

19  
2ej°



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ACATLÁN"

## CAUSAS Y EFECTOS DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 EN LA CIUDAD DE MÉXICO



TESIS CON  
FOLIA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

JAVIER ENRIQUE NAVARRETE SILVA



## **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.

# I N D I C E

	PAGINA
INTRODUCCION.....	1
<b>CAPITULO I RESEÑA HISTORICA DE LOS SISMOS.....</b>	<b>3</b>
1.1. SISMOS EN EL MUNDO.....	3
1.2. SISMOS EN MEXICO.....	7
<b>CAPITULO II ASPECTOS GEOLOGICOS.....</b>	<b>15</b>
II.1. PLACAS TECTONICAS.....	15
II.1.1. PLACA DE COCOS Y PLACA DE LA RIVERA.....	19
II.2. REPLICAS.....	21
II.3. ONDAS SISMICAS.....	22
II.4. MEDICION DE LOS SISMOS.....	25
II.5. CONDICIONES DEL VALLE DE MEXICO.....	36
<b>CAPITULO III EFECTOS DE LOS SISMOS SOBRE LAS ESTRUCTURAS.....</b>	<b>43</b>
III.1. CARACTERISTICAS DE LAS FUERZAS SISMICAS.....	43
III.2. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD.....	46
III.3. SISTEMA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD.....	59
III.4. SISTEMAS INELASTICOS.....	64
III.5. EFECTO DE FLEXION.....	68
III.6. EFECTOS DEL SUELO LOCAL.....	74
<b>CAPITULO IV CARACTERISTICAS DEL SIGMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1965 Y SU REPLICA DEL 20 DE SEPTIEMBRE.....</b>	<b>77</b>
IV.1. CARACTERISTICAS DEL SIGMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1965.....	77
IV.2. CARACTERISTICAS DE LA REPLICA DEL 20 DE SEPTIEMBRE.....	97
<b>CAPITULO V CAUSAS DE FALLA EN ALGUNAS CONSTRUCCIONES DE LA CIUDAD DE MEXICO.....</b>	<b>105</b>
V.1. CAUSAS NATURALES QUE ORIGINARON FALLAS EN LAS ESTRUCTURAS.....	105
V.2. SISTEMAS ESTRUCTURALES.....	106
V.3. CARACTERISTICAS DE LAS CONSTRUCCIONES DAMADAS.....	108
V.4. ZONIFICACION DEL DANO.....	120
V.5. TIPO DE FALLAS ESTRUCTURALES.....	127
V.6. COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES.....	136
V.7. DANOS EN OTROS TIPOS DE CONSTRUCCIONES.....	139

<b>CAPITULO VI</b>	<b>ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DEL D.F. ANTERIOR AL SISMO Y EL NUEVO REGLAMENTO. ....</b>	<b>141</b>
VI.1.	CAUSAS QUE PRODUCAN CAMBIOS EN LOS REGLAMENTOS. ....	141
VI.2.	REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DE 1976, NORMAS DE EMERGENCIA Y REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DE 1987. ....	146
VI.2.1	REGLAMENTO DE 1976. ....	146
VI.2.2	NORMAS DE EMERGENCIA. ....	147
VI.2.3	REGLAMENTO DE 1987. ....	150
<b>CAPITULO VII</b>	<b>SEGURIDAD URBANA ANTE FENOMENOS SISMICOS. ....</b>	<b>169</b>
VII.1.	RIESGO SISMICO EN LA CIUDAD DE MEXICO. ....	159
VII.2.	MEDIDAS A TOMAR EN REGIONES URBANAS PROPENSAS A TERREMOTOS. ....	173
<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>.....</b>	<b>189</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	<b>.....</b>	<b>195</b>

La cosa más bella que podemos experimentar es lo misterioso. Es la fuente de toda verdad y ciencia. Aquel para quien esa emoción es ajena, aquel que ya no puede maravillarse y extasiarse ante el miedo, vale tanto como un muerto: sus ojos están cerrados... Saber que lo impenetrable para nosotros existe realmente, manifestándose como la prudencia máxima y la belleza más radiante que nuestras torpes capacidades pueden comprender tan solo en sus formas más primitivas... este conocimiento, este sentimiento, se encuentra en el centro de la verdadera religiosidad. En ese sentido, pertenezco a las filas de los hombres religiosos devotos.

ALBERT EINSTEIN.

## INTRODUCCION .

El 19 de septiembre de 1985 cerca de las 7:19 hrs. la Ciudad de México era sacudida por un fuerte terremoto, el cual destruyó cientos de edificaciones, costando la vida de miles de compatriotas. En ese tiempo era estudiante del 5º semestre de la carrera de Ingeniería Civil, tratando de explicarme el por que de la falla de tantas construcciones que se veían derrumbadas sobre las calles de la Ciudad. Pero al no poder comprender esto, nació el deseo de llenar tal inquietud, para poder saber la causa de tantas pérdidas de vidas. Al llegar a los últimos semestres de la carrera, empezaba a comprender algunas cosas, al mismo tiempo que se me pedía establecer el tema de tesis, con lo cual se presentaba la oportunidad de llegar a profundizar en el tema y compartir estas explicaciones a través del presente trabajo.

Al empezar las investigaciones me daba cuenta de que se trataba de fenómenos que son procesos de la vida misma de la Tierra, en que hemos ido descubriendo paulatinamente que la especie humana tiene unos pocos millones de años de edad y vive en un planeta que es mil veces más viejo. Nuestra civilización técnica moderna ocupe solo una diezmilésima parte de la edad de la humanidad. Por lo tanto estamos en los inicios de la ciencia y la tecnología, marcando apenas nuestras hipótesis y teorías tanto de los sismos, como de las estructuras.

El hombre, según los datos más recientes, ha llegado, mediante perforaciones, mas allá de los 10 kilómetros - específicamente a los 12 kilómetros- si relacionamos esta cifra con la longitud del radio terrestre de 6,374 kilómetros, podemos decir que hoy a finales del siglo XX, conocemos directamente menos del 0.2% del interior de nuestro planeta.

Si aún no conocemos directamente el 99.98% del interior de nuestro planeta y si todavía no hemos podido confeccionar las bases de un comportamiento de dónde y cuándo ocurrirán los fenómenos sísmicos, la razón, la lógica y la conciencia nos imponen, como la mejor medida de seguridad, profundizar en los estudios de riesgo sísmico y el comportamiento de las estructuras ante estos fenómenos.

El estudio de la Ingeniería Sísmica y del riesgo sísmico para una nación como la nuestra, que está en la insidencia de varias placas litosféricas activas, no son temas ligeros y, por lo tanto el conocimiento y la difusión de ellos deben ser continuos. Tal vez la mayor parte de la gente que vivimos los sismos de septiembre de 1985 hemos hecho más por olvidar estos que por estar prevenidos para afrontar algún fenómeno similar.

El presente trabajo esta conformado de la siguiente manera. El capítulo I trata sobre la sismicidad mundial, identificando las zonas más activas, además del caso particular de la República Mexicana. El capítulo II es un breve estudio de la teoría de tectónica de placas, así como de otros asuntos geofísicos que puedan ayudar a comprender la respuesta de las estructuras ante movimientos telúricos. En el capítulo III se trata el tema de la dinámica estructural en su forma más elemental, teniendo como base el libro de Diseño Estructural del Ing. Roberto Meli Piralla, ante la dificultad de tratar el tema de una forma breve y básica. El capítulo IV versa sobre las mediciones que se hicieron en la Ciudad de México del sismo del 19 de septiembre de 1985 y su réplica del día 20. En el capítulo V tenemos una breve descripción de las fallas más comunes que se tuvieron en los diferentes tipos de estructuras. El capítulo VI es una rápida comparación entre el reglamento anterior al sismo y el que ahora está en vigor, refiriéndose únicamente a lo que es diseño por sismo. Por último en el capítulo VII se dan una serie de medidas que pudieran tenerse en cuenta ante un fenómeno sísmico.

## CAPITULO I

### RESEÑA HISTORICA DE LOS SISMS.

*"Un mal terremoto destruye en un momento las más viejas asociaciones; el mundo el verdadero símbolo de todo lo que es sólido, se movió debajo de nuestros pies como una cortesa sobre un fluido; un segundo de tiempo creó en la mente un sentimiento de inseguridad, que horas de reflexión no producirían."*

CHARLES DARWIN (Reflexiones sobre su experiencia en el terremoto de estación del 20 de febrero de 1835 en Concepción, Chile).

#### 1.1 SISMS EN EL MUNDO.

La humanidad a través de los siglos ha tenido que enfrentarse a los diferentes fenómenos naturales, dentro de los fenómenos naturales con mayor potencia destructiva se encuentran los sísmos, a los que el hombre ha empezado a estudiar con base en el método científico. Estos fenómenos son tan implacables que en unos cuantos segundos pueden perderse miles de vidas, bienes materiales, salud y seres queridos. El hombre queda atomizado ante las fuerzas enormes de la naturaleza, pero gracias a su capacidad de investigación comienza a entender las causas de estos fenómenos, a visualizar en qué puntos del planeta suceden con más frecuencia y qué medidas tomar para que los efectos de los temblores no sean tan devastadores.

Base importante para el estudio de los sismos es el registro cronológico de éstos, por lo que a continuación se presenta una lista de terremotos en los diferentes puntos del planeta, en diferentes épocas, que han provocado enormes daños o que han sido muy intensos. En esta lista se indica la magnitud del sismo, que es una medida del tamaño del temblor y se relaciona con la energía liberada durante el fenómeno, en el capítulo siguiente se dará una definición más completa de magnitud.

TABLA I.1. SISMOS IMPORTANTES EN EL MUNDO.

FECHA	REGION	MUERTOS	MAGNITUD
2000 a. de c.	Turkmenia (URSS)	-----	---
225 a. de c.	Rodas (Grecia)		
856 d. de c./dic.	Corinto, Grecia	45,000	
692 d. de c.	Daipul, India	180,000	
23/May./1893	Ardabil, Irán	150,000	
08/Sep./1138	Ganzah, Siria	230,000	
1201	Mar Egeo	100,000	
1268	Sicilia-Asia Menor	60,000	
27/Sep./1290	Chihli, China	100,000	
20/May./1293	Kamakura, Japón	30,000	
26/Ene./1531	Lisboa, Portugal	30,000	
23/Ene./1556	Shansi, China	850,000	
Sep./1693	Sicilia, Italia	100,000	
30/Dic./1730	Hokkaido, Japón	107,000	
30/Nov./1731	Fekin, China	100,000	
11/Oct./1737	Calcuta, India	300,000	
01/Nov./1755	Lisboa, Portugal	62,000	
04/Feb./1783	Calabria, Italia	50,000	
1779-1780	Tabriz, Irán	100,000	
04/Feb./1797	Quito, Ecuador	40,000	
18/Dic./1820	Echigo, Japón	30,000	
13/Ago./1868	Perú-Ecuador	250,000	
10/Sep./1899	Yakutat Bay, Alaska	-----	8.6
19/Abr./1902	Quetzaltenango, Guatemala	----	8.3
18/Abr./1906	San Francisco, EUA	700	8.2
17/Ago./1906	Santiago, Chile	20,000	8.2
28/Dic./1908	Messina, Italia	30,000	7.5
13/Ene./1915	Avezzano, Italia	30,000	7.0
16/Dic./1920	Kansu, China	180,000	8.5
01/Sep./1923	Kwanto, Japón	100,000	7.9
22/May./1927	Nan-Shan, China	200,000	8.3
26/Dic./1932	Kansu, China	70,000	7.6
31/May./1935	Quetta, India	60,000	7.5
24/Ene./1939	Chillán, Chile	30,000	7.7
27/Dic./1939	Erzincan, Turquía	25,000	8.0
15/Ago./1950	Assam, India	600	8.6
04/Nov./1952	Kamchatka, URSS	-----	8.2
09/May./1957	Aleutianas, EUA	-----	8.3
23/May./1960	Chile	5,000	8.5
28/Mar./1964	Anchorage, Alaska	140	8.6
31/May./1970	Ancash, Perú	60,000	7.7
23/Dic./1972	Managua, Nicaragua	5,000	6.2
04/Feb./1976	Guatemala	23,000	7.5
27/Jul./1976	Tang-Shan, China	650,000	7.6
03/Mar./1985	Valparaíso, Chile	-----	8.0
19/Sep./1985	México, D.F.	10,000	8.1
07/Dic./1988	Armenia, URSS	25,000	6.9

La lista anterior podría crecer grandemente y aún así quedarían muchos sismos importantes fuera. De tal manera que para nuestro propósito es mejor observar un mapa de la actividad sísmica mundial, que muestra las diferentes zonas de la Tierra donde son más frecuentes los temblores.

FIGURA 1.1 MAPA DE ACTIVIDAD SISMICA MUNDIAL (Ref. 1).



Como se aprecia en el mapa anterior la actividad sísmica no está distribuida uniformemente, los sismos se han concentrado a lo largo de líneas o bandas, definiéndose en la corteza terrestre tres macrozonas sísmicas: el cinturón circumpacífico, el cinturón alpino y la zona de baja sismicidad. La primera es la zona que bordea, como su nombre lo indica, al Océano Pacífico, que va desde el extremo sur de América, atravesando Chile, Perú, Ecuador, Colombia, América Central, México, Estados Unidos, Canadá y Alaska para pasar luego por el estrecho de Bering hacia Japón y las islas Filipinas y finalizar en la icla sur de Nueva

Zelanda. El Cinturón Alpino va desde las islas Azores, al extremo occidental de Europa y Africa, cruzando el Mediterráneo, afectando principalmente a la península Ibérica, el norte de Africa, Italia, Grecia, Rumania, Yugoslavia, Irán, Irak, Turquía, pasando por la India y China para finalizar en las islas de Sumatra, Indonesia y Nueva Guinea, donde se une al Cinturón Circumpacífico. El resto de estas zonas es de baja sismicidad, en donde los temblores son poco frecuentes.

El cinturón Circumpacífico es la zona con mayor actividad telúrica, que es donde se libera el 85% de la energía total producida por los sismos anualmente. Como se aprecia nuestro país cubre una parte de esa zona.

La siguiente tabla nos da una idea de la forma en que se presenta la actividad sísmica mundial.

TABLA 1.2. TERREMOTOS MUNDIALES POR AÑO (Ref. 2).

MAGNITUD	NUM. ANUAL PROMEDIO DE TERREMOTOS
mayor de 8.0	2
de 7.0 a 7.9	20
de 6.0 a 6.9	100
de 5.0 a 5.9	3000
de 4.0 a 4.9	15000
de 3.0 a 3.9	más de 100000

## 1.2 SISMOS EN MÉXICO.

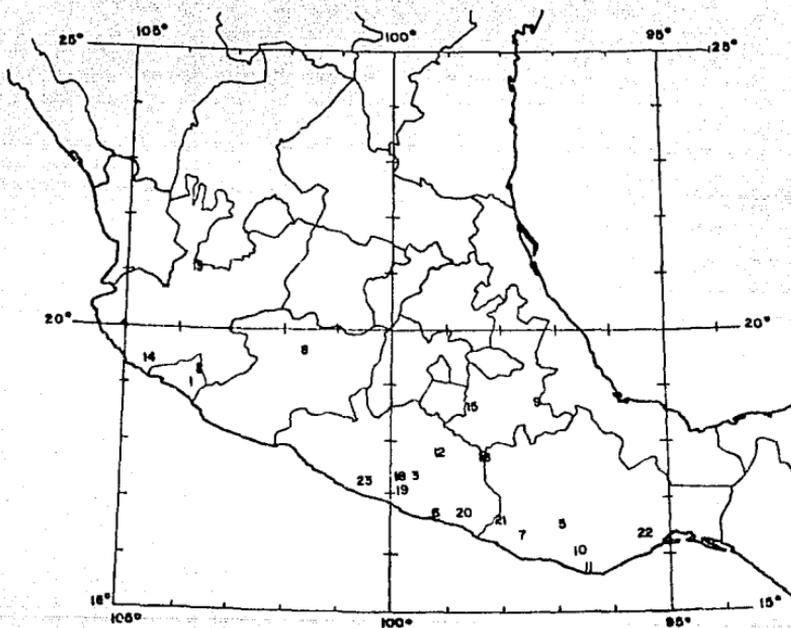
La República Mexicana, como se anotó anteriormente, se encuentra en una de las zonas sísmicas más activas del mundo. El estudio de los sismos en México con bases científicas, ha sido reciente, pero su ocurrencia ha sido desde tiempos remotos.

Para establecer regiones macrosismicas en nuestro país, se presenta una tabla de los temblores del siglo pasado compilados a partir de reportes de daños y relatos de impresiones personales. Este catálogo por lo tanto es incompleto y puede contener algunos errores.

TABLE 1.3. CATALOGO DE GRANDES TEMBLORES OCURRIDOS EN MEXICO EN EL SIGLO XIX (tomada de Singh et.al. 1981).

EVENTO	FECHA	REGION	EPICENTRO		M
			LAT(°N)	LOG(°W)	
1	25 Mar. 1806	Costa de Colima-Mich.	18.9	103.8	7.5
2	31 May. 1818	Costa de Colima-Mich.	19.1	103.6	7.7
3	04 May. 1820	Costa de Guerrero	17.2	99.6	7.6
4	22 Nov. 1827	Jalisco	20.0	105.0	7.7
5	09 Mar. 1845	Oaxaca	16.6	97.0	7.5
6	07 Abr. 1845	Costa de Guerrero	16.6	99.2	7.9
7	05 May. 1854	Costa de Oaxaca	16.3	97.6	7.7
8	19 Jun. 1858	Norte de Michoacán	19.6	101.5	7.5
9	03 Oct. 1854	Puebla-Venacruz	18.7	97.4	7.3
10	11 May. 1870	Costa de Oaxaca	15.8	96.7	7.9
11	27 Mar. 1872	Costa de Oaxaca	15.7	96.6	7.4
12	16 Mar. 1874	Guerrero	17.7	99.1	7.3
13	11 Feb. 1875	Jalisco	21.0	103.8	7.5
14	09 Mar. 1875	Costa de Jalisco-Col.	19.4	104.6	7.4
15	17 May. 1879	Puebla	18.6	98.6	7.0
16	19 Jul. 1882	Guerrero-Oaxaca	17.7	98.2	7.5
17	03 May. 1887	Bavispe, Sonora	31.0	109.2	7.3
18	29 May. 1887	Guerrero	17.2	99.8	7.2
19	06 Sep. 1889	Costa de Guerrero	17.0	99.7	7.0
20	02 Dic. 1890	Costa de Guerrero	16.7	98.5	7.2
21	02 Nov. 1894	Costa de Oaxaca-Gro.	16.5	98.0	7.4
22	05 Jun. 1897	Costa de Oaxaca	16.3	95.4	7.4
23	24 Ene. 1899	Costa de Guerrero	17.1	100.5	7.9

FIGURA 1.2. LOCALIZACION DE EPICENTROS DE GRANDES TEMBLORES EN MEXICO EN EL SIGLO XIX.



Ahora se muestra un catálogo de los grandes sismos de México que han ocurrido en el transcurso de este siglo. Los datos aquí presentados son más confiables que los de la tabla anterior, ya que en este siglo se tuvieron los aparatos necesarios para la medición y localización de sismos. Haciendose la aclaración que es a partir de la década de los 60 cuando se tienen aparatos de mayor precisión.

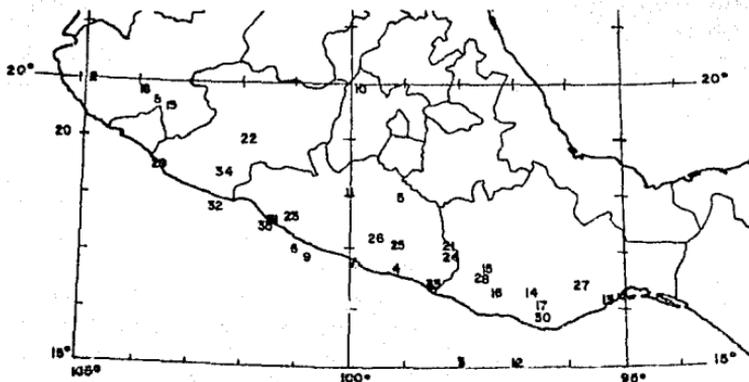
TABLA I.4. CATALOGO DE GRANDES SISMOS DE MEXICO ( $M_s \geq 7.0$ ) POCO PROFUNDOS. H  $\leq 65$  Km. REGION COMPRENDIDA:  $15^{\circ}$ - $20^{\circ}$  N,  $94.5^{\circ}$ - $105.5^{\circ}$  W.

SUCESO	FECHA <sup>1</sup>	HORA <sup>1</sup> h:m:s	LATITUD (°N)	LONGITUD (°W)	PROFUNDIDAD (KM.)	M
1	20 Ene. 1900	06:33:30	20.0	105.0	H	7.0
2	16 May. 1900	20:12:00	20.0	105.0	H	7.1
3	14 Ene. 1903	01:47:36	15.0	98.0	H	7.3
4	15 Abr. 1907	05:08:06	16.7	99.2	H	7.9
5	26 Mar. 1908	23:03:30	18.0	99.0	80	7.8
6	27 Mar. 1908	03:45:50	17.0	101.0	H	7.2
7	30 Jul. 1009	10:51:54	16.8	99.9	H	7.5
8	07 Jun. 1911	11:02:42	19.7	103.7	H	7.8
9	16 Dic. 1911	19:14:18	16.9	100.7	H	7.6
10	19 Nov. 1912	13:55:07	19.9	99.8	H	7.0
11	21 Nov. 1916	06:25:24	18.0	100.0	H	7.0
12	29 Dic. 1917	22:50:20	15.0	97.0	H	7.1
13	22 Mar. 1928	04:17:03	16.2	95.4	H	7.7
14	17 Jun. 1928	03:19:28	16.3	96.7	H	8.0
15	04 Ago. 1928	18:28:16	16.8	97.6	H	7.4
16	09 Ago. 1928	03:01:07	16.3	97.3	H	7.8
17	15 Ene. 1931	01:50:40	16.1	96.6	H	8.0
18	03 Jun. 1932	10:36:52	19.8	103.9	H	8.4
19	18 Jun. 1932	10:12:10	19.5	103.5	H	8.0
20	30 Nov. 1934	02:05:15	19.0	105.3	H	7.2
21	23 Dic. 1937	13:17:58	17.1	98.1	H	7.7
22	15 Abr. 1941	19:09:51	18.8	102.9	H	7.9
23	22 Feb. 1943	09:20:44	17.6	101.1	H	7.7
24	14 Dic. 1950	14:15:49	17.2	98.1	H	7.3
25	28 Jul. 1957	08:40:10	17.1	99.1	H	7.7
26	11 May. 1962	14:11:57	17.2	99.5	H	7.2
27	23 Ago. 1965	19:46:02	16.3	95.8	H	7.8
28	02 Ago. 1968	14:06:43	16.6	97.7	H	7.4
29	30 Jun. 1973	21:01:18	18.4	103.4	32	7.5
30	29 Nov. 1978	10:52:47	16.0	96.6	19	7.8
31	14 Mar. 1979	11:07:11	17.5	101.5	15	7.6
32	25 Oct. 1981	03:22:13	17.7	102.5	20	7.3
33	07 Jun. 1982	06:52:32	16.4	98.5	15	7.0
34	19 Sep. 1985	13:15:50	18.1	102.4	16	8.1
35	21 Sep. 1985	01:37:09	17.3	101.4	H	7.5

Tomado de: Catalog of Shallow Earthquakes of Mexico from 1900 to 1981, S.P. Singh, M. Rodriguez y J.M. Espindola. Instituto de Geofisica, U.N.A.M.

<sup>1</sup> Fecha y hora en el Meridiano de Greenwich (G.M.T.)

FIGURA 1.3. LOCALIZACION DE EPICENTROS DE GRANDES TEMBLORES EN MEXICO DURANTE EL SIGLO XX.



La fecha y la hora de un sismo se refieren al Tiempo Medio de Greenwich (GMT), para que los diferentes observatorios del mundo puedan comparar las horas de llegada de las ondas sísmicas, teniéndose un solo marco de referencia en sus mediciones.

Del estudio de la tabla anterior se puede apreciar que en los últimos 87 años han ocurrido 35 temblores con  $M \geq 7.0$  y 7 temblores con  $M \geq 7.9$  en la región comprendida por el catálogo. Después del temblor de Jalisco de 1932 ( $M = 8.4$ ), el sismo del 19 de septiembre de 1985 es el segundo gran sismo que ha ocurrido en nuestro territorio en lo que va de este siglo.

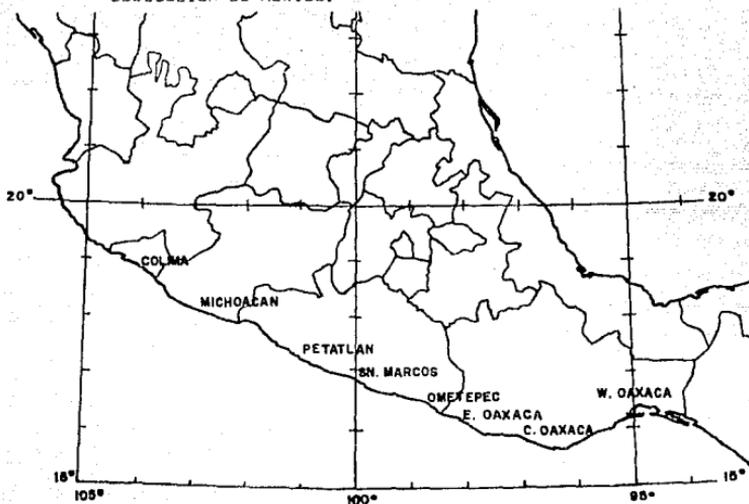
A través de las últimas dos tablas se pueden inferir periodos de recurrencia para algunas zonas de subduccion (véase capítulo II). Los resultados se presentan en la tabla siguiente (modificada a partir de Singh, et. al., 1981).

TABLA 1.5. PERIODOS DE RECURRENCIA OBSERVADOS DE GRANDES TEMBLORES SUPERFICIALES A LO LARGO DE LA ZONA DE SUBDUCCION DE MEXICO (Ref. 3).

REGION	LOCALIZACION APROX.		AÑO DEL EVENTO	PERIODO PROMEDIO (AÑOS)
	LAT. (°N)	LONG. (°W)		
Este de Oaxaca	16.2	95.8	1897(7.4); 1928(7.7); 1965(7.8).	34
Centro de Oaxaca	16.0	96.8	1870(7.9); 1928(8.0); 1978(7.8).	54
Oeste de Oaxaca	16.6	97.7	1854(7.7); 1894(7.4); 1928(7.4); 1968(7.4).	38
Ometepec	16.5	98.5	1950(7.3); 1982(7.0);	32
San Marcos	16.7	99.2	1845(7.2); 1907(8.0); 1957(7.7).	56
Petatlán	17.3	101.4	1943(7.7); 1979(7.6).	36
Michoacán	18.1	102.5	1911(7.9); 1985(8.1).	74
Colima	18.4	103.2	1941(7.9); 1973(7.5).	32

Los datos en *letra itálica* son menos confiables.  
El dato entre paréntesis es la magnitud del sismo.

FIGURA 1.4. LOCALIZACION DE REGIONES DE PERIODOS DE RECURRENCIA DE GRANDES TEMBLURES SUPERFICIALES A LO LARGO DE LA ZONA DE SUBDUCCION DE MEXICO.



Se llama brecha sísmica o gap a cierta zona sísmicamente activa en donde se han dado fuertes sismos en el pasado y que ha tenido un largo período de quietud o inactividad, por lo que se considera que se ha estado acumulando energía, siendo posible que ocurra en un futuro próximo un sismo de magnitud considerable.

"Resulta evidente que la Costa Grande de Guerrero (al norte de Acapulco) no ha generado un macrosismo desde principios de siglo, y que en la Costa Chica al sur de Acapulco no se han producido sismos importantes desde el temblor de 1957. El área

ocupada actualmente por la brecha de Guerrero podría generar un sismo de magnitud 8.0 a 8.2 si se rompiese en un sólo evento sísmico."<sup>1</sup>

Para cerrar este capítulo podemos citar una frase que hace alusión al párrafo anterior:

"Cuando un científico declara que algo es posible, casi con toda certeza tiene razón. Cuando asevera que algo es imposible, probablemente está equivocado."

Arthur C. Clarke.

---

<sup>1</sup> Suárez Reynoso, Gerardo. *El potencial sísmico en México: una perspectiva histórica*. Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, Zihuatanejo, México. Noviembre, 1986.

## C A P I T U L O I I

### ASPECTOS GEOLOGICOS.

*"Los terremotos empiezan entre los 10 y 15 kilómetros de profundidad, y sin embargo, sabemos menos acerca de las condiciones físicas de allá abajo, que sobre el espacio interestelar."*

RUSS EVANS.

#### II.1. PLACAS TECTÓNICAS.

Literalmente "sismo" proviene de la palabra griega seismos que significa: agitación. Un sismo ocurre cuando se tiene una vibración de la tierra.

Pueden existir varias causas que provoquen un sismo tales como:

- Colapsos de Cavernas
- Explosiones
- Impactos de Meteoritos
- Actividad Volcánica
- Movimientos Tectónicos

De estas causas la que libera más energía y que tiene una repercusión mayor en las obras de Ingeniería en una región amplia, son los movimientos tectónicos a los cuales trataremos en detalle.



En el interior de las placas tectónicas hay muy poca o ninguna deformación lo que hace que las placas se comporten como islas sólidas que se desplazan sin cesar las unas respecto a las otras, los desplazamientos pueden ser de una placa bajo otra, lateralmente, de separación o que choquen frontalmente. En la región donde son los movimientos, cientos de kilómetros cúbicos de roca son deformados, lo que permite la acumulación de energía potencial (como si fuera un resorte) y en un determinado momento los esfuerzos actuantes al ser superiores a la fricción que los detiene, producen lo que se conoce como disparo sísmico.

Hay tres tipos de contacto entre placas:

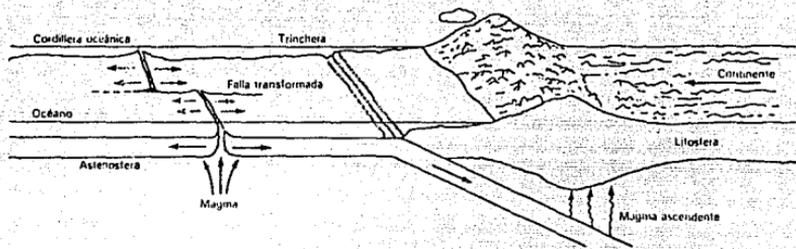
a) Los contactos constructivos: se hallan en las dorsales oceánicas, donde se está creando nueva corteza oceánica que empuja alejándose entre sí a las dos placas hacia los lados.

b) Los contactos o márgenes destructivos: están situados en las fosas oceánicas, que son regiones de choque entre placas, en donde una placa se hunde debajo de la otra formando ángulos de hasta 45° que llegan a alcanzar el manto.

c) Los contactos conservativos: ni se crea ni se destruye corteza, sino que las placas se limitan a deslizarse la una respecto a la otra.

La litosfera sigue un proceso de rejuvenecimiento en el cual el material nuevo que emerge tiene que ocupar un espacio, por lo tanto en algún lado debe de existir algo que cree el equilibrio, entonces se tendrá que destruir una parte de las placas por la superficie nueva que se ha creado, ya que la superficie de la Tierra es constante. Esto ocasiona que una placa se deslice sobre otra, o que se inserte una debajo de otra, esto último es conocido como subducción. Ver figura 11.2.

FIGURA II.2. FENOMENO DE SUBDUCCION (Ref. 4).

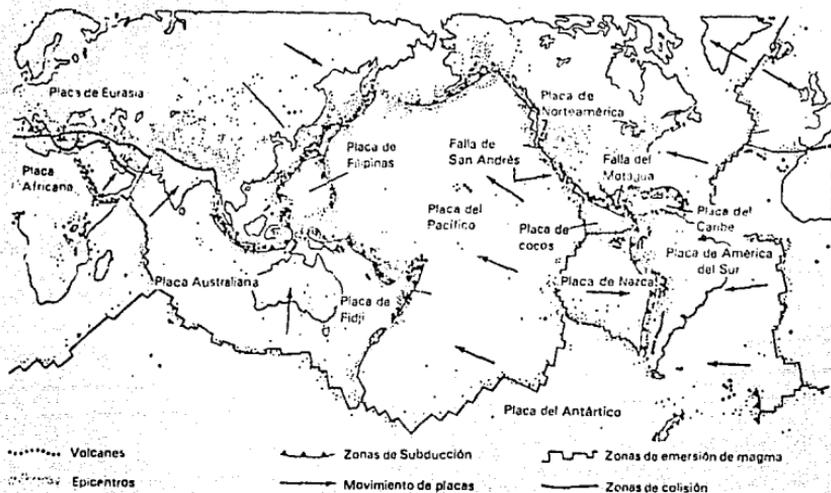


Las zonas de creación de nueva litósfera se presentan como cordilleras oceánicas y las zonas de subducción forman a menudo trincheras submarinas de gran profundidad. Por otra parte se puede observar (figura 11.1.) que las distintas placas no coinciden con los continentes y los océanos, sino que pueden tener corteza oceánica y continental.

El movimiento que se lleva a cabo en las placas ha variado la posición de los continentes a través del tiempo geológico (millones de años) y se piensa que estuvieron todos reunidos en un gran continente llamado Pangea. Este puede explicar el ajuste que hay entre las costas de Sudamérica y África.

Si sobreponemos los mapas de actividad sísmica (capítulo I) y el de placas tectónicas se observará que las regiones del mundo con mayor actividad sísmica se encuentran actualmente en los límites entre dos o más placas distintas, como se observa en la figura 11.3.

FIGURA II.3. RELACION ENTRE LIMITES DE PLACAS Y ACTIVIDAD SISMICA (Ref. 5).

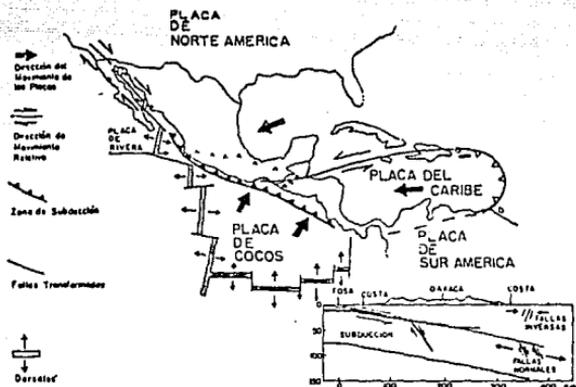


### II.1.1. PLACA DE COCOS Y PLACA DE LA RIVERA.

Como se muestra en la figura II.4 la placa de Cocos se mete debajo de la placa Continental, la placa de Cocos va desde la costa de Colima hasta Centroamérica, en el Océano Pacífico, y hasta la isla de Cocos muy cerca del ecuador en el sentido sur. Su área es de aproximadamente 1'900,000 km<sup>2</sup> y su desplazamiento es de entre 6 y 7 cm cada año respecto al continente, lo que los geólogos llaman una placa tectónica "rápida". La energía que se libera en el movimiento telúrico del 19 de septiembre de 1985 fue provocado por un desplazamiento de esta placa. La gran mayoría de

los sismos que tienen su origen en la costa del Pacífico se deben a los desplazamientos que tiene la placa de Cocos en su fenómeno de subducción.

FIGURA II.4. LOCALIZACIÓN DE LA PLACA DE COCOS Y DE LA RIVERA



La actividad sísmica que se tiene a consecuencia de la subducción de la placa de Cocos debajo de la placa Continental es una de las de mayor intensidad en el mundo. De ella cabe esperarse sismos frecuentes de magnitud cercana a los 7.5 grados en la escala de Richter.

La placa de la Rivera es de menor tamaño comparativamente con las demás, esta se incrusta bajo el estado de Jalisco, con una velocidad de aproximadamente 2.5 cm/año. La frontera de la placa

de la Rivera con la placa de Cocos es algo incierta pero se estima que intersecta la costa de México cerca de Manzanillo (19.1°N, 104.3°W).

## II.2. REPLICAS.

No se conoce de una manera precisa cuales son las causas que dan origen a sismos menores después de ocurrir un temblor principal, pero se piensa que el desplazamiento de una falla no es uniforme, ni constante, sino que existen rugosidades en ciertas zonas. Ya que se liberó la energía en el sismo principal, es muy probable que se darán sismos, generalmente de magnitud menor llamados réplicas, estos se deben a que las placas quedan atoradas en ciertas rugosidades en las que no se ha liberado la energía, ésta energía se descarga en forma gradual con temblores de menor magnitud que el sismo principal.

La magnitud de las réplicas depende de las características regionales donde ocurrió el sismo principal, siendo particulares las que se producen en la costa del Pacífico de nuestro país, las cuales no corresponden a otros modelos de diferentes partes del planeta. No hay reglas para la secuencia de las réplicas pero la mayor parte de las veces van disminuyendo conforme transcurre el tiempo de forma logarítmica.

Para el caso del sismo que estamos estudiando, la repetición del sismo principal el viernes 20 de septiembre de 1985, desde el punto de vista del sismólogo Lomnitz, no fue una réplica, los dos eventos en rigor fueron uno solo, pues el segundo correspondió a la otra parte del primero, un poco demorada. Parece ser que el jueves 19 de septiembre se rompió un segmento de la placa desde un poco al norte de Lázaro Cárdenas (Michoacán) hasta poco más al norte de Zihuatanejo (Guerrero), y el día 20 terminó de romperse el segmento hasta Petatlán (Guerrero), aproximadamente (Ref. 6).

### 11.3. ONDAS SISMICAS.

En las fallas que no se han movido durante mucho tiempo se acumula energía (como la que se almacena en un resorte comprimido), que se libera en forma repentina y se gasta en crear la falla, romper la roca y vencer la fricción entre ambas caras de la fractura, que tratan de frenar el movimiento; otra parte puede permanecer en las rocas como esfuerzo residual y el resto se libera en forma de ondas sísmicas que se propagan por el interior y la superficie de la Tierra poniéndola en vibración.

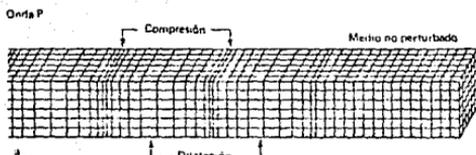
Hay tres tipos básicos de ondas elásticas que son las que producen los movimientos del terreno y causan daños en un sismo.

Ondas P. La más veloz de las ondas es la llamada primaria u onda P. Su movimiento es similar al de una onda de sonido, en que a medida que se propaga, comprime y tensiona en forma alternada a la roca (Figura 11.5). Las ondas P, como las ondas sonoras, pueden viajar por medios sólidos (montañas de granito), medios líquidos (magma volcánico o el agua de los océanos) y aún por sus características parecidas a las del sonido pueden salir desde el interior de la Tierra a la superficie y una parte de ellas puede ser transmitida a la atmósfera como ondas sonoras, que pueden ser oídas por los animales y los humanos si sus frecuencias están dentro del rango del oído. La velocidad de las ondas P varía de acuerdo a las propiedades del medio; por ejemplo en las rocas ígneas tienen una velocidad aproximadamente de 6 km/seg. y por las rocas poco consolidadas de alrededor de 2 km/seg.

De manera que el tiempo que tardarían las ondas P en llegar de un sismo originado en la costa de Acapulco a la Ciudad de México sería alrededor de un minuto en promedio ya que estas ondas tendrían que pasar sobre diferentes tipos de estratos.

FIGURA 11.5. DEFORMACION DE UN MEDIO ELASTICO POR LAS ONDAS P

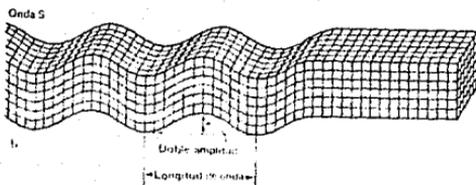
(Ref. 2).



Ondas S. La onda más lenta dentro del interior de las rocas es la llamada secundaria o onda S. Cuando una onda S se propaga deforma la roca lateralmente en ángulo recto a la dirección de propagación (Figura 11.6). Se sabe que las ondas S no pueden transmitirse en medios líquidos, tales como los océanos. La velocidad de las ondas S es menor que las de las ondas P y estas velocidades dependen de la densidad y propiedades elásticas de las rocas y el suelo a través de los que viajan.

FIGURA 11.6. DEFORMACION DE UN MEDIO ELASTICO POR LAS ONDAS S

(Ref. 2).



En todos los sismos la onda P es percibida primero. La diferencia de tiempo entre los arribos de las ondas P y S a veces es llamado prefase, que se indica por  $t_{s-p}$  y está relacionado con la distancia D a la fuente de origen como:

$$D = t_{s-p} * V_p * V_s / (V_p - V_s) \quad \text{Ec. (2.1)}$$

donde: D = distancia de donde se registra la prefase al lugar donde se origina el sismo.

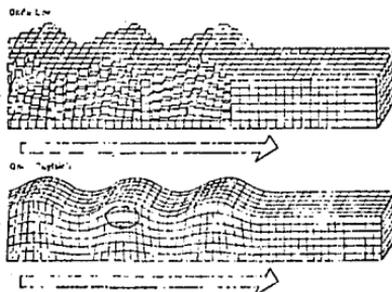
$t_{s-p}$  = prefase, diferencia de tiempo entre las ondas P y S.

$V_p$  = velocidad de las ondas P

$V_s$  = velocidad de las ondas S

Ondas superficiales. Son llamadas así porque su movimiento está restringido a la superficie del suelo. Las ondas superficiales se dividen en dos. Una de ellas se llama onda Love y su movimiento es esencialmente, el mismo que el de las ondas S, pero que no tiene desplazamiento vertical; mueve el suelo de lado a lado en un plano horizontal paralelo a la superficie del terreno, en ángulo recto a la dirección de propagación (Figura II.7). El otro tipo de onda superficial es la onda Rayleigh, que debido a su componente vertical de su movimiento, puede afectar a líquidos. Las ondas superficiales generalmente viajan todavía a menor velocidad que las ondas S.

FIGURA II.7. DEFORMACION DE UN MEDIO ELASTICO POR LAS ONDAS SUPERFICIALES (LOVE Y RAYLEIGH) (Ref. 2).



Las ondas sísmicas al propagarse se van amortiguando con la distancia y modifican sus características dependiendo de las condiciones topográficas y geotécnicas de las regiones que atraviesan. Pero la influencia de los aspectos locales puede provocar una amplificación del movimiento, como sucedió en algunas zonas de la Ciudad de México.

Ahora sabemos que el suelo blando de la capital, lejos de amortiguar los movimientos del terreno, como algunas personas creyeron en el pasado, amplifica las ondas y provoca mayores aceleraciones. Este es un factor de riesgo sísmico que se debe tomar en cuenta.

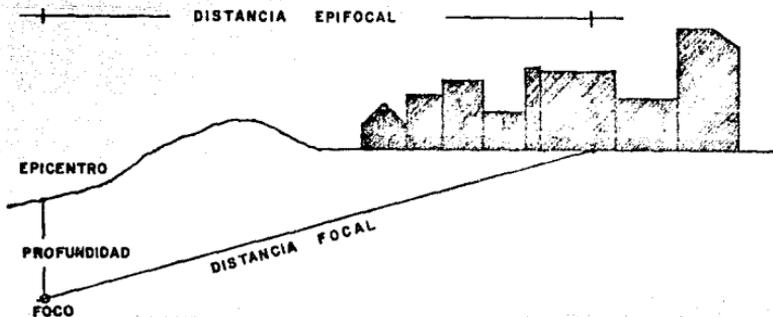
#### II.4. MEDICION DE LOS SISMOS.

Al lugar donde se inicia el fallamiento que produce los sismos se le llama foco o hipocentro, a grandes distancias el plano completo de ruptura aparece como un punto. Su determinación se hace en la mayoría de los casos estudiando la porción inicial

de los registros sísmicos, por lo que el foco que se reporta es casi siempre el sitio donde se inicia la perturbación, aún cuando el temblor se origine en varios puntos. El epifoco o epicentro es la proyección vertical del foco en la superficie terrestre.

Se definirá como estación al lugar en donde interesa conocer los efectos del temblor. La distancia del epicentro a la estación es la llamada distancia epifocal y del foco a la estación es la distancia focal, también es importante decir que la distancia entre el epicentro y el foco es llamada profundidad del foco.

FIGURA II.8. ILUSTRACION DE LA DISTANCIA EPIFOCAL Y FOCAL.



Mientras mayor es la distancia al epicentro, más diferencia existe en los tiempos de recorrido de los distintos tipos de ondas, de forma que lejos de él, puede sentirse con más duración un temblor que fué breve en el lugar donde se generó.

Se consideran sismos someros, si suceden a una profundidad menor de 60 kms.; profundos si están a más de 300 kms. de profundidad y de profundidad intermedia a los que suceden entre los 60 y 300 kms. de profundidad.

Para percibir con cierta exactitud el movimiento del terreno se hace uso de instrumentos precisos. Los registros obtenidos con ellos son fundamentales para el estudio y la comprensión del comportamiento del suelo y de las estructuras durante un sismo. A continuación se presenta una breve descripción de estos instrumentos.

Un sismógrafo sirve para captar, amplificar e inscribir el movimiento del suelo provocado por el paso de las ondas sísmicas de un temblor o cualquier otro fenómeno vibratorio. En este aparato se registran los llamados sismogramas y en ellos en ocasiones se puede apreciar los diferentes tipos de ondas sísmicas en orden sucesivo de tiempo en que llegan a una estación sismológica.

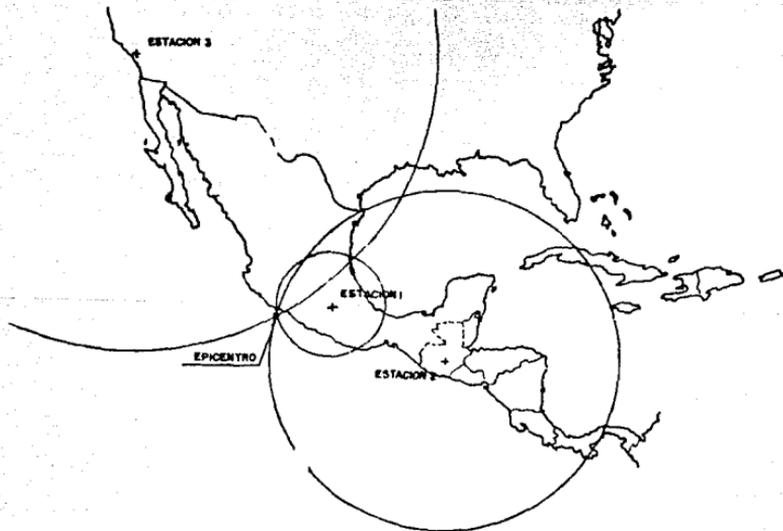
Los sismógrafos son instrumentos de muy alta sensibilidad, con capacidad para detectar sismos fuertes lejanos o débiles cercanos, que registran a base de amplificar las ondas sísmicas con la finalidad de ganar resolución en la medida, pero al ser muy sensibles no pueden registrar sismos fuertes cercanos, debido a que se saturan (las agujas indicadoras llegan a sus topes).

Las ondas internas provocadas por un sismo salen al mismo tiempo del foco y van llegando a las estaciones sismológicas de acuerdo con sus velocidades, detectándose primero las ondas P, luego las S y después las superficiales. Cabe aclarar que en cierto instante puede que estén presentes los tres tipos de ondas. Los sismólogos saben que la diferencia de tiempo entre que

llegan las ondas P y S (prefase) registradas en una estación, está relacionada con la distancia al sitio donde se originó el sismo, como se mencionó en el subcapítulo anterior.

El método más sencillo para encontrar el epicentro de un temblor consiste en localizar en un mapa de cierta escala las estaciones sismológicas, luego haciendo centro en cada estación se traza un círculo el cual tiene un radio igual a la distancia encontrada previamente ( $D = t_{s-p} * V_p * V_s / (V_p - V_s)$ ) y llevada a escala del mapa. En el punto donde intersectan los círculos trazados, está localizado el epicentro. Para utilizar este procedimiento se necesita de por lo menos tres estaciones sismológicas, ver figura II.9.

FIGURA II.9. LOCALIZACION DEL EPICENTRO.



En la práctica, la localización de los epicentros es más complicada, pero se sigue este principio básico, el proceso se ha sistematizado bajo computadoras, haciendo el cálculo mucho más rápido.

El acelerógrafo es un instrumento que ayuda en gran medida a la ingeniería sísmica ya que puede hacer mediciones de sismos de gran intensidad cercanos que son los que interesan a la ingeniería. Este aparato registra las aceleraciones del suelo, de un lugar determinado de la estructura o en donde se coloque el acelerógrafo. Estos aparatos empiezan a funcionar cuando el movimiento tiene cierta intensidad y continúan su registro por muy fuerte que sea el sismo. Registran simultáneamente la aceleración en dos direcciones horizontales ortogonales y en una vertical.

Al registro de los acelerógrafos se le llama acelerograma y es la historia de las aceleraciones provocadas por el sismo en una dirección dada y constituye la descripción más útil del movimiento del suelo en un lugar.

Las características de los acelerogramas que más se relacionan con la potencialidad destructiva del sismo son, la aceleración máxima, la duración de la etapa sensible (cuando la aceleración tiene un valor considerable) y por último la frecuencia dominante del movimiento.

La aceleración no es el único parámetro del movimiento del suelo que influye en la respuesta de las estructuras; también son importantes la velocidad y el desplazamiento del terreno. Al integrar en el tiempo el acelerograma se puede obtener la historia de velocidades y volviendo a integrar esta última se obtienen la de desplazamientos del terreno. La integración se hace con métodos numéricos a través de una computadora.

Es importante en la medición de los sismos conocer las aceleraciones, velocidades y desplazamientos ya que con ello se pueden calcular aproximadamente los esfuerzos a que están sometidas las estructuras.

Los sismoscopios son aparatos mucho más sencillos que los acelerógrafos; son péndulos que representan estructuras reales (con un periodo de vibrar y un cierto amortiguamiento) y su registro permite obtener la aceleración máxima para ese sistema. Su empleo está decayendo en la actualidad.

Para medir los sismos se utilizan dos escalas: la de Richter y la de Mercalli. En la escala de Richter se mide de una manera indirecta la energía liberada por un sismo y debe ser igual, dentro de cierto margen, para cualquier estación sismológica del mundo. En la escala de Mercalli se miden los efectos que se tienen sobre objetos comunes y construcciones en un determinado lugar y varía de lugar a lugar. Por lo tanto, un sismo tiene un único valor en la escala de Richter y un número indefinido en la escala de Mercalli dependiendo de cuantos puntos se consideren en la superficie terrestre.

La idea de catalogar los sismos fue la causa por la cual en 1935 el sismólogo Francis Richter introdujo el concepto de magnitud de un temblor. En 1935 Richter y Belo Gutenberg, estudiaron los sismos de California y definieron como magnitud el logaritmo de base diez de la amplitud máxima (en milésimas de milímetro) registrada en un sismógrafo estándar a una distancia de 100 kms. del epicentro del terremoto.

La energía que se libera en un sismo es tan grande del orden de  $10^{25}$  ergios (1 ergio = 1 dina  $\times$  1 cm.) que para la medición de esta se usa una escala logarítmica que simplifica la enorme cantidad, que es la magnitud del temblor en la escala de Richter.

La magnitud de un temblor es una medida indirecta de la energía que se libera. Entre la magnitud  $M$  calculada a partir de un sismograma mediante la definición de Richter y la energía liberada  $W$  existe la siguiente relación:

$$\text{Log}_{10} W = 11.8 + 1.5M$$

$W$  = energía en ergios

$M$  = magnitud en escala de Richter

La energía liberada por los sismos más grandes, como ya se mencionó anteriormente, es del orden de  $10^{23}$  ergios que es 10,000 veces más grande que la bomba atómica de 20 kilotonnes que destruyó Hiroshima, y aún mayor que las grande bombas nucleares actuales de varios megatonnes (1 kilotón =  $4 \times 10^{14}$  ergs.).

Un sismo grande como el de Michoacán de 1985 libera una energía de  $E_w = 8.91 \times 10^{23}$  ergs. ( $M=8.1$ ), mientras que los sismos medianos o pequeños con magnitud  $M=5$  y  $M=3$  generan  $2.0 \times 10^{16}$  y  $2.0 \times 10^{14}$  ergs., respectivamente. De esto podemos observar que la energía liberada por los sismos medianos y pequeños es mucho menor que la liberada por los grandes sismos, de tal manera que se requerirán del orden de 44 millones de sismos de magnitud 3 ó 44,000 de magnitud 5 para liberar la energía correspondiente a uno de magnitud 8.1; por lo tanto la ocurrencia de sismos pequeños no sirven como disipadores de energía.

La magnitud de los sismos está relacionada con la cantidad de energía potencial liberada en el foco sísmico. La acumulación de energía depende del tiempo de interrupción del movimiento de las placas, al ser mayor el tiempo de interrupción (quietud o brecha sísmica) se espera una mayor magnitud del próximo sismo.

La intensidad es una medida subjetiva de los efectos de un sismo, que traduce mediante números una serie de sensaciones, impresiones e interpretaciones personales del sismo.

Como la intensidad varía de un sitio a otro, las evaluaciones en un lugar determinado constituyen, generalmente un promedio; por lo que se acostumbra hablar solamente de grados enteros.

Es común representar en un mapa los efectos de un sismo mediante curvas que definen áreas de igual intensidad a las que se llama isosistas. Al área de mayor intensidad observada se le denomina pleistocista.

A continuación se presenta la escala de Mercalli Modificada que es muy conocida y utilizada.

Escala de Intensidades de Mercalli, Modificada.  
(Abreviada y Modificada por C. F. Richter. Ref. 7)

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

I. Imperceptibles. Sismos marginales y período largo de los grandes sismos.

II. Los perciben las personas en reposo, en los pisos superiores, o colocadas favorablemente.

III. 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.

IV. Los objetos colgados oscilan. La vibración es como la que se produce al paso de los camiones pesados; o sensación como la de una sacudida, como la de una bola pesada que pegará contra muros. Los automóviles parados oscilan. Las ventanas, los platos y las puertas hacen ruido. Los vasos chocan. La loza se quiebra. En el extremo superior del grado cuatro, las paredes y marcos de madera se agrietan.

V. 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.

VI. 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. Los árboles y arbustos se sacuden visiblemente, o se les oye crujir.

VII. Es difícil permanecer de 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 del 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 arena o de grava. Las campanas grandes repican. Se dañan los canales de riego.

VIII. 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 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 quebran. 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.

IX. Pánico general. Se destruye la mampostería D; la mampostería C se daña mucho, algunas veces con colapso completo. Daño general en los cimientos. Los marcos estructurales no

enclados se salen de los cimientos. Los marcos crujen. Grietas conspicuas en el terreno. Expulsión de arena y lodo en zonas aluviales, fuentes de origen sísmico, cráteres de arena.

X. La mayoría de las estructuras de mampostería y de marcos se destruye, incluso sus cimientos. Algunas estructuras de madera bien construidas y puentes destruidos. Serios daños a presas, diques, terraplenes. Grandes derrumbes. Agua arrojada sobre las márgenes de los canales, ríos, lagos, etc. Arena y lodo desplazados horizontalmente en las playas y en terreno plano. Rieles doblados ligeramente.

XI. Rieles muy doblados. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio.

XII. Daño casi total. Grandes masas de roca desplazadas. Visuales y líneas de nivel deformadas. Objetos arrojados al aire.

La intensidad puede calcularse aproximadamente con la siguiente relación:

$$I = (\text{Log } 14 V) / (\text{Log } 2)$$

I = intensidad en la escala de Mercalli Modificada

V = velocidad máxima del terreno (cm/seg.)

Usualmente se observan las mayores intensidades cerca de la zona del epicentro; aunque, en ocasiones, pueden existir condiciones, que provoquen que un sismo cause mayores daños a distancias lejanas del epicentro, como características particulares del terreno, efectos de guías de ondas, etc. Como es el caso de la Ciudad de México

Otro factor que hace que la región pleistocista no coincida con la epicentral, es que pueden reportarse las mayores intensidades en otros sitios, donde debido a la concentración de población, un terremoto causará más daños en esta región que en una zona comparativamente o totalmente deshabitada.

#### II.5. CONDICIONES DEL VALLE DE MEXICO.

El valle de México es un depósito sedimentario de origen lacustre, y ha adquirido sus rasgos recientes en el último millón de años. Durante este lapso se han acumulado grandes cantidades de sedimentos en una cuenca que ha sido cerrada por la gran actividad volcánica.

Gran parte del área del valle, que abarca unos 9,200 km<sup>2</sup>, estuvo cubierta por lagos someros desde la época diluvial (cuaternario) hasta fines del siglo XIX, este medio ambiente lacustre favoreció el desarrollo de colonias importantes de microorganismos de diferentes especies y la sedimentación de gran cantidad de partículas finas de ceniza volcánica que pasaron a crear los depósitos potentes de arcilla que existen en amplias áreas de la Ciudad de México.

El subsuelo del Valle de México se caracteriza por presentar fuertes contraste de deformabilidad y resistencia (lo que lo hace un laboratorio natural para la Mecánica de Suelos y la Ingeniería Sísmica). Lo anterior hace que se clasifique a la ciudad en tres zonas:

-Zona del lago

-Zona de transición

-Zona de lomas

Zona del lago.- comprende unicamente la extensión ocupada por el lago de Texcoco. Resultados de investigaciones recientes indican que la zona del lago debe extenderse hasta el lago de Xochimilco-Chalco en la parte sur del valle de México.

#### Zona del lago de Texcoco.

El perfil estratigráfico en esta área se compone de una capa dura superficial de rellenos aluviales y eólicos, seguida por un estrato potente de arcilla blanda con intercalaciones de capas delgadas de arena, limo-arenosa, vidrio volcánico y fósiles. Debajo de este estrato de arcilla está la primera capa dura que es un estrato de arena limosa débilmente cementada. Subyaciendo a la primera capa dura se encuentra la formación arcillosa inferior compuesta por arcilla de mayor consistencia que la superior. Por último se localizan los depósitos profundos que están constituidos por secuencias de capas de arenas limosas y tobas de alto grado de cementación. Esta formación es la base de los suelos compresibles.

#### Zona del lago de Xochimilco-Chalco.

Las características estratigráficas en esta área difieren de las del lago de Texcoco. El perfil está formado básicamente por un depósito de arcillas más consistentes y resistentes que las del lago de Texcoco, con intercalaciones de estratos finos de arena limosa y de limos. Subyaciendo el depósito arcilloso se encuentra una capa de lava de características basálticas.

#### Zona de lomas.

En la región oeste de la ciudad de México esta zona se caracteriza por los suelos duros, compactos y compuestos principalmente por arenas limosas con altos contenidos de gravas y por tobas muy cementadas. En la parte sur de la ciudad se

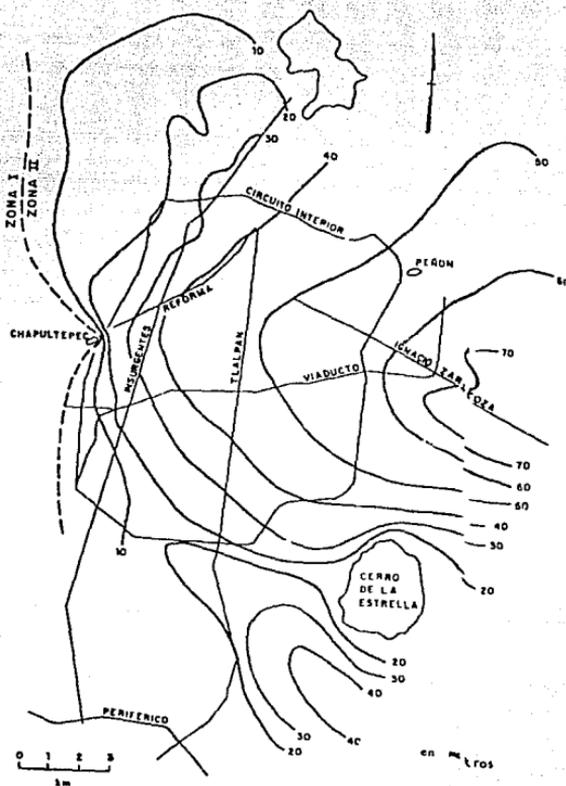
tienen principalmente colados de lava con espesores del orden de unos 20 m., sobreyaciendo formaciones similares a las de la parte oeste.

#### Zona de transición.

Esta zona se encuentra entre la del lago y la de lomas y se caracteriza por la variabilidad de sus perfiles estratigráficos. Se tienen secuencias de estratos compactos de materiales limosos y arenosos y capas de arcilla blanda éstas de espesor variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

En la figura siguiente se muestran los contornos que indican las profundidades a los depósitos profundos.

FIGURA 11.10. CURVAS DE IGUAL PROFUNDIDAD A LOS DEPOSITOS PROFUNDOS (Ref. 9).



En los perfiles de las dos figuras siguientes se muestra la variación de las condiciones del suelo en la ciudad de México en secciones este-oeste y norte-sur.

FIGURA II.11. CORTE ESTRATIGRAFICO S - N (Ref. 9).

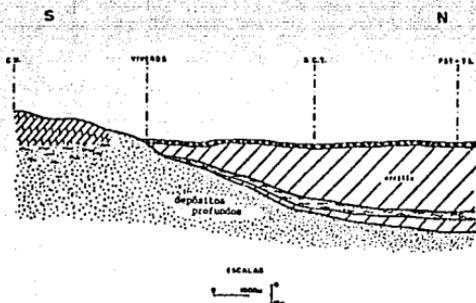
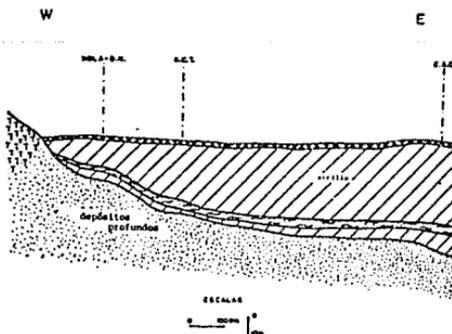


FIGURA II.12. CORTE ESTRATIGRAFICO W - E (Ref. 9).





## CAPITULO III

### EFFECTOS DE LOS SISMOS SOBRE LAS ESTRUCTURAS.

Como ha sucedido a lo largo de la historia de la Ingeniería Civil en general, y de la estructural en particular, la necesidad de resolver los problemas planteados por las demandas de una sociedad en continuo cambio hace que la construcción avance más rápidamente que las teorías con que se apoya el diseño estructural; los arquitectos inician el cambio y los ingenieros estructurales les siguen, sin darse cuenta de que entran en un campo desconocido, o minimizando la importancia de ese paso."

OSCAR DE BUEN LOPEZ DE HEREDIA.

#### III.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS CARGAS SISMICAS.

Las fuerzas que se inducen en una estructura producidas por un sismo son muy diferentes de la mayor parte de las otras acciones a que puede estar sujeta una estructura, tales como, cargas verticales debidas a la gravedad, viento, presión hidrostática, presión de tierra, etc. Las diferencias no estriban en las características dinámicas del fenómeno, sino que sus efectos dependen de una interacción compleja entre el movimiento sísmico, las características del suelo y las de la estructura. El

movimiento del suelo no daña al edificio por un impacto similar al de una bola de un demolidor, o por presión aplicada externamente, como la del viento, sino por fuerzas de inercia generadas internamente causadas por la vibración de la masa del edificio. Por lo tanto la magnitud de la carga sísmica dependerá de las propiedades de la estructura; la masa, tamaño y forma del edificio determinan parcialmente tanto la naturaleza de estas fuerzas como la manera en que serán resistidas.

El riesgo sísmico implica un problema único de Ingeniería, ya que un sismo severo constituye la carga más intensa a que la mayoría de las estructuras pueden estar sujetas. El problema más grave de la Ingeniería sísmica es que no se conocen las sollicitaciones para las que han de diseñarse y construirse los edificios, lo que es totalmente diferente, como se dijo anteriormente, de lo que sucede con las cargas verticales, muertas y vivas, y bastante diferentes de las fuerzas de viento.

Como es imposible predecir los sismos y sus características que puede tener en un determinado sitio, también es imposible evaluar el comportamiento completo de una estructura sometida a temblores fuertes de características desconocidas. Estamos, pues, obligados a construir en un entorno desconocido, basándonos en lo poco que sabemos de lo que ha sucedido hasta ahora, pero sin saber casi nada de lo que puede pasar en el futuro y además, sin que sea válido incrementar excesivamente las secciones o los factores de seguridad, pues ha de construirse económicamente.

En la práctica los métodos de análisis sísmico de las estructuras se hacen con fuerzas horizontales estáticas, obtenidas de acuerdo con los reglamentos, con los que se pretende sean más o menos equivalentes a las acciones dinámicas producidas por los sismos. Aunque utilizamos estos procedimientos, es fundamental no perder de vista el carácter dinámico del problema, por lo tanto hay que conocer los principios básicos de la

dinámica estructural los cuales se tratarán de una manera superficial.

Una carga dinámica comprende cualquier fuerza que varía con el tiempo, y la carga sísmica es una variable compleja de ésta. La manera en la que una estructura responde a una excitación dinámica dada, depende de la naturaleza de la excitación y de las características dinámicas de la estructura, esto es, de la manera como almacena y disipa la energía vibratoria. La excitación sísmica puede ser descrita en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración que varían con el tiempo. Cuando esta excitación es aplicada a la base de una estructura, produce una respuesta dependiente del tiempo en cada uno de los elementos de la estructura, que puede ser descrita en términos de desplazamientos o de fuerza.

Al tener nuestras construcciones apoyadas sobre el suelo, cuando éste se mueve por efecto de las ondas sísmicas originadas por un temblor, el cual puede ser descrito por una historia de aceleraciones (o de velocidades o de desplazamientos), las estructuras responden a esta excitación sísmica, mediante una vibración a través de la cual disipan la energía que es generada por dicho movimiento.

La amplitud de la vibración necesaria para disipar esa energía depende de las características del sistema constituido por el conjunto subsuelo-cimentación-estructura-elementos no estructurales. Aún con la complejidad de un sistema como el descrito, las principales características de su respuesta pueden mostrarse a través del estudio de un sistema simple de un grado de libertad.

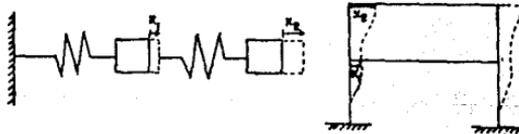
### III.2. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD.

Para describir la posición de un sistema oscilatorio en un momento dado de su trayectoria, es necesario dar un número mínimo de coordenadas independientes llamadas grados de libertad, ver figura III.1.

FIGURA III.1. ESQUEMATIZACION DE SISTEMAS DE UNO Y DOS GRADOS DE LIBERTAD.



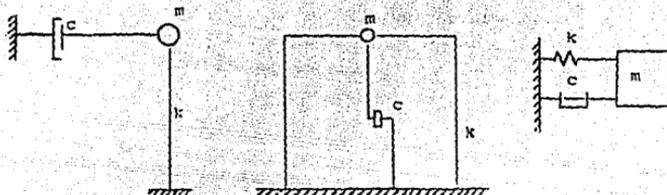
Sistema de un grado de libertad.



Sistema de dos grados de libertad.

El sistema simple de un grado de libertad está conformado por una masa, un resorte con cierta rigidez y un amortiguamiento, se representa comúnmente de las siguientes maneras:

FIGURA III.2. REPRESENTACION COMUN DEL SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD.



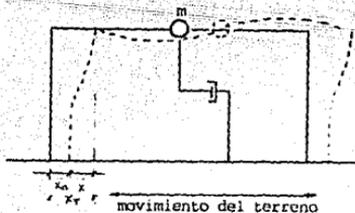
$m$  = masa

$k$  = constante total de resorte de los elementos resistentes  
(rigidez)

$c$  = amortiguamiento

Cuando el sistema está sujeto a un movimiento de su base, definido por una historia de desplazamiento  $x_b$ , o de aceleraciones del suelo  $\ddot{x}_b$ , la masa entrará en oscilación y se producirán sobre ella tres tipos de fuerza.

FIGURA III.3. MOVIMIENTO EN LA BASE DEL SISTEMA.



Estos tres tipos de fuerza son las siguientes:

a). La fuerza de inercia que de acuerdo con el principio de D'Alembert es proporcional a la masa y a la aceleración total que esta sufre,  $X_T$  que es la suma de la aceleración del terreno  $\ddot{u}$ , más la de la masa relativa al terreno  $\ddot{u}$ .

De acuerdo a la 2ª Ley de Newton

$$F(t) = m \cdot a = m d^2 u / dt^2 = m \ddot{u} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

$$F_i = m R_T \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Las fuerzas de inercia son el producto de la masa por la aceleración ( $F = m \cdot a$ , de Newton) como se vió anteriormente. La aceleración es una función de la naturaleza del sismo. La masa es una propiedad del edificio. Fuesto que las fuerzas son de inercia, por lo general un aumento en la masa origina un aumento de fuerza.

b). La fuerza de amortiguamiento que se opone al movimiento y trata de restablecer el equilibrio de la estructura en vibración. Esta fuerza puede considerarse proporcional a la velocidad relativa de la masa; al factor de proporcionalidad se le llama coeficiente de amortiguamiento.

$$F_A = c \cdot \dot{u} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

c). La fuerza que se genera en la columna por su rigidez lateral al tratar de ser desplazada con respecto al terreno. Suponiendo que la respuesta de la columna se mantiene dentro del rango elástico, dicha fuerza será igual al producto del

desplazamiento relativo de la masa con respecto al suelo, por la rigidez lateral de la columna.

$$F_R = k \cdot x \quad \text{Ec. (3.4)}$$

De lo anterior se tiene que la ecuación de equilibrio dinámico queda de la siguiente forma.

$$F_T + F_A + F_R = 0 \quad \text{Ec. (3.5)}$$

sustituyendo

$$F_T = m \cdot \ddot{x}_T ; F_A = c \cdot \dot{x} ; F_R = k \cdot x$$

$$m \cdot \ddot{x}_T + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0 \quad \text{Ec. (3.6)}$$

como

$$x_T = x_A + \eta \quad m (\ddot{x}_A + \ddot{\eta}) + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0$$

$$m \cdot \ddot{\eta} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = -m \cdot \ddot{x}_A \quad \text{Ec. (3.6.1)}$$

dividiendo entre  $m$  (masa)

$$\ddot{\eta} + c \cdot \dot{x}/m + k \cdot x/m = -\ddot{x}_A \quad \text{Ec. (3.7)}$$

Las dos constantes,  $c/m$  y  $k/m$  representan conceptos relacionados con la vibración libre del sistema (que es cuando el término  $-\ddot{x}_A$  de la ecuación 3.7 es nulo).

De ellas:

$$k/m = \omega^2 \quad \text{Ec. (3.8)}$$

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad \text{Ec. (3.9)}$$



El amortiguamiento representa la disipación de energía que la estructura realiza principalmente debido a la fricción interna de los materiales y el rozamiento entre los componentes de la construcción. El amortiguamiento interno de una estructura es una propiedad que depende de los sistemas estructurales y de los materiales en ella empleados, tanto en los componentes estructurales como en los llamados "no estructurales" (muros divisorios, fachadas, instalaciones, etc.). Por lo general en las construcciones comunes se advierte que tales componentes producen solamente un amortiguamiento francamente bajo, comparado con aquel que se denomina amortiguamiento crítico, el cual se refiere al valor del amortiguamiento que evita la oscilación, es decir, el sistema regresa hacia su posición después de haber sufrido una excitación, éste vale:

$$C_{cr.} = 2 \sqrt{km} \quad \text{Ec. (3.12)}$$

La constante de amortiguamiento puede expresarse como una fracción del crítico, en la forma:

$$\delta = c / C_{cr.} = c / 2 \sqrt{km} \quad \text{Ec. (3.13)}$$

La tabla siguiente indica valores representativos del amortiguamiento para varios tipos de construcción.

TABLA III.1. RELACIONES DE AMORTIGUAMIENTO TÍPICO PARA ESTRUCTURAS (Ref. 10).

TIPO DE CONSTRUCCION	AMORTIGUAMIENTO $\beta$ , POR CIENTO DEL VALOR CRITICO $C_{cr}$ .
Marco de acero, soldado, con todos los muros de construcción flexible.	2
Marco de acero, soldado o apernado, con revestimiento rígido, y con todos los muros interiores flexibles.	5
Marco de acero, soldado o apernado, con muros de cortante de concreto.	7
Marco de concreto, con todos los muros de construcción flexible.	5
Marco de concreto, con revestimiento rígido y todos los muros interiores flexibles.	7
Marco de concreto, con muros de cortante de concreto o mampostería.	10
Edificios con muros de cortante de concreto y/o mampostería.	10

Nota: El término concreto incluye tanto el concreto reforzado como el prestrezado en los edificios.

Como  $\beta = c/C_{cr} = c/2 \sqrt{Km}$

y  $\sqrt{Km} = m \sqrt{E/m} = m\omega$   $\beta = c/2\omega m$  Ec. (3.14)

por otra parte

$$c/m = 2\omega\beta \quad \text{Ec. (3.15)}$$

La ec. diferencial (3.7) se puede escribir como:

$$\ddot{x} + 2\omega\beta\dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{u}_g \quad \text{Ec. (3.16)}$$

De la ecuación anterior uno puede apreciar que la respuesta del sistema está definido por dos parámetros únicamente, la frecuencia circular del sistema, ( $\omega_1$ , o su periodo ya que  $T = 2\pi/\omega_1$ ) y la fracción del amortiguamiento crítico  $\xi$ .

La solución de la anterior ecuación diferencial, cuando la estructura parte del reposo, se obtiene como la superposición de la respuesta a una serie de impulsos diferenciales, en la forma llamada integral de Duhamel.

$$x(t) = -1/\omega \int_0^t \ddot{x}_a(\lambda) e^{-\xi \omega(t-\lambda)} \sin(\omega(t-\lambda)) d\lambda \quad \text{Ec. (3.17)}$$

La solución presentada en la forma de la ecuación anterior implica la aproximación  $1 - \xi^2 = 1$ , que es válida ya que para las estructuras de ingeniería civil generalmente  $\xi < 0.1$ , como se puede ver en la tabla III.1.

Obtener la respuesta del sistema mediante la solución de la integral de Duhamel es un trabajo muy complicado, y que, debido a que la historia de aceleraciones del terreno durante un sismo,  $\ddot{x}_a(\lambda)$ , no puede expresarse mediante una función continua, es necesario utilizar procedimientos numéricos.

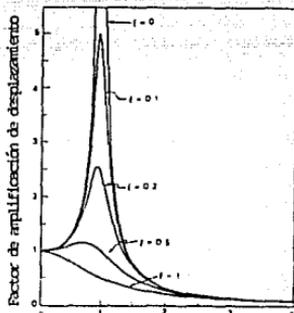
Un caso que se presenta a una solución relativamente sencilla y muy ilustrativa es que la excitación sea un movimiento armónico de tipo:

$$\ddot{x}_a = a \sin \omega_0 t \quad \text{Ec. (3.18)}$$

en donde  $\omega_0$  es la frecuencia circular de vibración del movimiento del terreno y "a" una constante que define la amplitud de la aceleración del movimiento.

La solución se ilustra de manera adimensional en la figura siguiente:

FIGURA III.5. AMPLIFICACION DINAMICA DEL MOVIMIENTO DE UN SISTEMA LINEAL DE UN GRADO DE LIBERTAD SUJETO A VIBRACION ARMONICA (Ref. 5).



Relación entre la frecuencia de la vibración inducida y la natural del sistema.

Las abscisas representan la relación entre la frecuencia del movimiento del terreno y la del sistema. Las ordenadas representan la relación entre el desplazamiento máximo que se presenta en la masa bajo efectos dinámicos y el desplazamiento estático que produciría una fuerza constante de magnitud  $m \cdot a$ . En la figura se observa la importancia que tienen los parámetros de la estructura que definen su respuesta. Cuando la frecuencia del sistema es bastante menor o mayor que la de la excitación, el desplazamiento máximo de la masa, del que dependen las fuerzas que se provocan en el sistema, no rebasan al estático; pero si las dos frecuencias o períodos tienden a tener el mismo valor, (esto es cuando la relación se acerca a uno), hay una amplificación cada vez mayor del movimiento del terreno y el desplazamiento en la masa llega a ser varias veces mayor al del terreno provocándose fuerzas muy grandes en el sistema. Cuando la

relación de frecuencias es igual a uno y el amortiguamiento es cero, el desplazamiento del sistema tiende a infinito. También es importante hacer notar la importancia del amortiguamiento, particularmente cerca de la resonancia, es suficiente un amortiguamiento pequeño para reducir de una manera apreciable la respuesta del sistema.

La respuesta de una estructura a la excitación irregular y transitoria de un sismo será obviamente mucho más compleja que en el movimiento anteriormente estudiado, pero se puede analizar a partir de la solución del caso del movimiento armónico. Un acelerograma de un sismo se puede considerar como la superposición de manera aleatoria de un gran número de ondas armónicas que cubren una gama de frecuencias muy amplia, pero que tiene amplitudes muy grandes sólo dentro de un intervalo de periodos dominantes que dependen del tipo de sismo, de la distancia al epicentro y del tipo de suelo. Ante esa serie de ondas de diferente periodo, el sistema responde con mayor amplitud a los que tienen periodo similar al suyo, mientras que para los demás es menor.

A menudo sólo estamos interesados en la respuesta máxima de la estructura, por ejemplo, en la aceleración máxima de la masa durante un terremoto. Si para un acelerograma dado, obtenemos la respuesta máxima de sistemas de un grado de libertad con cierto amortiguamiento y hacemos variar el periodo de estos sistemas desde cero hasta un valor que comprenda casi todos los periodos de las estructuras comunes, se puede presentar una información de manera gráfica, llamada espectros de respuesta como los de la figura III.6. Cada punto de esta gráfica representa la máxima aceleración alcanzada por el sistema de un grado de libertad con un periodo  $T$ . Estos espectros de respuesta representan una información muy valiosa para apreciar los efectos de un sismo determinado sobre las estructuras y que por lo tanto pueden emplearse como un índice de la acción sísmica.

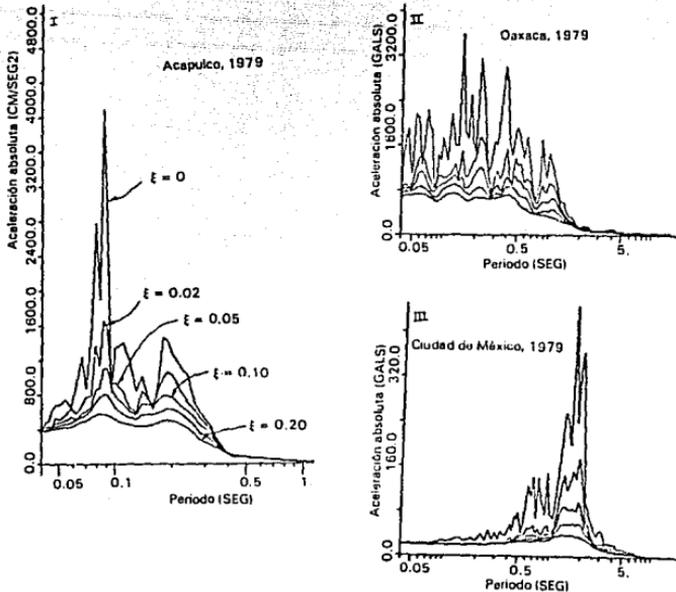
El espectro de aceleraciones proporciona una medida directa de la fuerza de inercia,  $F_i$ , máxima, que se induce en el sistema al multiplicar la ordenada espectral por la masa:

$$F_i = m \cdot S_a$$

Ec. (3.19)

Los espectros de aceleraciones que a continuación se presentan corresponden a acelerogramas de sismos de diferentes características.

FIGURA III.6. ESPECTROS DE ACELERACIONES DE UN MISMO EVENTO PARA DIFERENTES SITIOS (Ref. 5).

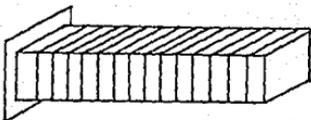


El caso I corresponde a un sismo de intensidad media registrado muy cerca del epicentro, en el cual se observa que las ordenadas espectrales son mayores para los sistemas con periodos muy cortos, (estructuras rígidas) y va disminuyendo rápidamente conforme se va haciendo mayor el periodo. El caso II es un sismo intenso registrado a una distancia moderada donde se tienen ordenadas altas en un intervalo grande de periodos, y para el caso III se presenta un sismo de gran intensidad registrado a una gran distancia en terreno blando, en el cual las respuestas mayores corresponden a periodos mayores. Lo antes comentado hace resaltar la importancia del contenido de frecuencias de cada acelerograma. Las ordenadas espectrales mayores corresponden al intervalo de periodos dominantes en el acelerograma, ya que cuando el sistema de un grado de libertad tiene periodos muy próximos a los que se hacen notables en el acelerograma, la respuesta máxima crece notablemente debido a la resonancia. De modo que si un sismo de magnitud no elevada registrado cerca del epicentro, tiene periodos dominantes muy cortos, provocará sollicitaciones mayores en estructuras para las cuales el periodo fundamental también es corto. Un sismo de gran magnitud a distancias intermedias tiene un efecto notable dentro de un amplio intervalo de periodos y por lo tanto será muy desfavorable para las estructuras relativamente rígidas, con periodos cortos, tanto para aquellas flexibles, con periodos grandes. Por último, en un sismo a gran distancia en terreno blando, predominan movimientos de periodo grande y por lo cual resultan más afectadas las estructuras altas y flexibles.

Cuando el periodo de la estructura tiene un valor próximo a cero, la ordenada espectral tiende a la aceleración máxima del terreno. Una aceleración del suelo cercana a 0.2 g. (196 gals) es muy alta, pero las aceleraciones que se inducen en el sistema serán más altas, dependiendo del grado en que la masa y la forma del edificio actúen para amortiguar los efectos vibratorios. Se puede alcanzar una cifra de 1.0 g. (981 gals) o 100% de la gravedad. En un sentido estático, esto es equivalente a tratar de

diseñar un edificio que se proyecta horizontalmente, teniendo su base sobre una superficie vertical (ver figura III.7).

FIGURA III.7. EQUIVALENCIA DE FUERZAS PRODUCIDAS POR UN SISMO.



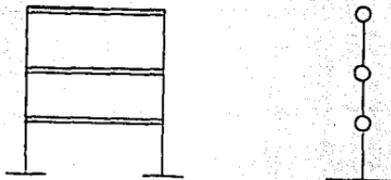
Cuando se observa el comportamiento real de los edificios, se ve que varios factores modifican esta equivalencia, y las estructuras que nunca podrían quedar en voladizo respecto a una superficie vertical, pueden soportar por breves instantes un sacudimiento sísmico de 1.0 g. (981 gals).

Una estructura no debe diseñarse para resistir un sólo sismo de gran intensidad, sino el conjunto de sismos a que puede estar sujeta en su vida útil. Aún para sismos de semejantes características en cuanto a magnitud y distancia epicentral, el espectro de respuesta puede cambiar notablemente debido a diferencias en contenidos de frecuencias y duración. La estructura por lo tanto deberá diseñarse para la envolvente de los espectros que correspondan a diferentes sismos.

### III.J. SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD.

El comportamiento dinámico de la mayoría de las estructuras es más complejo que el sistema de un grado de libertad. Los edificios de varios pisos, por ejemplo, están considerados como estructuras de varios grados de libertad, compuestas por una serie de masas concentradas unidas por resortes, con un grado de libertad por cada piso, considerado este como la coordenada vertical independiente necesaria para ubicar el desplazamiento. Esta representación admite todavía un análisis dinámico relativamente sencillo de sus respuestas. El caso común de una estructura que puede idealizarse de esa manera es el de un edificio simétrico en el cual las masas se consideran concentradas en cada piso y los resortes representan la rigidez lateral de cada entrepiso, como se muestra en la figura siguiente:

FIGURA III.B. SISTEMA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD.



En el equilibrio de cada nivel se consideran las mismas fuerzas que intervienen en el sistema de un grado de libertad.

$$F_t + F_m + F_A = 0$$

Ec. (3.5)

Los distintos términos de esta expresión determinan con ecuaciones idénticas a las empleadas para el sistema de un grado de libertad, pero en este caso las variables representan vectores y matrices. De esta forma la fuerza de inercia vale:

$$F_i = M \cdot \ddot{x}_T \quad \text{Ec. (3.20)}$$

En este caso  $F_i$  es el vector de fuerzas de inercia,  $\ddot{x}_T$  es el vector de aceleraciones totales y  $M$  la matriz (diagonal) de masas.

Las fuerzas en las columnas valen:

$$F_R = K \cdot x \quad \text{Ec. (3.21)}$$

en donde  $F_R$  es el vector de fuerzas elásticas,  $K$  es la matriz de rigideces y  $x$  es el vector de desplazamientos.

De manera similar la fuerza de amortiguamiento puede expresarse como:

$$F_A = C \cdot \dot{x} \quad \text{Ec. (3.22)}$$

donde  $F_A$  es el vector de fuerzas de amortiguamiento,  $C$  es la matriz de amortiguamiento y  $\dot{x}$  es el vector de velocidades. Comúnmente el amortiguamiento se supone igual en todos los entrepisos y la matriz  $C$  se vuelve una constante.

La ec. de equilibrio dinámico puede escribirse generalmente como:

$$F_i + F_R + F_A = 0 \quad \text{Ec. (3.5)}$$

La ecuación es equivalente a

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\ddot{X}_0 \quad \text{Ec. (3.23)}$$

La ec. matricial anterior para varios grados de libertad es idéntica en su forma a la ec. 3.6.1 para sistemas de un grado de libertad.

Como la respuesta dinámica de una estructura depende de la frecuencia (o periodo) y formas modales, el primer paso en un análisis de un sistema de varios grados de libertad es encontrar las frecuencias y formas modales en vibración libre sin amortiguamiento.

La ecuación diferencial puede reducirse a:

$$M\ddot{X} + KX = 0 \quad \text{Ec. (3.24)}$$

Si se considera la acción de un desplazamiento impuesto y suponiendo que no existe amortiguamiento, la estructura vibrará libremente adoptando una configuración de desplazamiento que se denomina forma modal y con una frecuencia de vibración peculiar de cada modo. Existen tantos modos como números de grados de libertad tiene el sistema.

Pero como en vibración libre el movimiento es armónico simple:

$$X = a \sin \omega t \quad \text{Ec. (3.25)}$$

en donde "a" representa la amplitud de vibración. Nuevamente, la ecuación se expresa en forma matricial, "X" es el vector de desplazamiento y "a" un vector de constantes de amplitud.

Entonces

$$\ddot{x} = -\omega^2 a \sin \omega t \quad \text{Ec. (3.26)}$$

Sustituyendo en la ecuación  $(M\ddot{x} + Kx = 0 \text{ Ec. 3.24})$

$$Ka - \omega^2 Ma = 0 \quad \text{Ec. (3.27)}$$

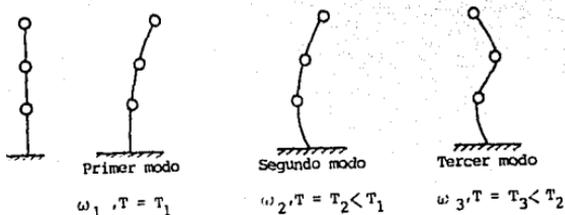
Para que "a" sea diferente de cero se requiere:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad \text{Ec. (3.28)}$$

Esta ecuación se resuelve con métodos numéricos estándar y permite encontrar los N valores de la frecuencia  $\omega$  que corresponden a cada modo natural de vibración del sistema (uno por cada grado de libertad que posee el sistema).

Teniendo los N valores de  $\omega$  se pueden determinar los N valores de a, que corresponden a cada frecuencia natural y que determinan la forma modal correspondiente. La figura III.7 muestra las formas de los tres modos normales de un edificio típico de tres pisos.

FIGURA III.9. MODOS DE VIBRACION DE UN SISTEMA DE TRES GRADOS DE LIBERTAD.



El primer modo, o modo fundamental, se caracteriza por no presentar puntos de inflexión y por tener la frecuencia menor (el período más largo). Al pasar a los modos superiores, la configuración presenta cada vez un punto de inflexión más y el período natural se va haciendo menor.

Interesa conocer la respuesta del sistema de varios grados de libertad ante una excitación sísmica cualquiera impuesta en su base. Al excitar el sistema, cada modo responde como un sistema independiente de un grado de libertad y la respuesta total será la combinación de las respuestas independientes de cada modo, multiplicada cada una por un factor de participación.

El desplazamiento del piso (o masa)  $i$  en un tiempo  $t$ , es obtenido entonces superponiendo la respuesta de todos los modos calculada para dicho período de tiempo  $t$ :

$$x_i = \sum_{n=1}^m \phi_{i,n} Y_{i,n}(t) \quad \text{Ec. (3.29)}$$

donde  $\phi_{i,n}$  es el factor que define la escala a que interviene el modo  $n$  en el movimiento del nivel  $i$ . Debe notarse que en estructuras con muchos grados de libertad, la mayor parte de la energía vibratoria es absorbida en los modos inferiores, y por lo general es suficientemente preciso suponer los efectos de los primeros modos.  $Y_{i,n}(t)$  es el desplazamiento en el nivel  $i$  del modo  $n$  en el instante  $t$ .

Como en el caso del sistema de un grado de libertad, aquí también para fines de diseño estructural, lo que más interesa es la máxima respuesta que tiene la estructura ante la excitación sísmica. Este máximo se puede determinar de manera conservadora a partir de los máximos de las respuestas de cada modo. Como los máximos modales no ocurren necesariamente al mismo tiempo ni tampoco tienen el mismo signo, la repuesta máxima será menor que

la suma de las respuestas espectrales de cada modo. Lo mejor que puede hacerse en un análisis espectral de respuesta, es combinar las respuestas modales sobre una base probabilística. La máxima respuesta del sistema se determina como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las respuestas modales. Con éste criterio, que es el aceptado por la mayoría de los reglamentos, se calcula primero la respuesta del sistema en cada modo de vibración  $R_i$ , (esta respuesta puede ser desplazamiento lateral de un nivel o la fuerza interna de una sección determinada). La respuesta máxima en cada modo puede determinarse directamente del espectro de aceleraciones o velocidades para la frecuencia natural del modo en cuestión, idealizando la estructura como una serie de sistemas de un grado de libertad. La respuesta total se calcula como:

$$R_n = \left( \sum_{i=1}^n R_i^2 \right)^{1/2} \quad \text{Ec. (3.30)}$$

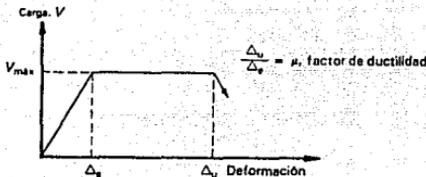
donde  $R_i$  puede ser deformación, fuerza cortante, momento de volteo, etc. La ecuación anterior solo es aplicable cuando los periodos de vibrar de la estructura son cercanos entre sí.

#### III.4. SISTEMAS INELASTICOS.

Ante las sollicitaciones de un sismo la mayor parte de los materiales y sistemas estructurales, se comportan de forma lineal hasta cierto punto, pero si el sismo que esta actuando sobre ellos provoca una intensidad severa, hace que los elementos se salgan de su intervalo elástico y el comportamiento se vuelva no lineal, por lo que la mayor parte de las estructuras pueden ser llevadas a deformaciones mayores a las que corresponden a la etapa lineal. La falla se presenta cuando se alcanza la deformación máxima dentro de la etapa no lineal.

Las ecuaciones diferenciales tratadas anteriormente, las cuales rigen el equilibrio dinámico de sistemas de uno o varios grados de libertad siguen siendo aplicables cuando el comportamiento no es lineal, pero su solución se hace laboriosa a través de procedimientos iterativos que consideran el comportamiento durante intervalos pequeños de carga. El sistema no lineal más estudiado es el elasto-plástico en el cual el comportamiento es lineal hasta la carga máxima, y después la capacidad de carga se mantiene constante hasta una deformación " $\mu$ " veces la de fluencia, donde es posible que el elemento no colapse, más bien, lo que pasa es que el elemento no toma más carga por lo que empieza a deformarse notoriamente (disipando los esfuerzos con energía de deformación) hasta que es imposible que se siga deformando y sufre el colapso:

FIGURA III.10. COMPORTAMIENTO ELASTOPLASTICO (Ref. 5).



La ductilidad de un elemento o estructura puede estar definida en términos generales por el cociente:

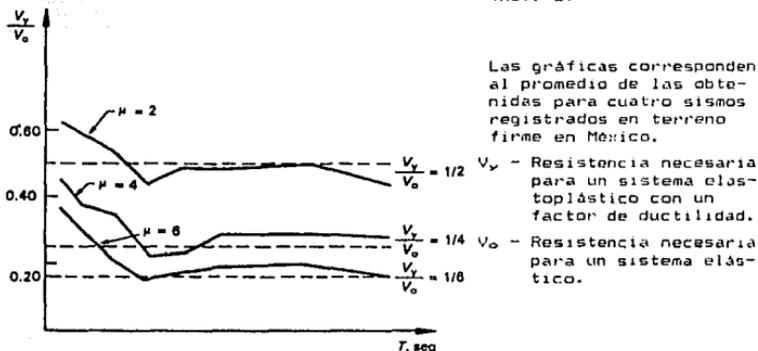
$$\frac{\text{Deformación a la falla}}{\text{Deformación a la fluencia}}$$

La ductilidad es generalmente deseable en las estructuras, debido a la ocurrencia de la falla en forma más suave ya que se desprende mayor cantidad de energía, que es el área bajo la curva de la gráfica esfuerzo-deformación, a diferencia de los materiales frágiles en los cuales se da la falla en una forma más explosiva.

Se han llevado a cabo análisis de sistemas de un grado de libertad ante acelerogramas de diferentes características, comparando el comportamiento entre sistemas lineales y no lineales con el mismo período y amortiguamiento. Encontrando cuál es la capacidad que necesita el sistema no lineal para resistir el sismo tratado sin que se sobrepase su deformación de falla. Esa capacidad posteriormente se compara con lo que requiere el sistema elástico de iguales características iniciales. La figura que a continuación se presenta hace notar la relación entre la capacidad del sistema elastoplástico y la del lineal para diferentes factores de ductilidad,  $\mu$ , del sistema inelástico.

FIGURA III.11. RELACIONES ENTRE LAS RESISTENCIAS NECESARIAS PARA SISTEMAS ELASTOPLASTICOS Y LAS NECESARIAS PARA SISTEMAS ELASTICOS CON MISMAS PROPIEDADES INICIALES PARA RESISTIR UN MISMO GRUPO DE SISMO.

(Ref. 5)



Los puntos representan el valor promedio obtenido del análisis con cuatro diferentes acelerogramas registrados en terreno duro. Se aprecia que la capacidad necesaria en el sistema elastoplástico es muy inferior a la que requiere el sistema elástico para resistir el sismo.

Los resultados anteriores nos permiten decir que si un sistema elastoplástico es capaz de desarrollar un factor de ductilidad  $\mu$  durante un sismo, puede diseñarse para que tenga una resistencia a carga lateral que se obtiene de un sistema elástico con el mismo período natural y amortiguamiento, dividiéndola entre  $\mu$ , excepto cuando se tienen sistemas cuyo período es muy corto en que el factor de reducción varía entre  $1/\mu$  y 1.

Para una resistencia económica contra sismos intensos, la mayoría de las estructuras deben comportarse inelásticamente. Lo que hace posible que un sistema inelástico resista un sismo, con una capacidad muy inferior a la que se requiere en un sistema elástico, es que la energía cinética introducida por el sismo en la estructura se disipa principalmente por medio de los ciclos de histéresis, lo que equivale a que el sistema posea un amortiguamiento equivalente muy superior al del propio material. Pero implicando que se presenten daños en los edificios diseñados con este criterio.

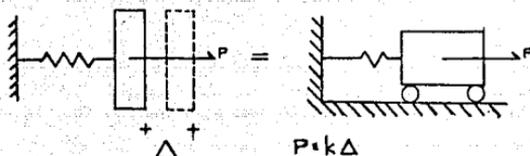
En realidad pocos sistemas tienen un comportamiento semejante al elastoplástico perfecto. En elementos de acero estructural o de concreto reforzado en que predomina la flexión, se tienen ciclos de histéresis parecidos a los elastoplásticos, pero cuando se tienen efectos importantes por cortantes, carga axial o por problemas de pandeo, se tiene un deterioro en la disipación de energía que da lugar a que el área incluida en los ciclos de histéresis sea muy inferior a la de un sistema elastoplástico. Cuando los esfuerzos generados son muy fuertes o cuando las secciones no cumplen con requisitos estrictos para asegurar que pueden soportar importantes deformaciones sin fallas, los ciclos de histéresis son inestables, o sea la capacidad de carga y la disipación de energía se van deteriorando ante la repetición de ciclos de carga.

El comportamiento inelástico de sistemas de varios grados de libertad es mucho más complicado que el de los sistemas simples, ya que está en función de la resistencia y ductilidad que se tiene en cada uno de los componentes del sistema y que al pasar cualquiera de ellos al comportamiento inelástico, cambia radicalmente la distribución de fuerzas del resto del sistema. Los análisis que se han realizado en sistemas de masas y resortes como en marcos de varios pisos, muestran que la mayor parte de las veces la demanda de ductilidad es mayor que la que se tiene en un sistema de un grado de libertad y que puede haber grandes demandas de ductilidad en un solo componente, si la distribución de resistencias no tiene una relación constante con la fuerza cortante sísmica que se induce en cada elemento. Esto es, si en un sistema de varios grados de libertad, la energía cinética inducida por el sismo se disipa a través del comportamiento inelástico de diversos componentes, mientras mayor sea el número de componentes que entren en el intervalo inelástico, menor será la cantidad de energía que tenga que disipar cada uno de ellos y también será menor la deformación máxima que deberá tener cada componente individual, o sea su demanda de ductilidad. Si en el diseño se tiene que algunos elementos están sobrediseñados con respecto a unos pocos, estos últimos deberán disipar por sí solos la energía inducida por el sismo a través de grandes deformaciones inelásticas que muy probablemente no sean capaces de soportar. Mientras los otros elementos estarán dentro del intervalo elástico.

### III.S. EFECTO DE TORSION.

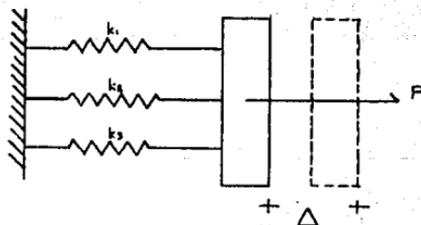
A continuación se explica el fenómeno de torsión, teniendo en cuenta el ya citado sistema de un grado de libertad, el cual se presenta en la figura siguiente:

FIGURA III.12. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD CON UNA FUERZA P



Y si se tienen varios resortes en paralelo en el sistema anterior, que aún sigue siendo de un grado de libertad, quedará de la forma que a continuación se presenta:

FIGURA III.13. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD CON RESORTES EN PARALELO.



La rigidez total del sistema es  $K = k_1 + k_2 + k_3$

dado que  $P = K \cdot \Delta$      $\Delta = P/K = P/(k_1 + k_2 + k_3)$

por lo que  $F_1 = k_1 \cdot \Delta$ ;  $F_2 = k_2 \cdot \Delta$ ;  $F_3 = k_3 \cdot \Delta$

de donde  $F_1 = k_1 \cdot (P / (k_1 + k_2 + k_3)) = (k_1 / (k_1 + k_2 + k_3)) \cdot P$

lo que se puede generalizar para "n" resortes como:

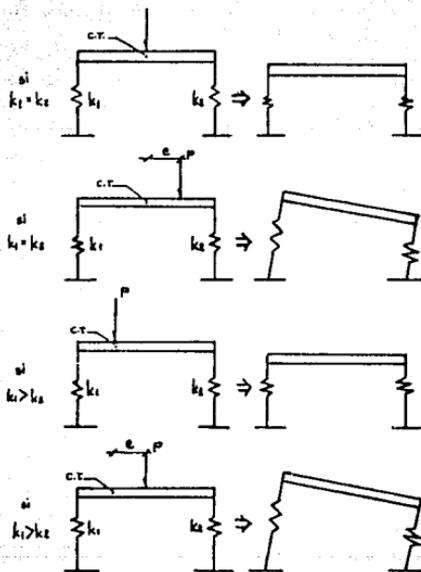
$$F_i = \frac{k_i}{\sum_{j=1}^n k_j} P$$

que es la distribución directa de la fuerza en cada elemento rigidizante. En la que se puede apreciar que mientras más rígido es un elemento tiende a tomar más fuerza.

El sistema de la figura III.12 es equivalente al de la figura III.13 siempre y cuando la fuerza este aplicada en el centro de torsión (C.T.), que es la posición en donde solamente se crean desplazamientos en un sentido, sin originar rotaciones.

Si no se tiene esta condición se introduce un efecto extra sobre el resorte que es el giro:

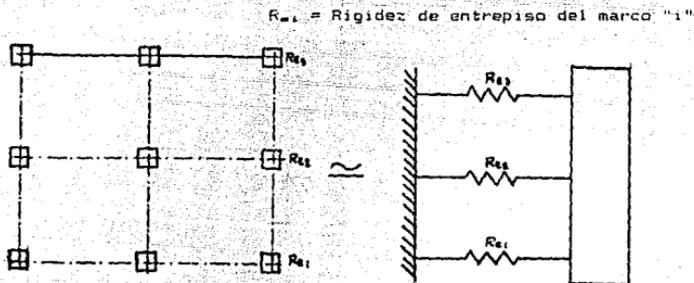
FIGURA III.14. SISTEMAS CON DIFERENTES UBICACION DE FUERZA.



El momento  $P \cdot e$  produce efectos extras de tensión y compresión en los resortes.

El entrepiso de un edificio puede interpretarse con el modelo de la figura III.13, en donde la rigidez "k" de cada resorte será la rigidez de entrepiso de cada marco y la rigidez total "K" será la suma de las rigideces de entrepiso de cada marco, por ejemplo:

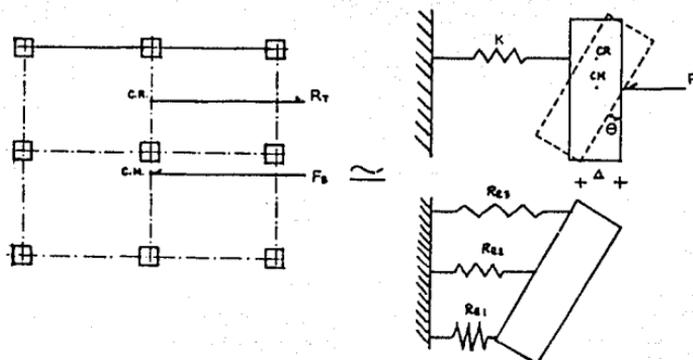
FIGURA III.13. SIMILITUD ENTRE LA PLANTA DE UN EDIFICIO Y EL SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD CON VARIOS RESORTES.



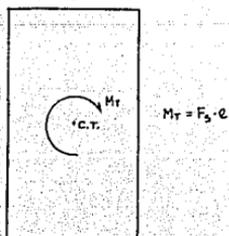
El punto de aplicación de la fuerza sísmica que actúe en el entrepiso será el centro de masas de dicho entrepiso.

El centro de rigidez es el punto por donde pasa el eje de la rigidez total equivalente, comúnmente calculado en dos direcciones ortogonales.

FIGURA III.16. EFECTO DE TORSION.



La excentricidad que produce la no coincidencia del C.R. (Centro de Rigideces) con el C.M. (Centro de Masas) genera un momento torsionante en la planta del entrepiso, que produce fuerzas sísmicas adicionales sobre los marcos del mismo. De este modo la planta de un entrepiso dado se asemeja al problema de torsión de Saint-Venant, donde el centro de torsión es el centro de rigidez, y el momento torsionante es el producto de las fuerzas sísmicas por la excentricidad.



El reglamento propone que:  $e = (FAD) \cdot e_a + e_{acc}$ .

FAD = factor de amplificación  
dinámica.

$e_a$  = excentricidad calculada

$e_{acc}$  = excentricidad accidental

En base a esta analogía se calculan las fuerzas sísmicas adicionales por efecto de torsión en cada marco del entrepiso dado.

Se puede observar que esta solución es esencialmente de carácter estático. Señalándose que aún son escasos los estudios de Torsión Dinámica.

### III.6. EFECTOS DEL SUELO LOCAL.

Las características del suelo sobre el que está apoyada la estructura cambia la respuesta sísmica de la misma debido a diversas causas:

a). La amplificación local, que es la modificación de las ondas sísmicas al transmitirse de la roca subyacente a los estratos del suelo que se encuentran entre ésta y la cimentación, además de la amplificación debida a la interacción lateral de las ondas superficiales.

b). La alteración del movimiento del terreno por la presencia de la propia estructura, considerada ésta como cuerpo rígido.

c). La interacción entre el suelo y la estructura provoca que una porción significativa de la energía cinética introducida por el sismo se vuelva a transmitir al suelo y se disipe por el amortiguamiento proporcionado por éste.

Las estructuras masivas y rígidas modifican las condiciones locales del suelo cambiando el movimiento que se tendría si no existiera la estructura. En general se ha observado que la amplitud de los movimientos del suelo abajo de la estructura es menor que la que se tienen junto a la estructura.

En lo que se llama interacción suelo-estructura, ésta provoca varias modificaciones en la respuesta. El giro que la deformación del suelo permite a la base de la estructura disminuye la rigidez efectiva de ésta y provoca un aumento en el periodo de la estructura. Por lo cual la ordenada espectral que tiene la estructura es diferente de la que se obtendría si no se tomara en cuenta la interacción.

El giro que se permite en la cimentación, esto es especialmente importante sobre todo en edificios rígidos y en los que existen muros de cortante, hace que el desplazamiento total de la estructura sea mayor que el que se considera con la cimentación empotrada. Esto reviste importancia en los efectos de segundo orden sobre la estructura y en las holguras que se tienen que dejar entre edificios contiguos para evitar el choque entre ellos.

El amortiguamiento de la vibración de la estructura que se tiene por la modificación del movimiento del suelo y por la radiación de las ondas reflejadas por la estructura, es una fuente de disipación de energía que disminuye la respuesta de la estructura, ya que las deformaciones de la estructura al disipar la energía del sismo son menores que si no existiera la interacción.

La suma de los efectos de la interacción suelo-estructura es, en la mayoría de los casos, una disminución de las fuerzas sísmicas: por lo que en estructuras comunes se ignora el efecto de la interacción, de tal manera que se estarán obteniendo resultados un poco conservadores.

## C A P I T U L O I V

### CARACTERISTICAS DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 Y SU REPLICA DEL 20 DE SEPTIEMBRE.

*"Fueron unos cuantos segundos despues de las 7:19 de la mañana el tiempo más dramático para la Ciudad de México. Repentinamente la impredecible fuerza de la naturaleza se hizo: un terremoto sacudía severamente a la capital del país y una de las más grandes urbes del mundo."*

#### IV.1. CARACTERISTICAS DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985.

El sismo del 19 de septiembre de 1985 presentó varias características que lo hacen excepcional, en cuanto a la obtención de registros de aceleraciones y tiempo de duración, en la historia sísmica del país. El sismo tuvo su epicentro a aproximadamente 400 km. al Sur-Deste de la Ciudad de México y a 33 km. de la Ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán (figura IV.1), el cual fue provocado por la penetración de la placa de Cocos bajo la placa Norteamericana.

FIGURA IV.1. EPICENTRO DEL TEMBLOR DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985.



De las distintas mediciones de aparatos sísmicos se obtuvieron los siguientes datos:

Hora de origen:	07:17:48	(hora local)
	13:17:48	(TMG) *
Coordenadas Epicentrales:	18.19°N**	18.14°N***
	102.53°W**	102.71°W***
Profundidad (kms.):	27.9 **	16.0 ***
Magnitud:	8.1 en escala de Richter.	

\* Tiempo del Meridiano de Greenwich

\*\* Según NEIC (National Earthquake Information Center)

\*\*\* Grupo Sismológico U.N.A.M.

Lo que lo ubica como el segundo de mayor magnitud en lo que va del siglo en nuestro país.

La liberación de energía sísmica durante el terremoto fue

$$E_s = 6.913 \times 10^{23} \text{ ergs.}$$

Su intensidad varió a lo largo del territorio nacional por lo que en la página siguiente se presenta un mapa de isosistas. En la Ciudad de México la intensidad fue desde V en terreno duro como en Ciudad Universitaria hasta VIII y IX en algunas zonas del centro, aún cuando el epicentro distaba más de 400 km. Los conceptos de leyes de atenuación que dicen que los efectos van siendo menores conforme aumenta la distancia al epicentro, deben adecuarse a las características peculiares de la Cd. de México.

La duración de más de dos minutos en un temblor de esta magnitud no tiene precedente en los registros instrumentales del país.

Desde el origen, su espectro de frecuencias se caracterizó por su riqueza en frecuencias bajas. El movimiento fue casi armónico, con período dominante de dos segundos en la zona central de la ciudad, e inclusive períodos mayores hacia la zona blanda más virgen.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



La distancia que recorrieron las ondas sísmicas desde el epicentro hasta la Ciudad de México fué de aproximadamente 400 km. en poco menos de dos minutos, con una velocidad promedio de 3.2 km/seg. Durante el recorrido las características de las ondas se modificaron hasta llegar a la Ciudad de México, con una acentuada regularidad, registrándose un periodo dominante de vibración de dos segundos, como se verá más adelante.

Uno de los aspectos más importantes de las características del sismo del 19 de septiembre de 1985 fué la enorme diferencia entre las intensidades del movimiento sísmico en la Ciudad de México. Esta diferencia se puede explicar con base a las variaciones de las características del terreno a través de la ciudad.

La intensidad del sismo se registró con 11 acelerógrafos en el Área metropolitana. De los cuales se presenta una tabla con la localización y el tipo de terreno donde se encuentran.

TABLA IV.1 UBICACION Y TIPO DE SUELO DE LOS DIFERENTES ACELEROGRAFOS

ESTACION	CLAVE	LAT. NORTE	LONG. OESTE	TIPO DE TERRENO
Ciudad Universitaria, D.F. Edificio 1 del Instituto de Ingenieria.	CUII1	19.330	99.183	Roca basáltica
Ciudad Universitaria, D.F. Patio del Instituto de Ingenieria.	CUII2	19.330	99.183	Roca basáltica
Ciudad Universitaria, D.F. Mesa Vibradora.	CUMV	19.330	99.183	Roca basáltica
Naucalpan Edo. de México Fresa Madin. Margen Izquierda.	MADIN	19.536	99.261	Roca fracturada
Tacubaya, D.F.	TACY	19.403	99.104	Suelo duro, zona de lomas D.F.
Sismex, Viveros, D.F.	VIVR	19.358	99.171	Suelo arcilloso Zona de transición D.F.
Central de Abastos D.F. Frigorífico.	CDAF	19.368	99.088	Suelo arcilloso Zona del ex lago de Texcoco
Central de Abastos D.F. Oficina.	CDAO	19.368	99.088	Suelo arcilloso Zona del ex lago de Texcoco
Secretaria de Comunicaciones y Transportes Xola y Eje Central D.F. Tlahuac D.F.	SCT	19.393	99.147	Suelo arcilloso Zona del ex lago de Texcoco
Bombas.	TLHB	19.279	99.000	Suelo arcilloso Zona del ex lago de Xochimilco.
Tlahuac D.F. Deportivo.	TLHB	19.293	99.035	Suelo arcilloso Zona del ex lago de Xochimilco.



TABLA IV.2. VALORES MAXIMOS REGISTRADOS POR LOS ACELEROGRAFOS.

CLAVE	COMPONENTE	Amáx. (cm/seg <sup>2</sup> )	Vmáx. (cm/seg)	Dmáx. (cm)
CU111	N - S	28.10	10.20	5.54
	VERT	21.57	8.23	6.65
	E - W	33.45	9.38	7.19
* CU112	N - S	31.71	10.25	6.17
	VERT	21.07	7.99	6.61
	E - W	34.65	9.37	7.71
CUMV	N - S	37.36	9.19	5.70
	VERT	20.14	8.40	4.57
	E - W	38.83	11.01	4.45
MAD1N	N 60x E	7.84	1.53	0.48
	VERT	6.15	1.17	0.42
	N 30x W	9.78	1.71	0.68
TACY	N - S	34.40	14.29	11.96
	VERT	19.16	8.29	7.61
	E - W	33.22	9.81	8.62
* VIVR	N - S	44.11	11.48	9.10
	VERT	18.15	5.84	6.96
	E - W	42.42	12.20	7.47
* CDAF	N - S	80.53	24.85	15.02
	VERT	27.24	8.70	8.17
	E - W	94.62	37.57	18.88
CDAO	N - S	69.16	34.98	25.02
	VERT	35.67	11.34	8.92
	E - W	80.40	41.86	24.67
* SCT	N - S	97.97	38.74	19.12
	VERT	36.64	9.00	7.58
	E - W	167.92	60.50	21.94
TLHB	N - S	135.88	64.10	36.61
	VERT	23.97	9.39	6.78
	E - W	106.67	44.61	39.29
* TLHD	N - S	117.67	34.90	20.76
	VERT	59.30	17.01	6.89
	E - W	111.55	36.06	22.07

NOTA: \* Instrumentos de campo libre.

De los resultados anteriores podemos observar que las aceleraciones máximas se presentan en suelos arcillosos, zona del lago, particularmente los registrados por el acelerógrafo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, pero no cabe duda de que el temblor fue todavía más intenso, y por lo tanto debieron tenerse mayores aceleraciones en otras zonas de la ciudad, en la que la destrucción fué mucho más grave. Esto que se intuyó al observar los daños ocasionados por el temblor, se ha visto confirmado por estudios en los que se ha evaluado la intensidad aproximada del sismo en función de la resistencia de estructuras dañadas severamente, ubicadas en diversas zonas de la ciudad (Ref. 12). Lamentablemente, no se contó con instrumentos en el Hospital General, en Fray Servando Teresa de Mier y San Antonio Abad, en las colonias Juárez y Roma, en la Zona del Monumento a la Revolución, en Tlatelolco. Ni siquiera operaron los dispositivos de la Torre Latinoamericana, que hubieran sido de gran utilidad.

Como la respuesta sísmica de las estructuras depende en gran medida de las características de la fuente excitadora, en este caso la historia de aceleraciones del terreno, ya que es en la que más se basa el diseño sísmico, se muestran los acelerogramas obtenidos en las tres componentes de aparatos instalados en llamado "Campo Libre", que son los que están ubicados a nivel del terreno y no en una estructura. Los cuales son de acuerdo a su clave: CUI12, VIVR, CDAF, SCT y TLHB. Es de resaltar que estos acelerogramas no se encuentran graficados a una misma escala, ni su inicio ocurre para todos en el mismo instante.

FIGURA IV.4. COMPARACION DE LOS ACELEROGRAMAS EN EL SENTIDO NORTE-SUR REGISTRADOS EN DIFERENTES SITIOS EL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 (Ref. 13).

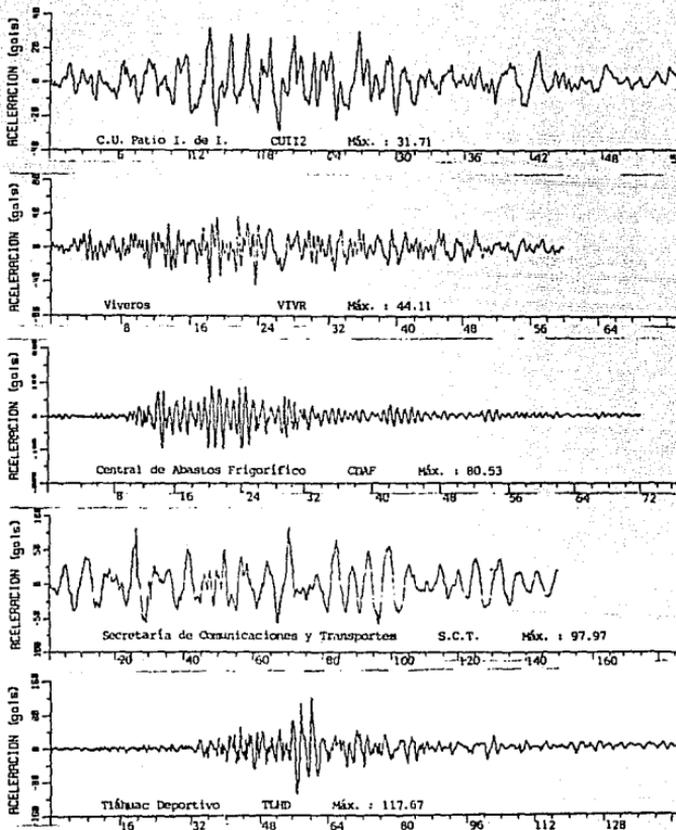


FIGURA IV.5. COMPARACION DE LOS ACELEROGRAMAS EN EL SENTIDO VERTICAL REGISTRADOS EN DIFERENTES SITIOS EL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 (Ref. 13).

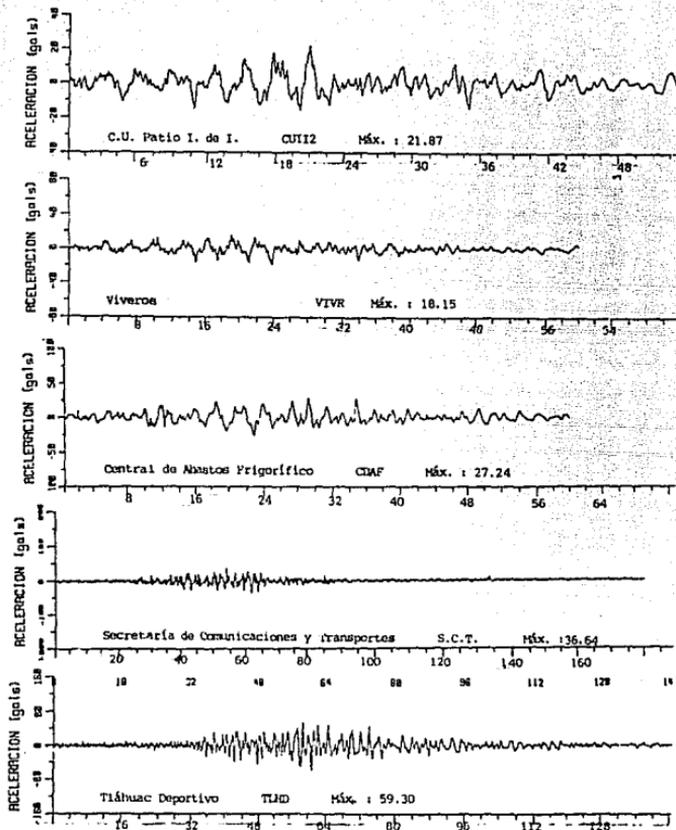
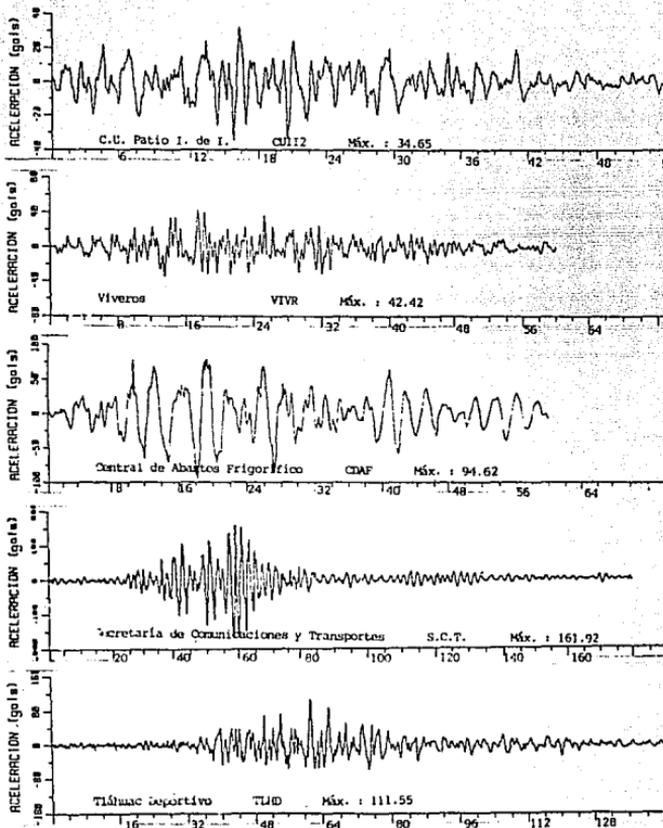


FIGURA IV.6 COMPARACION DE LOS ACELEROGRAMAS EN EL SENTIDO ESTE-OESTE REGISTRADOS EN DIFERENTES SITIOS EL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 (Ref. 13).



Cabe hacer mención que en varios casos los acelerogramas que se presentaron son la parte más importante del registro total obtenido, y su duración no debe tomarse como la del temblor mismo.

De la información presentada anteriormente se puede decir que los registros del temblor en la Ciudad de México variaron enormemente según el tipo de terreno en el cual estaban colocados los acelerógrafos.

Para terreno firme, zona I de acuerdo al Reglamento de Construcción para el Distrito Federal (R.C.D.F.), se tienen los datos de Ciudad Universitaria (CUII2) en los cuales se presentaron aceleraciones máximas del 3.2% de la aceleración de la gravedad en la dirección horizontal y 2.2% en el sentido vertical, también es importante señalar que hubo un componente marcado de 2 segundos de período en estos acelerogramas.

En el caso de terreno tipo II de acuerdo al R.C.D.F. tenemos los valores del acelerograma localizado en la zona de Viveros (VIVR) para el cual se presenta una aceleración máxima de 4.2% de la de la gravedad, en el sentido horizontal y 1.6% en el sentido vertical.

Por otra parte para el tipo de terreno III de acuerdo al R.C.D.F. (zona del lago) tenemos los registros de Central de Abastos (CDAF), Tláhuac (TLHD), y el de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Para el registro de la Central de Abastos se tiene una aceleración máxima de 8.2% con respecto a la gravedad en el sentido horizontal y 2.8% en el sentido vertical, en los que se presentan períodos dominantes entre 1.8 y 3.5 segundos. En Tláhuac el valor de la aceleración

máxima fue de 12.0% de la gravedad para el sentido horizontal y 5.3% en el vertical. El registro de acelerogramas más representativos de lo ocurrido en la zona cercana a la de mayores daños se obtuvo en S.C.T., a menos de 10 kms. de Ciudad Universitaria, para el cual tenemos una aceleración máxima resultante de las direcciones Este-Oeste y Norte-Sur que fue de aproximadamente de 200 gals, es decir 20% de la aceleración de la gravedad, y con un período de oscilación del suelo de 2 segundos que se mantuvo sensiblemente durante casi 45 segundos, en el sentido vertical la aceleración fue 3.7% de la gravedad.

En el capítulo anterior se comentó sobre la importancia de obtener los espectros de respuesta para un sismo, más si éste es uno de los más intensos y para el que se tienen mediciones, por esto en seguida se presentan los espectros de respuesta, con amortiguamiento de 0, 2, 5, 10 y 20% del crítico, de los acelerogramas que se obtuvieron con aparatos ubicados en campo libre, en el sentido en que se presentó la máxima aceleración. En estos espectros se puede visualizar para que períodos se presenta la máxima aceleración del sistema de un grado de libertad, que coincide bastante con los períodos dominantes que presentan los acelerogramas.

FIGURA IV.7. ESPECTROS DE RESPUESTA PARA EL SENTIDO ESTE-OESTE DEL REGISTRO DE CIUDAD UNIVERSITARIA (CUII2). (Ref. 13)

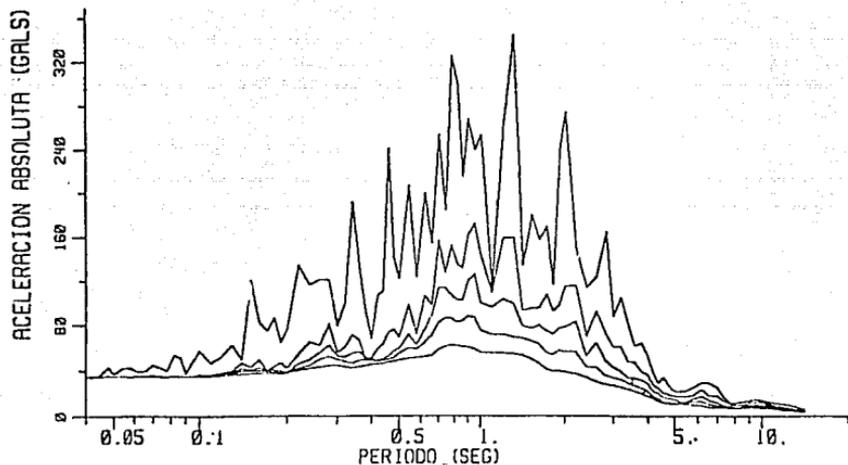


FIGURA IV. B. ESPECTROS DE RESPUESTA PARA EL SENTIDO NORTE-SUR DEL REGISTRO DE VIVEROS (VIVR). (Ref. 13)

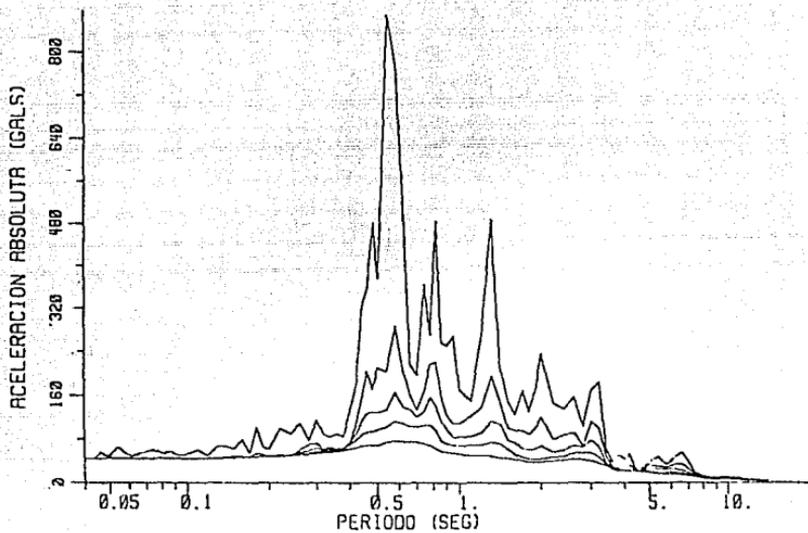


FIGURA IV.9. ESPECTRO DE RESPUESTA PARA EL SENTIDO ESTE-DESTE DEL REGISTRO DE LA CENTRAL DE ABASTOS (CDAF). (Ref. 13)

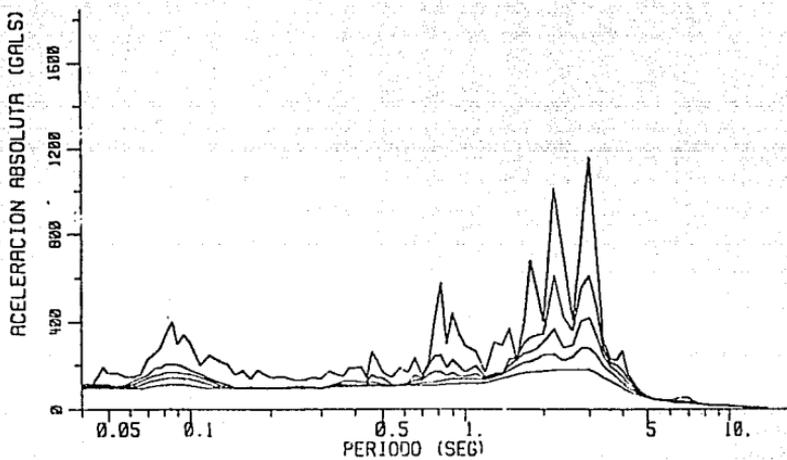


FIGURA IV.10. ESPECTRO DE RESPUESTA PARA EL SENTIDO ESTE-OESTE DEL REGISTRO DE LA SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT). (Ref. 13)

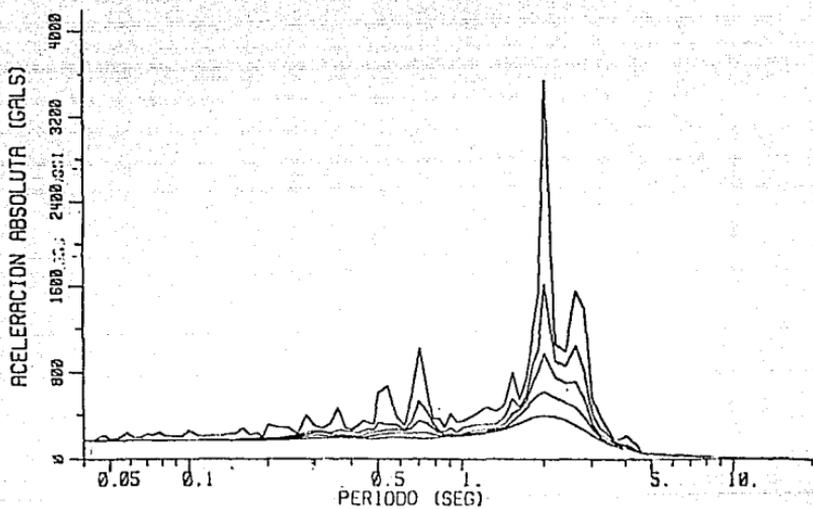
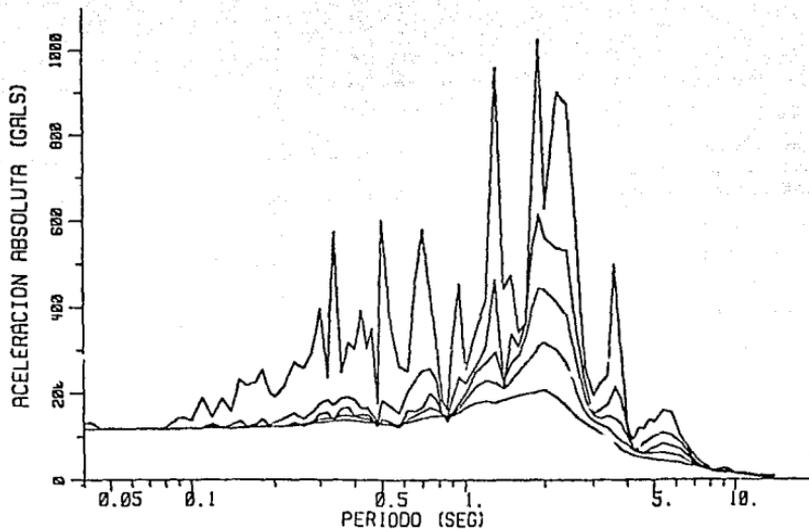


FIGURA IV.11. ESPECTROS DE RESPUESTA PARA EL SENTIDO NORTE-SUR DEL REGISTRO DE TLAHUAC (TLHD). (Ref. 13)



En los espectros anteriores notamos que para un amortiguamiento de 5% del crítico, que es el que comúnmente se utiliza para los edificios urbanos se tienen los siguientes datos:

Clave	Tipo de suelo de acuerdo al RCDF.	Aceleración máx. (gals)	Relación con la de S.C.T.	Período para el que ocurre la aceleración máx. (seg.)
CU112	I	126.41	0.13	0.95
VIVR	II	167.46	0.17	0.58
CDAF	III	421.31	0.43	3.00
SCT	III	977.78	1.00	2.00
TLHD	III	443.64	0.45	1.90

Cabe hacer mención que, por las características descritas, el 19 de septiembre de 1985 ocurrió un sismo que rebasó plenamente los registros de otros sismos ocurridos en la Ciudad de México. Por ejemplo, en 1957 se presentó un movimiento de Magnitud 7.5, igual a la del 20 de septiembre de 1985, causando aceleraciones máximas estimadas del 6% de la gravedad y el 14 de marzo de 1979 fué la magnitud 7.0, con aceleraciones máximas del suelo del 3% de la gravedad. En la tabla IV.3 se señala en forma resumida las diferencias entre los sismos de 1957 y 1979 con el de 1985, y se compara la energía liberada por cada uno de ellos con la correspondiente a la explosión de una bomba atómica similar a la de Hiroshima. En esta tabla se puede apreciar que la energía liberada en septiembre de 1985 es aproximadamente 8 veces mayor que la correspondiente a 1957.

TABLA IV.3. COMPARACION CON LOS SIGSMOS DE 1957 Y 1979 (Ref. 14).

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

## IV.2. CARACTERISTICAS DE LA REPLICAS DEL 20 DE SEPTIEMBRE.

Después del sismo del 19 de septiembre hubo un pequeño número de réplicas de las que sólo una, 36 horas después del evento principal tuvo importancia, su epicentro estuvo situado al este del localizado el día anterior, a unos 340 km. de la Ciudad de México. A pesar de su magnitud relativamente alta, su menor distancia focal y el hecho de que encontró gran número de edificios severamente debilitados por el terremoto del día anterior, no ocasionó gran número de daños adicionales.

De las distintas mediciones de aparatos sísmicos se obtuvieron los siguientes datos:

Hora de origen:	19:37:13 (Hora local)	20/sep./85
	01:37:13 (TMG) *	21/sep./85
Coordenadas Epicentrales	17.80°N **	17.82° N ***
	101.65°W **	101.815°W ***
Profundidades (kms.)	30.8 **	16.0 ***
Magnitud:	7.5 en escala de Richter.	
La liberación de energía sísmica fue $E_s = 1.585 \times 10^{23}$ ergs.		

La intensidad máxima que se registró fue de VI en la escala de Mercalli para la Ciudad de México.

Basándonos en los acelerógrafos que se encontraban en operación en el momento de ocurrir la réplica mayor, ya que el sismo principal ocasionó que varios acelerógrafos agotaran su dotación de película o de cinta magnética, se presenta la información numérica más relevante, como es aceleración, velocidad y desplazamiento máximo (Amáx., Vmáx., Dmáx.). La clave y localización de los aparatos correspondientes es la definida en el subcapítulo anterior.

Posteriormente se presentan los acelerogramas de los aparatos ubicados en campo libre, en las componentes Norte-Sur, Vertical y Este-Oeste. Cabe hacer notar que el acelerógrafo de la S.C.T. que fue el que registró las mayores aceleraciones en el sismo principal, ya no registró este sismo.

\* Tiempo del Meridiano de Greenwich.

\*\* Según NEIC (National Earthquake International Center)

\*\*\* Grupo Sismológico U.N.A.M.

TABLA IV.4. VALORES MAXIMOS REGISTRADOS POR LOS ACELEROGRAFOS PARA LA REPLICA DEL 20 DE SEPTIEMBRE.

CLAVE	COMPONENTE	Amáx.	Vmáx.	Dmáx.
* CUI12	N - S	14.76	3.28	1.09
	VERT	8.05	1.68	0.60
	E - W	15.00	3.90	1.39
CUMV	N - S	13.66	2.32	0.75
	VERT	7.62	1.87	0.50
	E - W	13.51	1.70	0.46
TACY	N - S	14.75	2.57	1.29
	VERT	6.15	1.58	1.11
	E - W	12.98	2.21	1.06
* VIVR	N 32° W	21.48	3.22	1.42
	VERT	6.55	1.23	0.76
	N 58° E	26.28	3.29	1.34
* CDAF	N - S	42.43	12.02	5.02
	VERT	12.40	3.79	1.32
	E - W	29.36	9.66	5.72
CDAO	N - S	48.66	18.19	9.65
	VERT	13.88	4.42	5.04
	E - W	32.30	11.73	7.75
* TLHD	N - S	100.00	26.41	11.50
	VERT	64.31	17.54	6.58
	E - W	90.47	26.65	11.61

NOTA: Las Amáx. está en gals (cm/seg.), Vmáx. en cm/seg. y Dmáx. en cm  
 \* Instrumentos de campo libre.

FIGURA IV.12. COMPARACION DE LOS ACELEROGRAMAS EN EL SENTIDO NORTE-SUR REGISTRADOS EN DIFERENTES SITIOS EL 20 DE SEPTIEMBRE DE 1985 (Ref. 15).

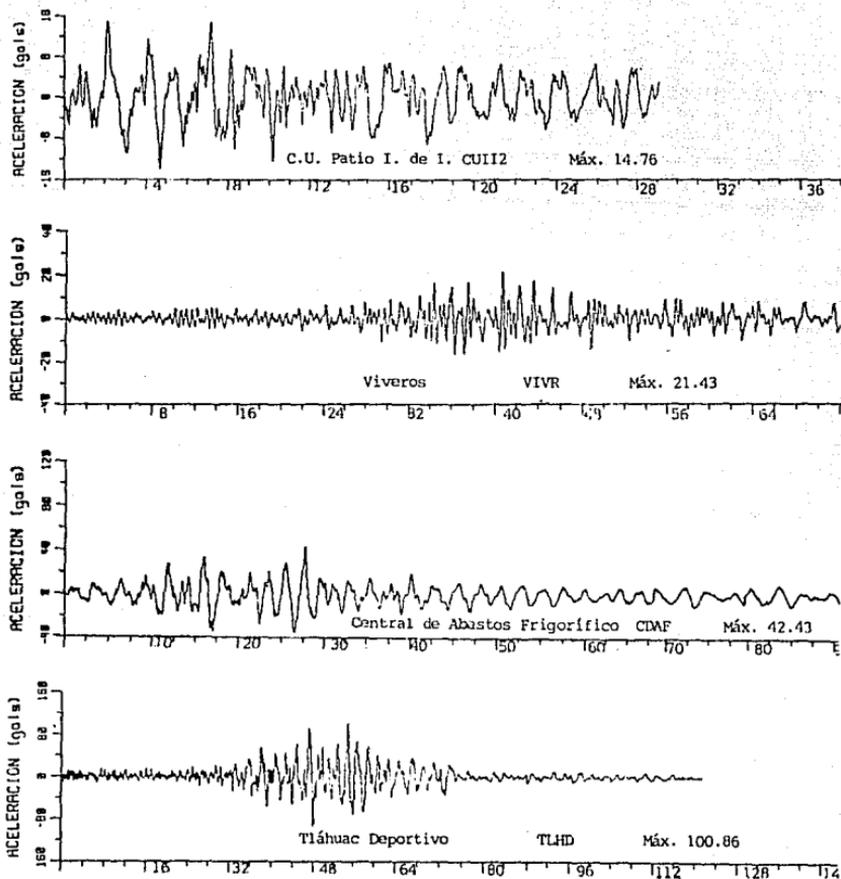


FIGURA IV.13. COMPARACION DE LOS ACELEROGRAMAS EN EL SENTIDO VERTICAL REGISTRADOS EN DIFERENTES SITIOS EL 20 DE SEPTIEMBRE DE 1985 (Ref. 15).

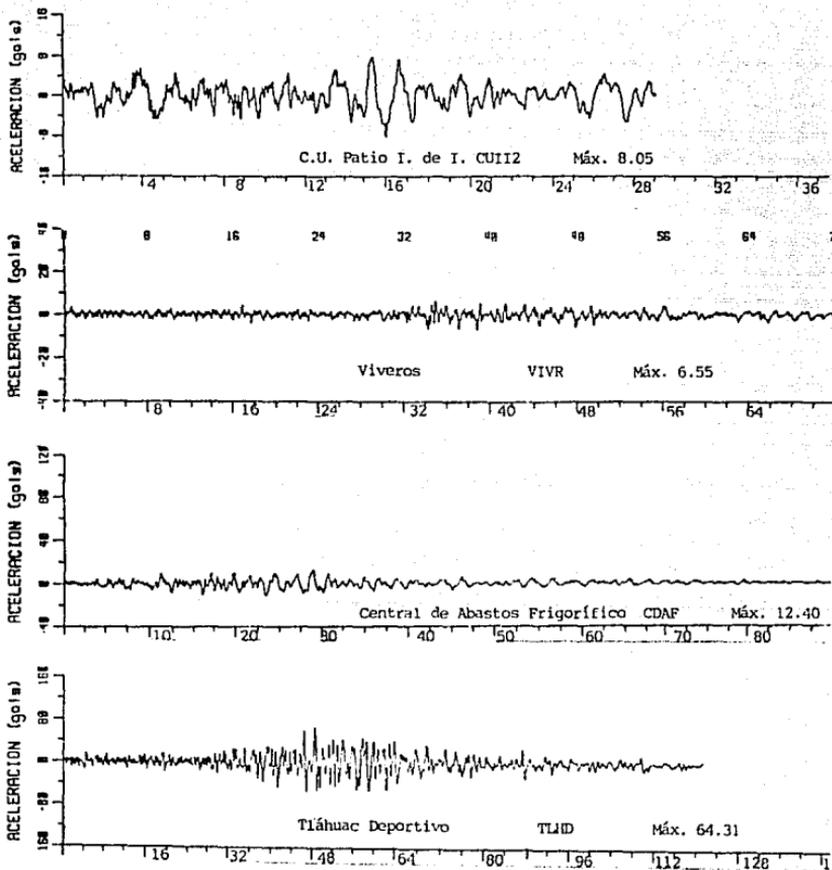
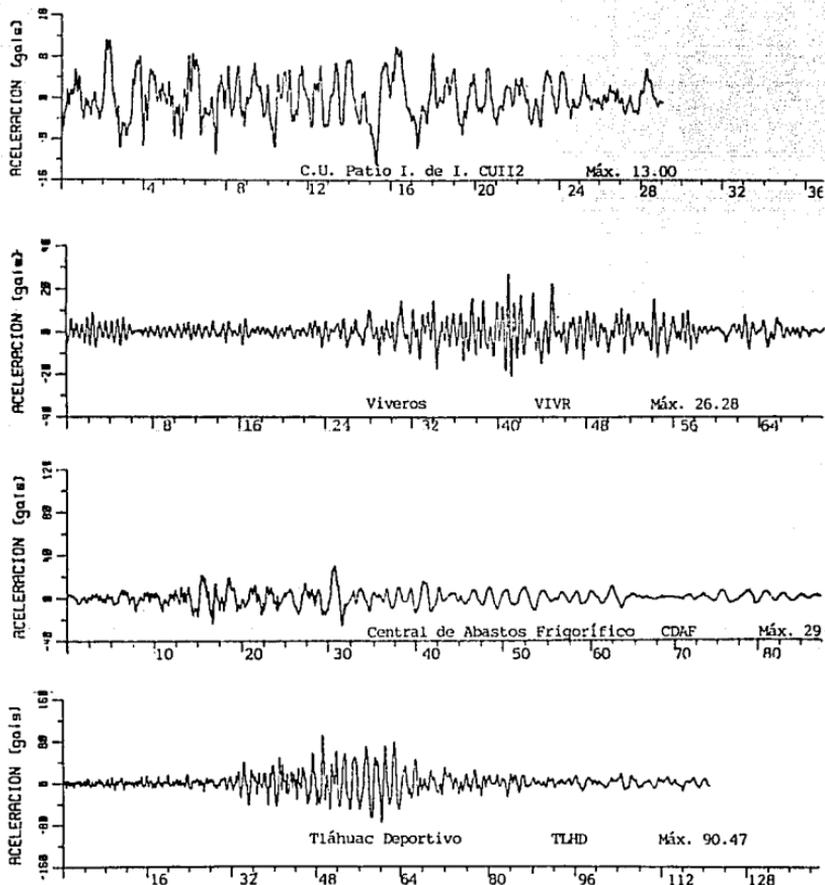


FIGURA IV.14 COMPARACION DE LOS ACELEROGRAMAS EN EL SENTIDO ESTE-OESTE REGISTRADOS EN DIFERENTES SITIOS EL 20 DE SEPTIEMBRE DE 1985 (Ref. 15).



De la tabla anterior se aprecia que para terreno firme (zona I) la aceleración que se tiene en los instrumentos no llega a ser ni el 50% del valor que se obtuvo del sismo principal. Para terreno tipo II las aceleraciones son de aproximadamente 60% de las obtenidas el 19 de septiembre. Y para terreno tipo III se tienen valores de hasta el 85% de las aceleraciones registradas el día anterior. De lo cual se pone otra vez de manifiesto la importancia que tiene el subsuelo en los registros de aceleraciones, en especial el de la zona del lago para epicentros localizados a una gran distancia de la Ciudad de México.

## C A P I T U L O V

### CAUSAS DE FALLA EN ALGUNAS CONSTRUCCIONES DE LA CIUDAD.

*"La fuerza de la naturaleza es tan grande que los esfuerzos de la humanidad para controlarla o quedar a salvo de ella resulta en muchas ocasiones un esfuerzo infructuoso. Lo inesperado parece enterrar los avances técnicos de muchos años de investigación."*

LUIS ESTEVA HARABOTO.

#### V.I CAUSAS NATURALES QUE ORIGINARON FALLAS EN LAS ESTRUCTURAS

Es fundamental conocer de manera cabal la índole de los daños provocados por los grandes sismos para poder establecer y mejorar los criterios de concepción de estructuras antisísmicas.

Durante décadas los sismos que estremecieron a la Ciudad no causaron grandes daños, lo cual hizo pensar que era bastante segura. La realidad se apreció el 19 de septiembre de 1985, con un evento que rebasaba por mucho los pocos registros que se tenían de años atrás, nunca se habían derrumbado tantas estructuras por causa alguna en el país, por lo tanto hay una serie de causas que provocaron fallas en las construcciones de la Ciudad, las cuales son debidas a la naturaleza:

- La gran magnitud del sismo (8.1 en la escala de Richter).
- Las características de las ondas que llegaron a la Ciudad de México, la excepcional y marcada regularidad de las oscilaciones del movimiento, con grandes aceleraciones (hasta del 20% del valor de la gravedad).
- La larga duración del sismo (sentido por más de 2 minutos por las personas) y medida en los acelerogramas.
- La amplificación del movimiento en el valle de México debido a sus características (topografía, geología y propiedades mecánicas del suelo).

#### V.2. SISTEMAS ESTRUCTURALES.

Para la evaluación de daños es importante conocer los sistemas estructurales más comunes en la Ciudad de México, los cuales se describirán brevemente a continuación:

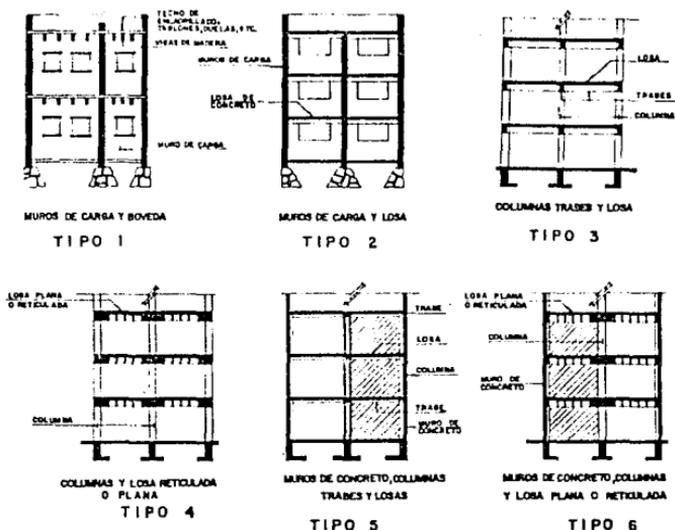
El primero corresponde a edificios antiguos construidos con gruesos muros de carga de mampostería y sistemas de piso a base de vigas de madera o acero, sobre los que se apoyan bóvedas de ladrillo o tablonés de madera, o a base de arcos y bóvedas de piedra (TIPO 1). El segundo tipo es la versión moderna del anterior con muros de mampostería más delgados y reforzados con dadas y castillos de concreto con sistema de piso de losa de concreto perimetralmente apoyada (TIPO 2).

El tercer tipo de estructura corresponde a marcos formados por columnas y trabes peraltadas con sistema de piso de losa de concreto perimetralmente apoyadas u otro (TIPO 3). El cuarto tipo es a base de marcos formados por columnas y losas planas aligeradas que en general resultan muy flexibles (TIPO 4).

Los tipos de estructuras quinto y sexto son similares a las dos anteriores pero cuentan con elementos de rigidez adicional como son, muros de concreto o de mampostería o elementos diagonales de contraventeo de concreto o de acero, ubicado en algunas cruces para reducir los desplazamientos laterales y mejorar el comportamiento general de la estructura (TIPO 5 y 6).

También existen construcciones con sistemas estructurales que resultan de la combinación de los tipos 3 con 5 y 4 con 6, es decir, en una sola construcción algunos marcos no cuentan con elementos de arriostramiento y otros en la misma dirección si se encuentran rigidizados por muros o diagonales y en muchos casos no se mantiene simetría en esta rigidización, lo que hace que la estructura tenga torsiones ante movimientos sísmicos. Otra combinación de uso muy común son los marcos flexibles y libres de muros en los pisos superiores.

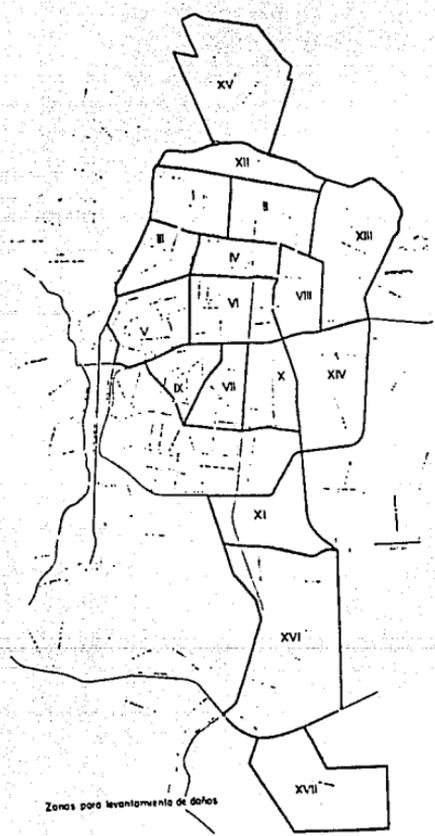
FIGURA V.1. ESQUEMATIZACION DE SISTEMAS ESTRUCTURALES (Ref. 14).



## V.3. CARACTERISTICAS DE LAS CONSTRUCCIONES DANADAS.

De acuerdo a un estudio realizado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Ref.16), el área de la Ciudad de México donde los edificios se derrumbaron o sufrieron daños, fué dividida en 17 zonas (figura V.2).

FIGURA V.2. ZONAS PARA LEVANTAMIENTO DE DAÑOS (Ref. 16).



Se propuso reunir información que permitiera identificar las más importantes características estructurales asociadas a los daños del sismo. Los efectos de éste se clasificaron como sigue:

- 1). Colapso total o parcial.- Se incluyen casos de derrumbe, debidos a choques. Se omiten viviendas de uno o dos pisos, de materiales de construcción de mala calidad o deteriorados, y no aparecen en las estadísticas de los efectos del sismo.
- 2). Daño grave.- Incluye edificios con varias columnas seriamente dañadas, con distorsiones importantes en los entrepisos y con inclinación considerable.
- 3). Daño estructural intermedio o moderado.- Abarcan daños locales a columnas y vigas que presentan en general una pérdida significativa en la capacidad de los elementos. Las estadísticas para esta y la siguiente categoría de daños no cubren más que una pequeña fracción del total, ya que la inspección exterior con frecuencia no revela la presencia de daño ligero o menor.
- 4). Daños menores.- Incluyen fisuras en estructuras, muros de carga o divisorios, pero no daños locales de importancia.

Se intentó identificar características importantes estructurales y de cimentación. Algunas de estas pudieron evaluarse en forma estadística.

La siguiente tabla contiene el número de edificios que sufrieron derrumbes o daños graves, clasificados de acuerdo con el tipo de estructura, fecha de construcción y número de pisos. La mayoría (72%) de los edificios derrumbados o severamente dañados se encontraban entre la zona III a la VI.

TABLA V.1. RESUMEN ESTADÍSTICO DE DAMOS EN EDIFICIOS (Ref. 14).

Tipo de Estructura	Daño	Año de Construcción			Número de Pisos				Total
		1957	57-76	1976	5	6-10	11-15	16	
Marcos de Acero	Colapso	7	5	0	4	3	1	2	10
	Grave	1	1	0	0	0	2	0	2
Marcos de Concreto	Colapso	27	51	4	27	46	8	1	82
	Grave	16	23	6	10	28	6	1	45
Losas Reticulares	Colapso	8	62	21	36	49	5	1	91
	Grave	4	22	18	5	26	12	1	44
Muros de Carga de Mampostería	Colapso	6	5	2	11	2	0	0	13
	Grave	9	13	1	22	1	0	0	23
Otros	Colapso	4	8	2	12	2	0	0	14
	Grave	0	4	2	2	4	0	0	6
Total	Colapso y Grave	82	192	56	129	161	34	6	330
									100%

Las razones para dividir la época de construcción en tres periodos como se muestra en la tabla anterior, son que las primeras disposiciones contra sismos, razonablemente realistas, se aplicaron a fines de 1957, el reglamento de 1966 no las modificó en forma considerable, y el reglamento de 1976 introdujo cambios más importantes. Si tomamos en cuenta el número de edificios de más de cuatro niveles construidos en diversas zonas:

de la Ciudad durante los diferentes periodos, así como el tipo predominante de solución estructural en cada época, podemos llegar a la conclusión de que los edificios erigidos después de la publicación del reglamento de 1976, probablemente resistieron mejor que los del periodo precedente y el tipo de estructura fue una variable más decisiva.

A continuación se describirá el comportamiento de los diferentes tipos de estructura.

Estructuras con muros de carga y pisos a base de vigas. Por lo general, las estructuras contruidas antes del siglo XX se comportaron muy bien. Los edificios coloniales casi no sufrieron daños. Esto es comprensible en vista de su rigidez y resistencia debidas al uso de muros de carga muy gruesos. Tal vez contribuyeron la forma favorable de interacción suelo-estructura, la disipación de energía por fricción seca entre las piedras del muro y, quizás, el hecho de que las estructuras coloniales más vulnerables se habían derrumbado en épocas anteriores. Este tipo de construcción en general, por contar con muchos muros en ambas direcciones, es muy rígida y sus periodos naturales de oscilación son virtualmente menores de 0.5 seg., por lo que su respuesta dinámica en la zona de terreno compresible fué satisfactoria y sufrieron pocos daños. Sin embargo, algunos de los daños observados se debieron principalmente a la notable falta de mantenimiento ya que el sistema de piso a base de vigas de madera no es lo suficientemente rígido como para transmitir la carga a todos los muros que la apoyan; por otro lado en los casos en que las vigas están en toda la planta en una sola dirección, los muros que les sirven de apoyo mostraron daños al recibir la fuerza horizontal de las vigas en la dirección perpendicular a su plano que es, además, poco eficiente para este tipo de sollicitaciones. A esta falla colabora la falta de confinamiento adecuado en las esquinas y remates ya que en la mayoría de los casos no se contó con castillos o dadas, carencia propia de la

época de construcción de este tipo de estructuras. Algunas más recientes con las losas de concreto como sistemas de piso, mostraron corrimientos de esta sobre los muros por la falta de correcta unión entre ambos elementos.

Estructuras con muros de carga y losa de concreto. Considerando la gran cantidad de edificios existentes con muros de carga de mampostería, su número en la tabla anterior es muy reducido. Su comportamiento relativamente satisfactorio debe atribuirse a que no suelen tener más de seis pisos y por lo general son mucho más rígidos que edificios similares con estructuras a base de marcos; su periodo fundamental de vibración queda entonces por debajo del rango de ordenadas espectrales elevadas. Sin embargo, algunas construcciones sufrieron daños importantes por las siguientes causas: golpe recibido de alguna estructura cercana colapsada, golpe recibido por estructura adyacente a falta de holgura suficiente entre ambas construcciones, hundimiento diferencial provocado por el hundimiento de edificios altos contiguos por lo que se marcaron grietas diagonales en los muros. Todas las causas anteriores no son reputables directamente a la estructura, sino a las vecinas.

Marcos formados por columnas y traveses. Este tipo de estructuración de forma esquelética, es uno de los más comunes y el material de construcción predominante es el concreto reforzado, el acero estructural con conexiones soldadas y en menor número el uso de perfiles de acero conectados con remaches o tornillos y forrados por una capa de concreto que varía entre 5 y 10 cms. de espesor. El sistema de piso es mediante losa de concreto perimetralmente apoyada. Son usadas primordialmente para habitación u oficinas. Estas estructuras se caracterizan porque los muros divisorios y de fachada no son estructurales o al menos eso se ha pretendido mediante el uso de juntas flexibles entre muros y estructura. Los muros son de mampostería o de materiales ligeros y deformables. La cimentación depende de la

altura de la construcción siendo más frecuente el uso de cajones de compensación, pilotes de fricción y pilotes de punta. Este tipo de construcción fue de las más afectadas por el sismo ya que para muchos edificios su período natural de oscilación fue cercano al del movimiento del suelo y sus desplazamientos muy grandes por ser estructuras poco rígidas.

- Marcos de concreto. La mayoría de los problemas en edificios con estructura de concreto se debió a la falla de las columnas por compresión excéntrica (flexocompresión), tensión diagonal (cortante) o una combinación de ambas. Pareció que el acero de las trabes no fluyó, de manera que no se presentó el comportamiento dúctil supuesto en el diseño, que se basa en la formación de articulaciones plásticas en las trabes. Las fallas en las columnas pueden atribuirse al deterioro del material bajo el gran número de ciclos de carga que ocasionó un temblor de duración excepcional. En muchos casos influyó también en las fallas la escasez de estribos y la concentración excesiva del acero de refuerzo longitudinal, colocado en las esquinas formando paquetes. Los daños sufridos en las vigas se debieron principalmente a insuficiente resistencia a cortante. Variaron desde grietas inclinadas con ancho del orden de 1 mm, hasta aplastamiento del concreto, rotura del refuerzo transversal y descubrimiento del refuerzo longitudinal.

- Marcos de acero. Entre las causas principales de colapso o daños severos en edificios con estructura de acero se han identificado los siguientes:

Pandeo local o fractura en vigas de alma abierta (armaduras).- El pandeo, elástico o inelástico, de miembros comprimidos, ocasiona una disminución de resistencia repentina, similar a la que se presenta en una falla frágil. Por otro lado, el control de calidad en ángulos pequeños del tipo de los que se emplean en el alma de las vigas, es con frecuencia defectuoso, lo

que a veces lleva a fallas frágiles en tensión. Además, experiencias realizadas en los últimos años parecen indicar que hay una disminución importante de resistencia en miembros sometidos a varios ciclos de tensión y compresión alternas. Pandeo o ruptura de contraventos muy esbeltos de algunas estructuras antiguas.

En este caso se volvió a comprobar que las estructuras a base de marcos rígidos de acero tienen, desde el punto de vista de resistencia, un comportamiento satisfactorio bajo fuerzas sísmicas, pero que este puede perderse si se utilizan elementos en los que desaparezcan la gran ductilidad y capacidad de absorción de energía, características del acero estructural, por provocarse fallas prematuras de carácter frágil, como pueden ser, por cortante, pandeo de algún tipo, falla de soldadura o conexiones.

Marcos formados por columnas y losa plana aligerada.- La mayoría de las losas planas de la Ciudad de México son losas reticulares, y exhiben en grado importante las características objetables de losas planas bajo excitación sísmica. Las estructuras que emplean losas planas son muy flexibles y, en la manera en que se estaban diseñando en la Ciudad de México, desarrollaron bajas ductilidades. La mayoría de las que fallaron lo hicieron en las columnas. Hay varios casos en que las columnas perforaron las losas, que fallaron por cortante bajo la combinación de fuerzas verticales y laterales. En estos casos, las losas muestran grietas diagonales de tensión alrededor de los apoyos, que sugieren falla incipiente por punzonamiento. La omisión de un volumen macizo de concreto alrededor de la columna fue evidente en algunas losas reticulares como también lo fue la insuficiencia de acero longitudinal a través de la columna y en su vecindad. Una característica adicional de las losas planas es su corto espesor que, aunado al insuficiente confinamiento en las intersecciones, no permite que se desarrolle suficiente

adherencia con las varillas longitudinales de la columna como para cambiar de esfuerzos elevados de tensión a de compresión, especialmente cuando estas varillas son de gran diámetro o están agrupadas en paquetes y cuando se presenta un gran número de inversiones de momento durante el sismo.

Desde tiempo antes del sismo se había hecho hincapié en el abuso que se estaba haciendo sobre la losa plana reticular al utilizarla en construcciones cada vez de mayor altura y sin tomar adecuadamente la limitación de las deformaciones laterales ante efectos sísmicos, ni los problemas de resistencia al cortante en la losa alrededor de la columna y en las columnas mismas (Ref. 17).

Las fallas experimentadas por algunos edificios con losa plana reticular han llevado a muchos proyectistas y constructores a la opinión de que el sistema debe proibirse por ser inadecuado para soportar cargas laterales. La losa reticular ofrece un gran número de ventajas constructivas que pueden aprovecharse. Lo que es inadecuado es pretender resistir sismos en edificios de cierta altura exclusivamente con la acción de marcos que se forman entre las columnas y la losa. La resistencia a carga lateral debe ser proporcionada por muros de concreto o por elementos de rigidez y capacidad similar, dejando el sistema losa-columna la función de tomar las cargas verticales y una pequeña porción de las cargas laterales.

Marcos rigidizados con muros de cortante.- Los muros que desde el diseño fueron considerados como parte integrante de la estructura, resultaron muy convenientes en el comportamiento del conjunto ya que, además de rigidizarlo contra desplazamientos, se observó que existe mejor distribución en planta que los de relleno, reduciendo con esto los efectos de la torsión. Los elementos rigidizantes en general son de concreto, de mampostería o de mampostería reforzada con diagonales de concreto. En vista

de la cantidad de daños observados, este tipo de estructura resulta muy conveniente para la construcción en zonas altamente sísmicas.

Las estructuras colapsadas o con daños importantes fueron de diversos tipos, construidas en épocas muy diferentes, muchas de ellas habían resistido otros sismos, incluyendo el de 1957, sin daños aparentes; otras fueron reforzadas después de eventos sísmicos anteriores al de 1985. Es probable que en algunas fallas haya influido el deterioro ocasionado por temblores de tierra anteriores, por hundimientos diferenciales de sus cimentaciones, comunes en la Ciudad de México, o por combinación de ambos factores.

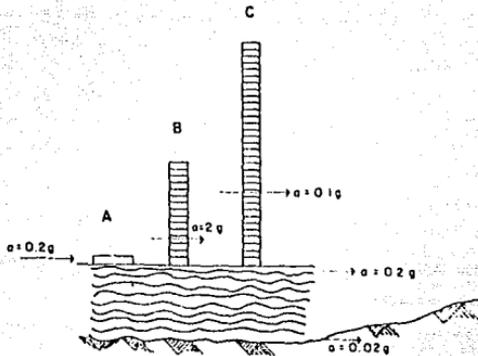
Excepto por viviendas de uno o dos pisos, hechas de materiales de mala calidad, tales como las casas de adobe, los casos de derrumbe o de daños severos se limitaron a edificios de más de cuatro pisos de altura, los más vulnerables demostraron ser los de siete a quince pisos. Estos edificios que se derrumbaron o que sufrieron daños severos estaban ubicados en las zonas III, IV y VI. Esto indica la presencia de fenómenos de resonancia ocasionado por la coincidencia entre los períodos de vibración de las arcillas del valle y las de las estructuras de ese número de niveles desplazadas en ellas. A continuación se explicará este fenómeno de una forma más clara.

El suelo del centro de la Ciudad de México, constituido por una serie de estratos arcillosos extraordinariamente deformables que descansan, a distintas profundidades, en depósitos mucho más rígidos (figura II.11 y II.12), es una estructura que, en amplias zonas vibra con período natural cercano a los dos segundos (ver figura II.13).

Cuando esa estructura se ve excitada por vibraciones que tienen también un período natural dominante de aproximadamente dos segundos, como es el caso de lo que ocurre como resultado de los sismos que, originados en la costa del Pacífico, se hacen sentir en la Ciudad de México (ver los acelerogramas del capítulo IV), se entra a una condición cercana a la resonancia produciéndose amplificaciones muy notables del movimiento que originalmente llega y que dan lugar, en la superficie del terreno, a amplitudes y aceleraciones de gran magnitud. Aquellos edificios que, colocados sobre este terreno, tengan también un período fundamental de vibración similar al del suelo, amplifican aún más el movimiento llegándose a condiciones que, en ciertos casos, difícilmente pueden ser resistidos por ellos también en el caso de que cuenten con resistencias mayores a las que son usuales.

Esta amplificación no se presenta en construcciones bajas y rígidas que se mueven con el suelo, ni en edificios de gran altura en donde las aceleraciones que llegan a actuar pueden ser aún menos que las del propio terreno, esto es debido a que el período de la edificación es mayor que la del suelo; la amplificación si se presenta en edificios de altura media, es decir los que tienen de seis a quince pisos, esto obedece a que tal vez los edificios de 7 pisos con período fundamental aproximado a 0.9 segundos, encontrará ordenadas espectrales significativas, aumentarán su período conforme se incrementa la amplitud de la oscilación y al entrar al rango inelástico pierden rigidez, para luego aumentar su período a un valor cercano a 2 y entrar al rango de aceleraciones espectrales muy elevadas, (ver figura siguiente).

FIGURA V.3. COMFORTAMIENTOS ESTRUCTURALES TÍPICOS (Ref. 18).



- A. Monumentos coloniales; alcanzan aceleraciones similares a las del suelo.  
 B. Edificios de mediana altura; amplifican la aceleración del suelo.  
 C. Edificios altos; aminoran la aceleración del suelo.

Por otra parte el periodo fundamental de un edificio de 16 pisos rara vez será inferior a 1.8 segundos. Tan pronto como sus deformaciones se vuelven considerables, su periodo habrá aumentado lo suficiente para sacarlo de las aceleraciones espectrales muy grandes.

El grupo ICA estudió las áreas más dañadas en parte de las 17 zonas, incluyendo las viviendas modestas en el recuento de las construcciones que habían sufrido derrumbe o daños severos. Con base en ello se elaboró la tabla siguiente, que presenta los porcentajes correspondientes en términos del número de edificios existentes. La cantidad total de edificios en el área fue de 53,356, entre los cuales sólo el 1.4% se derrumbó o sufrió daños severos. Con esta base, las cifras correspondientes a construcciones de menos de cinco pisos fue de 1.0% y para más de cinco pisos 10%.

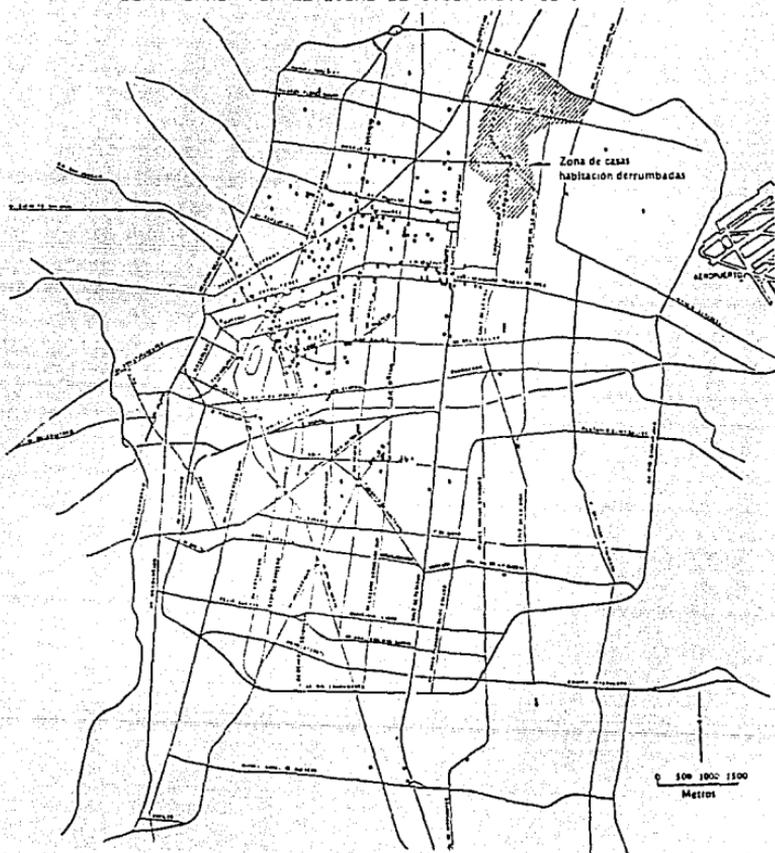
TABLA V.2. PORCENTAJE DE DERRUMBES O DAÑOS GRAVES.

Número de pisos	Porcentaje de casos de colapso o daño grave (en el intervalo de número de pisos).
1 - 2	0.9
3 - 5	1.3
6 - 8	8.4
9 - 12	13.6
12 o más	10.5
TOTAL	1.4 con respecto al total de construcciones.

#### V.4. ZONIFICACION DEL DAÑO.

La zona de mayor densidad de daños se localizó en un mapa al igual que los casos de colapso total y daño grave. Esta distribución se presenta en la figura V.4.

FIGURA V.4. UBICACION DE EDIFICIOS GRAVEMENTE DAMADOS O QUE SE DERRUMBARON POR EL SISMO DE 1985 (Ref. 16).

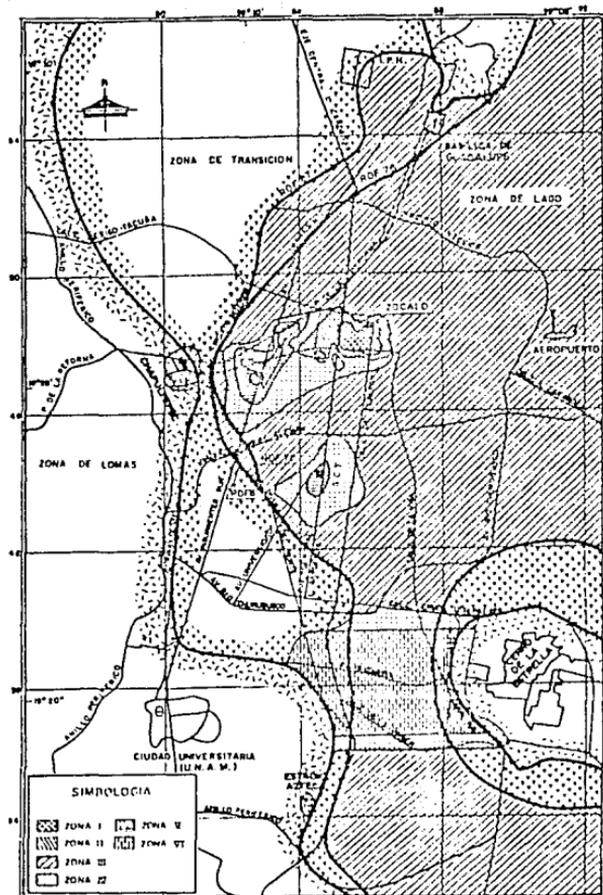


Edificios gravemente dañados ( - ).  
 Edificios que se derrumbaron ( " ).

La figura anterior nos mostró los primeros estudios que se hicieron sobre la distribución de los daños, que fue con base en su densidad geográfica, sin tomar en cuenta la capacidad de las estructuras. lo que condujo a resultados muy vagos o a la asociación de las mayores intensidades con las zonas donde se encuentran las construcciones más viejas y deterioradas.

Ante la escasa instrumentación sísmica de la Ciudad de México durante el sismo de 1985, fue necesario recurrir al estudio de la distribución de los daños, considerando la capacidad sísmica de las estructuras afectadas, para poder interpretar las diferencias de intensidad que se manifestaron en diversas partes de la ciudad. Por lo que se procedió a evaluar la capacidad sísmica de 296 edificios de concreto afectados por el sismo de 1985 utilizando un procedimiento simplificado que fue desarrollado en la UAM Accapotzalco (Ref. 12) con base en métodos originados en Japón. Mediante la adopción de la capacidad de los edificios gravemente dañados como medida cuantitativa de la intensidad sísmica se elaboró un mapa de intensidades del sismo de 1985 que a continuación se presenta.

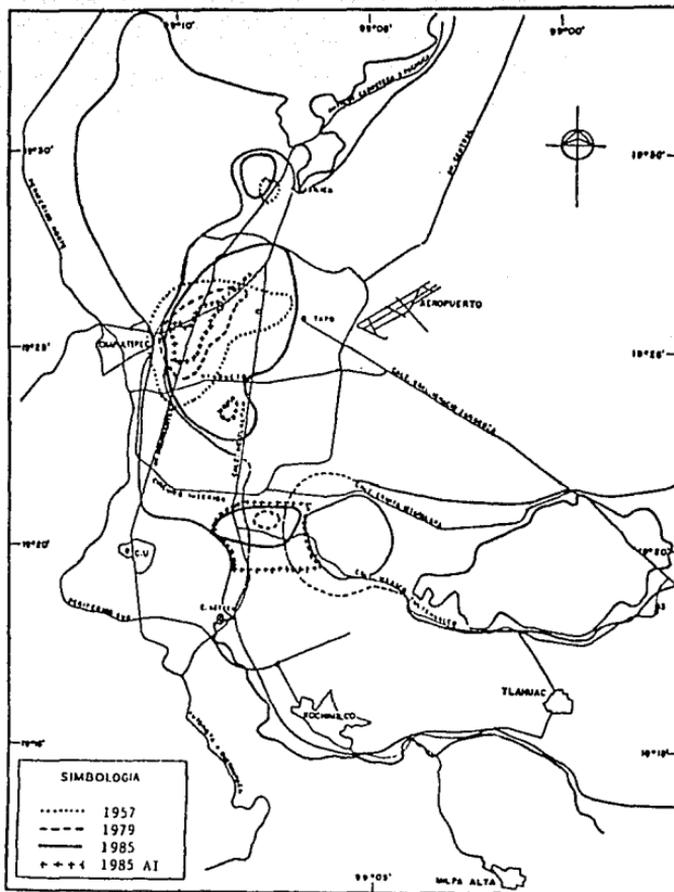
FIGURA V.5 MAPA DE INTENSIDADES DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1965 (Ref. 19).



Las zonas I y II, de baja intensidad, comprenden la región ocupada por la ciudad hasta principios del siglo XIX y su estratigrafía corresponde a un suelo bastante consolidado por los rellenos y sobrecargas de las construcciones, desde la época de los aztecas hasta la fecha. La zona III, de intensidad intermedia, cubre la mayor parte de la zona del lago y se extiende sobre la zona de transición del RDF76 por la colonia Lindavista, al norte, y por la colonia Escandón, hacia la parte media de la ciudad. Las zonas IV, V y VI, de mayor intensidad, se encuentran ubicadas entre el suelo firme del centro de la ciudad y el Cerro de Chapultepec, y entre el cerro de la Estrella y el pedregal de Coyacacán (CU), lo que sugiere la existencia de una fuerte interacción entre las zonas de suelo firme y baja intensidad sísmica, lo bastante cercanas entre sí como para que las ondas emitidas y reflejadas por ellas hacia el suelo blando intermedio se superpongan, dando lugar a amplificaciones en la intensidad de hasta 100% entre las zonas VI y III. Finalmente, alrededor del Centro SCOP de la SCT se encuentra también una pequeña porción de la zona V, rodeada por una extensión mayor de la zona IV, en una región en la cual se ubicaban antiguos islotes del lago que fueron asentamientos prehispánicos y coloniales; lo que nuevamente asocia esta zona de alta intensidad con la interacción lateral entre zonas de terreno firme.

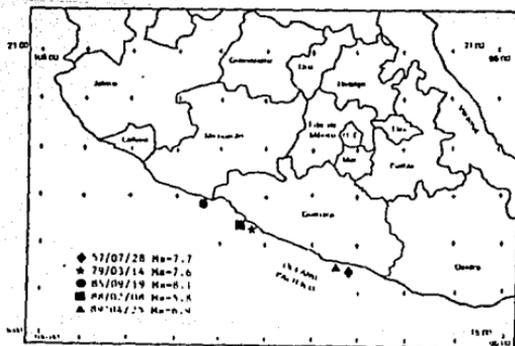
Es importante comparar la zona más dañada del sismo estudiado con las correspondientes a los dos sismos anteriores para los que se cuenta con un levantamiento de daños en la Ciudad: el del 26 de julio de 1957 y el del 14 de marzo de 1979. En la figura que a continuación se presenta la zona de mayor densidad de daños en este sismo se compara con aquellas donde se registraron en los dos sismos anteriores. En este último sismo, los daños fueron mucho más severos y la región dañada es más amplia, pero se nota coincidencia entre las zonas más afectadas en los tres casos, las que se ubican al poniente de la zona de terreno compresible.

FIGURA V.5. ZONAS DAMAÑAS POR LOS SIEMOS DE 1957, 1979  
Y 1985 (Ref. 19).



La comparación de las envolventes de los daños ocurridos en 57, 79 y 85 muestra que las zonas afectadas cercanas al centro de la ciudad tienden a ser concéntricas, envolviendo los sismos de mayor magnitud a los menores, con la zona de alta intensidad de 85 como un núcleo común a los tres, independientemente de la diferente ubicación de sus epicentros (ver figura siguiente); en particular el de 57 respecto de los otros dos. Esto parece indicar la existencia de una zona de alta sismicidad que coincide con la zona de alta intensidad de 85 y es independiente de la ubicación de los epicentros para sismos de subducción originados en la costa del Pacífico. Este fenómeno no se advierte con tanta claridad en el resto de la ciudad. Al norte, existe cierta coincidencia entre la zona de daños de 57 y 85, sin embargo, no se reportaron daños graves ahí en 79, lo que podría deberse a la menor magnitud de este sismo. Al sur, la envolvente de daños de 85 engloba a la de 79, en donde se ubica el único colapso producido por este sismo: la Universidad Iberoamericana, pero se advierte la ausencia de daños en 57, lo que pudo deberse al incipiente desarrollo urbano de la zona en aquel tiempo.

FIGURA V.7. LOCALIZACION DE LOS EPICENTROS DE LOS SISMOS DE 1957, 1979 Y 1985 (Ref. 19).



### V.5. TIPO DE FALLAS ESTRUCTURALES.

Hubo cierto tipo de fallas que se hicieron prevaletientes en los edificios colapsados o severamente dañados, por eso a continuación se presenta una estadística de estas fallas y la descripción de las principales de ellas.

TABLA V.3. CAUSAS DE FALLA (Ref. 16).

Características observadas	Porcentaje de casos
Pronunciada asimetría en rigidez	15 %
Edificio de esquina	42 %
Planta baja débil	8 %
Columnas cortas	3 %
Masa excesiva	9 %
Asentamiento diferencial previo	2 %
Comportamiento insatisfactorio de cimentación	13 %
Choques	15 %
Daño previo por sismo	5 %
Funconamiento en losas reticulares	4 %
Falla de piso superior	38 %
Falla de piso intermedio	40 %

#### - Falla frágil de columnas.

En la gran mayoría de fallas de edificios a base de marcos de concreto, el colapso fué originado por la falla de columnas por flexocompresión o por cortante o una combinación de ambas.

Se cree que el acero de las trabes principales y el de las losas planas no siempre alcanzó la fluencia y por lo tanto, no se pudo desarrollar el comportamiento dúctil que se requiere para que fueran válidos los factores de reducción que por este concepto permitía adoptar el reglamento entonces en vigor.

El modo de falla más común puede identificarse como la pérdida de capacidad de carga vertical del edificio debido al progresivo deterioro del concreto de las columnas por la repetición de un elevado número de ciclos de carga lateral que excedieron a su resistencia en flexocompresión o en cortante. Lo anterior fue propiciado en diversos casos por la escasez de refuerzo transversal y la excesiva separación entre refuerzo longitudinal de la columna, lo que origina el pandeo de las barras de refuerzo, y a un confinamiento muy escaso del concreto contenido en el núcleo de la columna. Otro factor que contribuyó a la pérdida de capacidad de la columna fue la excesiva concentración del acero longitudinal en paquetes de esquina.

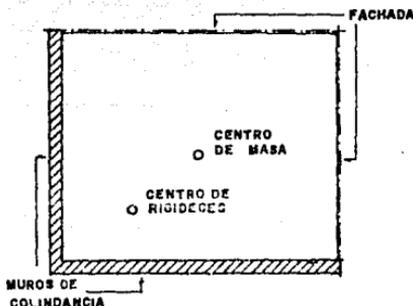
- Efectos de los muros divisorios de mampostería.

Gran parte de los edificios de varios pisos en la zona más afectada tenían una alta densidad de muros de mampostería. En muchos casos se suponía que estos servirían sólo como divisiones y no como estructurales, mientras que en otros casos estaban considerados para tener una función estructural, por lo cual estaban adecuadamente colocados y reforzados para que cumplieran dicho propósito. En la mayoría de los casos la presencia de muros de mampostería fue benéfica y tal vez evitó el colapso de un gran número de edificios. Esto ocurrió cuando dichos muros estaban colocados en forma regular y simétrica en todos los pisos, aún cuando estos muros sufrieron diversos grados de agrietamiento. En otros casos su presencia fue responsable de la falla estructural, sobre todo en tres situaciones:

- Distribución asimétrica.
- Planta baja débil.
- Asimetría causada por falla de los muros de relleno.
- Distribución asimétrica.

De los edificios que sufrieron daños graves, 42% eran edificios en esquina. En la mayoría de los casos tenían muros de mampostería en dos lados perpendiculares y fachadas muy abiertas en los dos lados restantes (figura V.8). Aún cuando se toma en cuenta la torsión para un análisis lineal, la fluencia asimétrica produce torsión en estos casos. La torsión que provocó esta situación incrementó en forma significativa las fuerzas que se ocasionaron en las columnas de los ejes de fachadas y que contribuyeron a provocar la falla. Algunos edificios que no estaban en esquina también fallaron por torsión, debido a la distribución asimétrica de los muros de relleno de mampostería.

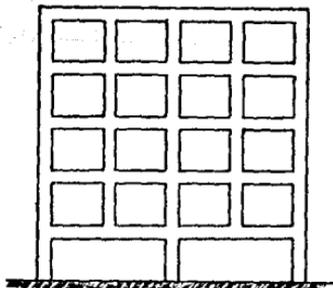
FIGURA V.8. EDIFICIO DE ESQUINA.



### Planta baja débil.

Se conoce así el caso en que en los pisos superiores existe una estructura con mucho mayor rigidez a cargas laterales que en el primer entrepiso. Esta situación se da en gran cantidad de edificios en que, en los pisos superiores tienen una profusión de muros de relleno de mampostería, en tanto que en la planta baja los marcos están casi descubiertos. Esto es típico en edificios de apartamentos con estacionamiento en planta baja, así como hoteles con comercios y servicios al nivel de la calle. En ellos, a no ser que estén diseñados en forma especial, la disipación de energía debida a comportamiento inelástico debe tener lugar casi exclusivamente en la planta baja, ya que existe un cambio de rigidez muy brusco entre un piso y los otros superiores, éstos absorben más fuerza y por lo tanto se generan mayores desplazamientos que en el inferior, lo que provoca demandas de ductilidad muy grandes en el "piso débil" que no pueden llegar a darse y el entrepiso falla. Esta fué una causa común de falla, a veces asociada con torsión.

FIGURA V.9. PLANTA BAJA DÉBIL.



- Asimetría causada por la destrucción de muros.

En varios casos los muros de relleno escasamente reforzados o anclados fallaron totalmente, ya sea en flexión perpendicular a su plano o por cortante; esto hizo que se perdiera la contribución a la resistencia a cargas laterales de muros que eran vitales para mantener la simetría, lo que incrementó notablemente las fuerzas sobre las columnas debido a torsión. La destrucción de muros divisorios o de colindancia fue muy notable, en general, por las grandes deformaciones laterales a las que se vieron sujetos los edificios.

- Daños ocasionados por temblores anteriores.

Algunos edificios dañados en sismos anteriores no habían sido reparados, o las reparaciones fueron inadecuadas; esto puede haber ocasionado algunas de las fallas. Es posible que durante sismos sucesivos las estructuras, principalmente las de concreto, sufran un deterioro progresivo aunque no haya daños aparentes, lo que también puede llevar eventualmente al colapso.

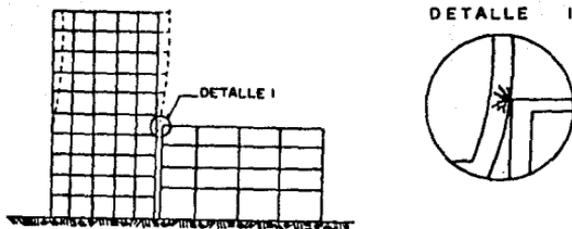
- Columnas cortas.

Se identifican con este término al caso en que las columnas de algunos ejes se encuentran restringidas a su deformación lateral por muros de mampostería o por pretilas de fachada. Esta situación las hace mucho más rígidas que las de los otros ejes, por lo que tienden a absorber una fracción mayor de las fuerzas laterales para lo cual no están generalmente diseñadas, esto precipitó fallas frágiles generalmente por cortante. También se consideran columnas cortas aquellas con relaciones de esbeltez demasiado bajas que provocan aumento del cortante y que no fueron diseñadas para resistir el aumento de esta sollicitación.

- Choques.

En más del 40% de los edificios derrumbados o seriamente dañados hubo choques con estructuras adyacentes. En algunos casos solo produjo daños locales menores, en otras ocasiones la falla de una o de las dos construcciones vecinas. Se supone que este hecho es responsable de un buen número de las fallas observadas en los pisos superiores. Es evidente que el requisito reglamentario de separación mínima entre edificios colindantes no se respetaba. La separación entre edificios colindantes era del orden de 10 cms., lo cual es claramente insuficiente.

FIGURA V.10. CHOQUES ENTRE EDIFICIOS.



- Falla en pisos superiores e intermedios.

Del número de derrumbes parciales o totales, casi el 40% comprende el colapso de uno o más pisos ubicados en el tercio superior de la estructura. Es también elevado el número de casos de daños graves en el tercio medio de la altura. Algunos de estos casos no se debieron a choques; pueden atribuirse a reducciones

bruscas de resistencia y rigidez de la estructura en los niveles afectados, debido a disminución de sección de columnas a su refuerzo transversal y longitudinal, o al número de marcos de relleno; a tralapes inadecuados del refuerzo vertical; a anchos de columnas tan pequeños que no permiten que las longitudes de desarrollo requeridas del acero longitudinal en las traves principales cambiara del esfuerzo de fluencia en tensión al de fluencia en compresión, o a un rápido incremento en aceleraciones horizontales debidas a oscilaciones de la base causadas por la interacción suelo-estructura.

- Cargas excesivas.

En buen número de los niveles fallados o con daños severos se encontró que las cargas verticales excedían sustancialmente a las de diseño. En ciertas ocasiones los revestimientos, rellenos y muros divisorios tenían un peso superior a las cargas muertas usualmente consideradas, pero lo más frecuente fueron cargas vivas excesivas, ya fuese por un cambio en el uso del inmueble o por la existencia de archivos muy pesados, particularmente en los pisos superiores.

El incremento de las masas, sobre todo en los pisos superiores, provocó fuerzas laterales mayores en las construcciones, lo que aunado a los efectos gravitacionales de estas sobrecargas, debe haber contribuido a los daños.

- Excesiva discrepancia en las relaciones largo/ancho y/o alto/ancho.

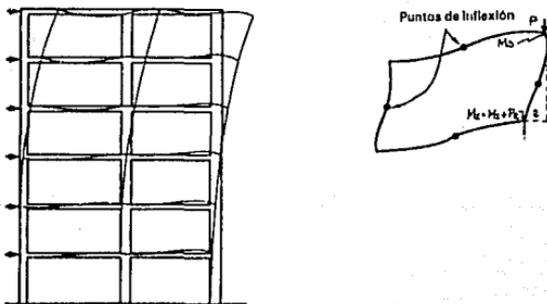
El exceso de dimensión a lo largo de alguno de los ejes principales de las edificaciones respecto a los demás, causó falla en edificios multifamiliares construidos hace más de 20 años, y en los cuales la incidencia de las ondas sísmicas afectó

de manera diferente a distintos marcos resistentes de las estructuras, produciendo fenómenos de alabeo y volcamiento en edificios largos y/o esbeltos.

- Efectos  $P - \Delta$ .

Algunas fallas, sobre todo de construcciones esbeltas, sugieren desplazamientos laterales muy grandes, que ocasionaron aumentos significativos en los momentos flexionantes en la parte inferior del edificio, producidos por las descargas verticales desplazadas lateralmente, es decir, el llamado "Efecto  $P - \Delta$ " ( $P - \Delta$ ) puede haber influido decisivamente en algunos casos. Este efecto parece haber sido un factor significativo en los daños y aún en el colapso de varias estructuras.

FIGURA V.11. ILUSTRACION DEL EFECTO  $P - \Delta$ .



- Asentamientos diferenciales.

No hay duda sobre los efectos desfavorables de estos hundimientos, ya que se presentan antes o durante el temblor. Los hundimientos por el sismo, algunos espectaculares, pueden atribuirse a la disminución de la resistencia de los suelos al

corte, ocasionada por muchos ciclos de carga alternada; las cimentaciones sobre pilotes de fricción fueron particularmente susceptibles a este fenómeno.

- Daños a elementos secundarios.

Estos daños ocurrieron en una elevada incidencia en escaleras, que fueron causa de muchas pérdidas de vidas. En grado menor debe señalarse el elevado número de fallas de apéndices en las azoteas como tanques y casetas de elevadores.

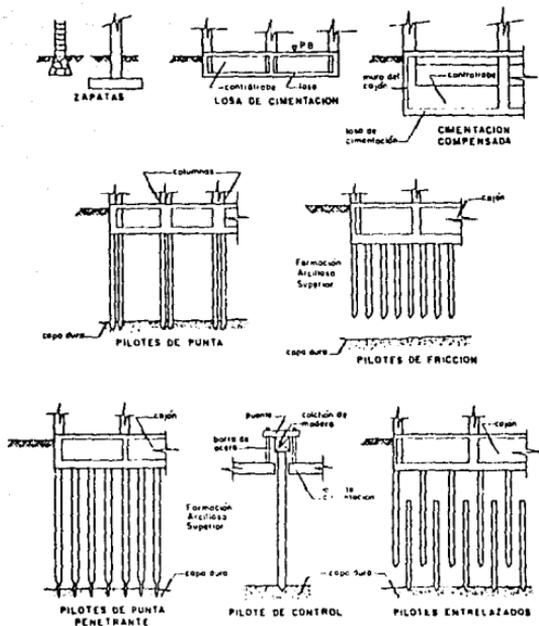
Se han descrito las fallas estructurales más características y numerosas, sin embargo, al evaluarlas ha de recordarse que las razones principales del gran número de edificios colapsados o con daños importantes fueron la excepcional intensidad y la larga duración del sismo en zonas de la ciudad en los que los movimientos del terreno fueron amplificados de manera extraordinaria por las características de vibración de los estratos de terreno blando que componen los antiguos lagos, los que resultaron particularmente sensibles a los períodos dominantes del movimiento transmitido por el terreno blando subyacente y al fenómeno de interacción entre estratos consolidados en los cuales se encuentren suelos débiles.

Los efectos del sismo dejan como interrogante principal las reservas desconocidas de resistencia estructural, que fueron responsables del hecho de que la mayoría de las estructuras no hayan fallado a pesar de la intensidad que presentaron los movimientos del terreno.

### V.6. COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES.

Prácticamente todos los tipos de cimentación usuales son vulnerables a los sismos y deben diseñarse tomando en cuenta explícitamente las cargas que estos les puedan transmitir.

FIGURA V.12. TIPOS DE CIMENTACION EMPLEADOS EN LA ZONA LACRUSTRE DE LA CIUDAD DE MEXICO (Ref. 20).



Las cimentaciones superficiales de construcciones ligeras sobre zapatas aisladas o corridas tuvieron en general un buen comportamiento durante el sismo. Solamente se presentaron asentamientos en cimientos superficiales con construcción pobre o apoyados en rellenos sueltos mal compactados, fueron numerosos los casos de asentamientos diferenciales inducidos en cimentaciones superficiales por construcciones pesadas vecinas. En general, estos asentamientos ya se habían presentado en condiciones estáticas y se acentuaron notablemente durante el sismo.

Las cimentaciones sobre losas continuas presentaron en algunos casos asentamientos totales y diferenciales muy significativos que condujeron a desplomes importantes de las construcciones.

En las cimentaciones compensadas los casos de mal comportamiento se deben en general a circunstancias previas al sismo análogas a las de las cimentaciones superficiales. La estanquidad deficiente de los cajones de cimentación tuvo también consecuencias desfavorables. En efecto, el peso del agua que inunda parte o la totalidad de la estructura se suma al peso de la construcción y reduce la compensación en forma significativa.

El comportamiento de las cimentaciones sobre pilotes de punta apoyados en la primera o segunda capa resistente fue aparentemente adecuado en la mayor parte de los casos. Aunque en algunos casos se presentaron desplomes importantes de edificios sobre pilotes de punta que hacen posible la hipótesis de que, en algunos casos, los pilotes hayan llegado a penetrar en la capa resistente de apoyo, o bien que estos se hayan pandeado o colapsado.

Para cimentaciones sobre pilotes de fricción se pueden observar dos tipos de comportamiento inadecuado:

\* Hundimiento brusco durante el sismo de construcciones pesadas, generalmente de grandes dimensiones en planta para las cuales es posible verificar que la presión de contacto losa-suelo era importante, aun suponiendo que los pilotes trabajaban a su capacidad máxima de carga. La interpretación en este caso es la misma que para cimentaciones insuficientemente compensadas.

\* Desplomes permanentes y en casos colapso total por volcamiento de estructuras esbeltas con insuficiente número de pilotes.

En las cimentaciones especiales también se observaron casos de mal comportamiento.

El sistema de pilotes controlados presentó con frecuencia deformaciones grandes y, en un número reducido de casos, la falla estructural o el volcamiento de dicho mecanismo. Lo anterior puede atribuirse a múltiples factores entre los cuales destacan la falta de mantenimiento.

También se encuentran casos de mal comportamiento de cimentaciones con pilotes entrelazados o con pilotes penetrantes, atribuibles a factores semejantes a los mencionados para pilotes de fricción y de punta.

Las estructuras esbeltas sobre pilotes de fricción pueden presentar desplomes o falla, aun si su diseño estático es aceptable, debido a la reducción considerable de su capacidad de carga ante las excentricidades de carga generadas por el sismo.

## V.7. DAÑOS EN OTROS TIPOS DE CONSTRUCCIONES.

En cuanto a otras construcciones, aparte de los edificios, casi no hubo daños. Los túneles y estaciones subterráneas del metro sufrieron daños insignificantes y de fácil reparación, de igual manera para los pases a desnivel de la ciudad; La mayor parte del sistema de drenaje permaneció intacto, lo que no sucedió con la red de agua potable, las tuberías principales se rompieron en varias docenas de secciones, y hubo más de 7.000 fracturas en la red secundaria. Esta diferencia en el comportamiento de los sistemas de drenaje y de suministro de agua potable debe atribuirse a que las juntas de las tuberías tienen distinta deformabilidad y a que las tuberías de agua están colocadas más cerca de la superficie. Las pocas tuberías de gas preparadas existentes no sufrieron daños importantes. Todas las calles eran transitables después del sismo, excepto en los lugares en que estaban obstruidas por edificios colapsados; sin embargo en varios lugares, en las zonas en que el movimiento del suelo fué más intenso, aparecieron grietas y deformaciones permanentes que sugieren ondas superficiales. Hubo varios casos de rieles de tranvía levantados y retorcidos. Las torres de transmisión de energía no sufrieron daño alguno. Una antena aislada de televisión se derrumbó (estaba en lo alto de un edificio). Es difícil saber si el derrumbe fue ocasionado por la falla del edificio o de la antena) y otra sufrió daños apreciables. Se cayó un pequeño número de postes de electricidad (50 de 350.000 en las líneas primarias de alimentación). El daño a subestaciones eléctricas fue moderado (112 transformadores de 26.000); una pequeña parte de la ciudad se quedó sin energía eléctrica después del sismo; la mayor parte de este servicio se reanudó dentro de las 48 horas siguientes, y el resto en unos cuantos días. El servicio telefónico sufrió graves daños sobre todo al derrumbarse los bastidores de equipo y al tenerse colapso parcial de los edificios principales de la compañía telefónica. Las comunicaciones de larga distancia y muchas de las comunicaciones locales quedaron interrumpidas durante mes y medio

aproximadamente. La restitución de la normalidad tomó más tiempo. Se produjeron algunos incendios debidos a fugas de gas en edificios derrumbados, los cuales fueron apagados de inmediato, a excepción de uno, que causó una explosión.

## CAPITULO V I

### ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DEL D.F. ANTERIOR AL SISMO Y EL NUEVO REGLAMENTO.

*"Los sismos de 1985 en la Ciudad de México hicieron ver que el Reglamento para las Construcciones en el Distrito Federal, entonces en vigor, subestima de manera importante la intensidad sísmica que para ese tipo de movimiento del suelo cabe esperar en el Centro de la Ciudad; en teoría, todas las construcciones bien diseñadas de acuerdo con el Reglamento podrían haberse desplomado".*

JOSÉ LUIS SÁNCHEZ MARTÍNEZ.

#### VI.1. CAUSAS QUE PROVOCAN CAMBIOS EN LOS REGLAMENTOS.

Los avances de la ingeniería sísmica se dan a saltos, definidos por la ocurrencia de un gran sismo, generalmente de consecuencias graves, que pone de manifiesto diferencias, a veces importantes, entre el comportamiento real de las estructuras y aquel que teóricamente se preveía; así ha ocurrido en México, donde en 1957 y en 1985 después de fuertes macrosismos, ha sido necesario promulgar nuevos reglamentos para la construcción de edificios, que pretenden reflejar nuevas experiencias adquiridas y establecer disposiciones que eviten, en el futuro, los daños más graves observados.

La historia de la ingeniería sísmica y la evolución de los reglamentos que rigen el diseño de los edificios de nuestra ciudad muestran, sin lugar a dudas, la preocupación constante de los ingenieros civiles para construir edificios que sean seguros y, al mismo tiempo, económicamente factibles. Sin embargo, también muestra la imposibilidad de resolver el problema promulgando nuevas Normas de Emergencia cada vez que haya un terremoto de características diferentes a los anteriores y modificando después el reglamento, aumentando los coeficientes sísmicos y exigiendo métodos de análisis y diseño más complicados y, al menos en apariencia, más refinados. Si bien es cierto que el reglamento de 1976 es mejor que el de 1943, y el de 1987 superior al de 1976, también lo es que nada nos asegura que el próximo sismo intenso no tendrá características diferentes de las que han tenido los anteriores, que quizás hagan más vulnerables a edificios que han sufrido poco hasta ahora.

En la tabla VI.1 se muestran los valores que han tenido los coeficientes sísmicos especificados en los Reglamentos de Construcción para el D.F. para los tipos de estructuras más comunes, desde 1943 hasta nuestros días.

TABLA VI.1 COEFICIENTES SÍSMICOS EN LOS REGLAMENTOS DEL D.F. (Ref. 21)

AÑO	GRUPO	ESTRUCTURA RACION	COEFICIENTE SÍSMICO			CASO	Q	COEFICIENTE SÍSMICO/Q			GRUPO A
			ZONA I	ZONA II	ZONA III			ZONA I	ZONA II	ZONA III	
1942	III A VI	-----	0.025								I.- x 4.0 II.- x 2.0
1957*	B	TIPO 1	0.05	0.05	0.07						x 2.0
1966	B	TIPO 1	0.04	-----	0.06						x 1.2
1976	B	TIPO 1	0.16	0.20	0.24	2	4.0	0.04	0.05	0.06	x 1.2
1985*	B	TIPO 1	0.16	0.27	0.40	I	4.0	0.04	0.05	0.10	x 1.5
1987	B		0.16	0.32	0.40	I	4.0	0.04	0.08	0.10	x 1.5

Los mismos reglamentos pueden tener un efecto que en ocasiones es negativo. Por ejemplo, todos los ingenieros estructurales sabían que el código de 1942 era inadecuado, y trataban de mejorarlo, cuando menos al diseñar edificios de importancia; esta tendencia desaparece ahora, pues el reglamento parece cubrir adecuadamente todas las posibilidades, y la mayoría de los estructuristas tiende a aplicarlo ciegamente.

El concepto básico del diseño sísmico de estructuras está basado en que resistan de manera satisfactoria sismos de intensidad moderada y que presenten daños de moderados a severos, durante un movimiento de gran intensidad; a esta responsabilidad debe responder un Reglamento de Construcciones.

El Reglamento de diseño y construcciones es un reflejo de las estimaciones de la sismicidad local y el grado de daño que puede tolerarse. Los reglamentos son de carácter general, pues no es posible especificar todas las características de una estructura en particular; se tienen normas que deben seguir los diseñadores y constructores para garantizar que las edificaciones resistan satisfactoriamente sismos que probablemente ocurran durante su vida útil.

En la actualidad se tienen más conocimientos para estimar el riesgo sísmico en la Ciudad. Se conoce mejor el suelo del valle de México, se tiene más información de las intensidades de las ondas sísmicas que pueden llegar, de tal manera que esto se refleja en las nuevas especificaciones que existen para la creación de estructuras asentadas en el Valle de México.

El Reglamento de Construcciones para nuestra Ciudad debe requerir que las estructuras se diseñen con coeficientes sísmicos razonablemente altos, y que se utilicen métodos de análisis y diseño que estén de acuerdo con la importancia de las construcciones. Pero no son esos los únicos aspectos que ha de

cubrir, ni siquiera los más importantes: debe prestar atención especial a todo aquello que hace que los edificios tengan esa resistencia adicional que les permite resistir temblores de tierra más intensos que el de diseño sin fallar y, en la mayoría de los casos, sin sufrir daños importantes. Muchos de esos aspectos reciben poca atención en nuestros códigos de construcción. Entre estos aspectos están, los relativos al diseño arquitectónico, tratar de que la estructuración sea igual en elevación y en planta, sin elementos que produzcan torsiones excesivas y sin discontinuidades bruscas en rigideces o resistencias.

Por lo tanto los reglamentos deben dirigirse, al tratar la seguridad estructural, a todos los especialistas que participan en el proceso de diseño y construcción, y no sólo a los ingenieros estructurales, que son considerados responsables del proyecto sin tener en cuenta que en la mayoría de las veces tienen que trabajar dentro de un marco que ha sido definido por investigadores universitarios, arquitectos y otros especialistas. La responsabilidad debe ser compartida entre quienes escriben los reglamentos, las autoridades de la ciudad que los aprueban y les dan carácter legal, los propietarios, arquitectos, ingenieros especialistas en mecánica de suelos y cimentaciones, ingenieros estructurales y constructores, puesto que todos contribuyen a las características finales de cualquier edificio terminado y a su comportamiento a lo largo del tiempo (Ref. 18).

En las casi tres décadas entre julio de 1957 y septiembre de 1985 la ciudad sufrió buen número de sismos relativamente intensos; con pocas excepciones, los daños estructurales fueron reducidos, y hubo un número muy pequeño de colapsos, en algunos casos se presentaron daños no estructurales extensos, sin pérdida de vidas pero con pérdidas económicas de alguna importancia. Todo parecía indicar que el código para diseño sísmico era sano; cumplía la condición de que los temblores frecuentes, poco

intensos, no producen daños, los de intensidad media ocasionen daños no estructurales y estructurales localizados y fáciles de reparar, y los muy intensos, poco frecuentes produzcan en algunas ocasiones daños no estructurales y estructurales importantes que obliguen a efectuar reparaciones costosas e incluso a demoler la construcción y sustituirla por otra, pero sin pérdida de vidas. Después del 19 de septiembre de 1985, se apreció que el Reglamento en vigor debía cambiar, pues ya no cumplía con la filosofía anterior.

El sismo del 19 de septiembre de 1985 demostró que la resistencia real de las estructuras bien concebidas, diseñadas y construidas, que no se han deteriorado a lo largo del tiempo o han sido reparadas adecuadamente, es mucho mayor que la resistencia que se buscó al diseñarlas. Pero también demostró que esa resistencia extra, sin la cual los daños hubiesen sido mucho mayores de lo que fueron, puede perderse con facilidad por torsiones excesivas, cambios bruscos de rigidez de un piso a otro, fallas por cortante o por pandeo, detalles o conexiones diseñados o construidos de manera inadecuada. Todo esto es especialmente cierto para temblores de larga duración que exigen niveles elevados de ductilidad y de capacidad de absorción de energía sin daños apreciables.

Los sismos de 1985 hicieron notable la necesidad de contar con disposiciones de diseño estructural y especificaciones para el control de calidad de las estructuras. También se notaron las limitaciones de los métodos normales de análisis para prever la respuesta de las estructuras sujetas a fuerzas externas y también se hizo patente el desconocimiento que aun tenemos sobre las singulares características de los suelos de la ciudad.

El sismo sacó a la luz temas en que se debe investigar más, como al comportamiento de los elementos estructurales bajo gran número de ciclos de carga de alta amplitud, también se tiene que revisar la capacidad de los medios normales de análisis para predecir la respuesta de estructuras complejas ante fuertes temblores, que deforman y varían su rigidez y resistencia. Las experiencias del sismo de septiembre de 1985 han mostrado que para evitar el deterioro de la capacidad ante el gran número de repeticiones de ciclos de deformación se requieren requisitos de diseño y de refuerzos mucho más estrictos que los que estaban en vigor antes del sismo.

## VI.2. REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DE 1976, NORMAS DE EMERGENCIA Y REGLAMENTO DE CONSTRUCCION DE 1987.

### VI.2.1. REGLAMENTO DE 1976.

El reglamento de 1976 es el primero y único, en las últimas décadas, que proviene del deseo de únicamente actualizar las normas de diseño, y que no ha sido forzado por un temblor de características insospechadas que, al ocasionar daños estructurales mucho mayores que los previstos, hayan obligado a revisar los criterios de diseño. Este reglamento presentó diferencias importantes en su filosofía con respecto a los reglamentos anteriores, pues siguiendo la tendencia mundial deja a un lado los métodos tradicionales de diseño estructural, basados en esfuerzos permisibles y adopta un formato de estados límite y factores de carga y resistencia.

El reglamento de 1976 fue reconocido como de vanguardia en la época de su publicación, con avances notables a nivel mundial; sin embargo, los cambios en la tecnología y los resultados de investigaciones llevadas a cabo en México y en el extranjero hicieron necesaria su revisión, la cual se había iniciado hacia fines de 1984, con objeto de recuperar el nivel tecnológico

adecuado, reconociendo que un reglamento debe ser un documento dinámico y adaptable a la realidad. El sismo de 1985 y su réplica del día siguiente aceleraron ese proceso, obligando a emitir unas modificaciones de emergencia que debían emplearse en los proyectos de reparación de todas aquellas construcciones dañadas por estos sismos, así como en construcciones nuevas ubicadas en las zonas de terreno blando y de transición, llevándose de nuevo a una secuencia de unas Normas de Emergencia y luego una revisión del reglamento.

#### VI.2.2. NORMAS DE EMERGENCIA.

Cinco semanas después del sismo se implementaron las Normas de Emergencia en las cuales se establecía: reparar las edificaciones que sufrieron daños estructurales fuertes de tal forma que cumplan los nuevos requerimientos.

Si bien los sismos de septiembre de 1985 no causaron daños importantes a las construcciones ubicadas en las zonas I y II, no puede asegurarse que los tamblores futuros tengan las mismas características. Los efectos del sismo del 19 de septiembre en muchas construcciones de la zona III pusieron de manifiesto que las disposiciones del Reglamento eran insuficientes en ciertos renglones, como los referentes a los coeficientes sísmicos en las zonas de terreno blando, a los requisitos para suponer un factor de ductilidad de 4 o superior y en lo tocante a modos de falla frágil. Por ello y mientras se profundizaba en tales cuestiones, se adoptaron criterios más severos en estos aspectos.

Entre las modificaciones más importantes se encontraban el incremento de los coeficientes sísmicos, a 0.40g (antes 0.24) en la zona blanda (zona III) y a 0.27g (antes 0.20) en la zona de transición (zona II), conservándose los valores de la zona firme (zona I) sin cambio (0.16g). Asimismo las aceleraciones del

terreno se cambiaron a 0.10g (antes 0.06) y a 0.054g (antes 0.045) en la zona III y II respectivamente.

Estos coeficientes no alcanzan las máximas ordenadas de los espectros de aceleración que corresponden a una extensa porción en la zona III pues se reconoce que las estructuras disponen de reservas que un análisis convencional no tiene en cuenta, aunque ésta no se sabe de cuanto puede ser, por lo tanto es dudoso este criterio adoptado por el Reglamento. Al especificar que se elevan todas las ordenes espectrales se prevee la ocurrencia de temblores con periodos dominantes que diferencien de los que se manifestaron en esta ocasión. A ello obedece también el incremento, más moderado, en los coeficientes para construcciones ubicadas en la zona II no obstante que en ellas los daños fueron pequeños.

Los incrementos que se fijan en los coeficientes sísmicos para cuando se acude al método simplificado de análisis son proporcionales a los que se adoptaron para  $c$  y  $a_m$ .

Los coeficientes sísmicos para construcciones del grupo A deben tomarse ahora iguales a 1.5 veces los correspondientes al grupo B. Antes este factor era 1.3. Su incremento obedece a la evidencia de la extrema gravedad de la falla de estas construcciones que conduce a tratar de disminuir sustancialmente su probabilidad de falla.

En buen número de los edificios de oficinas que sufrieron colapso o daños graves se encontró que las cargas vivas excedían con mucho a las que marcaba el Reglamento, ya que en estos casos se había abusado de la capacidad estructural cargando los pisos con cantidades exageradas de papel, particularmente en archiveros. En varios casos ello obedecía a que los pisos destinados a oficinas se habían convertido en bodegas de telas o de otros materiales o bien en talleres, aunque este cambio de uso

estaba prohibido. Tal vez lo ideal fuera exigir la colocación de placas que fijan las cargas vivas máximas admisibles en cada piso. Ante la falta de experiencia con esta práctica y la duda de que se cumplirán los límites fijados se prefirió aumentar sensiblemente las cargas vivas de diseño en edificios destinados a oficinas. Las cargas que ahora se establecen, parecen razonables, pero no consta que sean suficientemente conservadoras. Considerando que la práctica de almacenar grandes cantidades de papel es particularmente común en oficinas de gobierno, es recomendable fijar un mínimo de  $250 \text{ kg/m}^2$  para la carga viva máxima,  $W_m$ , en estos casos y adoptar una carga instantánea de  $180 \text{ kg/m}^2$ . Será necesario que cuando se vaya a destinar a oficinas de gobierno un edificio existente, se revise su diseño con las cargas antes mencionadas. El tema era poco estudiado y se procedió a realizar un levantamiento de cargas en un número extenso de inmuebles para concluir que valores debían adoptarse en el nuevo Reglamento.

La altura máxima para edificios en que es válido el método estático simplificado se redujo de 13 m. a 8.5 m., cambiándose los valores sísmicos reducidos para este caso, esto es debido a que los coeficientes ahora empleados aumentaban la importancia de los momentos de volteo, los que en este método no se tienen en cuenta, y a la vulnerabilidad sísmica manifiesta de las construcciones de altura media.

Se eliminó el factor de reducción por ductilidad de  $\phi$  y para el valor de 4 se aumentaron los requisitos, exigiéndose ahora que los marcos sean capaces de absorber cuando menos el 50% de la fuerza cortante que les tocaba si estuvieran solos cuando el sistema estructural incluye muros o contraenteos; además se incluyeron restricciones adicionales para estructuras de acero y de concreto.

Se agregó un nuevo valor de reducción por ductilidad de 3, aplicable a estructuras de marcos con sistemas de piso de losa plana o con vigas de acero de alma abierta (armaduras), siempre y cuando se cumplan varios requisitos, como por ejemplo la consideración de una viga equivalente con ancho menor al especificado anteriormente para el caso de losas planas.

Abundaron las fallas por torsión, especialmente en edificios de esquina y en otros en que la excentricidad torsional, calculada estáticamente, era elevada en relación con la dimensión en la dirección en que se mide aquella. De ahí la limitación de que el máximo valor de excentricidad calculada en cualquier nivel no debe exceder del 20% de la mayor dimensión de la planta medida perpendicularmente a la dirección de análisis. El reglamento del 76 no tenía esta limitación.

#### VI.2.3. REGLAMENTO DE 1987.

Para hacer el nuevo reglamento, se tomó en cuenta las premisas de lo que se ha aprendido del comportamiento de las estructuras. Revisándose a través de la investigación las disposiciones de las normas de emergencia de 1985.

Estas investigaciones fueron estudios de campo de la naturaleza y grado de los daños, comportamiento observado y grado de los daños, comportamiento observado de cada edificio, comparándolo con su respuesta pronosticada, pruebas de laboratorio de miembros estructurales y muestras de suelo, sujetos a cargas de gran magnitud; simulación por computadora de la respuesta de estructuras a movimientos sísmicos en suelos blandos; revisión de los modelos de peligro sísmico; exploraciones de campo para conocer las condiciones geológicas del Valle de México y desarrollo de modelos para pronosticar la influencia en tales condiciones.

El 3 de julio de 1987 fue publicado en el Diario Oficial una nueva versión del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. En el título relativo a seguridad estructural (ahora VI en vez de IV), se incorporaron algunas de las medidas tomadas a raíz del sismo en las normas de emergencia, otras se cambiaron y otras son nuevas. Entre los aspectos más sobresalientes de esta versión están los siguientes:

La clasificación de estructuras por su destino se redujo a dos tipos eliminando el C anterior, aunque el grupo B se subdividió en B1 y B2, según altura y superficie cubierta y zona donde se construya. La zonificación del Distrito Federal con respecto a tipo de suelo se revisó y redefinió. En algunas partes de las zonas II y III, de terreno de transición y blando se introdujeron requisitos más severos. Considerando también ciertas zonas como de alta intensidad sísmica. Esta nueva zonificación sísmica fue adoptada por el RDF87 (ver figura siguiente), pero manteniendo el coeficiente sísmico de las Normas de Emergencia para la zona del lago, es decir, incluso en las zonas de alta sísmicidad, considerándolo suficiente para lograr un nivel aceptable de seguridad cuando se usa en combinación con los requisitos de diseño especificados en el mismo reglamento, principalmente con los factores de resistencia para columnas que fueran muy castigados. De esta manera, las zonas de alta sísmicidad solamente se utilizan para prohibir en ellas la reducción que permiten las Normas Técnicas Complementarias de Sismo cuando se considera el análisis de interacción suelo-estructura y para extender el coeficiente sísmico de la zona del lago a una porción de la zona de transición ubicada al sur de la ciudad.



Con respecto a los proyectos arquitectónicos se estableció la necesidad de contar, de preferencia, con una estructuración regular para reducir los efectos sísmicos. Se dan también normas sobre acabados y elementos no estructurales que pueden afectar el comportamiento sísmico de la construcción.

Se mantiene la modificación en cargas vivas para oficinas estipuladas en las normas de emergencia, diferenciándolas de las cargas vivas para habitación. En ambos casos ya no se hace variar la carga viva en función del área cargada del elemento estructural en estudio, aunque se permiten reducciones si dicha área es mayor que  $25m^2$ .

La mayor parte de los requisitos de diseño sísmico se pasaron a unas normas técnicas complementarias para diseño por sismo, pero permanecen en el reglamento algunos lineamientos generales sobre métodos de análisis, combinación de acciones y coeficientes sísmicos.

Se dan reglas claras para el tratamiento de muros divisorios, incorporándolos a la estructura desde el proyecto o desligándolos de ella para que no obstruyan sus deformaciones cuando no contribuyan a la resistencia y rigidez, sujetándolos adecuadamente y de preferencia haciéndolos a base de materiales débiles o muy flexibles en este caso.

Los coeficientes sísmicos de las normas de emergencia para la zona de transición se aumentaron, subiendo a 0.32g en vez de 0.27g. Los de zona firme y blanda quedaron en 0.16g. y 0.40g. respectivamente. Para estructuras del grupo A, el factor de incremento a los coeficientes es de 1.5 en vez de 1.3 del reglamento de 1976; esto se había cambiado desde las Normas de Emergencia de 1985.

Con base en la evaluación cuantitativa de los daños producidos por el sismo de 1985 en la Ciudad de México se propuso una zonificación sísmica de la misma que define dos nuevas zonas de alta intensidad independiente de la zonificación geotécnica.

El choque entre construcciones de diferentes características fue frecuente en los sismos de 1985, muchas construcciones se vieron dañadas únicamente por este hecho. El nuevo Reglamento reconoce estos hechos exigiendo separaciones entre edificios sustancialmente mayores a los que el Reglamento anterior requería; es necesario reconocer esta situación problemática siendo generoso con las separaciones entre construcciones y reconociendo, cuando existan, la presencia de paramentos de construcciones ya edificadas, con respecto a las cuales se deberá tener como mínimo una separación del doble de la que establezca el Reglamento al lindero.

Los desplazamientos laterales de entrepiso máximos admisibles, producidos por fuerzas sísmicas, disminuyen de 0.008 veces la diferencia de elevaciones correspondiente a 0.006 veces esa diferencia, y pueden duplicarse esos valores, lo mismo que en el Reglamento de 1976, en edificaciones en las que los elementos incapaces de soportar deformaciones apreciables, como los muros de mampostería, se separan de la estructura principal de manera que no sufran daños por las deformaciones de ésta.

La separación entre cuerpos de un mismo edificio o entre edificios adyacentes debe ser igual a la suma de sus desplazamientos horizontales calculados (sin reducir las fuerzas sísmicas) incrementados en 0.001, 0.003 o 0.006 de la altura del nivel de que se trate, sobre el terreno, en las zonas I, II o III respectivamente.

Un aspecto importante en el proyecto de construcción de los edificios del Grupo A y del Subgrupo B1 es la necesidad de contar, además del Director de la Obra, con un corresponsable de la seguridad estructural, quien deberá revisar que se hayan hecho los estudios necesarios para el proyecto de estructura y cimentación, y revisará dichos proyectos, los materiales que se emplearán; asimismo vigilará que la construcción se haga de acuerdo con esos proyectos y que la construcción de las instalaciones no afecte a los elementos estructurales. Todas las construcciones existentes del Grupo A deberán ser revisadas por un corresponsable en seguridad estructural y en su caso adecuarse para que cumplan con las disposiciones del nuevo reglamento. Así mismo, estas construcciones deberán revisarse cada cinco años o después de un sismo intenso para hacer constar que se encuentran en condiciones de seguridad adecuadas, de acuerdo al mismo reglamento.

Los factores de reducción por ductilidad cambiaron su nombre a factores de comportamiento sísmico; se mantuvieron las restricciones de las normas de emergencia en este aspecto. Asimismo se mantuvo la obligación de denunciar los daños que tenga una estructura por efecto de sismo, viento, explosión, sobrecargas, hundimientos diferenciales u otro concepto, debiéndose elaborar un dictamen técnico en función del cual la estructura podrá dejarse como está o deberá ser reparada, en cuyo caso debe cumplir con este reglamento.

En las normas de emergencia de octubre de 1985, en el Reglamento de julio de 1997 se aumentan de nuevo los coeficientes sísmicos y se corrigen algunos defectos evidentes en los factores de ductilidad, que ahora son llamados "factores de comportamiento sísmico", para enfatizar que la ductilidad no es la única propiedad que interviene en ellos.

El cambio más notorio en los criterios de diseño sísmico proviene de la introducción del concepto de factor de ductilidad, que permite reducir las solicitaciones sísmicas de diseño en función de la ductilidad del sistema estructural que habrá de resistirlas. Este concepto, implícito en los coeficientes de diseño de reglamentos anteriores, proviene tanto de la observación del comportamiento de construcciones reales durante temblores de tierra intensos como de estudios analíticos: las estructuras dúctiles, hiperestáticas y de resistencia bien distribuida pueden absorber sin colapso, aunque con deformaciones inelásticas importantes y aún con fallas localizadas, una cantidad de energía mucho mayor que la que ocasionaría el colapso de estructuras frágiles.

Todos los reglamentos de construcción modernos reconocen que sería excesivamente conservador diseñar para que las estructuras resistieran dentro del intervalo de comportamiento sensiblemente lineal, pues aprovechando su ductilidad se logran reducciones sustanciales sin que ocurran daños importantes. Es más, las estructuras ordinarias tienen grandes reservas por encima de sus capacidades calculadas en forma convencional, reservas que la ductilidad no explica más que parcialmente.

Los requisitos para considerar los distintos valores del factor de comportamiento sísmico,  $Q$  (antes factor de reducción por ductilidad) se revisaron y adecuaron, quedando los valores de 4, 3, 2, 1.5 y 1 de las normas de emergencia, pero aclarándose que para una dirección de análisis dada, se usará, para toda la estructura, el mínimo valor de  $Q$  que corresponda a los diversos entresijos de la estructura. Esto es especialmente importante en aquellos casos en que hay cambios en el sistema estructural en los distintos entresijos.

Como ya se mencionó, también se establecen una serie de condiciones de regularidad deseable en las estructuras. En caso de que no se tengan esas condiciones se usará el 80% del valor del factor de comportamiento sísmico para calcular las reducciones admisibles. El Reglamento de 1976 no llama la atención sobre la importancia de la configuración en la respuesta de la estructura.

En las nuevas normas técnicas complementarias para diseño por sismo se establecen los métodos de análisis, estáticos o dinámicos, los espectros para diseño sísmico, los factores reductivos aplicables en función de la ductilidad que puede desarrollar la estructura o por la adición de dispositivos capaces de disipar energía (una nueva técnica muy promisoría para reducir los efectos sísmicos). El método estático simplificado de análisis es válido para estructuras de hasta 10 m. de altura si se cumplen los demás requisitos para aplicarlo.

Con respecto a las normas de emergencia se modificó, como ya se indicó, el coeficiente sísmico de la zona de transición; también se modificó la forma de los espectros de diseño, variando los periodos que definen la zona de ordenadas constantes, que ahora son de 0.2, 0.3 y 0.6 seg. el primero y de 0.6, 1.5 y 3.9 seg. el segundo, respectivamente para las zonas I, II y III. La aceleración para periodos nulos se considera igual a la cuarta parte de la ordenada máxima. Quedando los espectros de diseño como se muestra en las siguientes figuras.

FIGURA VI.2. COMPARACION ENTRE ESPECTROS DE DISEÑO DE REGLAMENTOS DE 1976 Y 1987 CON ESPECTRO DE RESPUESTA PARA EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 EN TERRENO FIRME.

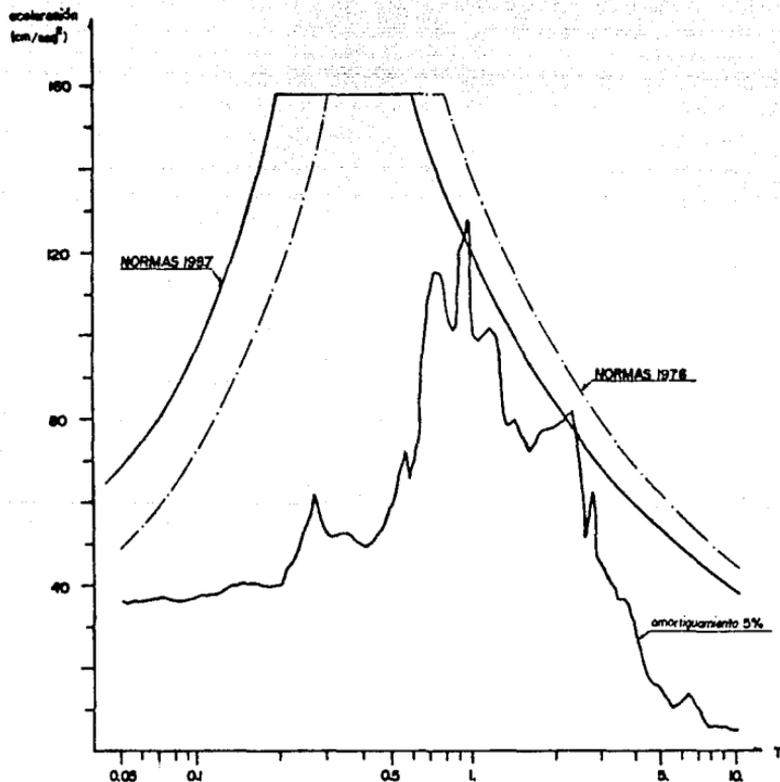


FIGURA VI.3. COMPARACION ENTRE ESPECTROS DE DISEÑO DE REGLAMENTOS DE 1975 Y 1987 CON ESPECTRO DE RESPUESTA PARA EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 EN ZONA DE TRANSICION.

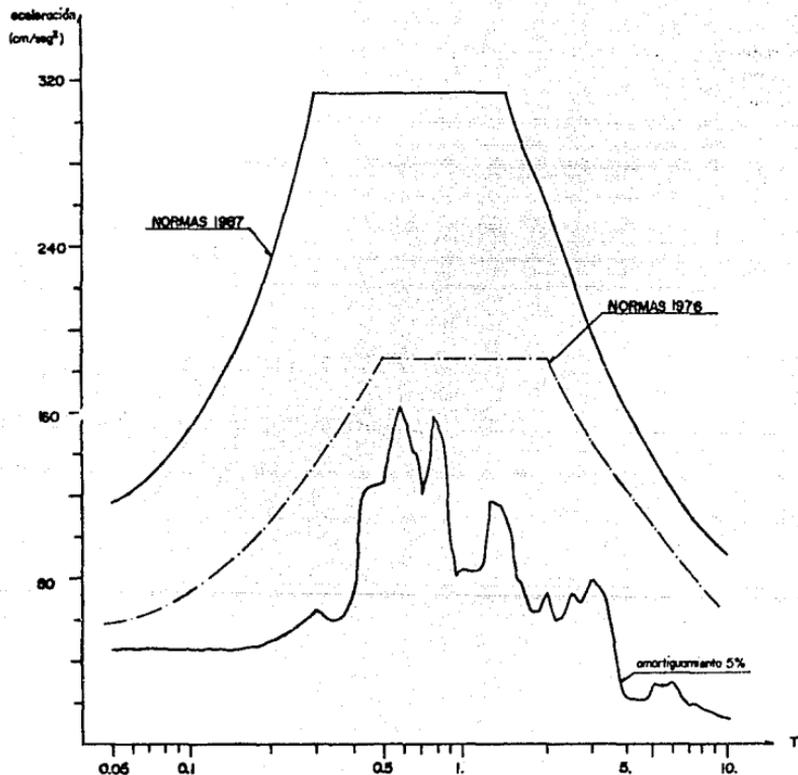
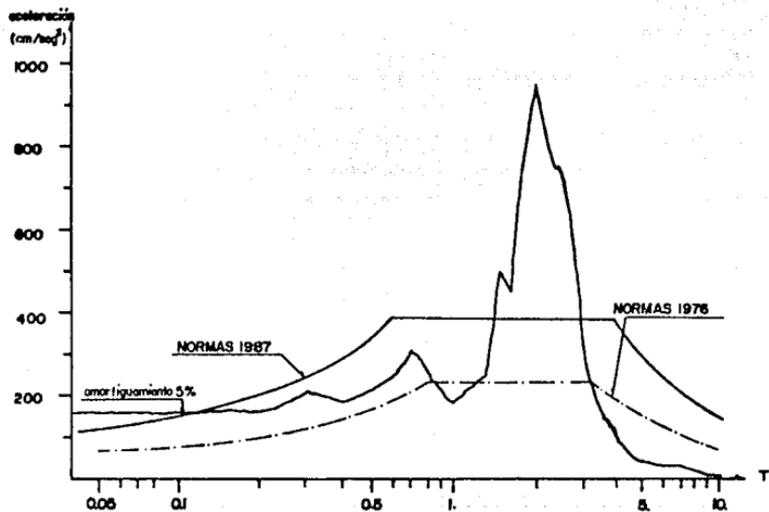


FIGURA VI.4. COMPARACION ENTRE ESPECTROS DE DISEÑO DE REGLAMENTOS DE 1976 Y 1987 CON ESPECTRO DE RESPUESTA PARA EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE EN ZONA DE EX LAGO.



Del análisis estadístico de los daños ocasionados en edificios por los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985, se infiere que aproximadamente un 42% de los daños corresponde a edificios con distribución asimétrica (en planta) de rigideces. Como consecuencia de ello la norma de diseño sísmico por torsión del Reglamento de Construcciones del D.F. ha sido modificada. Las normas actuales reconocen el problema de la torsión excesiva, estableciendo una excentricidad máxima del 10% de la dimensión de la estructura perpendicular a la acción sísmica. Las normas también exigen modificar la excentricidad multiplicándola por un factor dinámico (1.5) y sumándole o restándole la excentricidad accidental. La simetría en elevación y en planta es una condición que conviene buscar en las estructuraciones de edificios ubicados en la zona del lago de la Ciudad de México.

En el Reglamento de 1976 no se ponía ningún límite a la excentricidad torsional de las fuerzas sísmicas, se especificaba simplemente la obligación de considerar una excentricidad accidental que incrementaba la calculada. El comportamiento poco satisfactorio de las estructuras con torsión obligo a revisar estas normas; las normas de 1987 son mucho más estrictas en este sentido, la excentricidad máxima se limita al 10% de la dimensión de la planta en dirección normal al sismo a menos que el diseño se penalice incrementando las fuerzas cortantes calculadas en un 20%. adicionalmente se especifica que la excentricidad de diseño no sea menos que la mitad del valor máximo calculado para cualquiera de los pisos interiores y que el momento torsionante calculado en cualquier piso no sea menor que la mitad del que se calcule para cualquier piso encima de él. Sigue especificándose la excentricidad accidental de reglamentos anteriores.

Se llama también la atención de la importancia que puede presentar la pérdida de resistencia de un elemento estructural que entra en el rango de comportamiento inelástico al provocar torsiones imprevistas.

En los cálculos de torsión en planta, se pide la determinación del centro de resistencias, que no necesariamente coincide con el de rigideces, lo cual dificultará notablemente este aspecto, pues no es fácil determinar la resistencia de un entrepiso y por lo tanto por donde pasa su resultante (este requisito se derogará próximamente (Ref. 22).

Se tiene también en un apéndice, recomendaciones para tomar en cuenta la interacción suelo-estructura, en aquellos casos en que sea importante, pudiendo modificarse en este caso la forma del espectro de diseño, con base en los periodos dominantes del suelo en el sitio en que se construirá la estructura, proporcionándose en este apéndice un plano del D.F. con esos valores.

La interacción suelo-estructura no se contemplaba en absoluto en el Reglamento de 1976, las experiencias de 1985 indican su importancia; el nuevo Reglamento incluye un apéndice a este respecto; sin embargo su aplicación es optativa y en general no conduce a reconocer las situaciones críticas que parece haber ocurrido en varios casos y que contradicen la idea de que la interacción de la estructura con el suelo resulta siempre favorable para su comportamiento.

Por lo que respecta a las normas técnicas complementarias para el diseño de estructuras de mampostería, concreto reforzado, madera, acero, para el diseño de cimentaciones y por viento hubo también algunos cambios importantes en ellas, varios de ellos contemplados en las normas de emergencia y otros nuevos.

En el caso de estructuras de acero el diseño se seguirá haciendo, como lo contemplaba ya el Reglamento del 76, con base en cargas y resistencias últimas en vez de emplear esfuerzos permisibles como antes, aunque esto no reviste gran importancia

en la práctica ya que en la mayoría de los casos se discha con el Reglamento AISC y por esfuerzos permisibles.

En el diseño de cimentaciones se da también nuevas recomendaciones tomando en cuenta las experiencias obtenidas en los sismos de septiembre de 1985.

En un número importante de casos, en la zona blanda de la ciudad, se presentó la falla de la cimentación. Las fallas ocurrieron, en casi todas las ocasiones, en cimentaciones compensadas y en cimentaciones con pilotes de fricción. No es posible descartar la consideración de que el comportamiento de la cimentación haya influido en la falla de muchas estructuras. La práctica usual de fragmentar el conjunto suelo-cimentación-estructura en tres sistemas que se estudian por separado, es una hipótesis que puede influir desfavorablemente en ciertos casos, modificando, por ejemplo, hacia valores críticos el período natural de estructuras normalmente supuestas empotradas en su base.

En el caso de estructuras de concreto reforzado, un cambio importante consistió en establecer dos calidades de concreto, debiendo emplearse la mejor, que requiere control importante en la selección de materiales y en la fabricación, en estructuras de los grupos A y B. Se hicieron también, ajustes en los factores de reducción de resistencia y en los requisitos de detalle para lograr ductilidad en los marcos rígidos.

El concreto que se ha fabricado tradicionalmente en el valle de México no cumple con algunos requisitos de calidad internacional para concreto estructural. Para su elaboración se utilizan gravas andesíticas o basaltos vesiculares de bajo peso volumétrico y arenas andesíticas con altos contenidos de polvo; con estos agregados se adquiere un concreto con peso volumétrico un poco menor que el normal, pero con características de algunos

concretos ligeros, como bajo módulo de elasticidad, alta contracción por secado y elevadas deformaciones por flujo plástico. Con esto se tiene mayor flexibilidad en las estructuras, por la tendencia al agrietamiento y por la elevadas deformaciones con el tiempo.

Con el uso de gravas de mejor calidad, como las que se tienen de la trituración de rocas calizas o basálticas se pueden superar los defectos antes mencionados y obtener concretos con características que se recomiendan internacionalmente. El nuevo Reglamento de Construcciones para el D.F. especifica el empleo de un concreto de estas características para estructuras importantes. El nuevo concreto (clase I) ya está disponible en el mercado a un costo no excesivamente mayor al del tradicional (clase II) y su empleo debe difundirse rápidamente.

Las lecciones que se obtuvieron de los sismos de septiembre de 1985 señalan la necesidad de modificaciones fuertes en las características de las construcciones de concreto reforzado en regiones de alto riesgo sísmico. Estas modificaciones van más allá de los cambios de los requisitos de diseño sísmico de los reglamentos de construcciones; abarcan el tipo de construcción que es posible realizar económicamente en un sitio determinado, la selección del sistema estructural más conveniente para cada tipo de construcción y los materiales, métodos de diseño y forma de refuerzo.

Debe tomarse en cuenta que los cambios producidos en el nuevo Reglamento van mucho más allá del mero incremento en los coeficientes sísmicos; la reducción en las deformaciones laterales permisibles, en los factores de comportamiento sísmico ( $Q$ ) y en los factores de resistencia, así como una serie de requisitos de dimensiones mínimas y de cuantías de refuerzo longitudinal y transversal, van a redundar, en la mayoría de los casos, en incrementos sustanciales en la resistencia necesaria a

cargas laterales. Estos van a influir en la modificación de los sistemas estructurales económicamente más convenientes, así como en las alturas mismas de los edificios que se puedan construir.

Después del sismo se ha aprendido mucho sobre los defectos constructivos que conviene mejorar a través de especificaciones adecuadas. Las lecciones del sismo han obligado a detallar en mejor forma los elementos estructurales, tener un mejor control de calidad en las propiedades de los materiales, así como de las prácticas y tolerancias de construcción. También recalcó la importancia de conocer la calidad y características de los materiales locales y de su influencia en el comportamiento de los elementos y sistemas estructurales.

En el diseño de edificios nuevos debe prestarse atención especial a su configuración; deben eliminarse las irregularidades geométricas y estructurales sean horizontales o verticales, para evitar torsiones excesivas y concentraciones de la demanda de ductilidad en zonas localizadas, que serán probablemente incapaces de proporcionarla. Los elementos estructurales y no estructurales tienen que diseñarse cuidadosamente, prestando atención especial a su interacción, para evitar fallas locales que disminuyen la rigidez lateral de la estructura, incrementan las torsiones e inician daños progresivos. Deben escogerse los materiales y sistemas estructurales más adecuados, así como los modelos analíticos más convenientes para el análisis y el diseño. La revisión de todas las causas posibles de inestabilidad y el diseño de conexiones son de importancia primordial en estructuras de acero, y en las de concreto se ha de poner especial cuidado en la distribución del refuerzo, anclaje de las varillas y refuerzo por cortante, para evitar fallas no dúctiles. Debe haber concordancia entre la rigidez y la resistencia de todos los elementos, estructurales o no, pues los más rígidos "atraen" una parte mayor de la fuerza sísmica, y fallan si no pueden resistirla. Deben eludirse las construcciones con períodos

naturales de vibración cercanos a los del terreno en que se construye. El proceso de construcción requiere una supervisión concienzuda para detectar o corregir errores y prácticas incorrectas.

El RCDF-87 va a hacer que los sistemas estructurales a utilizar sean diferentes de los que han sido más comunes hasta ahora, para tener estructuras resistentes y económicas, en vista de los requisitos adicionales que impone sobre su resistencia y rigidez. Los marcos rígidos con contraventeos excéntricos constituyen un paso hacia la solución del problema.

En todos los edificios de cierta altura, de forma particular en la zona del lago, debe tenerse en consideración la necesidad de construir muros de rigidez de concreto reforzado o contravientos verticales de acero que sin interferir con la operación del edificio le proporcionen la rigidez y resistencia ante fuerzas horizontales, necesarias para soportar en buena manera sismos intensos, teniendo en cuenta los detalles para tener una estructura dúctil, que se comporte de una manera adecuada ante sismos extraordinarios.

Los reglamentos no prohíben sistemas estructurales que son poco eficientes para resistir efectos sísmicos ni recomiendan explícitamente los que sí lo son. Desalientan el uso de los primeros exigiendo el empleo de métodos de diseño más refinados y de factores de seguridad más elevados que inciden en la economía de cada solución estructural. El diseñador no debe forzar las soluciones a entrar en los límites permitidos por el reglamento. Debe pugnar por la adopción de un sistema estructural sano que proporcione defensas claras ante los efectos sísmicos y cuya seguridad se pueda comprobar mediante métodos aproximados y sencillos. La estrecha correlación que se ha encontrado entre el buen desempeño de los edificios ante el sismo de 1985 y algunos índices de resistencia ante carga lateral basados en el área

transversal de columnas y muros, indica que una comprobación de este tipo es un paso inicial necesario para evaluar cada solución estructural. Los métodos más refinados se aplicarán después en el diseño final para detectar problemas especiales debidos a las características específicas de los edificios y para el dimensionamiento de los elementos estructurales.

En la Ciudad de México veremos construcciones más robustas con abundancia de elementos rigidizantes distribuidos uniformemente de forma de transmitir a toda el área de cimentación las fuerzas provocadas por los efectos sísmicos. En la zona del lago, las construcciones serán más bajas y más regulares en planta y elevación.

Con el nuevo Reglamento se obtienen estructuras más estables y seguras intentándose lograr un equilibrio adecuado entre la seguridad y los costos para construir aunque es muy difícil inscribir en un balance económico el precio de las vidas humanas. Ya que pueden crearse estructuras que aguanten grandes sismos, pero la sociedad no puede soportar estos gastos cuando se destina ese dinero a sectores como la salud, la educación entre otros. De tal forma que las normas garantizan un riesgo razonable como lo implica cualquier actividad humana.

Con la aplicación del nuevo reglamento no se puede decir que ninguna construcción no vaya a fallar. Esto es imposible ya que existen incertidumbres, márgenes de error, aunque se este disminuyendo el porcentaje de peligro. Pero este nuevo reglamento puede mantener tranquila a la población.

## CAPITULO VII

### SEGURIDAD URBANA ANTE FENOMENOS SISMICOS.

*"A medida que aumenta nuestro conocimiento acerca de la complejidad de los terremotos, adquirimos cada vez mas conciencia de los límites que la naturaleza impone a nuestras posibilidades de proveer a partir de bases puramente teóricas cual será el comportamiento de las obras de ingeniería, del propio terreno o de una comunidad."*

N. ANDRASEYS.

#### VII.1. RIESGO SISMICO EN LA CIUDAD DE MEXICO.

Se puede definir a un desastre natural como la combinación de dos circunstancias. Primero la aparición violenta de un fenómeno natural con un alto poder destructivo que afecta a una región o comunidad y lo segundo, que la secuela inmediata de efectos y el tamaño de los daños hacen que los instrumentos de funcionamiento normal del gobierno no sean suficientes para hacer frente al acontecimiento y éste tiene que actuar conjuntamente con la sociedad para contener los efectos.

Un desastre no puede predecirse puntualmente, pero las sociedades y los estados pueden visualizar anticipadamente escenarios de desastre y medidas de emergencia. Al hacer ésto, lo

más importante es asignar a cada sector o cada grupo una responsabilidad determinada y estar de acuerdo en que momento debe intervenir.

La vulnerabilidad de la Ciudad de México ante los fenómenos sísmicos quedó de manifiesto durante el terremoto del 19 de septiembre de 1985. Los sismos del 19 y 20 de septiembre causaron daños sin precedente en la capital, nunca se había visto destrucción de la magnitud y extensión sufrida como en septiembre de 1985.

Se debe tener una clara noción de que nuestra ciudad se encuentra en una zona de alto riesgo sísmico y que se deben extremar las precauciones para evitar la repetición de las consecuencias.

Las características de los suelos del valle de la Ciudad de México hacen a la capital vulnerable a la mayor parte de los grandes sismos que ocurren en el centro y sur del país. El sismo de Michoacán, por ejemplo, produjo altas y sostenidas aceleraciones en el valle de México, aun cuando el epicentro se encontraba a más de 350 km. de distancia.

Los daños ocurridos en la mañana del 19 de septiembre en la Ciudad de México fueron inmensos e inesperados. Más de 10,000 personas murieron y muchas más perdieron su vivienda. Ha sido una lección muy costosa de la que debemos aprender. No hay que olvidar que la Ciudad de México está condenada a experimentar otros sismos de similares proporciones. Es de esperarse que sigan ocurriendo sismos en la Costa del Pacífico; principalmente en lugares en donde no se ha registrado un sismo fuerte desde hace mucho tiempo y se está almacenando la energía. Por el momento el conocimiento actual sobre los sismos no permite que se hagan predicciones precisas sobre la ocurrencia de estos fenómenos.

La probabilidad de que ocurra un sismo significativamente más intenso que el de septiembre de 1985 es bastante baja, aunque no puede descartarse (se podría dar como ejemplo, la posibilidad de que los sismos del 19 y 20 de septiembre hubieran ocurrido con segundos de separación, provocando un sismo de magnitud mayor al ocurrido).

Como se ha comentado en el capítulo I es probable que se origine un sismo de magnitud comparable al que estamos tratando, en las costas de Guerrero, pero pese a esto es muy poco probable que se tengan las características del sismo de septiembre de 1985 tales como tipo de ondas, distancia del epicentro, etc., que fueron particularmente nocivas para el valle de México.

Otra forma de apreciar el riesgo sísmico que presenta la Ciudad de México es a través del punto de vista de las compañías de seguros. Las compañías de seguros no están interesadas principalmente en las magnitudes de los sismos y la ubicación de los epicentros, sino más bien en el impacto de un terremoto sobre una zona de concentración de población, es decir la intensidad del evento. La frecuencia nos señala con qué periodicidad media ocurre un evento de intensidad dada para cada zona. Una frecuencia de por ejemplo 0.05 por año corresponde a un periodo de retorno medio de 20 años.

Algunos resultados numéricos de estos procedimientos están dados en la tabla siguiente. La cual muestra qué tanto riesgo sísmico se considera en nuestra Ciudad a comparación de otras.

TABLA VII.1 PROMEDIO ACUMULATIVO DE FRECUENCIA DE EVENTOS PARA ALGUNAS ZONAS DE CONCENTRACION MUNDIAL (Ref. 23).

ZONA DE CONCENTRACIONES	NUMERO ANUAL PROMEDIO DE EVENTOS SISMICOS DE INTENSIDAD (MERCALLI MODIFICADA).							
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Santiago de Chile	0.25	0.18	0.13	0.09	0.06	0.03	0.02	0.01
Bogota, Colombia	0.14	0.10	0.06	0.02	0.01	0.01		
Ciudad de Mexico	0.62	0.38	0.20	0.07	0.03	0.02	0.01	
Haifa, Israel	0.08	0.03	0.01	0.01				
Tokio, Japon	0.30	0.18	0.10	0.06	0.03	0.01		
Manila, Filipinas	0.18	0.09	0.05	0.02	0.01	0.01		
Estambul, Turquia	0.14	0.04	0.01	0.01				
Lisboa, Portugal	0.35	0.14	0.06	0.03	0.01			

De la tabla anterior se nota que la Ciudad de México es la que tiene periodos de retorno más seguidos para las distintas intensidades. Lo que la hace una de las ciudades con mayor riesgo sísmico y mayor población a nivel mundial.

"Una característica que el riesgo sísmico comparte con otros peligros geofísicos (terremotos, inundaciones, sequías, ciclones) es el crecimiento potencial de daños. Aunque las pérdidas locales, en términos de daños económicos, pérdidas de vidas y víctimas, puede fluctuar de año en año e incluso de década en década, el peligro potencial tiende a aumentar a medida que aumenta la población del mundo y ésta es más urbana, más concentrada y más dependiente de una infraestructura sofisticada pero vulnerable."<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jackson, Edgar y Burton, Ian. *El proceso del ajuste humano al riesgo sísmico. Terremotos, Evaluación y Mitigación de su Peligrosidad*. Editorial Blume. UNESCO. España 1980.

## VII.2. MEDIDAS A TOMAR EN REGIONES URBANAS PROPENSAS A TERREMOTOS.

Al ver el desastre que sufrió nuestra ciudad con el sismo, es urgente llevar a cabo planes de organización y planeación de ayuda en caso de calamidades como sismo.

La capacidad que tiene la sociedad para hacer frente a estos desastres depende de la forma en que se organizan las innumerables actividades que son necesarias, sin esperar que éste tipo de eventos se presente.

Es necesario reducir las desgracias y sufrimientos por medio de una movilización rápida y eficiente de los organismos de emergencia y de la población en general, así como un manejo adecuado de los recursos disponibles en tales circunstancias.

El socorro en el caso de un desastre, particularmente de un terremoto, no es enteramente efectivo a no ser que sea inmediato y a no ser que haya suficientes personas calificadas con conocimientos técnicos, competencia para actuar, entrenamiento individual y como grupo para proporcionar esta ayuda, y que exista suficiente equipamiento, adecuado a las necesidades y a las condiciones del terremoto. La coordinación de las operaciones es una regla de acción básica al ser observada si es que ha de hacerse el mejor uso del personal y del equipo.

Esta coordinación debe entrar tanto de cada grupo como entre grupos, siendo especialmente necesaria si la zona afectada es muy extensa, si el número de víctimas es muy alto y si el daño es muy serio y variado.

No es factible diseñar una ciudad completamente a prueba de terremotos cuando su ubicación es mala. En muchos países, un caso particular es el nuestro, será imposible abandonar totalmente aquellas zonas propensas a terremotos. Por lo tanto, es de importancia primordial seleccionar los lugares menos peligrosos entre los disponibles y desarrollar medios para la prevención de desastres.

Dentro de las regiones de alto riesgo es imperativo evitar la concentración de población y de actividades económicas en uno o en muy pocos lugares. Si un terremoto ocurriese en tal lugar, las consecuencias pueden ser desastrosas para la vida y la economía de toda una región o todo un país.

"Las grandes devastaciones que afectan a la economía de los países situados en regiones de gran sismicidad ponen claramente de manifiesto la necesidad de tomar energéticas medidas para reducir las pérdidas de vidas humanas y bienes materiales durante los sismos catastróficos. Los países en desarrollo, con grandes concentraciones de inversiones sociales en zonas sísmicas deben dedicar especial atención a la futura protección de unos sistemas vitales y onerosos, a fin de evitar graves quebrantos económicos."\*

No hay sustitutos para mitigar los peligros de un terremoto por medio de preventivos tales como el aplicar los conocimientos actuales al diseño y construcción de nuevos edificios y mejorar los viejos para hacerlos más resistentes.

Técnicamente podemos construir ciudades a prueba de terremotos, pero la experiencia ha demostrado, que esta solución, aunque posible no es económicamente factible. En la práctica,

\* Petrovskii, Jakim. *Histroyanizatsiya sismika y problemye sonevnyye*. Terremoton, Evaluación y Mitigación de su Peligrosidad. Editorial Blume. UNESCO. España 1980.

sólo algunos de los edificios más importantes son construidos para ser considerablemente sísmo-resistentes. Los planeadores se encuentran ante decisiones como la siguiente:

¿Qué es mejor construir 10 hospitales para los cuales el riesgo de que ocurra un sismo que alcance la aceleración de diseño durante los próximos 10 años sea del 5% o un solo hospital para el cual el riesgo es de 0.5%? Aunque es imposible evitar todo riesgo, generalmente es posible tomar uno razonable a cambio de tener los beneficios de contar con escuela, hospitales y otras construcciones que reportan beneficios a la sociedad.

Un comentario importante del caso de nuestra ciudad a los eventos sísmicos es el siguiente:

"Tenemos gran confianza de que estamos preparados para soportar temblores intensos. Pero es difícil pronosticar en una ciudad que presenta tantos riesgos. Estamos rodeados de volcanes, alta contaminación, se encuentran asentadas muchas empresas que representan un peligro potencial dentro del área metropolitana, etc.

La Ciudad de México no es el mejor lugar para invertir en el país. Valdría la pena buscar lugares menos riesgosos y sopesar la posibilidad de crear otros desarrollos urbanos."<sup>3</sup>

A continuación se presentan algunas medidas a tomar para hacer menos graves los efectos de un sismo, las cuales se pueden dividir en tres:

<sup>3</sup> Esteve Marabato, Luis. *En busca de la tranquilidad. Información Científica y Tecnológica*. Num. 123 CONACYT. México, Diciembre de 1986 Vol. 8.

- Medidas antes del terremoto.
- Medidas durante el terremoto.
- Medidas después del terremoto.

#### ANTES DEL TERREMOTO.

- Asegurarse de que el código de construcción de la zona, cubra de una manera adecuada la respuesta de las estructuras tomando en cuenta los efectos de sismos anteriores.

- Revisar de una forma especial las construcciones que puedan provocar una catástrofe mayor como escuelas, hospitales, presas, etc. tomando en cuenta el nuevo código, ya que tal vez necesite ser reforzadas.

- Reforzar los edificios a los que se haya dado un uso para el cual no fueron diseñados.

- Organizar cursos y editar folletos a fin de instruir a la población acerca de como actuar durante y después de un terremoto.

- Organizar instrucción y simulación de evacuación en escuelas, hospitales y otros edificios públicos.

- Contar con centros de emergencia en los cuales se debe de tener :

-Alimentos y medicinas.

-Materiales y herramientas de construcción.

-Elementos prefabricados para la construcción de vivienda temporal y elementos para la reparación de estructuras.

-Computadoras con archivos de información para localizar con una mayor eficiencia: maquinaria de construcción, personal

preparado para casos de desastre, grupos de emergencia, hospitales, registro de víctimas y su localización, registro de suministro de víveres y medicamentos, inventario de estructuras dañadas, etc.

- Ambulancias con radiotransmisores.

Es claro que los locales de estos centros de emergencia deben estar diseñados para resistir grandes sismos.

- Aconsejar a la gente que tenga en sus casas linternas, radio portátil, baterías, comida enlatada, agua, todo esto a la mano.

- Proporcionar cursos de primeros auxilios a la población.

- Conocer donde están las llaves de paso del gas y agua y los fusibles de la corriente eléctrica.

- Apremiar al personal de las escuelas y profesores a discutir la seguridad contra terremotos en clase.

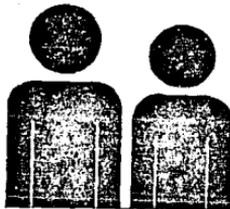
- Tener grupos de emergencia pionamente entrenados para entrar en acción en caso de desastre.

Una medida preventiva reciente que se ha venido estudiando en estos últimos años es la llamada alarma sísmica, la cual consiste en tener ubicados en la Costa del Pacífico varios acelerómetros, los cuales conforman una red, que al detectar movimientos sísmicos de magnitud superior a un umbral previamente definido, que pudieran transmitirse y llegar con peligrosidad a la Ciudad de México, mandan una señal a una estación ubicada en la Ciudad, con lo cual se puede avisar con segundos de anticipación (aproximadamente 60 si se produjera un sismo en la brecha de Acapulco) la llegada de las ondas sísmicas con un alto contenido de energía. Con lo que se permitiría desalojar con anticipación las edificaciones. Este proyecto aún está en investigación y es posible que se implemente en varias escuelas de la región de alta intensidad sísmica de nuestra ciudad.

## DURANTE EL TERREMOTO.

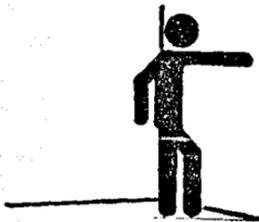
- Mantener la calma, es más fácil tomar decisiones importantes.

FIGURA VII.1. CONSERVAR LA CALMA, CAMINAR.



- No recargarse en paredes, mantenerse lejos de puertas de salida.

FIGURA VII.2. NO RECARGARSE EN LAS PAREDES.



- Si se encuentra en edificio que no sea especialmente seguro tratar de hacer una evacuación ordenada.

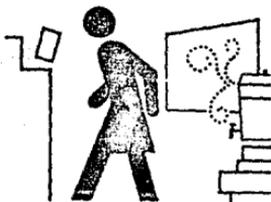
- Apagar inmediatamente cigarrillos o cualquier fuente de incendio.

FIGURA VII.3. APAGAR CIGARRILLOS O FUENTES DE INCENDIO.



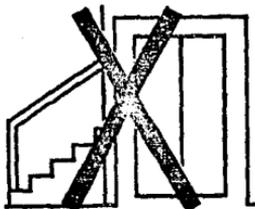
- Alejarse de ventanas, lámparas, cafeteras, objetos o muebles que puedan caer.

FIGURA VII.4. ALEJARSE DE OBJETOS O MUEBLES QUE PUEDAN CAER.



- No usar escaleras o elevadores.

FIGURA VII.5. NO USAR ESCALERAS O ELEVADORES.



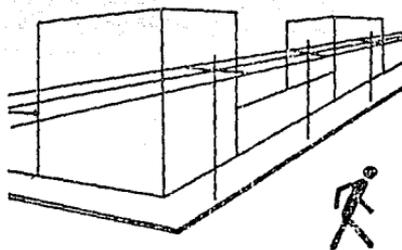
- Si hay la necesidad de desalojar las instalaciones obedecer las instrucciones del personal especializado o recordar el Plan de Emergencia.

FIGURA VII.6. SI ES NECESARIO DESALOJAR LAS INSTALACIONES OBEDECIENDO AL PERSONAL CAPACITADO.



- Si se encuentra uno en la calle es conveniente alejarse de los edificios por lo menos a una distancia aproximada correspondiente a la mitad de la altura del edificio. Colocarse lejos de los cables de alta tensión aéreos.

FIGURA VII.7. ACUDIR A LUGARES DESPEJADOS.

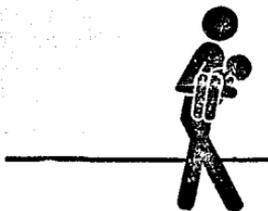


- Si se está en un coche en movimiento, parar y quedarse dentro hasta que el temblor haya terminado.

## DESPUES DEL TERREMOTO.

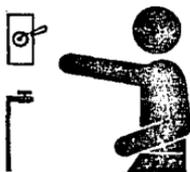
- Verificar si alguien requiere de primeros auxilios o ayuda inmediata. No se debe mover a un herido a menos que sea indispensable; marcar los sitios donde haya gente atrapada.

FIGURA VII.8. AYUDAR A LAS PERSONAS QUE LO REQUERAN.



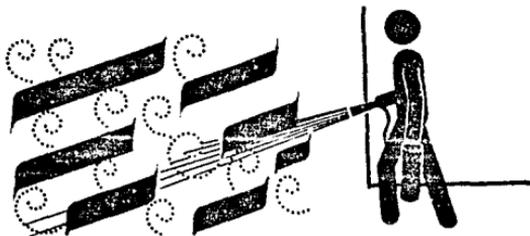
- Evitar acercarse a cables eléctricos rotos y a cualquier objeto metálico o charco que éstos toquen. Desconectar inmediatamente la alimentación de corriente eléctrica y de gas. Buscar rastros de cortocircuitos y olor de gas antes de reconectarlos. No encender cerillos (o fumar) antes de asegurarse de que no haya fugas de otro material inflamable.

FIGURA VII.9. CERRAR LLAVES DE GAS Y DESCONECTAR ELECTRICIDAD



- En caso de incendio, hacer uso de extinguidores y/o llamar a los bomberos.

FIGURA VII.10. UTILIZAR EXTINGUIDORES.



- No hacer llamadas telefónicas que no sean estrictamente necesarias, y hacerlas lo más breve posible, pues las líneas seguramente se necesitarán para llamadas de auxilio. Es

importante recordar que si un teléfono no contesta puede deberse a un simple cable roto en el camino, y no a que el lugar donde se encuentra el teléfono haya quedado destruido.

- No tomar agua, sin antes hervirla o purificarla.
- Cooperar con las autoridades para no complicar una situación difícil. No propagar rumores falsos. No estorbar las labores de rescate por estar de mirón.

FIGURA VII-11. OBEDECER LAS INSTRUCCIONES DEL PERSONAL CAPACITADO PARA EL CONTROL Y AYUDA SI SE LE SOLICITA.



- Sintonizar la radio para saber si hay instrucciones de emergencia.
- Mantenerse lejos de edificios dañados.
- No ir a zonas dañadas excepto si se está autorizado y el plan de emergencia así lo requiere.
- Si se está en la escuela o trabajo, seguir el plan de emergencia o las instrucciones dadas por alguien que esté a cargo.

- Esperar réplicas, que pueden causar daños adicionales.
- Entrar en operación los centros de emergencia y su personal calificado esto implica:
  - Buscar y encontrar a los supervivientes enterrados. Preguntar a las personas que viven en los edificios que se han derrumbado y a los vecinos que pudieron salvarse acerca del número de personas desaparecidas. La búsqueda puede ser efectuada con perros adiestrados o con equipo acústico o eléctrico, o con sensores ultra sensibles capaces de detectar el calor de un cuerpo vivo.
  - Mantener el orden en la zona afectada, de modo que los equipos de socorro tengan completa libertad de acción y de movimiento, evitar el pánico y reprimir el saqueo.
  - Llevar a cabo lo más rápidamente posible el trabajo más urgente necesario para restablecer los medios de comunicación y las redes de suministro de agua y electricidad y el sistema sanitario en la zona afectada.
  - Dado que los supervivientes tienen que ser encontrados lo más rápidamente posible, las operaciones de búsqueda y rescate no pueden ser responsabilidad del mismo grupo. Una vez que el equipo de búsqueda ha señalado el lugar donde alguien está enterrado, continúa su búsqueda en otros lugares, mientras el equipo de rescate entra en acción.
  - El trabajo del equipo de rescate consiste en abrirse paso a través de los escombros hasta la víctima, sin alterar el equilibrio frecuentemente precario de los escombros, de materiales de construcción, muebles y otros objetos. El equipo de búsqueda debe siempre estar acompañado de un médico, preferiblemente un especialista en reanimación, pues se podría necesitar que el tuviera que administrar primeros auxilios antes de liberar a la víctima, para ayudarla a sobrevivir y a resistir el shock de las maniobras que son necesarias para su rescate. Los

equipos sólo utilizan herramientas de mano. Las herramientas automáticas, tales como perforadoras o taladros neumáticos deben ser utilizados con gran cuidado, para evitar herir accidentalmente a la persona que estuviera atrapada bajo escombros.

- La coordinación entre equipos de búsqueda y equipos de rescate es esencial, si es que ha de lograrse un silencio absoluto en el lugar, lo cual a veces es necesario para poder detectar sonidos muy tenues o voces de auxilio.

- Salvar vidas en peligro implica recoger a los heridos, tanto a los que pueden moverse como a los que no lo pueden hacer, dándoles primeros auxilios, dirigiéndolos y transportándolos a unidades médicas móviles, donde médicos especialmente calificados para éste tipo de trabajos pueden tratarlos de acuerdo con la seriedad de sus heridas y luego, si es necesario, evacuarlos, después de los primeros auxilios a sus heridas, a hospitales equipados para un tratamiento completo, médico y quirúrgico.

- Los cuerpos de los muertos deben ser reunidos en zonas preparadas para éste fin, con todos los artículos o indicaciones que puedan ayudar a su identificación.

- Hay que organizar centros de ayuda para recibir a los supervivientes ilesos, para reunificar familias, para servir comida y bebida, y para registrar hombres, mujeres y adolescentes que estén en condiciones de participar en las operaciones de socorro o en la administración de los centros de ayuda.

- Tan pronto como sea posible, hay que habilitar centros temporales de alojamiento, para quienes carecen de viviendas puedan organizar su vida diaria con comidas, cama, servicios higiénicos, etc.

- En el centro de emergencia se debe de contar con la mayor cantidad de información posible como es, número de víctimas, localización de edificios dañados, personas hospitalizadas, personas en centros de ayuda, evaluación de daños, datos sísmicos y copias de todos los informes técnicos a medida que se elaboren.

- "La ayuda del extranjero es frecuentemente necesaria y siempre bienvenida, si se toma en consideración las verdaderas necesidades y las costumbres de la población afectada. Todos los países, sean donantes potenciales o víctimas potenciales deben reconocer la necesidad de coordinar la oferta y la demanda para evitar el despilfarro o las carencias. No debe permitirse que el generoso impulso de ayudar a quienes se han visto afectados por un desastre sea disperso, mal dirigido y perdido, pues ofrece una oportunidad para que las personas de todas las nacionalidades, razas y religiones expresen su solidaridad en forma amplia. A todo nivel, desde el del equipo de socorro que rescata a las personas de las ruinas o de los incendios, hasta el nivel del gobierno de un país cientos de kilómetros distante de la escena del desastre, la organización planificada, y la cooperación coordinada deben ser consideradas como imperativos indispensables."<sup>4</sup>

Las medidas anteriores no pretenden ser un plan a desarrollar en caso de un sismo grave, sino de dar una serie de acciones a tomar para hacer menos graves las consecuencias de un terremoto.

La cita siguiente da un punto de vista importante hacia la relevancia que tienen los fenómenos sociales ante un sismo.

<sup>4</sup> Dauard, Jean. *Implicaciones sociales y administrativas: protección, socorro y rehabilitación*. Terremotos, Evaluación y Mitigación de su Peligrosidad. Editorial Blume. UNESCO. España 1980.

"Los peligros de la mala aplicación del conocimiento científico existen debido a la incapacidad de manejar variables sociales, y a veces por la incapacidad de aplicar tales conocimientos cuando éstos existen. Un tratamiento sólido del riesgo sísmico depende de una capacidad de relacionar el conocimiento científico con el social y lograr una mezcla satisfactoria que nos conduzca a una acción sabia. Esto implica una alta metodología de sistemas relativos a la interacción del campo humano y el ambiente geofísico."<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Jackson, Edgar y Burton, Ian, *El proceso del ajuste humano al riesgo sísmico*. Terremotos, Evaluación y Mitigación de su Peligrosidad. Editorial Blume. UNESCO, España 1980.

## CONCLUSIONES.

En realidad el estudio de los sismos con bases científicas ha sido reciente tanto en nuestro país como en el mundo entero. Pero debido a los grandes avances de la tecnología se han podido localizar las zonas sísmicamente más activas, dentro de las cuales se encuentra buena parte de nuestro territorio nacional. Debido a que a partir de este siglo se han tenido las mediciones de sismos y se ha podido hacer inferencias de datos del siglo pasado, podemos encontrar períodos de recurrencia de sismos para ciertas zonas, que en la forma de predicción (si es que se puede llamar así) más confiable hasta el momento. A medida que se tengan más registros, la estimación de estos períodos será más confiable, con lo cual se podrá estimar de mejor forma el riesgo sísmico de nuestra capital o de la zona que se requiera. Pero dado que hasta hoy el estudio de la predicción sísmica no ha logrado resultados satisfactorios, debemos aceptar y reconocer el riesgo sísmico en todas nuestras acciones e inclusive estar preparados para afrontarlo y resolverlo de la mejor manera posible.

La teoría que se considera más confiable en la actualidad para explicar las causas de los terremotos de gran magnitud es la llamada "tectónica de placas"; de acuerdo con ella, la mayoría de los temblores de tierra se originan a lo largo de las fronteras entre las placas que componen la corteza terrestre, además de estos hay otras causas que pueden provocar sismos y que debemos no despreciarlas y tomar en cuenta como son: sismos tensionales en el interior de la placa en subducción y sismos en la corteza continental que reflejan la deformación de la placa de Norteamérica debido al proceso de subducción de placas en el Pacífico, este fenómeno de subducción de placas es el que hemos venido estudiando ya que origina un mayor número de sismos debido a la penetración de la placa de Cocos debajo de la placa Norteamericana, también presentándose este mismo fenómeno entre

la placa de la Rivera y la Norteamericana, además de que también se tiene un fenómeno de deslizamiento de la placa del Pacífico y la de Norteamérica en la falla de San Andrés, que afecta a Baja California y al norte de Sonora. Expuesto lo anterior podemos decir que nuestro país es altamente sísmico en buena parte de su territorio, ya que en él parece que convergen cinco placas tectónicas (la de Norteamérica, del Pacífico, de Cocos, de la Rivera y del Caribe), y que además de esto debemos tomar en cuenta que las condiciones geológicas del Valle de México hacen más graves los fenómenos sísmicos generados en la costa del Pacífico.

La brecha sísmica que no ha liberado energía desde hace tiempo es la de Guerrero, y de acuerdo con los científicos se espera que se libere esta energía antes del año 2000.

La gran magnitud presentada por el sismo del 19 de septiembre de 1985 hizo que se colapsaran varias estructuras en la Ciudad de México, registrándose aceleraciones del terreno que en realidad no se creía que pudieran ocurrir; jamás en la historia moderna de México y del mundo un sismo de magnitud 8.1 se había sentido con tal violencia en un centro urbano, tan densamente poblado como la Ciudad de México. El porcentaje de edificios colapsados fue de 1.4% del total existente en las zonas afectadas, con lo cual se puede apreciar que para haberse revasado los espectros de diseño entonces en funcionamiento fue mínimo el daño creado en la Ciudad.

Las estructuras colapsadas o con daño grave presentaron ciertas características que las hacen más endebles ante un fenómeno sísmico aquí y en cualquier parte del mundo, como se ha visto a lo largo del tiempo, algunas de estas malas características son las siguientes:

- Tener estructuras con periodos de vibración similares al del suelo donde se desplanta esta.

- Requerir una ductilidad difícil de cumplir, como sucede en cambios fuertes y localizados de resistencia, edificaciones con planta flexible, etc.

- Tener un amortiguamiento muy bajo.

- Presentar una estructura de caracter irregular tanto en planta como en elevación que ocasionen torsiones.

- No haber controlado la ubicación y construcción de elementos no estructurales.

- Estar bajo la amenaza de una colindancia peligrosa.

- Presentar una cimentación incapaz de transmitir incrementos notables de esfuerzos sísmicos al suelo, sin ocasionarle deformaciones perjudiciales.

- Contar con un sistema estructural poco apropiado, como son los que pueden propiciar un mecanismo de falla en columnas.

- Deterioro del sistema estructural a lo largo del tiempo, ocasionado por el intemperismo, temblores de tierra, hundimientos diferenciales de la cimentación.

- Cargas vivas mayores que las de diseño, sobre todo en los niveles superiores.

- Conexiones y otros detalles mal concebidos o realizados.

• Construcción defectuosa.

El Nuevo Reglamento de Construcciones del Distrito Federal en su parte de diseño por sismo, trata de corregir algunos de los errores que se observaron durante el sismo estudiado, aunque al parecer hay algunas cuestiones que se deberían manejar de mejor forma como son: darle la importancia adecuada que tiene el amortiguamiento en el comportamiento de una estructura ante sollicitaciones sísmicas, el Reglamento considera un amortiguamiento del 5% , pero se sabe que muchas construcciones modernas, que carecen casi por completo de muros rígidos y resistentes, tienen un amortiguamiento menor que el 5%, por lo que su respuesta sísmica puede incrementarse sustancialmente. El espectro de diseño para la zona III, cubre únicamente en un 40% el espectro de respuesta para el sismo del 19 de septiembre de 1985, es claro que no podemos regirnos por un pico que sucede alrededor del periodo de 2 seg., que nos conduciría a tener estructuras tremendamente voluminosas; por lo cual convendría hacer una microzonificación sísmica, más independiente de la zonificación típica del subsuelo de la Ciudad de México, donde se tengan coeficientes sísmicos que cubran de una manera más adecuada el espectro de respuesta antes mencionado. Por otra parte el espectro de diseño para la zona I parece hasta el momento que cubre de buena forma los espectros de respuesta que se han obtenido para esa zona, pero se sabe que en el pasado han ocurrido temblores con otras características, que han ocasionado daños en estructuras intactas en la últimas décadas.

Por lo descrito anteriormente el Reglamento de Construcciones actual en su parte Diseño por Sismo no se debe aplicar ciegamente, creyendo que cubre de forma adecuada la mayor parte de las estructuras. Debe tenerse el criterio suficiente para saber en que casos hay que salirse del Reglamento y dar una solución más adecuada. Además hay que aceptar que este Reglamento tiene incertidumbres y que es necesaria su modificación

periódica, que no se tiene un consenso en cuanto a las disposiciones recomendadas y que debería de haber una participación de todos los involucrados para sus modificaciones.

La Ciudad de México es una de las mayores urbes del mundo y es evidente que presenta un gran riesgo sísmico, por lo tanto debemos hacer todo lo posible para mitigar esa peligrosidad, ya que un sismo muy intenso en esta zona puede ser fatal para el país entero pues aquí se encuentra la mayor parte de la población y de la actividad económica, esto se puede hacer estudiando de una manera profunda todos los nuevos planteamientos que originó el sismo del 19 de septiembre de 1985. Es claro que seguirán ocurriendo sismos que afecten a nuestra ciudad, por lo que empieza a formarse en nosotros "una cultura sísmica", sólo con la cual podremos estar mejor preparados para afrontar estos fenómenos.

## B I B L I O G R A F I A

1. Estrada Uribe, Gabriel. *Estructuras Antisísmicas*. CECSA. México, 1984.
2. Bolt, Bruce. A. *Terremotos*. Ed. Reverté. España, 1981.
3. Sánchez Sesma, F.J. y Singh, S.K. *Grandes Temblores y sus efectos en el Valle de México: observaciones y teoría*. Los sismos de 1985: Casos de Mecánica de Suelos. SMMS. México, 1987.
4. Corro León, Javier. *El movimiento imprevisible*. Información Científica y Tecnológica. No. 110. CONACYT. México, noviembre de 1985.
5. Meli Piralla, Roberto. *Diseño Estructural*. Ed. Limusa. México, 1985.
6. Lomnitz, Cinna. *Predecir es mucho decir*. Información Científica y Tecnológica No. 110. CONACYT. México, noviembre de 1985.
7. Newmark, N.M. y Rosenblueth, E. *Fundamentos de Ingeniería Sísmica*. CECSA. México, 1976.
8. Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal: *Diseño por Sismo*. Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal. México, octubre de 1987.
9. Romo, Miguel y Jaime, Alberto. *Metodología para generar espectros de diseño deterministas en campo libre*. Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Querétaro, México, 1987.
10. Dowrick, D.J. *Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos*. Ed. Limusa. México, 1984.
11. Martínez, Alicia y Javier, Clara. *Isosistas del Macrosismo del 19 de septiembre de 1985*. Series del Instituto de Ingeniería No. 504. México, mayo de 1987.

12. Iglesias, Jesús. *Zonificación Sísmica de la Ciudad de México*. Memorias de VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Querétaro, México, 1987.

13. Mena, Enrique et. al. *Catálogo de acelerogramas procesados del sismo del 19 de septiembre de 1985. Parte I: Ciudad de México*. Series del Instituto de Ingeniería No. 497. México, julio de 1986.

14. Vázquez Vera, Alejandro y Pérez Ruiz, Ricardo. *Comportamiento de las estructuras en la Ciudad de México*. Revista Ingeniería Sísmica. Publicación Especial. México, D.F.

15. Carmona, Caroline et. al. *Catálogo de acelerogramas procesados del sismo del 19 de septiembre de 1985. Parte II: Réplica del 21 de septiembre en la Ciudad de México*. Series del Instituto de Ingeniería No. 503. México, febrero de 1987.

16. *Efectos de los Sismos de septiembre de 1985 en las Construcciones de la Ciudad de México. Aspectos Estructurales*. Segundo Informe del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. México, noviembre de 1985.

17. Meli P., Roberto y Rodríguez R., Mario. *Diseño Sísmico de Edificios con losas reticulares*. Memorias del V Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Guadalajara, Jal. 1979.

18. De Buen López de Heredia, Oscar, et. al. *Reto Sísmico*. Ed. IDH. México, 1988.

19. Iglesias, Jesús. *Sismicidad de la Ciudad de México*. Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro., noviembre, 1989.

20. Auvinet G., Gabriel y Mendoza L., Manuel. *Comportamiento de diversos tipos de cimentación en la zona lacustre de la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985. Los sismos de 1985: Casos de Mecánica de Suelos*. SMMS. México, 1987.

21. De Buen López de Heredia, Oscar. *Ingeniería Estructural en Zonas Sísmicas*. Revista de Ingeniería Sísmica No. 33. México, 1986.

22. Dany Rios, Julio. *Comentarios al inciso 8.6 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. Revista de Ingeniería Sísmica No. 33. México, 1988.

23. Straub, E. *El Seguro y las Consecuencias Económicas de los Terremotos*. Terremotos. Evaluación y Mitigación de su Peligrosidad. Ed. Blume. UNESCO. España, 1980.

24. Aguilar, Jorge; Juárez Hugo; Ortega Rodolfo e Iglesias Jesús. *Estudio Estadístico de Daños y Técnicas de Reparación para Edificios de Concreto afectados por Sismos*. Revista Ingeniería Sísmica. Publicación Especial. México, D.F.

25. Ciborowski, Adolfo. *Algunos aspectos de la planificación del desarrollo físico para asentamientos humanos en las regiones propensas a terremotos*. Terremotos. Evaluación y Mitigación de su Peligrosidad. Ed. Blume. UNESCO. España 1980.

26. De Buen López de Heredia, Oscar. *Evolución del Diseño Sísmico de Edificios de Acero*. Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Querétaro, México, 1987.

27. Del Valle Calderón, Enrique. *Criterios de Reparación de Algunos Edificios Afectados por el Sismo del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México. Ejemplos de Aplicación*. Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Querétaro, México, 1987.

28. Díaz Rodríguez, Abraham. *Los caprichos de la Tierra*. Aun Tiemblo. Sociedad Política y Cambio Social: el terremoto del 19 septiembre de 1985. Ed. Grigalbo, México, 1986.

29. Douard, Jean. *Implicaciones Sociales y Administrativas: Protección, Socorro y rehabilitación*. Terremotos. Evaluación y Mitigación de su Peligrosidad. Ed. Blume. UNESCO. España, 1980.

30. Esteva Maraboto, Luis. *En busca de la tranquilidad*. Información Científica y Tecnológica No. 123. CONACYT. México, diciembre de 1986.

31. Fundación ICA. *Experiencias Derivadas de los Sismos de septiembre de 1985*. Ed. Limusa. México, 1988.

32. Gribbin, John. *La Tierra en movimiento*. Biblioteca Científica Salvat. España, 1986.

33. Jackson, Edgar y Burton, Ian. *El proceso del ajuste humano al riesgo sísmico*. Terremotos. Evaluación y Mitigación de su Peligrosidad. Ed. Blume. UNESCO. España, 1980.

34. Meli Piralla, Roberto. *Sismos y Construcciones. Lección para la Ingeniería*. Información Científica y Tecnológica No. 110. CONACYT. México, noviembre de 1985.

35. Meli Piralla, Roberto. *El futuro de las Estructuras de Concreto Reforzado en Zonas Sísmicas*. Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Querétaro, México, 1987.

36. Nava, Alejandro. *Terremotos*. Ed. Fondo de Cultura Económica. México, 1987.

37. Nieto, José y Trigos, J.L. *El Concreto frente al Sismo*. Revista Construcción y Tecnología No. 15. México, agosto de 1989.

38. Noreña Casado, Francisco. *¿Estamos listos para soportar otro igual?* Información Científica y Tecnológica No. 123. CONACYT. México, diciembre de 1988.

39. Pereyra R., L. *Dos siglos de Temblores*. Información Científica y Tecnológica No. 123. CONACYT. México, diciembre de 1986.

40. Pérez Rocha, L; Sánchez Sesma, F; Bravo, M. *Influencia de las Condiciones Locales en la Duración de los Temblores y su Importancia en Ingeniería Sísmica*. Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Querétaro, México, 1987.

41. Prince, Jorge. *¿Cómo medir un sismo? Magnitud, intensidad y aceleración*. Información Científica y Tecnológica No. 110. CONACYT. México, noviembre de 1985.

42. Reglamento de Construcciones del D.F., Diario Oficial, 14 de septiembre de 1976.

43. Reglamento de Construcciones del D.F., Diario Oficial, 3 de julio de 1987.

44. Rosenblueth, E. y Meli, R. *El sismo del 19 de septiembre de 1986. Sus efectos en la Ciudad de México.* Revista IMCYC No. 189. México, mayo de 1986.

45. Singh, S.K. y Suárez, Gerardo. *Las características del Teztlor.* Información Científica y Tecnológica No. 110. CONACYT. México, noviembre de 1985.

46. Suárez Reynoso, Gerardo. *El potencial sísmico en México: una perspectiva histórica.* Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica. Zihuatanejo, México. Noviembre, 1986.