiguas, con conexiones inadecuadas entre vigas y columnas. El porcentaje más elevado de daños se presentó en las estructuras esqueléticas de concreto, siendo mayor en los edificios con losa reticular, sobre todo para el periodo de construcción 1957-1976 y con alturas de 5 a 15 niveles.

La menor densidad de daños en algunas partes puede deberse a que el número de construcciones del tipo más afectado por el sismo era reducida y no necesariamente a que la intensidad del movimiento fuese menor.

En cuanto a la fecha de construcción se deduce que, el número pequeño (82) de colapsos y daños estructurales antes de 1957 se debe a que los edificios eran bajos y con alta densidad de muros. Para los edificios construidos entre 1957 y 1976, se tiene el mayor número de fallas (192) como se vio anteriormente. En las construcciones realizadas después de 1976 se tienen 56 casos de colapso; probablemente esto indique una mejora en la calidad del diseño y construcción.

Si se considera que las estructuras estuvieron sometidas a una fuerza tres veces mayor que la que especificada en el RCDF

versión 1976, con trones de ondas sísmicas filtradas y amplificadas en las formaciones arcillosas y desplazamientos totales de 40 cm casi armónicos en el suelo provocando efectos de resonancia, se concluye que en general las estructuras mostraron un comportamiento regular. Es motivo de asombro el que no se hayan destruido más edificaciones en la zona del lago.

Dentro de los elementos que influyeron directamente en la formación de fallas se pueden considerar:

- la escasa coordinación entre la arquitectura y la ingeniería sísmica sobretodo en la etapa de proyecto y diseño, pues ambas tienen en común realizar edificaciones bajo condiciones de seguridad razonable para la realización de actividades humanas,

- la interrupción de la continuidad de los muros, forma una transición brusca de resistencias y rigideces que da lugar a grandes concentraciones de esfuerzos. Si esto sucede en planta baja se puede producir un piso suave,

- las fallas en pisos comprendidos entre el tercio superior de la altura del edificio y el último piso representó un 40% del total de los colapsos. Se señala como posibles causas: reducciones drásticas en las secciones de los elementos estructurales, empleo de menores cantidades de acero de refuerzo, amplificaciones dinámicas en los últimos niveles, apéndices diseñados y contruidos para resistir cargas laterales menores a las que el sismo les impuso,

- la presencia de muros de tabique desarrolló un papel determinante en la respuesta de edificios, pues en algunos casos ayudó junto con las columnas a resistir y en otros contribuyó a su falla,

- los daños ocasionados en columnas merecen atención especial, pues al presentarse la falla frágil en ellas implica en la mayoría de los casos el colapso parcial o total. Dentro de las fallas observadas están: la pérdida de capacidad de carga vertical debido al trituramiento del concreto, la columna corta, la fluencia del acero en las columnas antes que en las trabes,

- en la mayoría de las edificaciones dañadas se observó que la influencia del sobre peso fue básica en la formación de los daños, como lo fueron también las deficiencias en la construcción y supervisión y el cambio de uso.

- las eliminaciones o modificaciones de elementos estructurales para lograr mayores espacios libres en unos casos, y en otros falta de mantenimiento adecuado produjo deterioros importantes,

- cerca de un 40% de averías totales observadas se pueden atribuir a choques repetitivos entre edificios contiguos. En los casos más severos se notó la no coincidencia de alturas de entre piso en edificaciones vecinas.

Se concluye que es vital el estudio de las fallas en las edificaciones que sufrieron daños estructurales graves y colapsos, pues ante terremotos estos ponen en peligro la vida humana y los bienes materiales, pero también es importante el estudio de las estructuras que no presentaron daños pues aportan información para la comprensión del comportamiento dinámico de las estructuras frente a futuros sismos.

Se recomienda hacer una microregionalización con base en las profundidades de los estratos del suelo blando, considerando las diferentes condiciones de preconsolidación y los periodos dominantes del suelo. Además es necesario la colocación de aceleró

grafos en distintos tipos de suelos, así como en variadas estructuras a distintas alturas para lograr un conocimiento más amplio del movimiento de las estructuras bajo futuras acciones sísmicas.

Se sugiere investigar el efecto de la ductilidad y del amortiguamiento de los edificios que presentaron daño estructural intermedio, así como de los que no mostraron problemas estructurales, para asegurar la resistencia ante incursiones en el rango inelástico.

Se estima que no es conveniente el empleo de marcos formados por columnas y losas reticulares para edificios de más de 5 niveles en la zona blanda.

En regiones sísmicas es necesario que en el proceso de diseño se le de mayor importancia a la etapa de estructuración, para lograr que las estructuras presenten un comportamiento satisfactorio bajo acciones sísmicas, pues aumentan las posibilidades de sobrevivencia frente a un terremoto cuando se tienen formas estructurales que se ajustan a ciertos principios como son; la eliminación de peso superfluo, simetría y regularidad tanto en planta como en elevación, congruencia entre lo proyectado y lo construido, formación de líneas escalonadas de hiperestaticidad, la no coincidencia de periodos de vibración suelo-estructura, reducciones graduales de resistencia, ductilidad, rigidez y masa, formación de articulaciones plásticas en trabes y después en columnas, plantas poco alargadas y edificios de esbeltez reducida.

APENDICE A
PROPAGACION DE ONDAS ELASTICAS

La elasticidad de un sólido homogéneo e isotrópico, puede ser definida por dos constantes, k y μ .

k es el módulo de incompresibilidad o módulo de compresión.

Para granito, k es aproximadamente 27×10^{10} dinas por cm^2 ;
para agua, k es aproximadamente $2,0 \times 10^{10}$ dinas por cm^2 ;

μ es el módulo de rigidez.

Para granito, μ es aproximadamente $1,6 \times 10^{11}$ dinas por cm^2 ;
para agua, $\mu = 0$.

A. En el interior de un sólido elástico con densidad ρ , pueden propagarse dos ondas elásticas:

Ondas P Velocidad $\alpha = \sqrt{(k + 3/4\mu)/\rho}$

Para granito, $\alpha = 1,5$ km/s.

Ondas S Velocidad $\beta = \sqrt{\mu/\rho}$

Para granito $\beta = 3,0$ km/s;

para agua $\beta = 0$ km/s.

B. En la superficie libre de un sólido elástico pueden propagarse dos ondas elásticas superficiales:

Ondas Rayleigh Velocidad $c_R < 0,92\beta$

donde β es la velocidad de la onda S en la roca.

Ondas Love (para un sólido estratificado) Velocidad $\beta_1 < c_L < \beta_2$

donde β_1 y β_2 son las velocidades de la onda S en las capas superficial y más profunda, respectivamente.

C. Las dimensiones de una onda armónica están medidas en términos de periodo T y longitud de onda λ .

$$\text{Velocidad} = \lambda/T.$$

$$\text{Frecuencia } f = 1/T.$$

(De Bruce A. Bolt, *Nuclear Explosions and Earthquakes*. W. H. Freeman and Company. Copyright © 1976).

APENDICE B

Para eliminar repeticiones verbales en la escala original, se ha adoptado la siguiente convención. Cada efecto se nombra al nivel de intensidad en que aparece por primera vez frecuente y característicamente. Cada efecto puede encontrarse menos notoriamente o en menos casos en el siguiente grado superior. Unos cuantos efectos se nombran en dos niveles sucesivos para indicar un aumento más gradual.

Mampostería A, B, C y D. Para evitar ambigüedad en el lenguaje, se especifica la calidad de la mampostería, de ladrillo o de otro tipo, con las siguientes letras (que no guardan relación con la clasificación convencional en clases A, B y C de construcción):

Mampostería A. Con ejecución, mortero y diseño buenos; reforzada, especialmente en dirección lateral, y unida entre sí con -- acero, concreto, etc.; diseñada para resistir fuerzas laterales.

Mampostería B. Buena mano de obra y buen mortero; reforzada, pero no diseñada en detalle para resistir fuerzas laterales.

Mampostería C. Mano de obra y mortero ordinarios; sin partes débiles en los extremos, como falta de unión en las esquinas, pero sin refuerzo ni diseñada contra fuerzas horizontales.

Mampostería D. Materiales débiles como adobe; mortero pobre; normas deficientes de calidad; débil horizontalmente.

ESCALA DE INTENSIDADES DE MERCALLI MODIFICADA

(Abreviada y modificada por C.F. Richter)

1. Imperceptibles. Sismos marginales y periodo largo de los grandes sismos.
2. Los perciben las personas en reposo, en los pisos superiores o colocadas favorablemente.
3. Se percibe en el interior de las construcciones. Los objetos colgados oscilan. Vibración como la que producen los camiones ligeros al pasar. Duración estimada. Puede reconocerse como un sismo.
4. Los objetos colgados oscilan. La vibración es como la que se produce al paso de camiones pesados; o sensación como la de una sacudida, como la de una bola pesada que pegara contra los muros. Los automóviles oscilan. Las ventanas, los platos y las puertas hacen ruido. Los vasos chocan, la loza se quiebra.
En el extremo superior del grado cuarto, las paredes y marcos de madera se agrietan:
5. Se percibe a la intemperie; se estima su duración. Quienes duermen despiertan. Los líquidos se mueven; algunos se vierten. Los objetos pequeños inestables se mueven o se caen. Las puertas oscilan, se cierran, se abren. Las persianas, los cuadros se mueven. Los relojes de péndulo se paran, arrancan, cambian de paso.
6. Lo perciben todos. Muchos se asustan y salen a descubierto. Las personas caminan inseguras. Las ventanas, platos y artículos de vidrio se rompen. Las chucherías, libros y cosas

parecidas se caen de los estantes. Los cuadros se caen de los muros. Los muebles se mueven o se vuelcan. Los acabados débiles y la mampostería D se agrietan. Las campanas pequeñas repican (la de la iglesia, escuela). Los árboles y arbustos se sacuden visiblemente, o se les oye crujir.

7. Es difícil permanecer en pie. Lo notan los conductores de automóvil. Los objetos colgados trepidan. Los muebles se rompen. Daños en la mampostería D, incluyendo grietas. Las chimeneas débiles se rompen a nivel de techo. Caen los aplanados, los ladrillos se aflojan; las piedras, revestimientos, cornisas, los parapetos sin contrafuertes y los ornamentos arquitectónicos también caen. Algunas grietas en la mampostería C. Olas en los estanques; agua turbia con lodo. Pequeños deslizamientos y derrumbes en los bancos de grava o arena. Las campanas grandes repican. Se dañan los canales de riego.
8. Se afecta la conducción de los automóviles. Se daña la mampostería C; colapso parcial. Algún daño a la mampostería B; ninguno a la mampostería A. Caen los aplanados y algunos muros de mampostería. Caída y torsión de chimeneas de las casas y de las fábricas, monumentos, torres, tanques elevados. Las casas con estructura de madera salen de sus cimientos si no están ancladas; los muros de relleno son arrojados hacia afuera. Los pilotes podridos se quiebran. Las ramas se desprenden de los árboles. Cambios en el gasto y temperatura de manantiales y pozos. Grietas en terreno mojado y en taludes inclinados.
9. Pánico general. Se destruye la mampostería D; la C se daña mucho, algunas veces con colapso completo. Daño general en

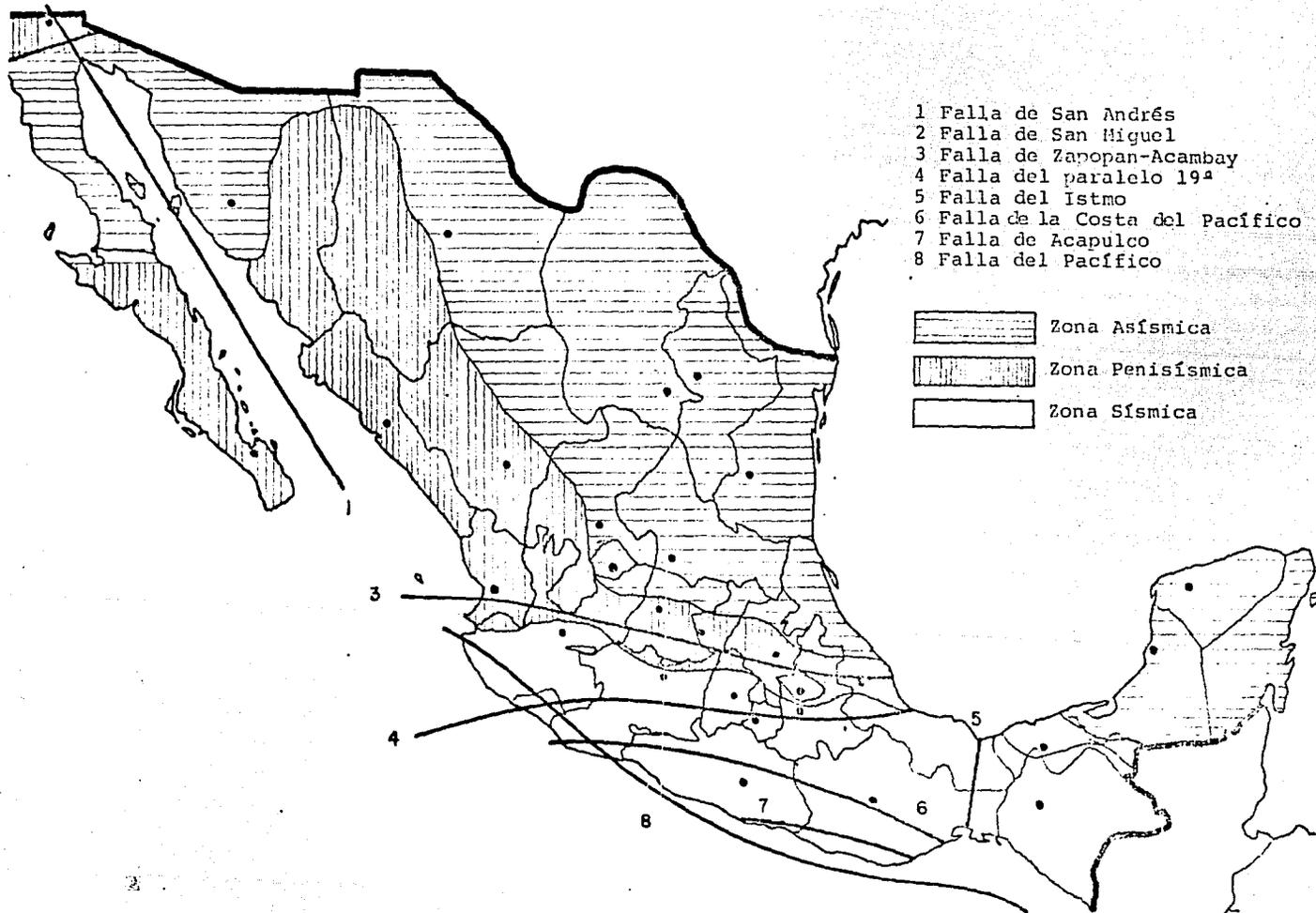


Fig. 115

TABLA I. COMPARACION CON LOS SISMOS DE 1957 y 1979

AÑO	MAGNITUD DEL SISMO (ESC.RICHTER)	ENERGIA LIBERADA (ERGS)	NUMERO DE BOMBAS DE HIROSIMA	ENERGIA RELATIVA CON BASE EN LA DE 1957	ACELERACION MAXIMA		RELACION DE ACELERACION CON BASE EN 1957
—	5.78	2.951×10^{20}	1.0	0.0	—	—	—
1957	7.50	1.122×10^{23}	380.2	1.0	60 GALS.	0.06 g	1.0
1979	7.00	1.995×10^{22}	67.6	0.18	30 GALS.	0.03 g	0.5
1985	8.10	8.913×10^{23}	3020.0	7.94	200 GALS.	0.20 g	3.0

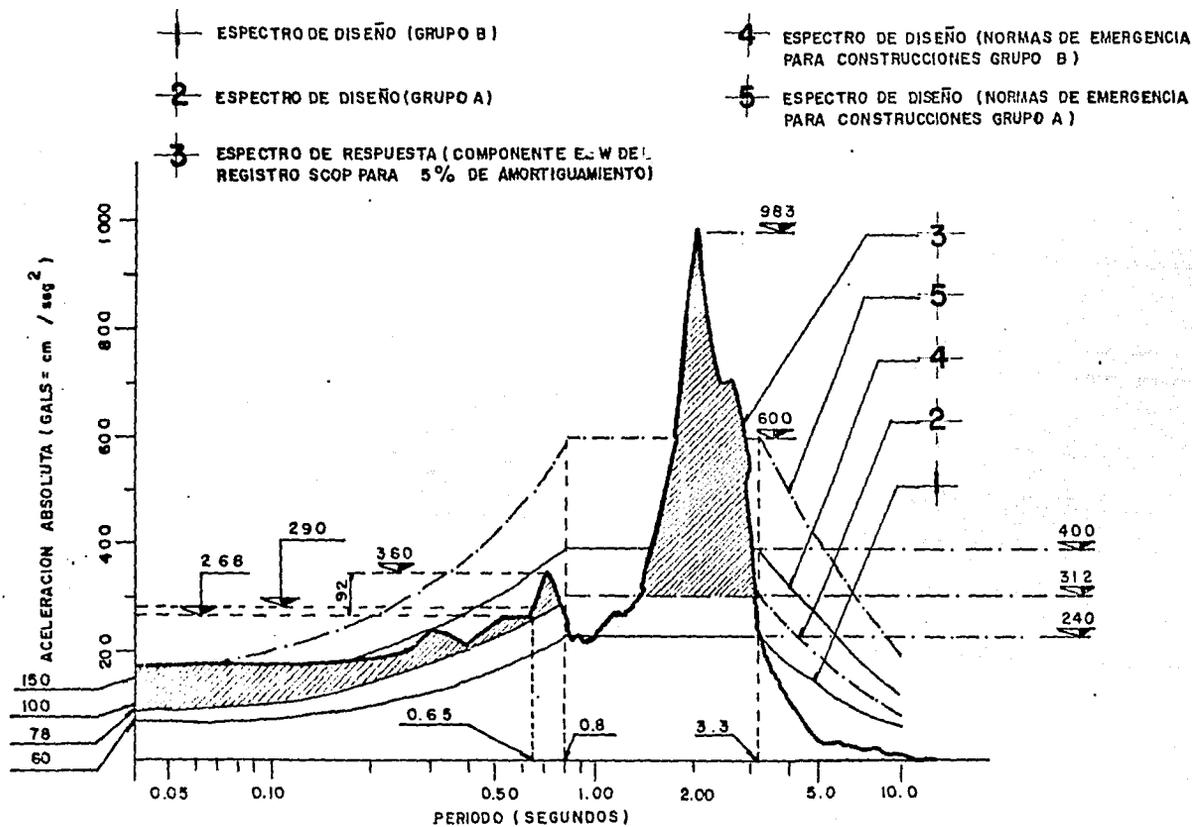
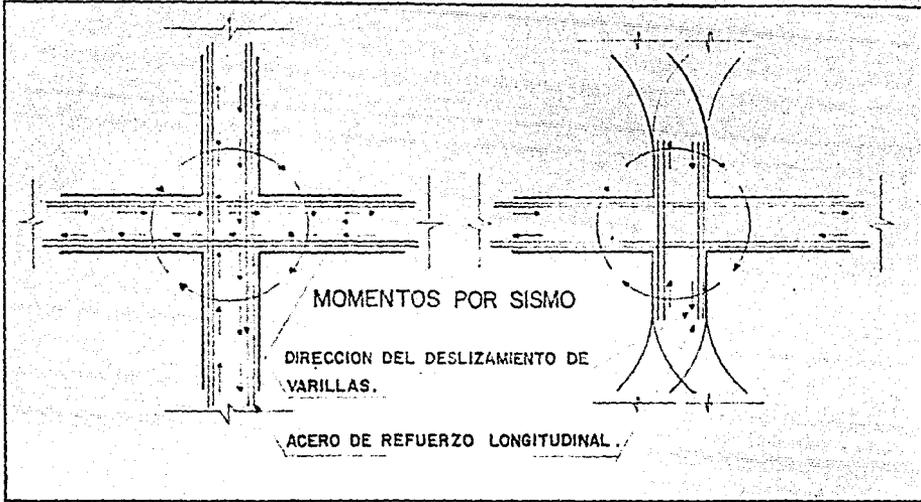


FIG. . ESPECTROS DE DISEÑO DE RESPUESTA PARA LA ZONA COMPRESIBLE DE LA CIUDAD DE MEXICO.



BIBLIOGRAFIA

1. Urey, Harold, "La movilidad de la Tierra", en J. Tuzo Wilson, en *Deriva Continental y Tectónica de Placas*, *Selecciones de Scientific American*, Blume, Madrid, 1976, Segunda Edición
2. Tazieff, Haroum, "Cuando la Tierra tiembla", *Ciencia y Técnica*, Siglo veintiuno, editores, México 1986, Segunda Edición
3. Leet, Don y Judson Sheldon, "Fundamentos de geología física", Limusa, México, 1975, Segunda Edición
4. Bolt, A., "Terremotos" Serie Ciencia y Sociedad, Reverté, -- Barcelona, 1981, Primera Edición
5. Mallory, F., Bob y Cargo, David, "Physical geology", International student edition, McGraw-Hill, Missouri, 1979, -- Primera Edición
6. McNally, K., C. y González-Ruiz, J., "Predictability of the whole earthquake cycle and source mechanics for large (7.0-8.1) earthquakes along the middle América trench off shore Mexico". *Earthquakes notes, seismol. Soc. Am.* 1986
7. Tufty, Barbara, "1001 questions answered about earthquakes, -- Avalanches, floods and other natural disasters", Dover, New York, 1978, Primera Edición
8. Kelleher, J., et. al. "Why and where great thrust earthquake occur along island arcs", *Journal Geophysical Research*, California, 1974
9. Minster, J. B. y T. H. Jordan, "Present-day plate motions", *Journal Geophysical Research*, California, 1978
10. Le Febvre, V. L. y Mc Nally, K. C. "Strees distribution and - subduction of aseismic ridges in the middle American - subduction zone", *Journal Geophysical research*, California, 1985
11. Wang, S., Mc Nally, K, C y Geller R., "Seismic strain release along the middle America trench, Mexico", *Journal Geophysical Research Letters*, California, 1981
12. UNESCO, "Terremotos", *Evaluación y mitigación de su peligrosidad*, Blume, Barcelona, 1980, Primera Edición

13. Mena, E. et. al. "Informe preliminar sobre sismos 10B", Centro SCOP, Instrumentación Sísmica, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1985
14. Herrera, Revilla Hismael, et. al., "El sismo del 19 de septiembre de 1985", Informe geofísico y evaluación preliminar, Revista Ingeniería, UNAM, Vol. LV, Núm. 3, - 1985.
15. Girón, Hurtado, Elvia, "De Hiroshima al 19 de septiembre", - entrevista realizada al Dr. Cinna Lomnitz, ICYT, Vol. 8, núm. 119, 1986
16. Prince, Alfaro, Jorge, "Instrumentos usados en mediciones - sísmicas", Instituto de Ingeniería, UNAM, 1962
17. Del Valle, Toledo, Enrique, "Criterios geofísicos sobre el - comportamiento del subsuelo durante el terremoto del - 19 de septiembre de 1985", la ingeniería en México, Re vista Ingeniería, Vol. LVI, núm. 3, 1986
18. Mena, E. et. al. "Catálogo de acelerogramas procesados del sismo del 19 de septiembre de 1985", Parte I: Ciudad de México, Instituto de Ingeniería, UNAM, No. 497, -- 1986
19. Martínez, Alicia, "Isosistas del macrosismo del 19 de septiem bre de 1985", Instituto de Ingeniería, UNAM, No. 504, - 1987.
20. Creixell, José, "Construcciones antisísmicas", Criterios pa ra su cálculo y diseño, CECSA, 1982, Segunda Edición.
21. CNIC, "Normas de emergencia y su aplicación en la reparación de edificios", ciclo de conferencias