

Recibido: Diciembre 8 de 1997

Aceptado: Junio 10 de 1998

Zonificación sísmica de la ciudad de Tapachula, Chiapas

Robertoni Cruz Díaz*&

M. Ramírez**

A. Albores*

J. Rodríguez*

J. García**

F. Rivero**

ABSTRACT

A proposal for seismic zoning, maps of curves of *isoperiods* and *design spectrum* are presented in this work as a first stage of a project for the study of seismic risk for the city of Tapachula.

The dynamic characteristics of the soil in the area under study are derived from the analysis of information on regional seismicity, geological, geotechnical, and topographic characteristics and, basically, information on the measuring of environmental vibration in 42 places within the city.

Key Words: Regional seismicity, vibration, Tapachula

RESUMEN

Se presenta una propuesta de *zonificación sísmica*, mapa de curvas de *isoperíodos* y *espectro de diseño*, como primera etapa de un proyecto de estudio de riesgo sísmico para la ciudad

& Autor para correspondencia

* Facultad de Ingeniería Civil, Campus I, Universidad Autónoma de Chiapas.
Blvd. Belisario Domínguez, Km. 1081, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. C.P. 29000

** Universidad Autónoma Metropolitana

de Tapachula. Las características dinámicas del suelo de la zona en estudio son obtenidas partiendo del análisis de información de sismicidad regional, características geológicas, geotécnicas, topográficas y, fundamentalmente, de la medición de vibración ambiental en cuarenta y dos sitios dentro de la mancha urbana.

Palabras clave: Sismicidad regional, vibración, Tapachula.

INTRODUCCIÓN

Tapachula, segunda ciudad de importancia en el estado de Chiapas, tanto en lo económico como en lo social, se encuentra enmarcada en una zona de alta sismicidad, producto de fallas locales y movimientos asociados al fenómeno de subducción en la costa del Pacífico, no obstante, carece de toda información propia que permita el diseño racional de construcciones resistentes a sismos. En un esfuerzo conjunto, la Universidad Autónoma de Chiapas y la Universidad Autónoma Metropolitana, realizan una propuesta de Zonificación Sísmica y parámetros para el diseño sismo-resistente, partiendo de un estudio de la zona por Vibración Ambiental.

Geología regional

Tapachula está localizada a los 92°16' de longitud oeste y a los 14°55' de latitud norte en la zona aluvial de la planicie costera de la parte más al sur del estado de Chiapas, a 28 Km del Océano Pacífico. A 3 Km al norte, se ubican los flujos lejanos del volcán Tacaná, último volcán situado al norte de la cadena volcánica del arco centroamericano asociada como resultado de la subducción de la placa de Cocos debajo de la placa Caribe. Entre 40 y 75 Km. de distancia al norte de la ciudad, está localizado el borde entre las placas Caribe y Norteamérica, marcado por una serie de ramas

subparalelas de la falla activa Polochic (Burkart, 1978; De la Rosa *et al.*, 1989; Suter *et al.*, 1995). El borde entre las placas Cocos y Caribe es la trinchera centroamericana, donde la placa Cocos esta subducida debajo de la placa del Caribe. La subducción, a través de este borde, da como resultado la cadena de volcanes del arco centroamericano, que incluyendo el volcán Tacaná y la zona de sismicidad Beniof-Wadati asociados con la subducción, es la responsable de la mayor sismicidad que afecta la región. La punta triple que existe en la intersección de las tres placas no está bien definida, y es probable que el movimiento lateral entre las placas de Cocos y Norteamérica esté distribuido en varias fallas de rumbo más al norte del estado (Whitney, 1996) conocido como la «Zona de fallas de rumbo de Chiapas» (Suter *et al.*, 1995). Las rotaciones y fallamientos asociados con la distribución del movimiento entre las placas es muy complicado y todavía no conocido, pero si se conoce que la deformación está pasando al norte de la falla de Polochic y no afecta la región de Tapachula de manera significativa.

Geología local

Localmente, en Tapachula existen depósitos aluviales correspondientes a las llanuras costeras del sur de Chiapas. Estos sedimentos de grava, arena y limos fueron depositados por los tres ríos que cruzan la ciudad. Geológicamente, el área en la cual se ubica Tapachula, la conforman rocas de edad terciaria superior y material reciente o del cuaternario. El terciario superior comprende tobas y cuerpos conglomeráticos (boleos) empacados en arcillas de color rojo a naranja y en algunos diques de clastos andesíticos de color gris con matriz piroclástica (ceniza y arena muy fina) (Figura 1). Estos materiales se presentan dentro de una morfología del tipo de lomeríos de mediana altura dentro de un marco general de una planicie costera. El conglomerado

ción, en el sistema de fallamiento de Polochic y en las cunas tectónicas del labio de la placa Caribe, pueden producir movimientos fuertes en la ciudad. La sismicidad que ocurre en la zona Beniof-Wadati de subducción entre las placas Cocos y Caribe, tiene el potencial más alto para producir daños en Tapachula. Ésta resulta porque, primero, la zona de subducción puede producir sismos más grandes que las otras fuentes de sismicidad que afectan la región y segundo, porque de la geometría de la zona de subducción, los hipocentros de esta sismicidad pueden ocurrir directamente debajo de la ciudad. Históricamente, sismos de gran magnitud han ocurrido en la zona Beniof de la trinchera centroamericana en el segmento más al norte, cercana al sitio. Reportes de movimientos sísmicos con intensidades Mercalli iguales o mayores de VI, en el período de 1900 a 1973 (Figuroa, 1973), muestran que más del 32% de éstos corresponden a la zona donde se ubica la ciudad de Tapachula.

McNally and Minster (1981), anotan eventos de $M_s=7.0$ o más como:

14 de diciembre, 1935	$M_s=7.3$
15 de junio, 1943	$M_s=7.0$
28 de junio, 1944	$M_s=7.0$
29 de abril, 1970	$M_s=7.3$

En el estado de Chiapas, durante los meses de abril y mayo de 1970, tuvieron lugar varios sismos en la parte continental del Soconusco, zona del Suchiate y en el océano Pacífico, frente a las costas de la misma región. El evento del 29 de abril de 1970 ha sido descrito por Figuroa (1973) como un evento de $M_L=5.2$ con 32 réplicas el mismo día. Este movimiento fue muy fuerte en todo el estado, donde los efectos correspondieron a los grados VII y V de la escala de Mercalli modificada. El epicentro se localizó a 15.3°N , 92.6°W .

Figuroa (1973) también señala que del primero al 28 de mayo del mismo año ocu-

rrieron otros 29 eventos más grandes que $M_L=4$, siendo el mayor de $M_L=5.4$. Los eventos más fuertes en esta secuencia fueron sentidos en México D.F., con intensidad de III, y en la región de Tapachula con intensidades hasta de VII. Figuroa (1973) también notó un macrosismo destructor que se originó en Chiapas el 25 de Septiembre de 1968, con una magnitud de 6.3 grados en la escala de Richter, al cual dio una intensidad de VIII en la ciudad de Tapachula, y cuyo epicentro se localizó en las mismas coordenadas que el anterior.

El segmento de Tehuantepec, de la trinchera mexicana, está alrededor de 110 Km al noroeste de la ciudad de Tapachula. Aunque es poco conocida la historia de la zona, Nishenko y Singh (1987) indican que probablemente hay suficiente deformación acumulada para producir un sismo de $M_s=8.0$. Este sismo puede pasar en el sudeste del segmento, entonces suficientemente cerca al sitio para producir movimientos fuertes en la superficie.

El sistema de fallamiento asociado con el borde entre las placas Norteamérica y Caribe, el sistema Motagua-Polochic, ha tenido sismos de grandes magnitudes con daños significativos. Ejemplos incluyen el sismo del 4 de febrero de 1976, cerca de la ciudad de Guatemala.

Medición de vibración ambiental

Del análisis de acelerogramas es posible obtener los espectros de respuesta del terreno, mismos que proporcionan con certeza el período natural de vibración para la aceleración máxima registrada; sin embargo, Tapachula no ha contado con equipo acelerográfico que permita conocer su historia sísmica. Otra forma de conocer el período fundamental de vibración es por medio de modelos empíricos analíticos, para los cuales se hace necesario la obtención de parámetros del suelo por medio de sondeos y sus respectivas pruebas de laboratorio; sin embargo, la utilización de este procedimien-

to requiere de recursos económicos importantes.

El terreno siempre vibra con amplitudes tan pequeñas como 10^{-6} a 10^{-7} m. y con períodos de vibración que varían desde algunas décimas de segundo hasta varios segundos. Estos *microtemblores* son causados por el tránsito cercano, máquinas en operación y otros vehículos en movimiento. Puesto que la forma del espectro de un microtemblor es similar a la de un sismo real, esta técnica puede ser empleada para predecir las características dinámicas del lugar (Kanai, 1962).

Así, para obtener los períodos fundamentales del suelo se procedió a realizar mediciones de campo, ubicando puntos a lo largo y ancho de la ciudad a fin de cubrir la mancha urbana y algunos lugares aledaños en donde a futuro se construirán las nuevas estructuras.

Para estas mediciones se utilizó un sistema de registro sismológico integrado por el equipo siguiente:

Grabadora digital de estado sólido KINEMATRICS SSR-1, con resolución de 16 bits, tres canales de acceso y muestreo de 200 mps por canal.

Dos sensores sismológicos de campo KINEMATRICS WR-1, con frecuencia nominal de 20 Hz. y un intervalo de respuesta eficiente de 0.05 a 5.0 s de período.

Computadora portátil para establecer comunicación entre la grabadora y los sensores.

La comunicación y la adquisición de datos se realizaron por medio de los programas *Quick talk* y *Quick look*, de Kinemetrics.

Se ubicaron 42 puntos distribuidos en toda la ciudad, con especial cuidado de

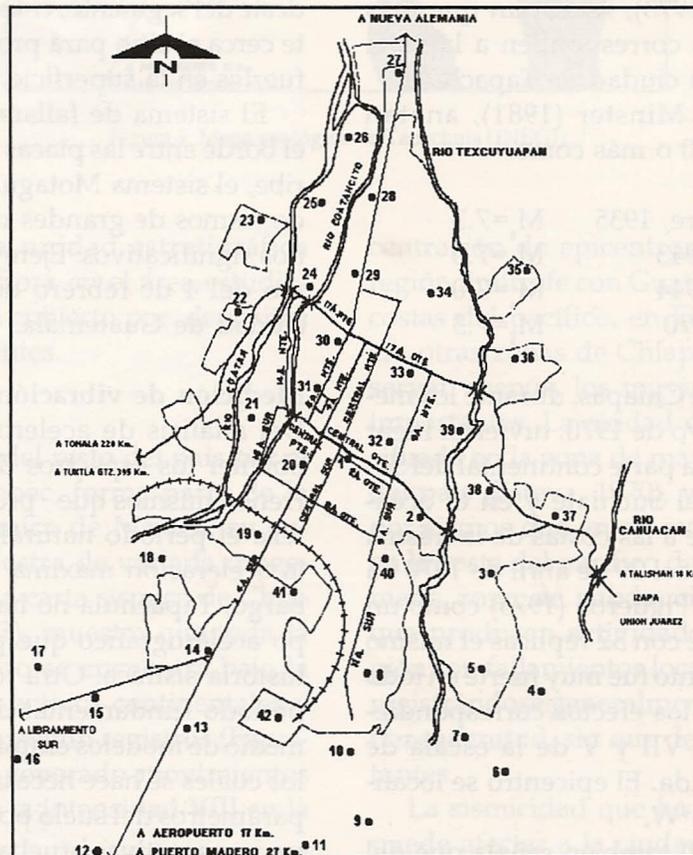


Figura 2. Puntos de medición de vibración ambiental estudiados

cubrir la mancha urbana y zonas de desarrollo futuro (Figura 2), procurando, asimismo, que estos puntos correspondieran a lugares en donde se ubican estructuras importantes, sitios notables o bien lugares en donde se cuenta con estudios de mecánica de suelos.

En cada sitio se registraron veinte eventos continuos por cada componente horizontal, de treinta segundos cada uno, en dirección ortogonal, lo que representa diez minutos de medición en cada punto, utilizándose, en todos los casos, un filtro Butterworth que elimina las frecuencias superiores a 15 Hz.

Con base en los registros obtenidos se elaboraron los espectros de Fourier, mismos considerados para la construcción del mapa de isoperíodos de la ciudad (Ver Figura 4).

Cabe mencionar que para obtener dichos espectros se aplicó la técnica propuesta por Nakamura, mediante la cual se suavizan los espectros con el fin de rectificar las perturbaciones captadas en la medición ambiental y que puedan no corresponder

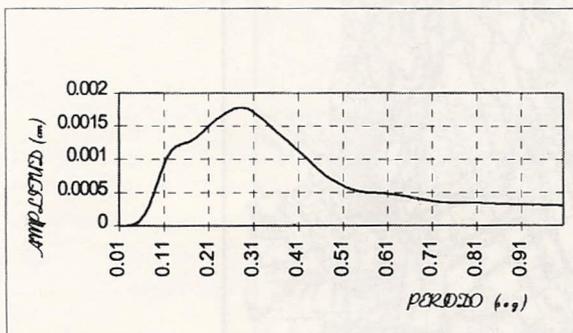


Figura 3. Espectro de Fourier promedio para Tapachula

a la forma natural de vibrar del suelo. En la Figura 3 se muestra el espectro promedio representativo para el suelo de la mancha urbana de Tapachula, señalándose un período natural de vibración $T=0.28$ s. En la Tabla 1 se resumen la ubicación de los puntos en la mancha urbana, así como los

valores de período correspondientes obtenidos.

En la Figura 4 se presenta el mapa de isoperíodos de la ciudad, en el que se plasman los resultados obtenidos por medio de las mediciones de vibración ambiental. Se observa que el valor más alto en la ciudad se localiza en el punto 21, con un período natural de vibración de 0.35 segundos, mismo que corresponde a la zona de depósitos aluviales, en donde los períodos suelen ser más largos dadas las características de este material; en tanto que el valor más bajo, de 0.13 segundos, se registró en los puntos 1, 2 y 14. El registro del punto 3 fue eliminado por encontrarse contaminado.

En forma adicional, y a fin de comprobar los resultados obtenidos en campo, se calculó el período natural de vibración del terreno en el único punto que se dispuso de información geotécnica proveniente del sondeo profundo localizado en el lugar donde se ubicará el Tribunal de Justicia (punto 41). El cálculo se efectuó utilizando el modelo elástico de propagación de ondas de corte, suponiendo incidencia vertical de ondas S. De acuerdo con este modelo y considerando los depósitos como formados por un solo estrato, el período del terreno puede obtenerse mediante la expresión:

$$T = 4\sum (H_i / V_{s_i})$$

en que:

$$V_s = (G/\rho)$$

donde:

$$G = [3230 (2.97 - e)^2 \sigma_0^{0.5}] / (1 + e)$$

$$\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$$

$$\sigma_1 = H(\gamma)$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 (K_v)$$

$$K_v = 1 - \sin \phi$$

H = Espesor del iésimo estrato, en m

V_s = Velocidad de ondas de cortante en m/s

G = Módulo de cortante

ρ = Densidad del material

e = Relación de vacíos

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Esfuerzos en el suelo

γ = Peso específico del material, kg/m³

Tabla 1. Periodos obtenidos por Vibración Ambiental

No.	Localización	T (seg.)	No.	Localización	T (seg.)
1	1ª sur entre central ote. y 2ª ote.	0.13	22	Hotel Loma Real	0.29
2	Av. central ote. y base militar	0.13	23	Fracc. El Porvenir	0.29
3	Av. Tuxtepec. Panteón Jardín		24	IMSS	0.30
4	Seminario. Fracc. Los Laureles	0.24	25	Fracc. Las Américas	0.27
5	C. Jacaranda y Priv. Las Palmas	0.25	26	Fracc. Xochimilco	0.29
6	Col. Santa Clara	0.28	27	Carr. Nva. Alemania, Club Camp.	0.29
7	Col. Esmeralda	0.24	28	39 pte. Col. 5 de Febrero	0.30
8	28 ote. y 13 av. Sur	0.31	29	27 pte. Col. 5 de Febrero	0.13
9	Col. Indeco Cebadilla	0.22	30	15 pte. y 6ª norte (centro)	0.30
10	40 oriente y 11 sur	0.29	31	Parque Central	0.28
11	Fraccionamiento Las Palmas	0.30	32	5ª Av. norte 3ª calle oriente	0.28
12	Estadio Olímpico	0.27	33	15 calle oriente 5ª Av. norte	0.32
13	Internado. Carretera Pto. Madero	0.31	34	Colonia Aceves	0.28
14	Feria Tapachula	0.13	35	Fracc. Lomas del Tacaná	0.33
15	COBACH (Plantel 8)	0.29	36	Col. Lomas de Sayula	0.29
16	Teatro de la Ciudad	0.28	37	Fracc. Bonanza. Carr. Talismán	0.31
17	Fracc. El Carmen	0.29	38	Col. Fco. Villa	0.32
18	Prol. 12 Av. Sur y Río de la Plata	0.30	39	Col. Barrio Nuevo	0.30
19	18 pte. y calle Río Papaloapan	0.19	40	Parque Niños Héroes	0.27
20	4ª calle pte. y 4ª calle sur	0.28	41	Cam. del Zapato y 22 calle pte.	0.14
21	4ª calle pte. y 18 av. sur	0.35	42	Fracc. Villa las Flores	0.31

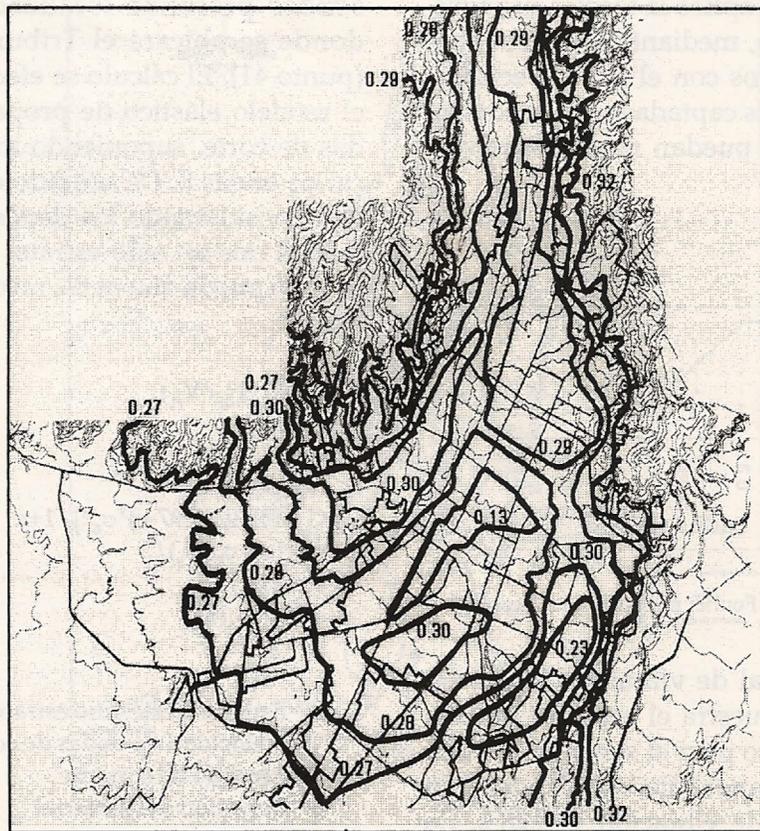


Figura 4. Mapa de isoperíodos propuesto para Tapachula.

ϕ = Ángulo de fricción interna del material, en grados.

El modelo analítico empleado reporta un período natural de vibración de 0.17 segundos, mientras que por medición de vibración ambiental el período es de 0.14 segundos, lo que representa una muy buena precisión, sobre todo si se considera la hipótesis en que se fundamenta el modelo analítico.

Zonificación sísmica

Como se señaló, el período natural de vibración más alto encontrado fue de 0.35 segundos. Si se considera el mismo criterio que en el Distrito Federal, donde valores inferiores a 0.4 segundos corresponden a terreno firme, entre 0.4 y 1.0 segundos a

terreno intermedio y períodos superiores a 1.0 a terreno blando, se puede concluir, desde el punto de vista dinámico, que la mancha urbana de la ciudad está desplantada sobre terreno firme o terreno tipo uno. En la Figura 5 se muestra el mapa que define la propuesta de zonificación sísmica para la ciudad de Tapachula.

Propuesta de coeficiente sísmico de diseño

Tomando en cuenta los resultados antes descritos y considerando las expresiones tradicionales para la construcción de espectros de diseño, es posible proponer un valor de coeficiente sísmico para el tipo de terreno que se tiene en la ciudad. Dado que el Reglamento de Construcciones de Tapa-

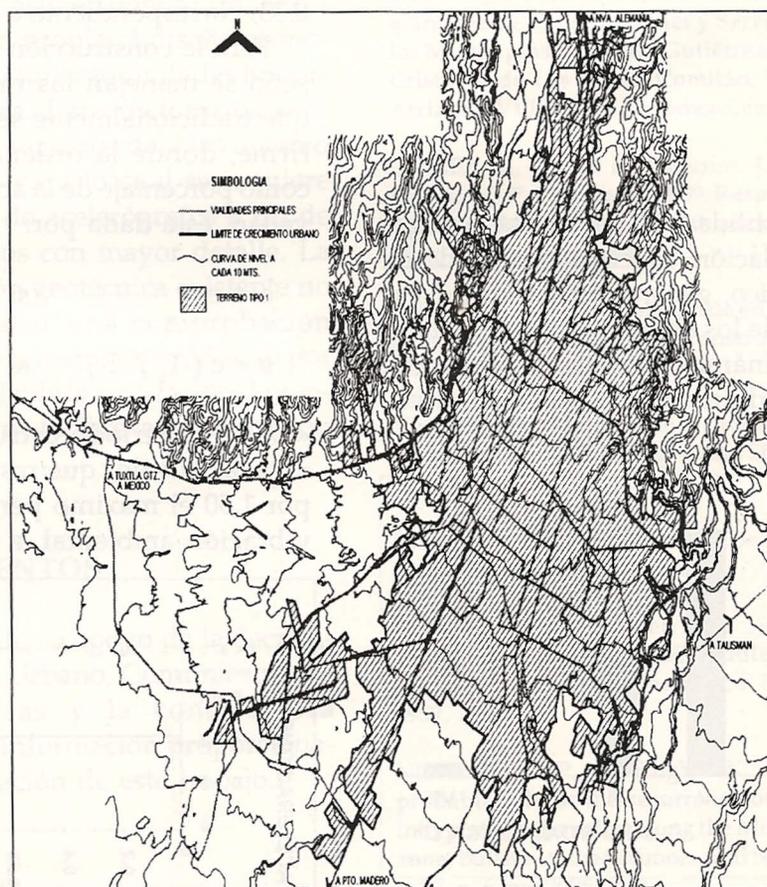


Figura. 5. Mapa de zonificación sísmica de Tapachula (suelo tipo I)

chula (1971) no especifica parámetros de diseño para confiar en la seguridad estructural y no existen registros disponibles de sismos importantes, ni evidencias de daños causados en construcciones que permitan estimar la intensidad sísmica; se presenta una propuesta basada en la relación *Intensidad de Mercalli y Coeficiente de resistencia K*, (Jara, 1989), obtenida a partir del estudio de daños producidos por los sismos de 1985 en la ciudad de México (Iglesias, 1989). Se establece la relación entre estos valores (Tabla 2), donde el coeficiente de cortante basal, correspondiente a la falla, puede igualarse al coeficiente sísmico redu-

Tabla 2. Escala de Mercalli Modificada vs Coeficiente de Resistencia

cido por ductilidad $c/Q=K$. Cabe agregar que dicha relación, asociada al método de análisis estático, genera resultados del orden de 72% de los obtenidos con el método de análisis dinámico para edificios de concreto de mediana altura (Gómez *et al.*,

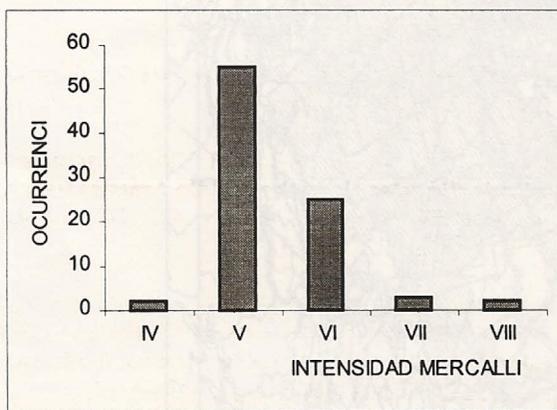


Figura 6. Ocurrencia de sismos en el Soconusco 1900-1993 (Figuroa, 1973)

1989).

De información obtenida del catálogo de macrosismos de Figueroa (1973), se deduce que el 62% de los sismos ocurridos en Tapachula y lugares cercanos han tenido intensidades de V, y el 28%, intensidades de VI (Figura 6). Aunque la ocurrencia de eventos con intensidad VI o mayor es relativamente baja, para cubrir incertidumbres, dada la escasez de registros, se adopta este valor como el de diseño, para el que $K=0.06$. Si se considera un factor de reducción por ductilidad $Q=4$, se tiene:

$$C = \frac{4 \times 0.06}{0.72} = 0.33$$

De acuerdo con lo anterior, el coeficiente de diseño propuesto para Tapachula es de 0.33, correspondiente a terreno tipo I.

Para la construcción del espectro de diseño se manejan las mismas expresiones que tradicionalmente se usan para terreno firme, donde la ordenada espectral «a», como porcentaje de la aceleración de la gravedad, está dada por:

$$a = c \quad \text{si } T < T_b$$

$$a = c \left(\frac{T_b}{T} \right)^r \quad \text{si } T > T_b$$

«T» es el período estructural de interés, « T_b », es el valor que resulta de multiplicar por 1.50 el máximo período obtenido con vibración ambiental, a fin de considerar,

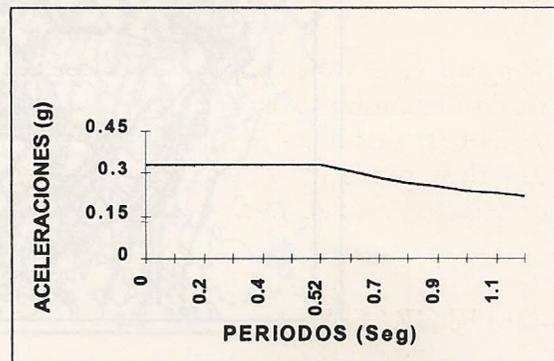


Figura 7. Espectro de respuesta propuesto

conservadoramente, posibles errores en la estimación del período natural de las estructuras. Por lo que se tiene: $1.5 \times 0.35 = 0.52$ segundos.

De las consideraciones anteriores, se propone para la ciudad de Tapachula un espectro de diseño, para intensidad máxima de VI, que se muestra en la Figura 7, en el cual la aceleración máxima es de 0.33 g., misma que es constante desde cero hasta un período del terreno de 0.52 segundos. Con valores de período mayores a 0.52 segundos, esta aceleración varía en forma descendente a razón de $(T_b/T)^{0.5}$.

CONCLUSIÓN

Los resultados de este trabajo deben considerarse como un primer intento de incorporar información propia al diseño sismo-resistente de estructuras en ciudades importantes de Chiapas. Para mejorarlos será necesario obtener registros del movimiento local del terreno, para lo cual se requiere de la instalación de acelerógrafos a fin de posibilitar estudios con mayor detalle. La escasa información geotécnica existente no ha permitido hacer una comprobación completa de los resultados obtenidos, es por lo tanto recomendable la realización de sondeos profundos que facilite la confirmación de éstos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el valioso apoyo de la Secretaría de Desarrollo Urbano, Comunicaciones y Obras Públicas y la constructora Kukulcán por la información proporcionada para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

ALONSO, G., Cruz, R., Santos, F., Ramírez, M., Ruiz,

M., Iglesias, J., 1994, *Zonificación Sísmica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México*. Universidad Autónoma de Chiapas. Universidad Autónoma Metropolitana, 30 p.

BURKART, B., 1978, *Offset Across the Polochic fault of Guatemala and Chiapas, México*; *Geology*, v6, n6, pp. 328-332.

DE LA ROSA Z., J. L., Eboli M. A., y Dávila S. M., 1989, *Geología del Estado de Chiapas*, Comisión Federal de Electricidad, Superintendencia de Estudios Zona Sureste, Publicación G-10, 192 p.

ESTEVAL, y Ordaz M., 1988, *Riesgo Sísmico y Espectros de Diseño en la República Mexicana*, Memoria del III Simposio Nacional sobre Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco, pp 420-458.

FIGUEROA A. J., 1973, *Sismicidad en Chiapas*, Facultad de Ingeniería Publicación 316, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., 54 p.

GOBIERNO DEL ESTADO DE CHIAPAS, 1971, *Reglamento de Construcciones y Servicios Urbanos de los Municipios de Tuxtla Gutiérrez, Tapachula, San Cristóbal de Las Casas, Comitán, Tonalá, Huixtla, Arriaga y Villaflores*. Periódico Oficial.

GÓMEZ A., Ortega R., Guerrero J. J., González E., Paniagua J. P. e Iglesias J., 1989, *Response and Design Spectra Obtained from Earthquake Damage Building*, *Earthquake Spectra*, V5, n1: 113-120.

IGLESIAS J., 1989, *Evaluación de edificios de concreto en la ciudad de México*, *Construcción y Tecnología*, IMCYC, V2, n15: 19-26.

JARA, M., Aguilar, J., Guerrero, J.J. e Iglesias, J., 1989, *Vulnerabilidad Sísmica de la Ciudad de México*, VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco, Guerrero, D76-D86.

KINEMETRICSSYSTEMS, 1988, *Seismic Workstation Software*, Pasadena, California.

McNALLY, K., y Minster, J. B., 1981, *Nonuniform seismic slip rates along the middle America trench*; *Journal of Geophysical Research*, v. 86, n. B6, pp. 4949-4959.

NISHENKO, S. P., and Singh, S. K., 1987, *Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone*; *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 77, n. 6, pp. 2095-2114.

SUTER, M., Quintero Legorreta, O., López Martínez,

M., Aguirre Díaz, G., and Farrar, E., 1995, The Acambay graben: Active intraarc extension in the trans-Mexican volcanic belt, Mexico; *Tectonics*, v. 14, n. 5, pp. 1245-1262.

WHITNEY, R. A., 1996, Sismicidad de la trinchera mexicana, sus fallas secundarias y otras fuentes de sismicidad en el sur de México; *Memorias del II Seminario Interuniversitario de Zonificación Sísmica*, Toluca, México, Abril 26, 1996.