

narse en tal forma que la estructura quede definida por las propiedades de sus oscilaciones libres, siendo la principal su *periodo de oscilación*, o sea, *el tiempo que tarda en efectuar una oscilación completa*. En esta forma puede representarse cualquier estructura por medio de sus periodos de oscilación únicamente.

Ahora bien, un edificio de varios pisos no tiene un solo período de oscilación. Si suponemos movimiento en *una sola dirección*, por ejemplo transversal, tendrá tantos periodos como pisos, todos diferentes entre sí. Si se consideran dos direcciones, longitudinal y transversal, tendrá dos por cada piso. El hecho de que un edificio de dos pisos tenga en una dirección dos periodos de oscilación diferentes, se puede comprobar fácilmente mediante una pieza de madera o metal que sea bastante flexible.

Esta varilla, fig. 2a, representará al edificio, fig. 2A. Si se sostiene por un extremo y se mueve como lo indican las flechas de la figura, se observará lo siguiente:

- 1º Si el movimiento es relativamente lento, oscilará del modo representado en (b).
- 2º Si se aumenta la rapidez del movimiento, oscilará como se indica en (c). Las oscilaciones equivalentes del edificio se presentan en (B) y (C) de la misma figura.

Es decir, cada modo de vibrar de la varilla tiene su propio período de oscilación y el mo-

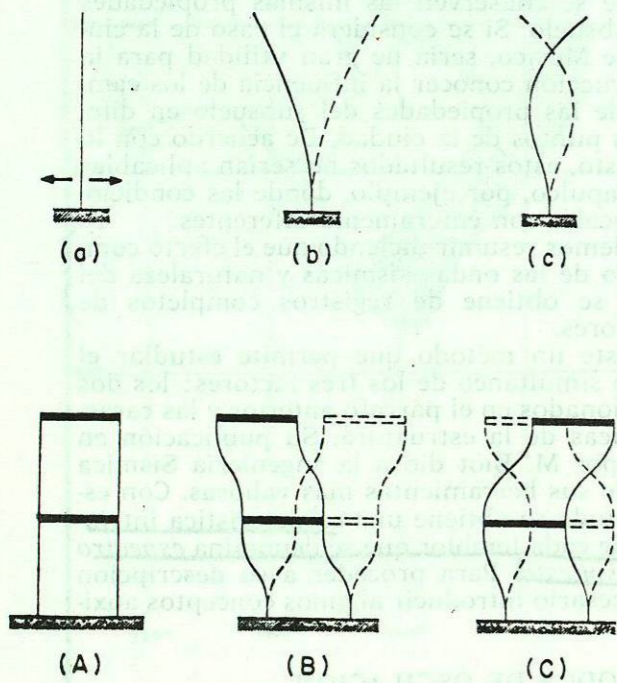


FIG. 2

do (c) tendrá un período más corto que el (b). Lo que sucede en el edificio es análogo y puede extenderse a varios pisos y direcciones.

Si el movimiento aplicado a la base de la estructura produce una vibración como (B) en la figura, el efecto será diferente que si produce una vibración como (C). En general un temblor produce los dos simultáneamente, pero los dos efectos separados se pueden combinar obteniéndose el efecto total.

Con estos antecedentes pasamos a comentar los espectros de respuesta.

ESPECTROS DE RESPUESTA

Desde el punto de vista de la construcción podemos definir espectro de respuesta de un temblor como la gráfica que relaciona periodos de oscilación de varias estructuras de un piso con el efecto máximo que produce en cada una de ellas un movimiento conocido de su base (fig. 3).

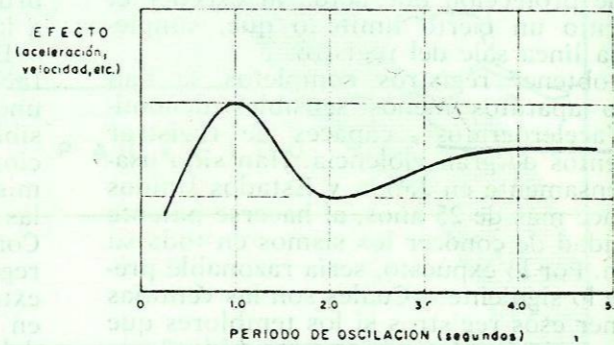


FIG. 3

Como lo indica esta figura, el efecto considerado para el trazo del espectro puede ser aceleración, velocidad, etc.

De acuerdo con nuestra definición de espectro, estas gráficas relacionan entre sí los tres factores que determinan el efecto de un temblor en una estructura, agrupados como sigue:

- 1) Las características de la estructura, expresadas como periodos de oscilación, y
- 2) Las características de las ondas sísmicas en combinación con la influencia de la naturaleza del terreno, lo que se obtiene de los registros de temblores.

Se hace notar que los espectros son también aplicables a estructuras de varios pisos aun cuando la definición se refiere a un solo piso; los diversos periodos de un edificio (tantos como pisos en una dirección) se consideran por separado. En otras palabras, para el uso del espectro, el edificio de varios pisos se descompone en varios edificios de un piso, cada uno con período igual a uno de los periodos de la estructura original.

Daremos a continuación varios ejemplos de diferentes interpretaciones que tiene el espectro. Refiriéndonos a la fig. 3, que presenta un caso hipotético, podemos observar lo siguiente:

- a) El espectro comprende a *todos* los edificios que se quiera, *definidos por sus periodos de oscilación*, siempre que el movimiento de la base haya sido el mismo para todos ellos.
- b) Si se consideran dos construcciones A y B de la misma clase y de un piso, cuyos periodos son 1.0 y 2.0 segundos respectivamente, el espectro indica que el "efecto" será doble en B que en A.
- c) Si un edificio de varios pisos tiene periodos de oscilación de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 segundos, el "efecto" a que se refiere el espectro puede tomarse de la gráfica para cada uno de esos valores y combinarse para obtener el efecto total.

Los espectros de los temblores proporcionan el medio más eficaz que se conoce actualmente para el diseño adecuado de toda clase de construcciones en zonas afectadas por movimientos sísmicos. Como su empleo en la práctica exige el registro de temblores, la aplicación del método descrito está más desarrollada en los países donde se han instalado mayor número de registradores. En el nuestro está aún en sus primeras etapas ya que se cuenta con acelerógrafos únicamente en la ciudad de México y su instalación fue posterior al temblor de 1957.

AMORTIGUAMIENTO

Más adelante se mencionan espectros calculados a partir de registros de temblores ocurridos. Su tratamiento hace necesario introducir un concepto de amortiguamiento que constituye otra de las características de las estructuras cuya importancia es fundamental para estudiar el comportamiento de la estructura bajo la acción sísmica.

Se entiende por amortiguamiento la capacidad de una estructura para disipar una parte de la energía que el sismo le comunica; es decir, esta parte de la energía total no se transforma en movimiento de la estructura sino que se pierde, transformándose principalmente en calor.

El amortiguamiento proviene de las fuerzas que se oponen al movimiento, como son la resistencia del aire, las fuerzas de fricción en las diversas superficies de contacto entre partes de la estructura, la fricción interna de los materiales, así como de la devolución de energía al terreno.

El grado de amortiguamiento es diferente en cada estructura. Conviene por tanto adoptar una unidad de medida del amortiguamiento que permita comparar directamente el de diversas construcciones. A ello obedece que

suela expresarse el amortiguamiento como una fracción de la unidad denominada amortiguamiento crítico.

Supongamos un sistema oscilatorio constituido por un péndulo simple como muestra la fig. 4a.

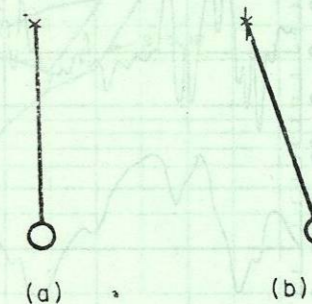


FIG. 4

En la fig. 4b se muestra el mismo péndulo que ha sido desplazado hasta una posición desde la que se le deja oscilar libremente. Puesto que en este caso únicamente la resistencia del aire se opone al movimiento, el número de oscilaciones del péndulo, hasta llegar a su posición de equilibrio, será considerable si se compara con el número de oscilaciones del mismo péndulo sumergido parcialmente en un líquido, como se muestra en la fig. 5.

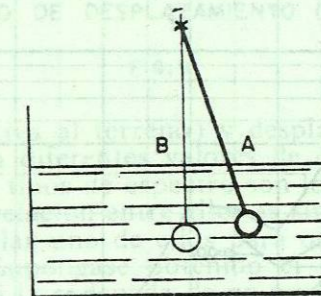


FIG. 5

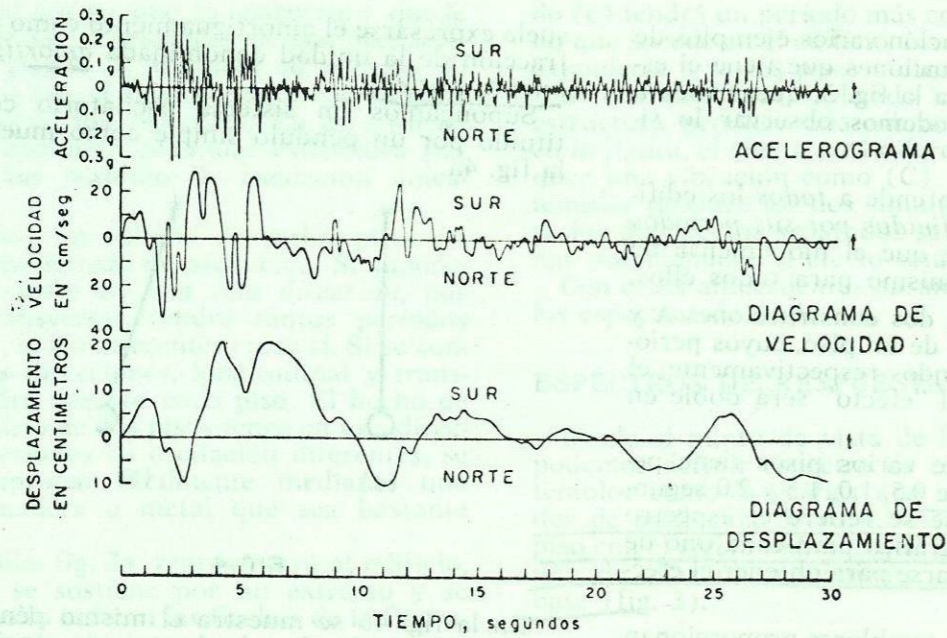
Por otra parte, el número de oscilaciones será menor entre más viscoso sea el líquido usado. Este tipo de amortiguamiento, ligeramente idealizado, se denomina viscoso o lineal y la fuerza que se opone al movimiento es proporcional en cada momento a la velocidad con que el péndulo se desplaza. Es decir,

$$F = cv$$

donde F = fuerza que se opone al movimiento

c = coeficiente de proporcionalidad que depende de la viscosidad del líquido

v = velocidad del péndulo (variable a lo largo de su recorrido)



TEMBLOR DE EL CENTRO, CALIFORNIA
MAYO 18 DE 1940. COMPONENTE N-S

FIG. 6

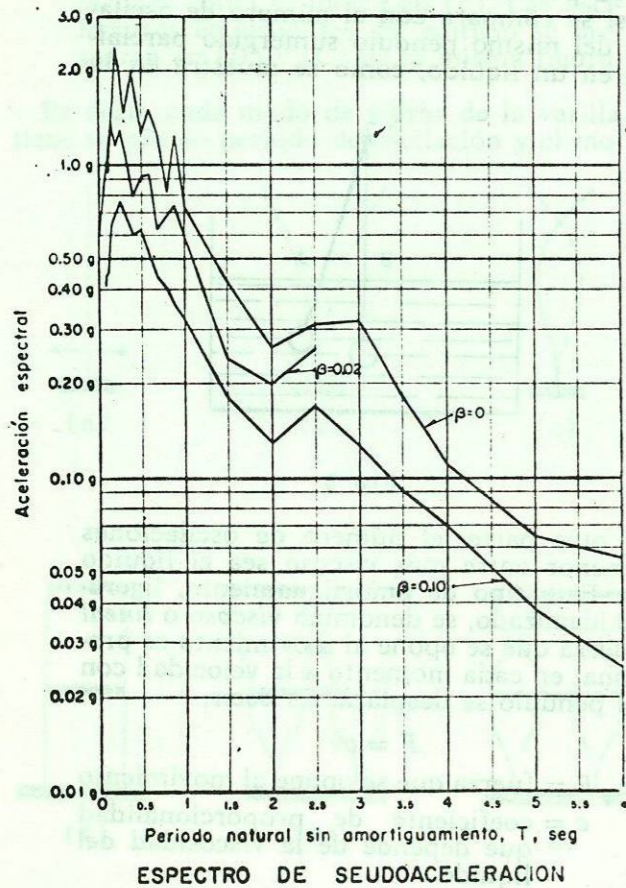


FIG. 7

Supóngase que en el recipiente de la fig. 5 se usa un líquido cuya viscosidad tiene el mínimo valor necesario para que al dejar el péndulo libre desde la posición A, no llegue a pasar a la izquierda de la posición B de equilibrio sino se aproxime asintóticamente a ella. En estas condiciones ya no existe movimiento oscilatorio. El coeficiente que corresponde a este líquido se denomina crítico y se designará aquí como c_{cr} .

Según lo que antecede, si $c/c_{cr} < 1$ hay oscilación, mientras que si $c/c_{cr} \geq 1$ no la hay. El grado de amortiguamiento que corresponde a c_{cr} se denomina amortiguamiento crítico, y al cociente c/c_{cr} se le llama grado o porción de amortiguamiento.

Aunque en el ejemplo del péndulo (fig. 5) el amortiguamiento es producido por el líquido, el concepto de amortiguamiento crítico no está limitado a este tipo de fuerza que se opone al movimiento sino incluye otras causas de absorción de energía.

La importancia del amortiguamiento se deriva de que aun una pequeña fracción del crítico en una estructura reduce considerablemente el efecto a que se hace mención en la fig. 3.

ESPECTROS COMUNMENTE EMPLEADOS

En la parte superior de la fig. 6 se reproduce la componente norte-sur de la aceleración del terreno durante el temblor ocurrido

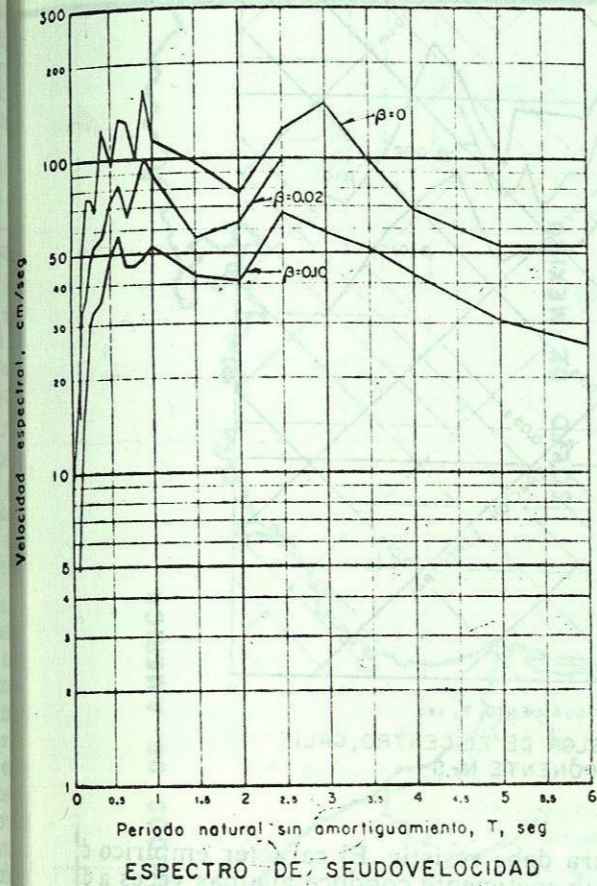


FIG. 8

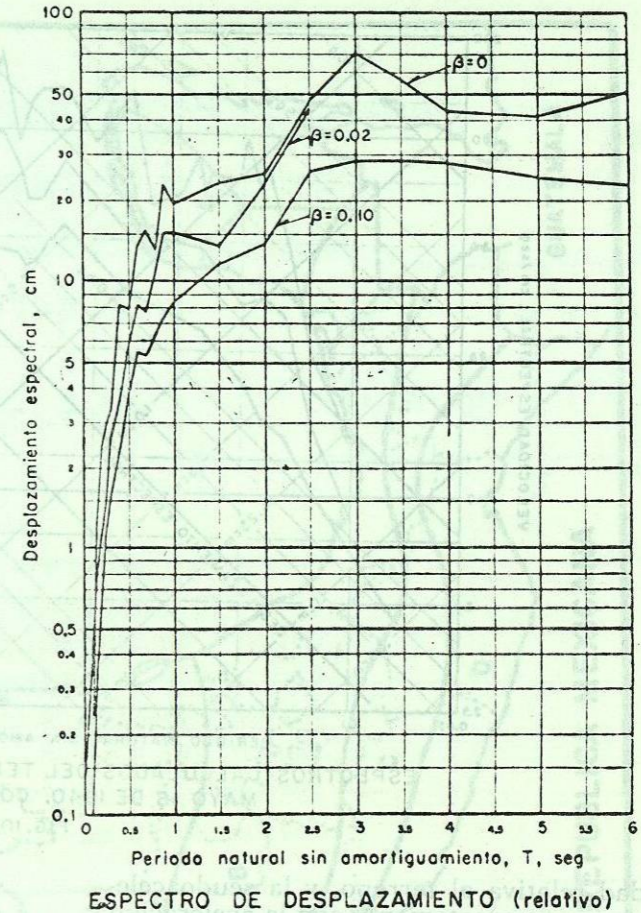


FIG. 9

el 18 de mayo de 1940 en la población de El Centro, California. En la parte media se reproduce la curva de velocidad obtenida por integración de la gráfica registrada por el acelerógrafo; y en la parte inferior se muestra la de los desplazamientos del terreno obtenida de la anterior por igual procedimiento. En esta figura se aprecia que la aceleración horizontal del terreno alcanzó un tercio de la aceleración de la gravedad.

Este temblor es el más fuerte del que se ha obtenido un registro completo. Sin embargo, aun en las últimas décadas han ocurrido sismos de mayor intensidad, como el de Assam (India) en 1950, el de Agadir (Marruecos) en 1960 y los de Chile en el mismo año; en estos casos no hubo en el lugar aparatos adecuados para su registro.

Del acelerograma de la fig. 6 se han calculado los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento que muestran las figs. 7 a 9; éstos corresponden respectivamente a valores máximos de la pseudoaceleración (aproximadamente igual a la aceleración absoluta), pseudo-velocidad (aproximadamente igual a la ve-

locidad relativa al terreno) y desplazamiento relativo para diferentes valores de c/c_{cr} .

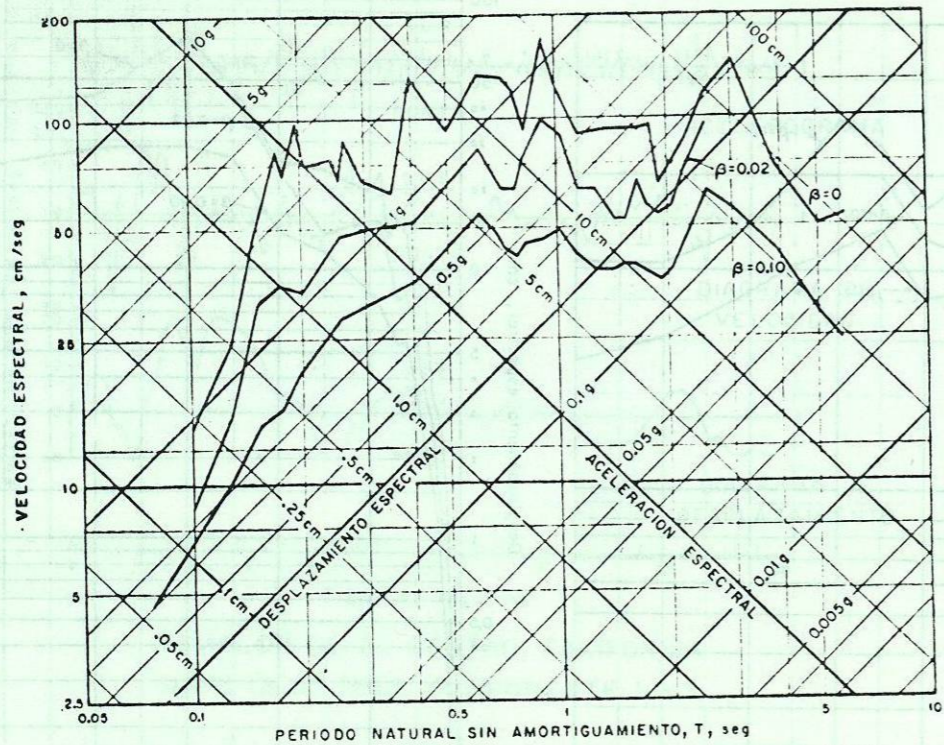
Estos tres tipos de espectro son los más comunes y la relación entre ellos es simple. Basta con calcular uno de ellos para obtener los otros dos. Supóngase obtenido el de pseudo-velocidad: si la ordenada de un punto de este espectro se multiplica por $2\pi/T$, siendo T (período) la abscisa correspondiente, se obtiene el punto del espectro de aceleraciones para igual valor de T .

Para obtener el de desplazamientos relativos (entre estructura y terreno) es suficiente multiplicar en forma análoga por $T/2\pi$.

El empleo de los términos *seudoaceleración* y *seudovelocidad* se ha generalizado en la literatura respectiva para indicar que la simple relación entre estos espectros incluye una aproximación, que usualmente tiene poca importancia, que facilita la conversión de uno a otro y que además permite incluir los tres espectros en una sola gráfica como se muestra en la fig. 10 en escalas logarítmicas. En rigor los tres espectros representan en distintas formas el de desplazamientos; la pseudo-velocidad es en promedio aproximadamente igual a la

62

63



ESPECTROS CALCULADOS DEL TEMBLOR DE EL CENTRO, CALIF. MAYO 18 DE 1940. COMPONENTE N-S

FIG. 10

velocidad relativa al terreno, y la pseudoaceleración coincide exactamente con la aceleración máxima absoluta de la estructura sólo cuando esta carece de amortiguamiento; de lo contrario difiere de ella, pero la diferencia no adquiere valores importantes excepto para estructuras fuertemente amortiguadas o de muy corto período de vibración.

En las figs. 7 a 10 se observa la marcada influencia que el amortiguamiento de una estructura tiene sobre el efecto ocasionado por un sismo; un amortiguamiento tan bajo como 2% del crítico reduce significativamente las ordenadas de los espectros mencionados, especialmente cuando se trata de estructuras de corto período natural de vibración.

CONCLUSIONES

- 1) Los métodos habituales de diseño por sismo se basan en el uso de un coeficiente para el cálculo de las fuerzas que la estruc-

tura debe resistir. El carácter empírico de este coeficiente conduce algunas veces a diseños inseguros, y con frecuencia a estructuras de costo mayor de lo necesario.

La aplicación del método descrito resulta en diseños más adecuados en cada caso, es decir, más seguros y menos costosos.

- 2) El empleo de espectros tiene la gran ventaja de combinar cuantitativamente los factores que tienen influencia sobre los efectos de movimientos sísmicos. A cambio, exige amplio conocimiento de las condiciones locales que únicamente se puede adquirir mediante el empleo de instrumentos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Al lector que desee profundizar en el tema se le recomienda el artículo "Fundamentos de Ingeniería Sísmica" por G. W. Housner del Instituto Tecnológico de California, publicado en la Revista *Ingeniería*, julio de 1962.

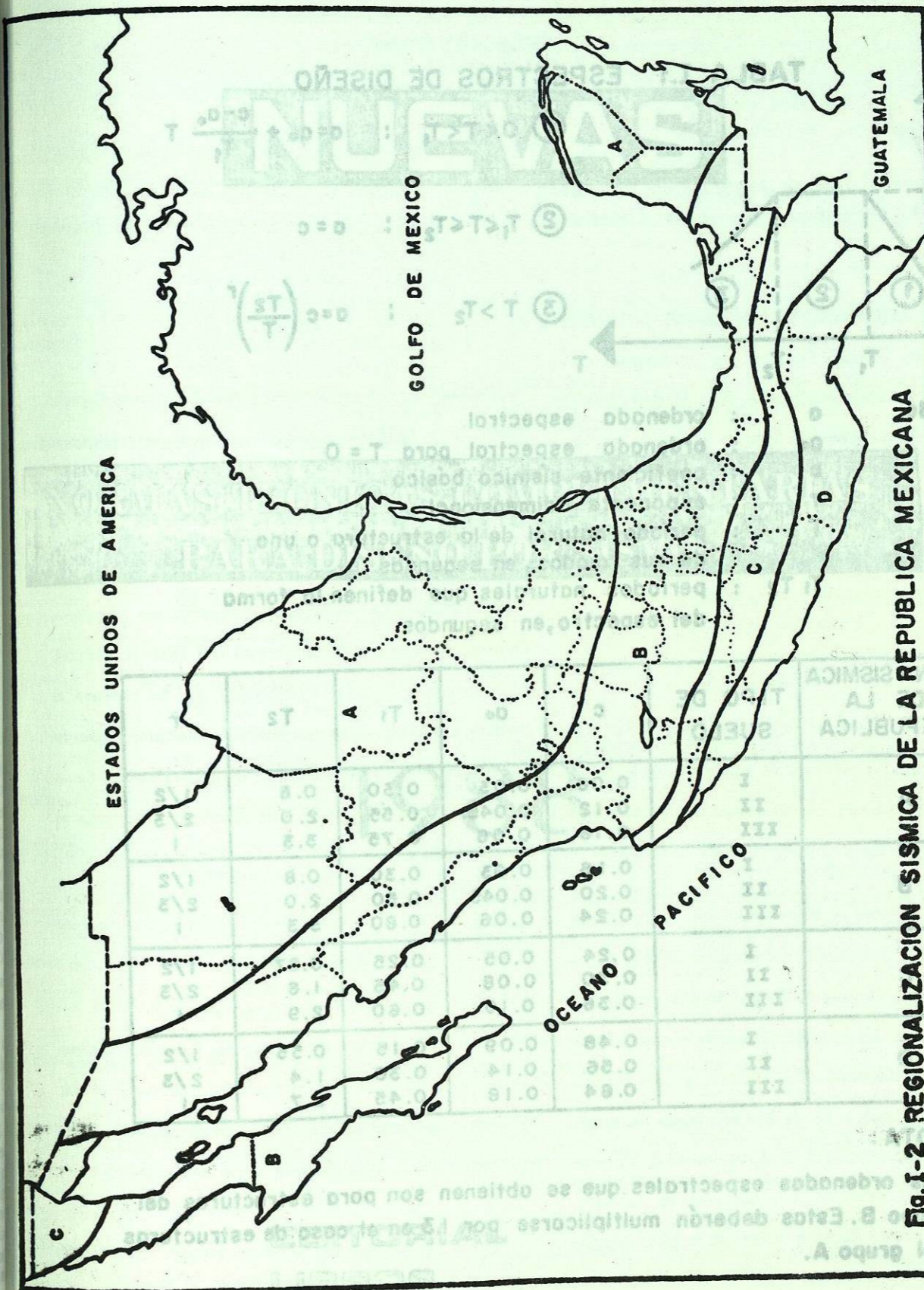
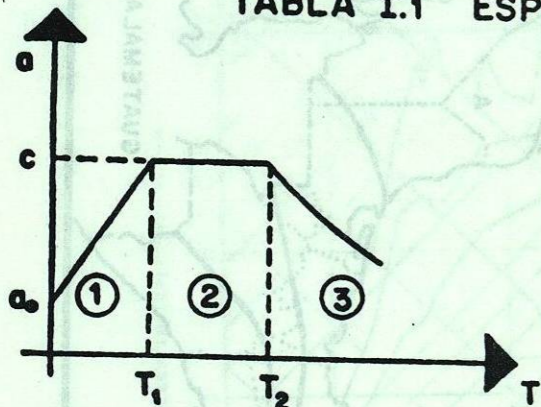


Fig. 1-2 REGIONALIZACION SISMICA DE LA REPUBLICA MEXICANA

TABLA I.1 ESPECTROS DE DISEÑO



① $0 < T < T_1$: $a = a_0 + \frac{c - a_0}{T_1} T$

② $T_1 < T < T_2$: $a = c$

③ $T > T_2$: $a = c \left(\frac{T_2}{T} \right)^r$

- donde:
- a : ordenada espectral
 - a₀ : ordenada espectral para T = 0
 - c : coeficiente sísmico básico
 - r : exponente adimensional
 - T : período natural de la estructura o uno de sus modos, en segundos
 - T₁ T₂ : períodos naturales que definen la forma del espectro, en segundos

ZONA SISMICA DE LA REPUBLICA	TIPO DE SUELO	c	a ₀	T ₁	T ₂	r
A	I	0.08	0.03	0.30	0.8	1/2
	II	0.12	0.045	0.55	2.0	2/3
	III	0.16	0.06	0.75	3.3	1
B	I	0.16	0.03	0.30	0.8	1/2
	II	0.20	0.045	0.50	2.0	2/3
	III	0.24	0.06	0.80	3.3	1
C	I	0.24	0.05	0.25	0.67	1/2
	II	0.30	0.08	0.45	1.6	2/3
	III	0.36	0.10	0.60	2.9	1
D	I	0.48	0.09	0.15	0.55	1/2
	II	0.56	0.14	0.30	1.4	2/3
	III	0.64	0.18	0.45	2.7	1

NOTA:

Las ordenadas espectrales que se obtienen son para estructuras del grupo B. Estas deberán multiplicarse por 1.3 en el caso de estructuras del grupo A.

NUEVAS

NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR SISMO

1988

EDITORIAL LIBROS ECONOMICOS