

01161



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

“ DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS EN PILAS
DE PUENTES URBANOS ”

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)**

P R E S E N T A:

JOSÉ LUIS ESTRADA RUIZ

DIRECTOR: Dr. EDUARDO REINOSO ANGULO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F., SEPTIEMBRE 2004.





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	1
FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRESENCIA DE DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS	3
Periodo de vibrar de las pilas	
Efecto del paso de las ondas	
Efectos de sitio	
DESCRIPCIÓN DE ESTUDIO REALIZADO Y DE ESTRUCTURAS ANALIZADAS	5
Modelado y análisis de las pilas	
Registros de acelerogramas empleados	
Efecto de la interacción entre las pilas (golpeteo)	
<i>Consideraciones tomadas en cuenta para modelar el efecto del golpeteo</i>	
ANÁLISIS DE LA RESPUESTA OBTENIDA PARA LOS MODELOS DE ESTUDIO	12
Variación de la respuesta con respecto al ángulo de arribo de las ondas	
Variación de la respuesta con respecto al periodo de vibrar de las pilas	
Análisis de la respuesta obtenida en cada sitio de manera general	
<i>Sitio Secretaría de Comunicaciones y Transportes</i>	
<i>Sitio Central de Abastos</i>	
<i>Sitio Viveros</i>	
<i>Sitio La Unión, Gro.</i>	
Comparación de las respuestas obtenidas en los sitios estudiados	
Longitud mínima de apoyo de elementos de la superestructura de puentes	
CONCLUSIONES	31
RECONOCIMIENTOS	33
REFERENCIAS	33
APÉNDICE A. Diagrama de flujo del análisis dinámico realizado	34
APÉNDICE B. Tablas de resultados obtenidos en cada sitio	37
APÉNDICE C. Velocidad de las ondas superficiales en sitios de suelo blando en el valle de México	40

DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS EN PILAS DE PUENTES URBANOS

RESUMEN

La presencia de desplazamientos relativos entre las pilas de un puente, originada por la diferencia en las respuestas de cada pila sometida a la acción de un sismo, puede llegar a producir golpeteo en las travesaños de la superestructura y eventualmente el colapso de la misma por la pérdida de apoyo, lo que significaría no solo las pérdidas directas en la infraestructura y posibles pérdidas de vida, sino la suspensión de operación de la vialidad provocando un mayor impacto socioeconómico.

Este estudio se enfoca a la determinación de la longitud necesaria de apoyo de travesaños de la superestructura a partir de la respuesta observada de los desplazamientos relativos que se presentan entre las pilas de un puente estructurado a base de claros simplemente apoyados.

Puesto que para la obtención de tales desplazamientos se toman en cuenta varios parámetros como son la longitud del claro entre pilas y el periodo de vibrar de las mismas, la propuesta de longitud necesaria de apoyo está en función de tales parámetros.

INTRODUCCIÓN

A partir de los sismos presentados en los últimos treinta años, se ha observado que estructuras especiales, como es el caso de puentes, han sufrido daños importantes.

Fue a partir del sismo de San Fernando en 1971 donde se presentaron estos daños, por lo que se tomaron medidas corrigiendo las normas de diseño actuales. Al presentarse los sismos de Loma Prieta (1989) y Northridge (1994) ambos en California, ocurrieron nuevos daños, lo que condujo a una nueva revisión de las normas de diseño. En 1995 en Kobe, Japón, ocurrió otro sismo de magnitud importante, que causó gran daño en la ciudad, especialmente en estructuras especiales. Dentro de los daños registrados en puentes o vialidades elevadas, se tienen los debidos al colapso por pérdida de apoyo de la superestructura (figuras 1, 2) por causa de los grandes desplazamientos relativos entre las pilas en dirección longitudinal.

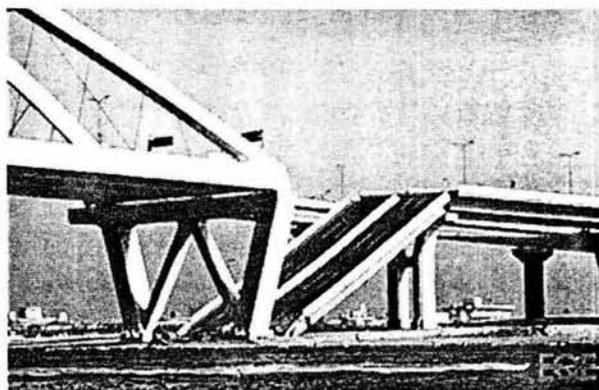


Figura 1. Colapso de un claro del puente Nishinomiya al este del puerto Nishinomiya, Japón, en la Wangan Expressway, durante el sismo de Kobe 1995.(EQE)

Los sismos ocurridos en el año de 1999 en Turquía y Taiwán, y en años posteriores en distintos países del mundo, han provocado una serie de daños en este tipo de estructuras, que ponen de manifiesto la necesidad de estudiar de manera detallada el comportamiento de tales estructuras, obteniendo así, diseños que conduzcan a un mejor desempeño de éstas.

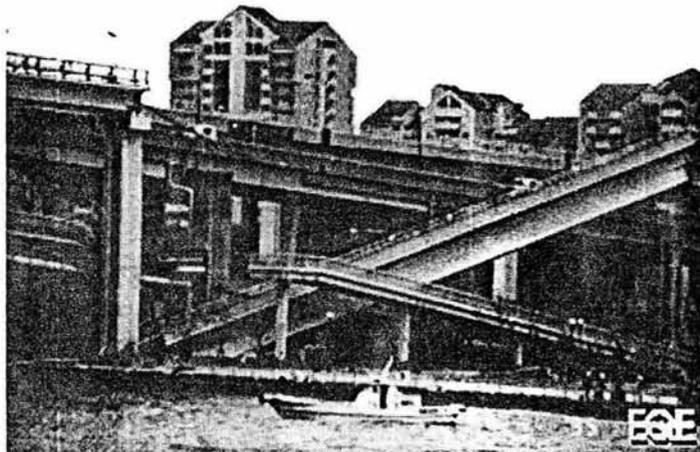


Figura 2. Colapso por pérdida de apoyo de una sección de puente elevado, durante el sismo de Kobe, Japón 1995.(EQE)

Existen algunos trabajos que abordan el estudio de los desplazamientos relativos entre pilas de puentes con estructuración a base de claros simplemente apoyados, tales como DesRoches y otros (2002) y Malhotra (1998), los cuales se enfocan a la evaluación del daño causado por el golpeteo (figura 3) entre elementos de la superestructura, no abordando el estudio de la longitud de apoyo de elementos de la superestructura para evitar el colapso de la misma por la pérdida del mismo.



Figura 3. Daño en elementos de superestructura de un puente debido al golpeteo.(EQE)

Hao (1998) realiza un estudio paramétrico para evaluar la longitud necesaria de apoyo en puentes, a partir de la diferencia de respuestas entre las pilas del puente mediante análisis en el dominio de la frecuencia. Considera excitaciones en la base de cada soporte no uniformes, las cuales modela con la función espectral de potencia propuesta por Tajimi – Kanai y una función de coherencia

empírica. De este estudio se encontró que el factor principal que determina la longitud de apoyo necesaria, es la relación de periodos de vibrar de las pilas adyacentes, cuando éstos difieren mucho. Sin embargo, al presentarse variaciones en el movimiento del suelo en cada soporte cuando los periodos de vibrar son muy parecidos entre sí, tales variaciones serán el factor más importante que determina la longitud de apoyo. Además, dicha longitud, se incrementa cuando el periodo de vibrar del puente coincide con el periodo dominante del suelo del sitio.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRESENCIA DE DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS

Un puente sometido a las acciones provocadas por un sismo, experimentará diferencias de desplazamiento horizontal en la subestructura, tanto en dirección longitudinal como en transversal, debido a varios factores. Según la configuración de la estructuración, se pueden tener dos casos, uno donde la estructura sea continua, es decir, que la superestructura esté unida monolíticamente con cada elemento de la subestructura, y el segundo caso cuando cada elemento de la subestructura es independiente de los demás. Para el primer caso, las diferencias citadas inducirán esfuerzos en los diferentes elementos que componen la estructura debido a las deformaciones que se presentan. El segundo caso será en el que se enfoca este estudio. Aquí los elementos de la superestructura se encuentran simplemente apoyados sobre los elementos que componen la subestructura, por lo que tienen libertad de desplazamiento horizontal.

La respuesta de una estructura sometida a una acción dinámica, depende de ciertas propiedades como son el periodo de vibrar y el amortiguamiento. Al comparar la respuesta de dos estructuras, las diferencias entre las respuestas, dependerán de esas propiedades; además, existen otros factores que dependen de la geometría del puente y las propiedades del suelo donde se desplanta la estructura, que influyen de manera importante en los desplazamientos relativos presentados.

Periodo de vibrar de las pilas

La principal propiedad dinámica de una estructura es su periodo de vibrar, el cual depende de la geometría de la misma, como puede ser la altura y la sección transversal en este caso. Al presentarse diferencias en la geometría de las pilas, estas no tendrán la misma rigidez y por consecuencia tendrán diferente periodo de vibrar, por lo que se presentarán respuestas diferentes entre sí.



Figura 4. Puentes con cambios de rigidez en las pilas de la subestructura.

Otro factor del cual es dependiente el periodo de vibrar es la masa de la estructura, la cual en este caso varía con la longitud de separación de las pilas del puente.

Efecto del paso de las ondas

Las ondas sísmicas arriban a cada pila en tiempos diferentes, lo cual depende de la geometría del puente y del ángulo de arribo de las ondas. Ese ángulo, con respecto al eje longitudinal del puente,

genera una diferencia en el tiempo de llegada de la onda entre las pilas del puente, que se puede expresar mediante la siguiente ecuación, la cual se obtiene partiendo de lo expuesto en la figura 5:

$$\Delta t = \frac{\text{distancia}}{\text{velocidad}} = \frac{L \cdot \cos \theta}{V_w} \quad (1)$$

Donde: L es la longitud entre apoyos, V_w es la velocidad de la onda sísmica en el suelo, θ es el ángulo de llegada de la onda sísmica con respecto al eje longitudinal del puente y Δt es la diferencia de tiempo de llegada de la onda sísmica entre pilas.

En este aspecto la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el suelo tiene una importancia relevante en la no sincronización del registro de las ondas en las pilas, particularmente cuando dicha velocidad es relativamente baja. La velocidad de propagación de las ondas de cuerpo depende de la densidad y propiedades elásticas del suelo. Con respecto a las ondas superficiales, considerando un semiespacio elástico homogéneo la velocidad de las ondas de Rayleigh y de Love es cercana a la de las ondas de corte y es función de la frecuencia; Roullé (2004) muestra la variación de éstas velocidades con respecto a la frecuencia en sitios de suelo blando del valle de México comprobando que dichas velocidades son cercanas a la velocidad de las ondas de corte y permanecen relativamente constantes en el intervalo de periodos de interés (0.3 – 1.3 seg), (Ver Apéndice C). Las ondas de corte (S) y de Rayleigh producen efectos similares en la superficie del suelo, en nuestro estudio es de mayor relevancia el efecto de las ondas de Rayleigh.

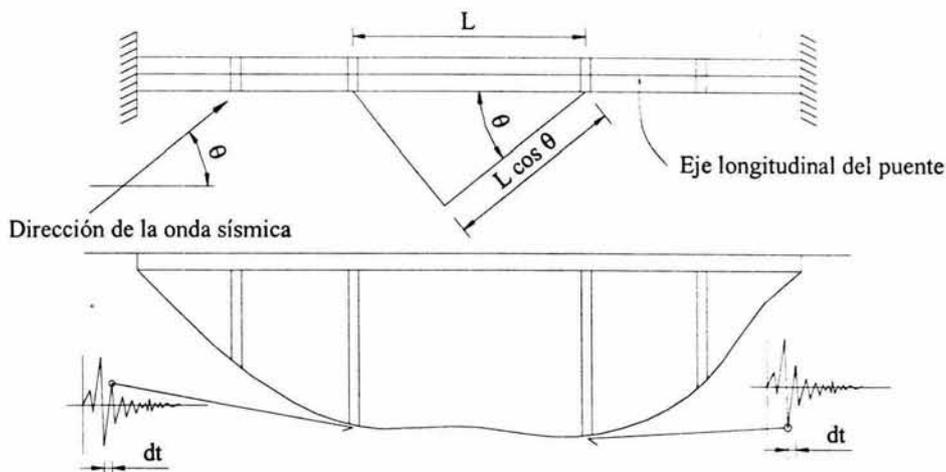


Figura 5. Ilustración del efecto del paso de las ondas (Priestley y otros, 1996)

Efectos de sitio

Las condiciones locales del suelo en un sitio determinarán las amplitudes y contenidos de frecuencia dominantes, lo cual es un factor que influye de manera importante en la respuesta de una estructura. De acuerdo a la relación de periodos de vibrar, del suelo (dominante) y de la estructura, se tendrá una cierta magnitud de la respuesta, la cual se amplifica al ser muy parecidos entre si ambos periodos de vibrar. En cuanto a la diferencia en el tiempo de llegada de ondas entre pilas, la influencia del sitio está dada en la velocidad de propagación de las ondas en el suelo. Debido a la separación que existe entre apoyos del tipo de puente estudiado, se pueden tener suelos con características diferentes en cada apoyo; en este estudio se considera el mismo tipo de suelo en todos los apoyos para sólo observar el comportamiento de una misma estructura en diferentes sitios.

DESCRIPCIÓN DE ESTUDIO REALIZADO Y DE ESTRUCTURAS ANALIZADAS

Las subestructuras de puentes deben ser tratadas como estructuras especiales, ya que el comportamiento que presentan bajo acciones sísmicas es muy diferente al presentado por otro tipo de estructuras tales como edificios. Debido a que las especificaciones contenidas en los reglamentos de construcción fueron desarrolladas principalmente a partir del comportamiento presentado por estas últimas estructuras, y por lo tanto aplicables a ellas, no es recomendable aplicarlas del todo a subestructuras de puentes. Por otra parte, en los últimos años, se han venido construyendo estructuras de este tipo, de las cuales depende el funcionamiento de sistemas de transporte en las grandes ciudades, como es el caso de la ciudad de México, donde se tienen características muy particulares en cuanto al tipo de suelo.

En este trabajo se obtienen las diferencias en desplazamientos horizontales en el sentido longitudinal del puente de dos pilas comunes a un mismo claro. Para esto, se consideran los factores que influyen en las diferencias citadas que se pueden presentar. Se analizan varios casos de pilas con diferente altura y con diferente longitud del claro entre ellas a fin de obtener estructuras con diferentes periodos de vibración; también se considera el efecto que produce el paso de las ondas sísmicas con un desfase en el tiempo dt en que se registran entre las pilas adyacentes, el cual se obtiene aplicando la ecuación 1. De acuerdo a lo anterior, cada pila estará sometida a la misma excitación, solamente afectada por el desfase en el tiempo de arribo de las ondas, ya que no se considera la influencia de la incoherencia generada por el trayecto de las ondas de corte a través del suelo (estratigrafía) entre las pilas.

Existen varios métodos de análisis para obtener la respuesta de una estructura, tales como vibraciones aleatorias, análisis en la historia del tiempo y el mediante el uso de espectros de respuesta. En este estudio se emplea el método de análisis en la historia del tiempo, es decir, se hacen análisis lineales paso a paso usando registros de acelerogramas de varios sitios, correspondientes a un evento sísmico. Con ello se logra obtener la respuesta deseada de una estructura en un sitio en particular.

Modelado y análisis de las pilas

Los modelos empleados para el estudio de la respuesta de las pilas del puente, corresponden a osciladores de un grado de libertad para cada una de ellas, de acuerdo a las consideraciones de estructuración del puente que se asumen.

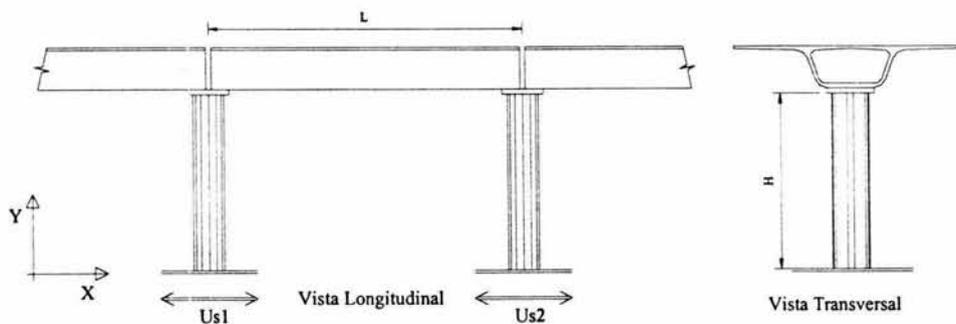


Figura 6. Sección del tipo de puente en estudio con estructuración a base de claros simplemente apoyados.

En la figura 6, se muestra el tipo de puente estudiado, donde se puede observar claramente la estructuración usada, es decir, la superestructura se encuentra simplemente apoyada sobre las pilas del puente.

Con la variación de las propiedades dinámicas de las pilas, obtenemos curvas de comportamiento de los desplazamientos relativos que se presentan entre estas. En este caso de estudio, se considera una sola sección transversal de las pilas, por lo que tales propiedades dinámicas solo dependerán de la longitud del claro entre las pilas y su altura respectiva.

La estructura del puente estudiado para la obtención de la respuesta buscada, se compone de una superestructura típica a base de traveses prefabricados de concreto presforzado simplemente apoyadas sobre la subestructura, compuesta por pilas aisladas de concreto reforzado, donde sus características geométricas corresponden específicamente a las mostradas en la figura 7. Se puede observar que sólo al modificar la altura y la longitud del claro, se obtienen propiedades dinámicas distintas (periodo de vibrar), ya que la altura influye en la rigidez de la pila y la longitud en la masa tributaria concentrada en el extremo superior de la misma; de lo cual también depende el periodo de vibrar.

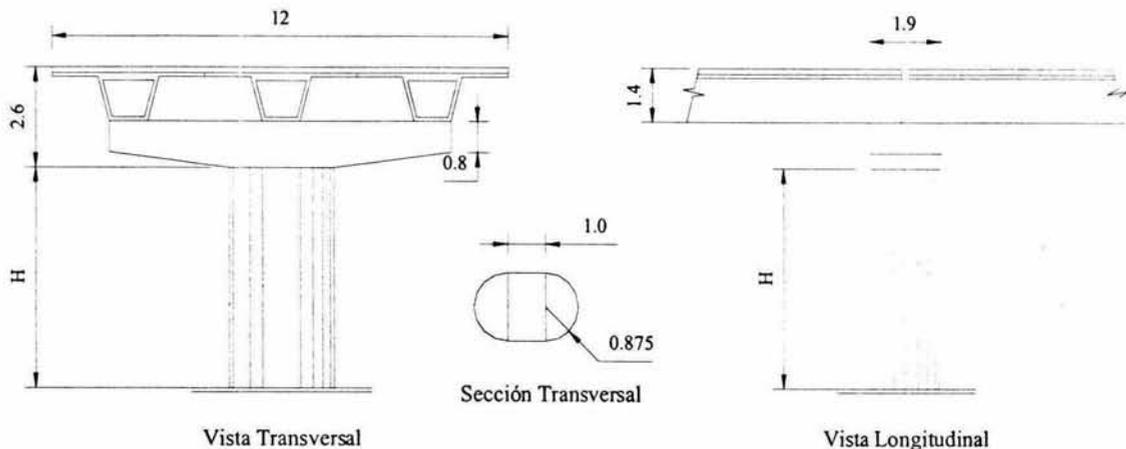


Figura 7. Estructura modelada para la obtención de desplazamientos relativos entre pilas.

Tabla 1. Características de la sección transversal de las pilas.

Dato	Valor	Unidad
Área transversal	4.155	M ²
Acero longitudinal	144	Var. # 12
Porcentaje de refuerzo longitudinal	4	%
Acero transversal	Zuncho # 4, paso @ 7 cm	-

Las propiedades de la sección transversal, que definen las cargas de fluencia de la misma, se obtuvieron del diagrama de interacción correspondiente, el cual se calculó usando el programa Biax (Wallace, 1989) y se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 2. Propiedades de la sección transversal

Propiedad	Valor	Unidad
Área transversal	4.155	M ²
Momento de inercia	0.907	M ⁴
Resistencia a compresión del concreto ($f'c$)	300	kg/cm ²
Módulo de elasticidad	242487.11	kg/cm ²
M_y ($P = 0$)	4964	Ton - m
M_b	5729	Ton - m
P_b	3985	Ton
$P_{\text{máx}}^{(+)}$ ($M = 0$)	18900	Ton
$P_{\text{máx}}^{(-)}$ ($M = 0$)	6900	Ton

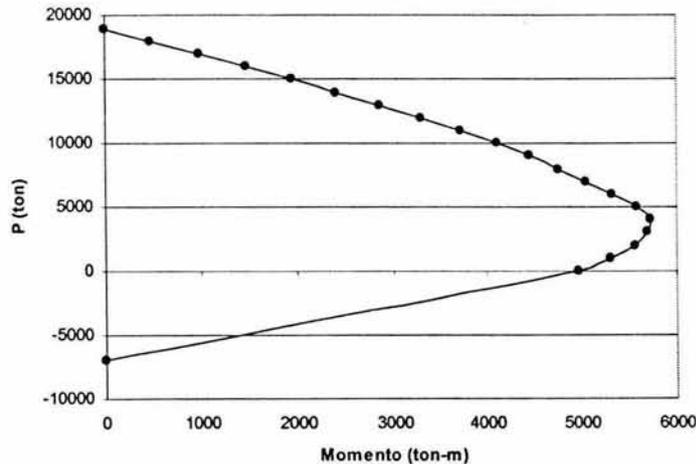


Figura 8. Diagrama de interacción de la sección transversal estudiada.

Registros de acelerogramas empleados

Para los análisis a realizar, se usan registros de estaciones correspondientes a sitios con distintas propiedades dinámicas del suelo, ubicados en la ciudad de México y en la costa de Guerrero. Tales sitios se escogieron por presentar amplificación de la respuesta de estructuras con periodos de vibrar correspondientes a un rango de interés. En la figura 9 se muestran los registros, además se puede observar la amplitud de la respuesta que se presenta para ciertos periodos de vibrar en los espectros correspondientes.

Los registros corresponden al sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985, ya que durante ese evento, se presentó un gran número de daños producto de las acciones a las que fueron sometidas las estructuras. Aunque las estructuras de puentes no sufrieron daño, cabe destacar que la estructuración actual de éstos ha cambiado respecto a la usada anteriormente contándose ahora con

estructuras con mayor esbeltez, además de que la superestructura está compuesta por elementos prefabricados simplemente apoyados.

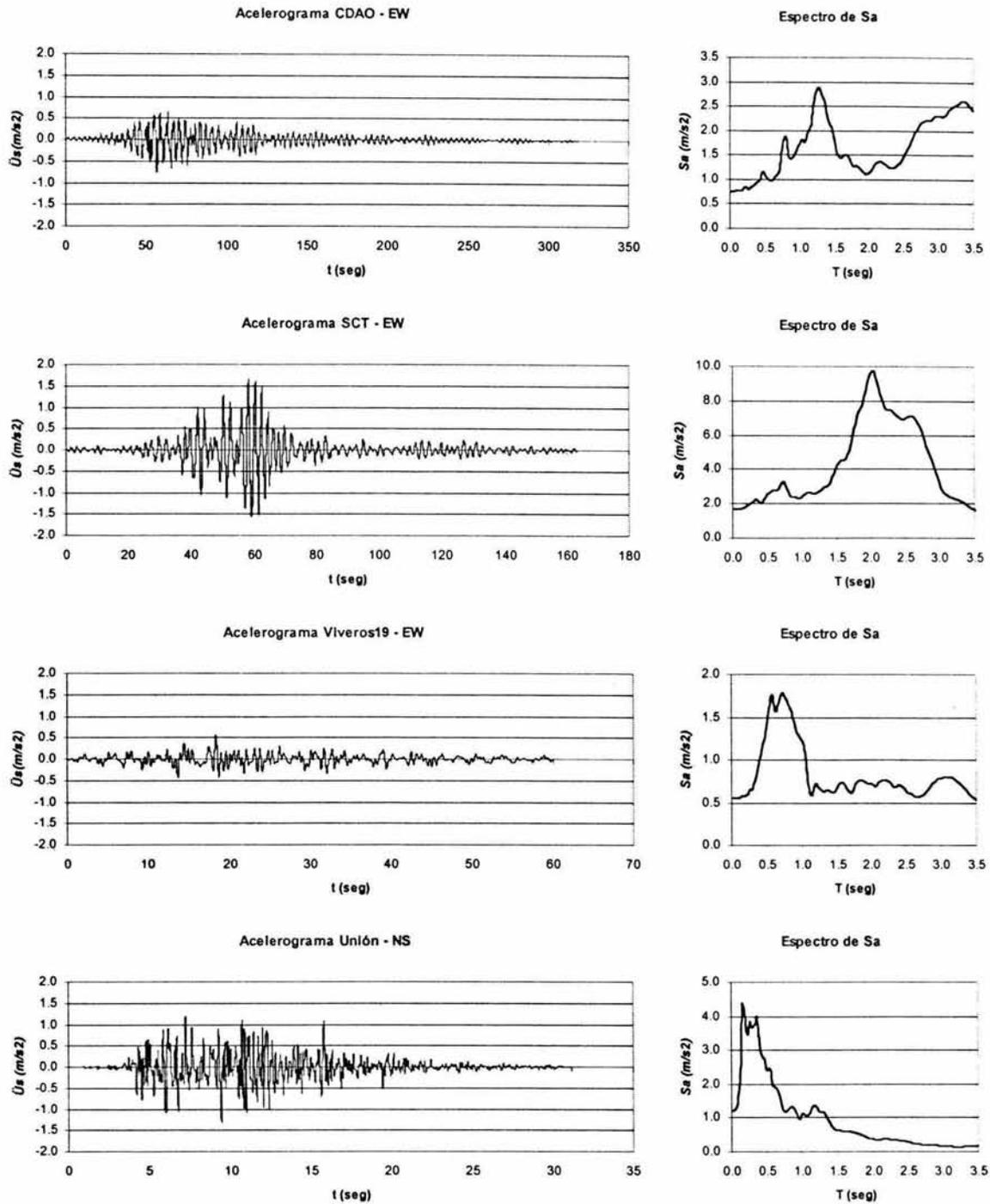


Figura 9. Registros de acelerogramas usados para el análisis en los sitios estudiados.

Los sitios a los cuales corresponden los registros son: Central de abastos, SCT y Viveros en la ciudad de México y La Unión en la costa de Guerrero, los cuales presentan varios tipos de suelo. En

la tabla 3 se presentan los datos necesarios del suelo para el análisis en cada sitio de estudio, DDF (1988).

Tabla 3. Características del suelo de los sitios de estudio

Sitio	Tipo de suelo	Velocidad de la onda sísmica (m/seg)
Central de Abastos	Blando	100
SCT	Blando	100
Viveros	Transición	600
La Unión	Firme	1000

En la tabla 4, se muestran los tiempos de desfase en el registro de las ondas entre las pilas, correspondientes a las características del tipo de suelo y a la longitud de separación de las mismas. Tales tiempos son calculados usando la ecuación 1 considerando un ángulo de incidencia de las ondas de cero grados y los valores de velocidad de éstas a través del suelo mostrados en la tabla 3.

Las longitudes a analizar se fijaron de acuerdo a las separaciones entre apoyos típicas de puentes urbanos.

Tabla 4. Diferencia en el tiempo de registro de las ondas en cada pila.

Longitud (m)	Tiempo de desfase (seg)		
	Suelo blando	Suelo de transición	Suelo firme
30	0.30	0.05	0.03
40	0.40	0.07	0.04
50	0.50	0.08	0.05
60	0.60	0.10	0.06
70	0.70	0.12	0.07
80	0.80	0.13	0.08

Efecto de la interacción entre las pilas (golpeteo)

Al comparar la respuesta de dos pilas independientes el análisis se debe hacer paso a paso de manera simultánea, puesto que al presentarse el caso donde choquen los elementos de la superestructura la respuesta de las pilas sufrirá una modificación producto de la carga impulsiva a la que son sometidas.

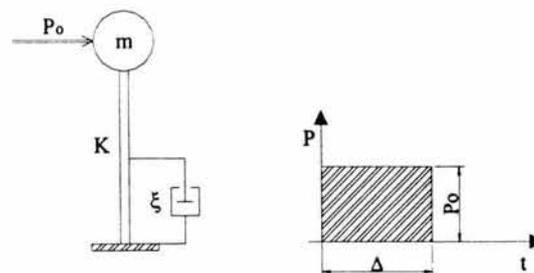


Figura 10. Oscilador sometido a una carga impulsiva.

Considerando que la carga impulsiva producida por el choque varía de forma rectangular con el tiempo como se muestra en la figura 10, la respuesta de un oscilador ante una carga de este tipo, partiendo de un estado de reposo, está dada por las expresiones siguientes:

$$X_p = \frac{P_o}{K} \cdot \left[e^{-\xi \cdot \omega \cdot \Delta} \cdot \left(-\frac{\xi \cdot \omega}{w_D} \cdot \text{sen}(w_D \cdot \Delta) - \cos(w_D \cdot \Delta) \right) + 1 \right] \quad (2)$$

$$V_p = \frac{P_o}{K} \cdot e^{-\xi \cdot \omega \cdot \Delta} \cdot \frac{\omega^2}{w_D} \cdot \text{sen}(w_D \cdot \Delta) \quad (3)$$

Donde:

$$w_D = \omega \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4)$$

y ω , ξ y K son la frecuencia, amortiguamiento y rigidez del oscilador, respectivamente, P_o y Δ son la carga impulsiva y el tiempo de su duración.

Si se asume que la duración Δ de la carga impulsiva P_o tiende a cero ($\Delta \rightarrow 0$, $P_o \Delta = K_c$), aplicando ese límite a las ecuaciones 2 y 3, la respuesta se simplifica y ahora se tiene:

$$X_p = 0 \quad (5)$$

$$V_p = \frac{K_c}{m} = \frac{P_o \cdot \Delta}{m} \quad (6)$$

donde m es la masa del oscilador. Lo anterior nos indica que al presentarse el choque, solamente sufrirá modificación la velocidad del oscilador, con respecto a los valores que se tienen antes del mismo. El efecto de la fuerza de impacto, se verá reflejado en el daño que se produzca en las traveses de la superestructura como se observa en los daños mostrados en la figura 3.

Existe un procedimiento aproximado para modelar el impacto, usado en DesRoches y otros (2002), asumiendo que éste es instantáneo y haciendo uso de la ley de conservación de la cantidad de movimiento (momento) así como del coeficiente de restitución, debido a que el choque no es totalmente elástico. De acuerdo a lo anterior, las velocidades de las masas en cuestión se modifican en el instante del impacto de la siguiente forma:

$$v'_1 = v_1 - (1 + e) \cdot \frac{m_2(v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

$$v'_2 = v_2 + (1 + e) \cdot \frac{m_1(v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \quad (8)$$

Donde:

v'_1 , v'_2 son las velocidades de los osciladores 1 y 2 después del impacto; v_1 , v_2 son las velocidades de los mismos antes del impacto; e es el coeficiente de restitución, el cual toma valores entre cero y uno.

Consideraciones tomadas en cuenta para modelar el efecto del golpeteo

A continuación se presentan las consideraciones que se asumen en los análisis realizados para obtener los desplazamientos relativos entre las pilas producto del efecto de golpeteo citado anteriormente, con el propósito de simplificar su implementación.

- No se toma en cuenta la restricción ofrecida por los claros contiguos a ambos lados de la parte del puente analizada; por lo que cada elemento de la superestructura solo se considera impactado en uno de sus extremos; además, solamente uno de esos extremos tiene libertad de deslizamiento horizontal como se muestra en la figura 11. El despreciar la restricción de los claros contiguos obedece a una simplificación del análisis realizado, con esto se puede llegar a obtener desplazamientos relativos mayores a los presentados en el caso de considerar la influencia de tales claros en el análisis.

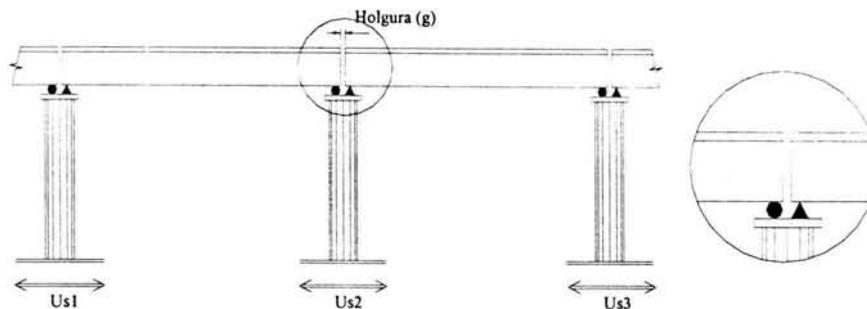


Figura 11. Modelo idealizado del puente

- En el análisis realizado, al presentarse el choque entre las masas de los osciladores, las velocidades de éstos serán modificadas de acuerdo a lo establecido en las ecuaciones 7 y 8. Tales velocidades también pueden ser obtenidas con la ecuación 6, debido a la dificultad para calcular el tiempo exacto en que ocurre el impacto y por lo tanto las velocidades de los osciladores en ese instante de las cuales depende la fuerza de impacto, se usan las ecuaciones 7 y 8 para calcular de manera aproximada las velocidades de los osciladores después del impacto.
- Al coeficiente de restitución se le asigna el valor de 0.8 de acuerdo a DesRoches y otros (2002), el cual es la relación entre los impulsos después y antes del impacto. Dicho coeficiente depende del tipo de material de los cuerpos que se impactan y de las condiciones geométricas en que se encuentran tales cuerpos.
- Al producirse el choque entre los osciladores, los desplazamientos de ambos dependerán del sentido de tales desplazamientos y pueden ser dos casos. Cuando el choque se produzca por el alcance entre los osciladores, es decir, que se desplacen en el mismo sentido, para el cuerpo que es golpeado el desplazamiento será el calculado sin considerar el choque, mientras que para el otro cuerpo el desplazamiento será el del primero más la holgura entre las traveses de la superestructura. Cuando el choque se produce al desplazarse ambos osciladores en sentidos opuestos, los desplazamientos estarán restringidos a la holgura entre las traveses. Para este caso, como una aproximación para calcular los desplazamientos de los osciladores en el instante del choque, cada desplazamiento corresponde a la relación entre el desplazamiento del oscilador y la suma de los desplazamientos de ambos osciladores calculados sin considerar el choque, multiplicada por la holgura entre traveses, con esto la suma de tales desplazamientos en valor absoluto, será la holgura entre traveses considerada.

- Los valores de las masas de los osciladores son relativamente parecidos entre sí.

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA OBTENIDA PARA LOS MODELOS DE ESTUDIO

Variación de la respuesta con respecto al ángulo de arribo de las ondas

Dentro de los factores que intervienen en el efecto del paso de las ondas (tiempo que transcurre entre el registro de las ondas entre las pilas adyacentes), el ángulo de arribo de éstas respecto al eje longitudinal del puente se debe tomar en cuenta, según el planteamiento expuesto en la figura 5. El mayor efecto de este factor se presenta al incidir las ondas en dirección longitudinal del puente, disminuyendo hasta ser nulo al arribar las ondas en dirección transversal del mismo.

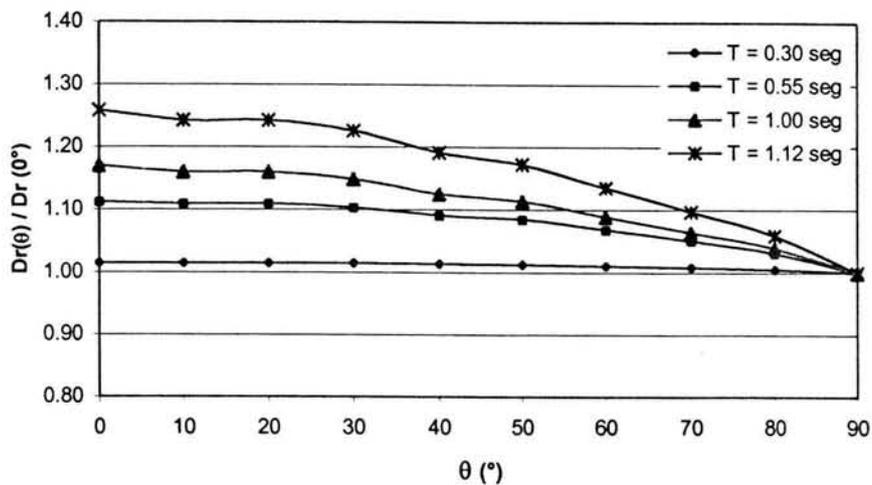


Figura 12. Variación de los desplazamientos relativos respecto al ángulo de arribo de ondas.

En la figura 12 se muestra la variación de los desplazamientos relativos que se presentan entre dos pilas de un puente al someterlo a una acción sísmica respecto al ángulo de arribo de las ondas; dicha variación es relativa al caso donde dicho ángulo vale 90° . El sitio de análisis corresponde a SCT y al sismo del 19 de septiembre de 1985, además la respuesta corresponde a un puente con varios periodos de vibrar de las pilas, determinada con una longitud de separación de pilas constante y un mismo periodo de vibrar de ambas pilas en cada caso. Se observa el incremento de la respuesta conforme disminuye el ángulo de arribo de las ondas, cuando dicho ángulo θ tiene el valor de 90° , no se presentan desplazamientos relativos entre las pilas (con mismo periodo de vibrar), puesto que las ondas inciden al mismo tiempo.

En todos los análisis que se presentan a continuación, de acuerdo a lo mostrado en la figura 12, se asume la incidencia de las ondas en dirección longitudinal del puente ($\theta = 0^\circ$). En cuanto a la holgura entre elementos de la superestructura en los apoyos, se considera que es de 10 cm.

Variación de la respuesta con respecto al periodo de vibrar de las pilas

Para obtener los desplazamientos relativos entre dos pilas de un puente con respecto a la variación del periodo de vibrar de las mismas, es necesario analizar una serie de estructuras con diferente

periodo de vibrar modeladas en este caso como osciladores de un grado de libertad. Las propiedades dinámicas de esos osciladores dependerán tanto de su rigidez como de su masa, o sea, de la sección transversal y la altura de cada pila, así como del peso dado por la longitud de separación de las pilas, respectivamente.

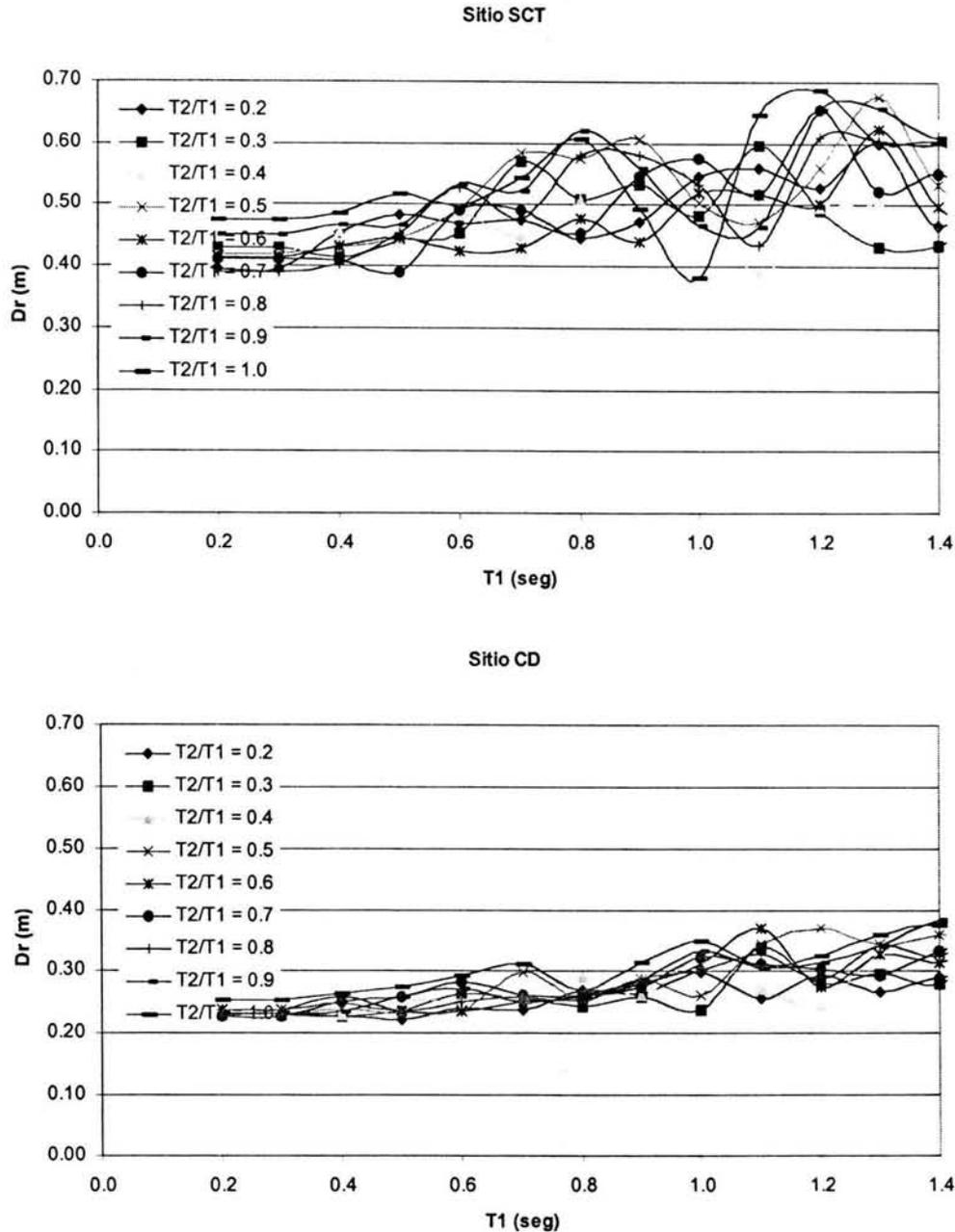


Figura 13. Desplazamientos relativos en dos sitios de suelo blando, $L = 80$ m, $g = 10$ cm.

En las figuras 13 y 14 se presentan los desplazamientos relativos entre pilas obtenidos en los sitios estudiados; en ellas se observa la variación de tales desplazamientos con respecto al periodo de la pila más flexible (T_1), para varias relaciones de periodos de vibrar de las mismas. Para ello se considera una longitud de separación constante ($L=80$ m) a fin de obtener el mismo tiempo de

desfase en el registro de las ondas entre las pilas. Los periodos para los cuales se presenta la respuesta están comprendidos entre 0.2 y 1.4 segundos, puesto que en ese intervalo se encuentran los periodos de vibrar de las pilas y puentes comúnmente usados; es decir, para periodos mayores a 1.4 segundos se tendrían pilas muy flexibles, que no corresponden a las típicamente usadas.

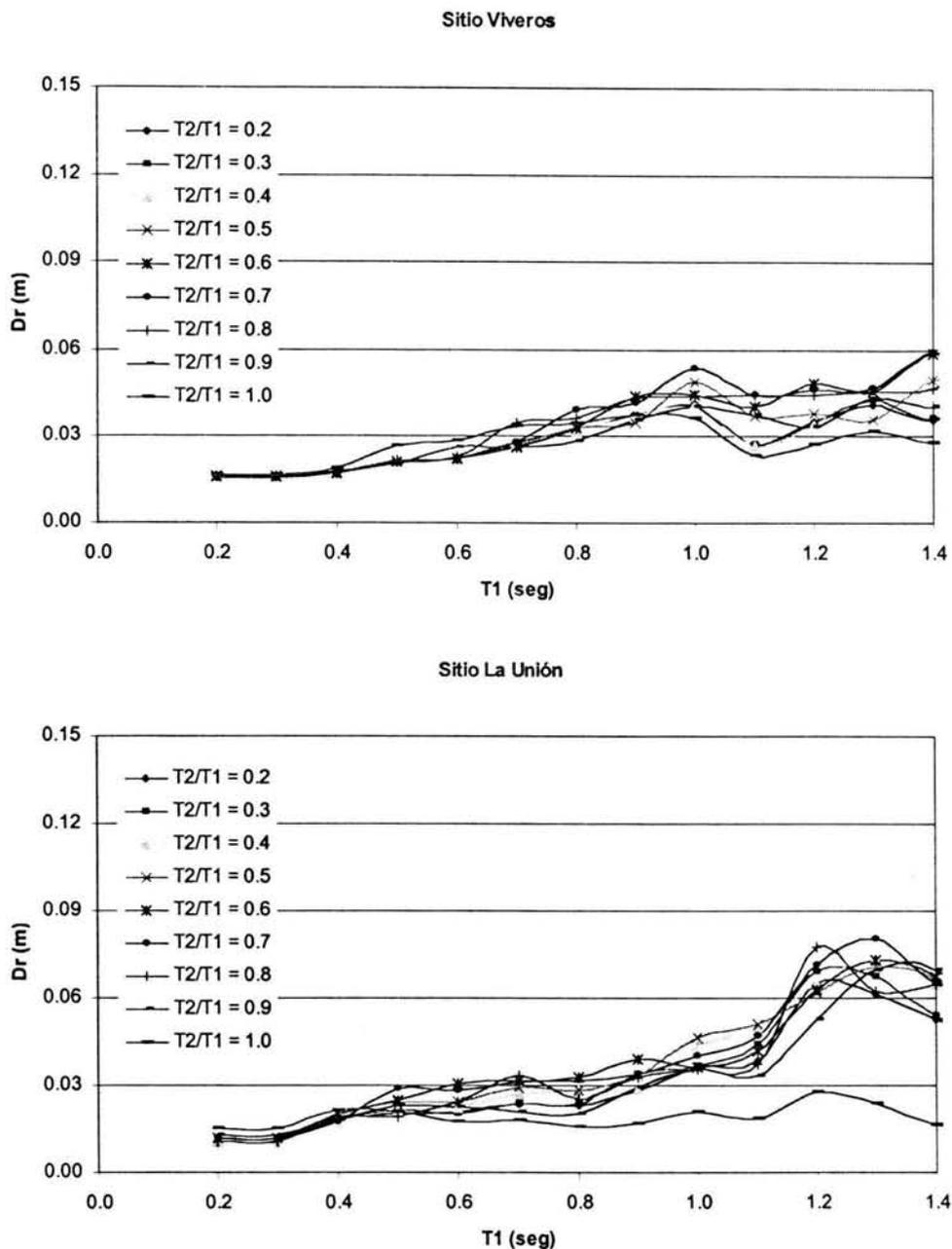


Figura 14. Desplazamientos relativos en sitios de suelo de transición y firme respectivamente, $L = 80$ m, $g = 10$ cm.

La figura 13 para los sitios SCT y CD ubicados en terreno de suelo blando, muestra que los desplazamientos relativos entre las pilas se incrementan de forma relativamente lineal con el periodo de vibrar de la pila más flexible. En general se observa que la respuesta obtenida con

respecto a la relación de periodos T_2/T_1 , presenta un rango de variación relativamente constante en cada periodo para cada sitio, donde en general la mayor respuesta se presenta cuando los periodos de las pilas son iguales entre si, salvo en algunos periodos. Las diferencias en los desplazamientos relativos presentados en los dos sitios de la figura 13 ubicados en suelo blando se deben a las condiciones locales y no se pueden generalizar a todo el suelo en la zona de lago.

En la figura 14 correspondiente a los sitios Viveros y La Unión ubicados en suelo de transición y firme, respectivamente (el segundo corresponde a la zona epicentral), se observa una disminución en los desplazamientos relativos de manera general con respecto a los sitios de suelo blando. En general para ambos sitios, se presenta el incremento de la respuesta conforme aumenta el periodo de vibrar de la pila más flexible, aunque de una forma no totalmente lineal.

En todos los casos de análisis en los sitios Viveros y La Unión las pilas se comportaron de manera totalmente independiente, puesto que los máximos desplazamientos relativos son menores a la holgura (g) considerada de 10 cm, no obstante en otros sitios o para otras condiciones se puede presentar un comportamiento independiente entre las pilas donde los desplazamientos relativos sean mayores a la holgura entre las trabes.

Con respecto a la relación de periodos, para el sitio Viveros se calcularon amplificaciones de los desplazamientos relativos de hasta el doble para algunos periodos con respecto a los presentados en el caso de pilas con mismo periodo de vibrar. Para el sitio La Unión, para prácticamente todos los periodos (T_1) se presenta una amplificación de la respuesta mucho mayor a la calculada para las pilas con el mismo periodo.

Las amplificaciones de los desplazamientos relativos presentados en los sitios Viveros y La Unión ubicados en suelos de terreno de transición y firme respectivamente, presentan una tendencia que corresponde al caso de considerar exactamente la misma excitación en ambas pilas, es decir los desplazamientos relativos tienden a aumentar conforme se incrementa la diferencia entre los periodos de las pilas puesto que el efecto del paso de las ondas tiende a disminuir en estos tipos de suelo al disminuir el tiempo de desfase de registro de las ondas sísmicas entre las pilas. Cuando se considera la misma excitación en los apoyos, los desplazamientos relativos entre pilas con mismo periodo de vibrar son nulos; en la figura 14 se muestran los resultados de obtenidos en estos sitios y se puede observar esa tendencia, es decir, en éstos casos los desplazamientos relativos entre pilas con mismo periodo de vibrar son menores a los obtenidos para pilas con diferente periodo.

En la figura 15 se presenta los desplazamientos relativos obtenidos en el sitio SCT considerando la misma excitación en ambas pilas, es decir, se despreja el efecto del paso de las ondas. En este caso los desplazamientos relativos son nulos cuando se tiene el mismo periodo de vibrar en las pilas comparadas. Para relaciones de periodos de las pilas diferentes a la unidad, la respuesta se incrementa al disminuir esta relación. Esto es porque el único factor que afecta la respuesta es la diferencia entre tales periodos.

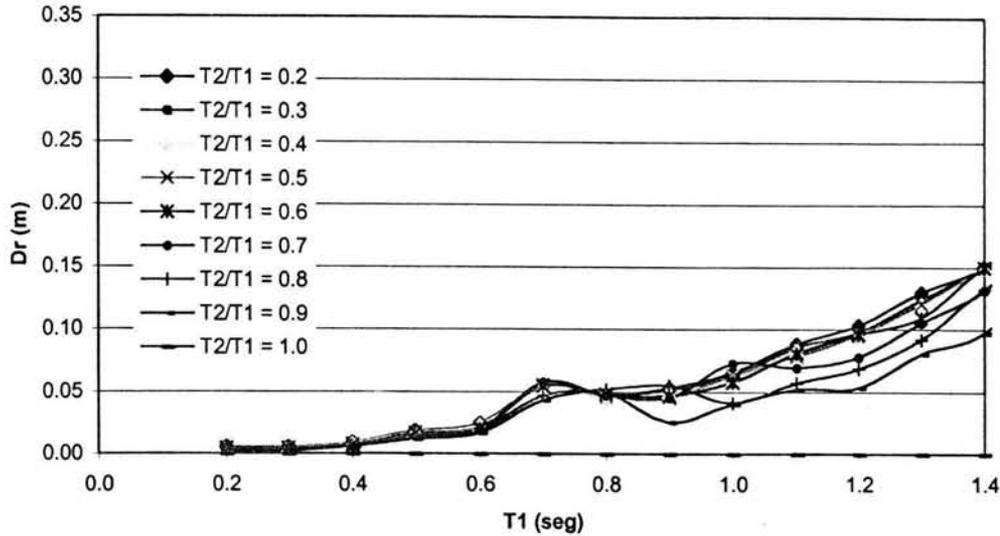


Figura 15. Desplazamientos relativos sitio SCT, considerando la misma excitación en ambas pilas, $L = 80$ m, $g = 10$ cm.

Con las distribuciones de los desplazamientos relativos entre pilas mostradas en las figuras 13 y 14 para los sitios estudiados correspondientes a una determinada longitud de separación de las pilas, se observa que no es necesario realizar los análisis correspondientes a todos los periodos (T_1) y relaciones de periodos (T_2/T_1) ahí mostrados necesarios para obtener tal respuesta para otras longitudes de separación, puesto que realizando tales análisis para determinados periodos y relaciones entre ellos se obtienen distribuciones de la respuesta muy semejantes a las mostradas en las figuras 13 y 14, lo cual nos conducirá a ecuaciones relativamente parecidas entre sí que representen esas respuestas.

Análisis de la respuesta obtenida en cada sitio de manera general

Con el propósito de establecer un comportamiento general respecto al periodo de vibrar de las pilas y a la longitud de separación entre las mismas, se presenta un análisis de la respuesta obtenida para cada uno de los sitios estudiados. Para obtener una distribución de la respuesta que nos permita ajustar los resultados a una expresión en función de las variables mencionadas, se obtuvieron resultados variando el periodo de la pila más flexible y manteniendo constante la longitud de separación entre las pilas y viceversa, así como varias relaciones de periodos de vibrar de las pilas.

Sitio Secretaría de Comunicaciones y Transportes

De acuerdo a la distribución de los resultados mostrados en las figuras 16 y 17, se puede observar que existe una dependencia relativamente lineal respecto a ambas variables (periodo de la pila más flexible y longitud de separación), lo que nos indica que los desplazamientos relativos representan un plano inclinado respecto a la variación de ambos parámetros, obviamente con pendientes distintas para cada uno.

Con respecto a la variación de los desplazamientos relativos al modificar la relación de periodos de vibrar relativo a los obtenidos para el caso de pilas con mismo periodo, en general existe una disminución de la respuesta, salvo en el caso de periodos relativamente largos (1.3 seg) donde se presentan ampliificaciones de tal respuesta.

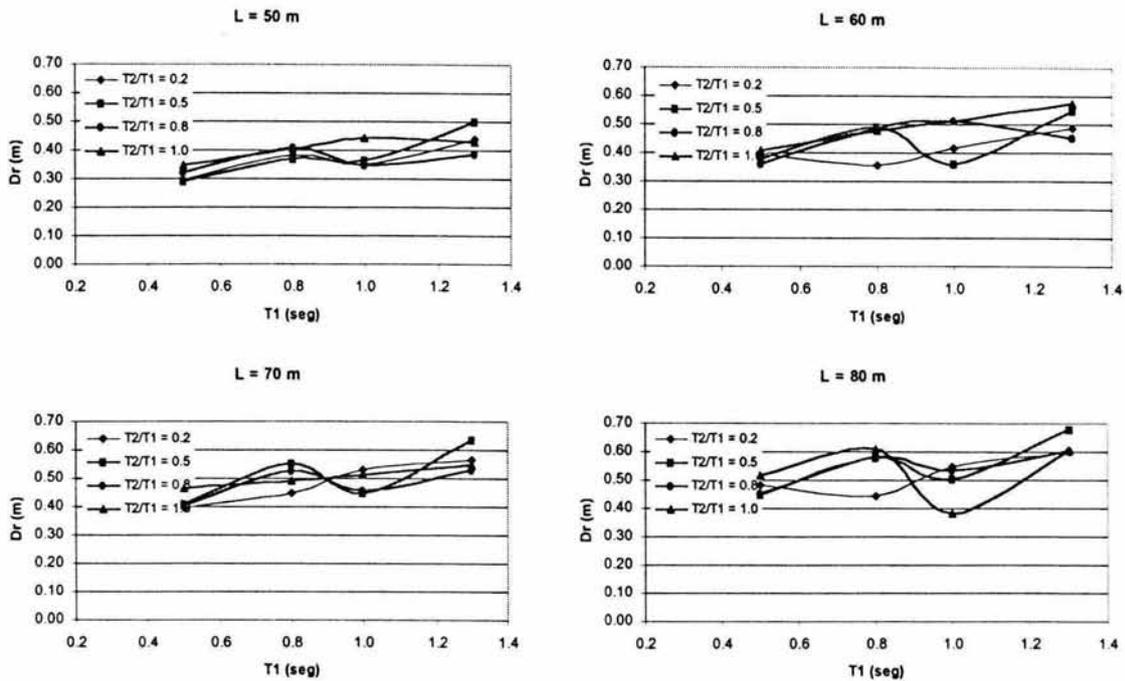


Figura 16. Variación de desplazamientos relativos con respecto al periodo de vibrar de la pila más flexible (T_1) en el sitio SCT

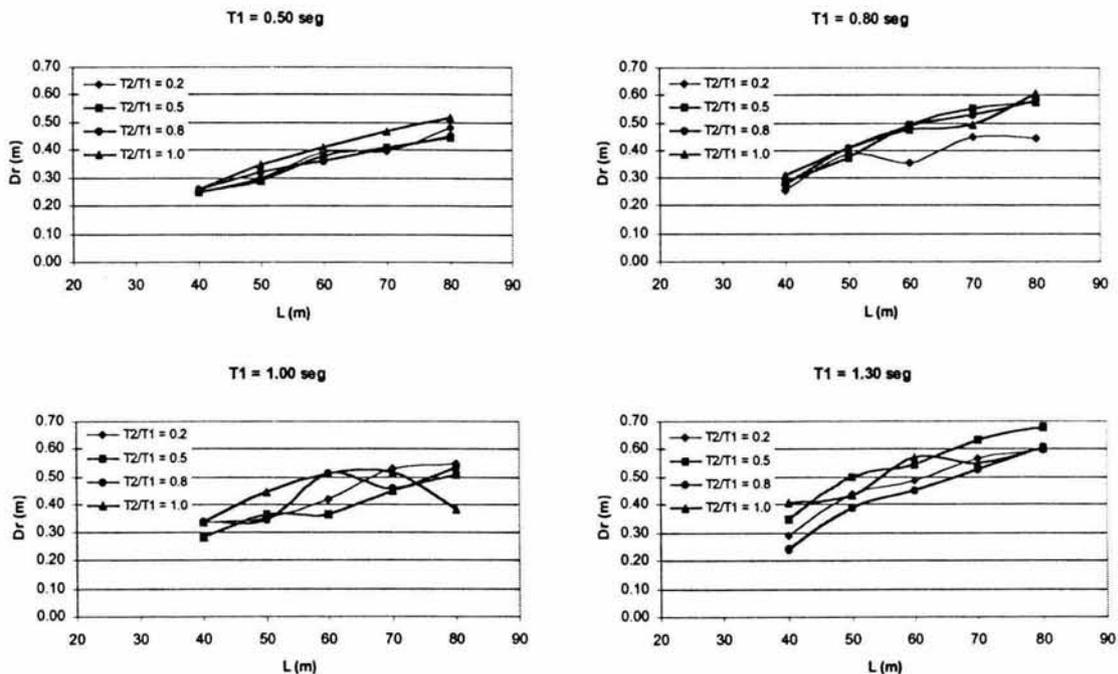


Figura 17. Variación de desplazamientos relativos con respecto a la longitud de separación de las pilas en el sitio SCT

A partir de la distribución de los desplazamientos relativos correspondientes a pilas con mismo periodo ($T_2/T_1 = 1.0$) se puede establecer una ecuación de comportamiento que se ajuste a ella, la cual tendrá la siguiente forma considerando variación lineal con respecto a las dos variables:

$$Dr(T_1, L) = \alpha \cdot T_1 + \beta \cdot L + \delta \quad (9)$$

Mediante un análisis de regresión lineal múltiple se realiza un ajuste por mínimos cuadrados a la distribución de desplazamientos relativos mostrada en la figura 18 correspondiente a pilas con mismo periodo para la obtención de los parámetros α , β y δ ; en la misma figura también se muestran las curvas ajustadas correspondientes a las curvas calculadas analíticamente.

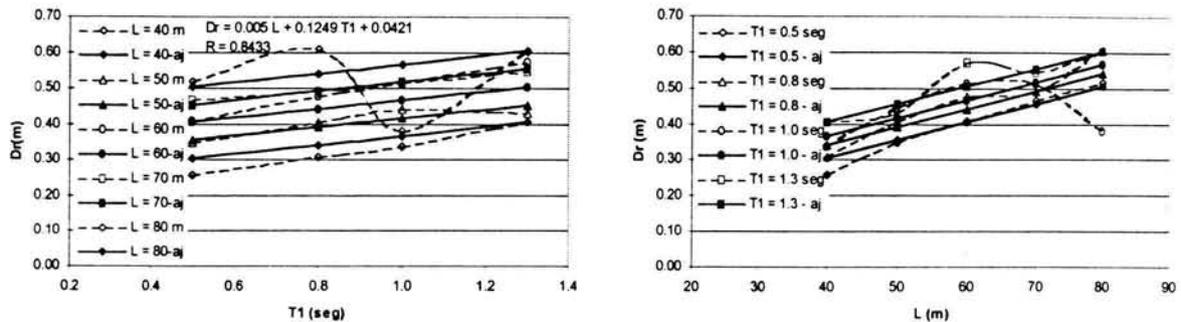


Figura 18. Desplazamientos relativos para pilas con mismo periodo de vibrar ($T_2/T_1 = 1.0$)

Puesto que la forma de la ecuación 9 está determinada a partir de los desplazamientos relativos obtenidos para pilas con mismo periodo, lo mostrado en las figuras 16 y 17 indica que existe una modificación de la respuesta cuando difieren entre si los periodos de vibrar de las pilas comparadas, para tomar en cuenta esto de una manera simple dicha ecuación será afectada por un factor dependiente de la relación de periodos de las pilas.

La modificación de la ecuación 9 obedece a la existencia de amplificaciones de los desplazamientos relativos obtenidos cuando son distintos los periodos de las pilas con respecto al caso cuando son similares. Estas amplificaciones son mayores como se señaló anteriormente en periodos relativamente largos (1.3 seg), en la figura 19 se muestra la variación de esas amplificaciones con respecto a la relación de los periodos de las pilas.

Considerando que las amplificaciones varían de forma lineal con respecto a la relación de periodos de acuerdo a lo expuesto en la figura 19, y además aplicando la variación obtenida para el caso donde se presentan las mayores amplificaciones, la ecuación que describe los desplazamientos relativos es de la siguiente forma:

$$Dr(T_1, L) = (\alpha \cdot T_1 + \beta \cdot L + \delta) \cdot \left(1 + \gamma \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right) \quad (10)$$

El factor γ se calcula mediante un ajuste por mínimos cuadrados a la distribución de amplificaciones para $T_1 = 1.3$ seg y $L = 70$ m por ser el caso donde tales amplificaciones son mayores. Al aplicar este factor a todas las combinaciones de periodos y longitudes que se puedan presentar se está sobre estimando la respuesta lo cual nos conduce al lado de la seguridad.

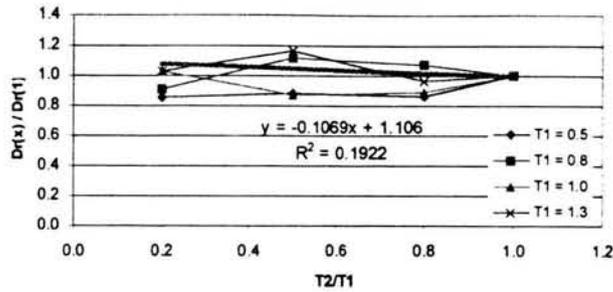


Figura 19. Variación de la respuesta con respecto a la obtenida para pilas con mismo periodo de vibrar en el sitio SCT

Los parámetros α , β , δ y γ dependen de las distribuciones de los desplazamientos relativos presentados con respecto al periodo de vibrar de la pila más flexible, longitud de separación de las pilas y la relación de los periodos de vibrar de éstas. Tales factores corresponden a los mostrados en las figuras 18 y 19, por lo que la ecuación propuesta para obtener los desplazamientos relativos que se presentan entre dos pilas de un puente estructurado a base de claros simplemente apoyados es:

$$Dr(T_1, L) = (0.1249 \cdot T_1 + 0.005 \cdot L + 0.0421) \cdot \left(1.106 - 0.106 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right) \quad (11)$$

Analizando la ecuación 11, se observa que presenta una variación lineal con respecto a cada variable (periodo de la pila más flexible y longitud de separación de las pilas), la diferencia entre las pendientes correspondientes a cada variable nos indica la importancia de tales variables en los desplazamientos relativos presentados entre las pilas. El periodo de vibrar de las pilas tiene mayor importancia en la respuesta que la longitud de separación de las pilas puesto que el parámetro de la pendiente correspondiente al periodo es mayor que el correspondiente al de la longitud de separación. Por su parte el efecto de tener diferencia entre los periodos de las pilas, en un caso extremo de que $T_2/T_1 = 0.20$, los desplazamientos relativos se pueden amplificar en 10% con respecto al caso de tener pilas con el mismo periodo para cualquier longitud de separación de las pilas.

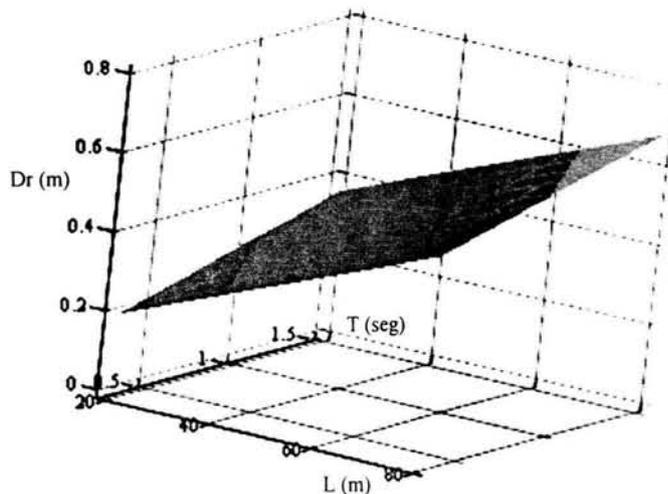


Figura 20. Distribución de desplazamientos relativos, para $T_2/T_1 = 0.20$, para el sitio SCT

Sitio Central de Abastos

En las figuras 21 y 22 se muestra la variación de los desplazamientos relativos entre pilas con diferente periodo de vibrar para una determinada longitud de separación y viceversa respectivamente.

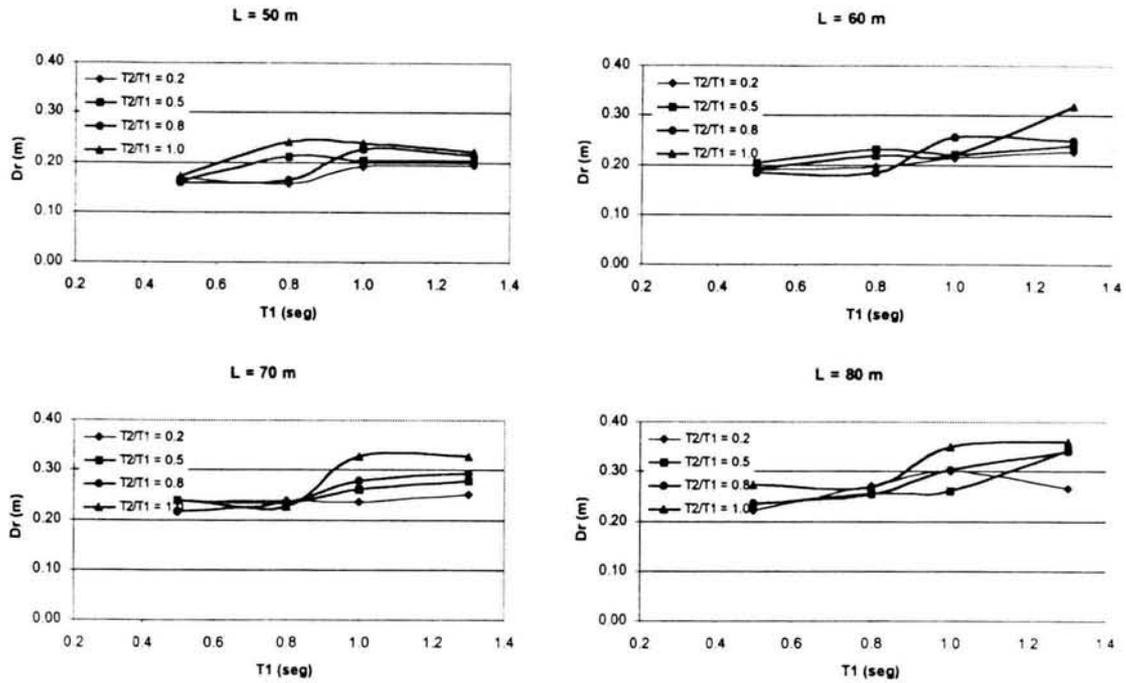


Figura 21. Variación de desplazamientos relativos con respecto al periodo de vibrar de la pila más flexible (T1) en el sitio CD

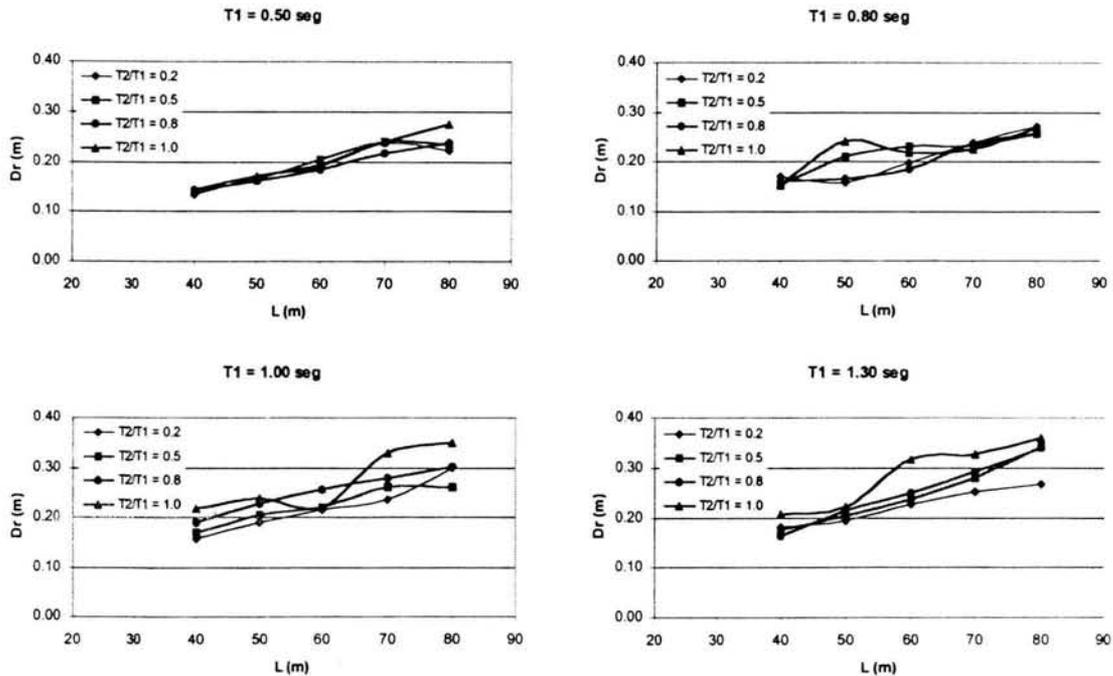


Figura 22. Variación de desplazamientos relativos con respecto a la longitud de separación de las pilas en el sitio CD

La distribución de los resultados mostrados en las figuras 21 y 22, indican que existe una dependencia relativamente lineal respecto a ambas variables (periodo de la pila más flexible y longitud de separación), lo que nos indica que los desplazamientos relativos representan un plano inclinado con respecto a la variación de ambos parámetros, como es el caso del comportamiento obtenido en el sitio SCT, ya que ambos corresponden a terreno de suelo blando. Con respecto a la variación de la respuesta al modificar la relación de periodos de vibrar relativo a la obtenida para el caso de pilas con mismo periodo, en general existe una disminución de tal respuesta, salvo en la combinación de algunos periodos y longitudes donde se presentan ciertas amplificaciones de la misma respuesta.

A partir de la distribución de los desplazamientos relativos correspondientes a pilas con mismo periodo ($T_2/T_1 = 1.0$) se puede establecer una ecuación de comportamiento que se ajuste a ella, la cual tendrá la forma de la ecuación 9 considerando variación lineal con respecto a las dos variables.

Al igual que en el sitio SCT mediante un análisis de regresión lineal múltiple se realiza un ajuste por mínimos cuadrados a la distribución de desplazamientos relativos mostrada en la figura 23 correspondiente a pilas con mismo periodo para la obtención de los parámetros α , β y δ , en la misma figura también se muestran las curvas ajustadas correspondientes a las curvas calculadas analíticamente.

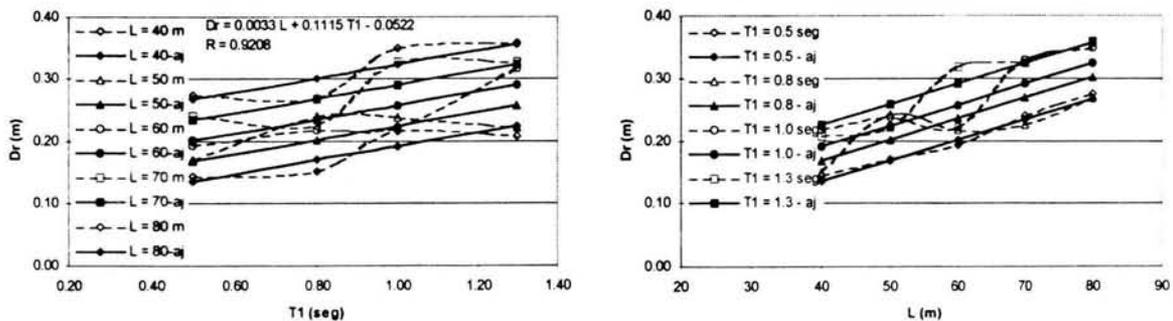


Figura 23. Desplazamientos relativos para pilas con mismo periodo de vibrar ($T_2/T_1 = 1.0$)

La ecuación propuesta está determinada a partir de los desplazamientos relativos obtenidos para pilas con mismo periodo, lo mostrado en las figuras 21 y 22 indica que existe una modificación de tales desplazamientos cuando difieren entre si los periodos de vibrar de las pilas comparadas, para tomar en cuenta esto de una manera simple, al igual como se hizo para el sitio SCT dicha ecuación será afectada por un factor dependiente de la relación de periodos de las pilas.

En la figura 24, se muestra una comparación de la variación de los desplazamientos relativos con respecto al caso cuando se tienen pilas con mismo periodo de vibrar, para la combinación de periodo de la pila más flexible y longitud de separación de las pilas donde se presentan las mayores amplificaciones de los desplazamientos relativos. Considerando que las amplificaciones varían de forma lineal respecto a la relación de periodos de acuerdo a lo expuesto en la figura 24, y además aplicando la variación obtenida para el caso donde se presentan las mayores amplificaciones ($T_1 = 0.80$ seg, $L = 40$ m), los desplazamientos relativos serán descritos por una expresión de la forma de la ecuación 10.

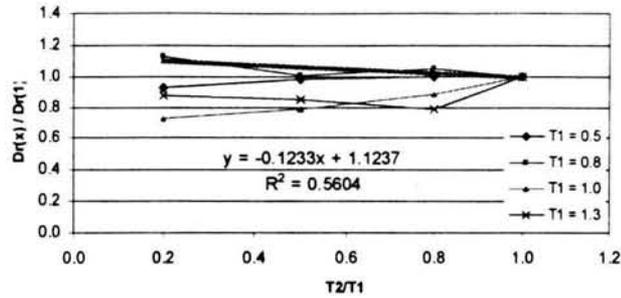


Figura 24. Variación de la respuesta con respecto a la obtenida para pilas con mismo periodo de vibrar en el sitio CD

Los factores α , β , δ y γ que intervienen en la ecuación 10, corresponden a los mostrados en las ecuaciones contenidas en las figuras 23 y 24 y se obtuvieron mediante el ajuste de curvas por mínimos cuadrados a las distribuciones de resultados de los análisis realizados para estructuras con mismo periodo de vibrar mostrados en la figura 23 y los cambios en dicha respuesta contenidos en la figura 24, respectivamente. La ecuación propuesta para obtener los desplazamientos relativos que se presentan entre dos pilas de un puente estructurado a base de claros simplemente apoyados, de acuerdo a lo señalado anteriormente para este sitio es:

$$Dr(T_1, L) = (0.1115 \cdot T_1 + 0.0033 \cdot L - 0.0522) \cdot \left(1.1237 - 0.1233 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right) \quad (12)$$

En la ecuación 12 al igual que en la ecuación 11, el periodo de vibrar de las pilas tiene mayor importancia en la respuesta que la longitud de separación de las mismas puesto que el parámetro de la pendiente correspondiente al periodo es mayor que el correspondiente al de la longitud de separación. Por su parte el efecto de tener diferencia entre los periodos de las pilas, en un caso extremo de que $T_2/T_1 = 0.20$, los desplazamientos relativos se pueden amplificar hasta en 10% con respecto al caso de tener pilas con el mismo periodo, muy similar a lo obtenido en el sitio SCT.

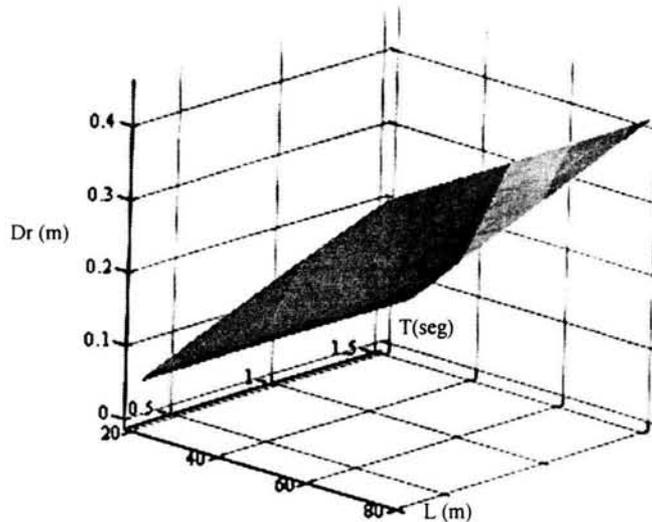


Figura 25. Distribución de desplazamientos relativos, para $T_2/T_1 = 0.20$, para el sitio CD

Sitio Viveros

En las figuras 26 y 27 se muestra la variación de los desplazamientos relativos entre pilas con diferente periodo de vibrar para una determinada longitud de separación y viceversa respectivamente.

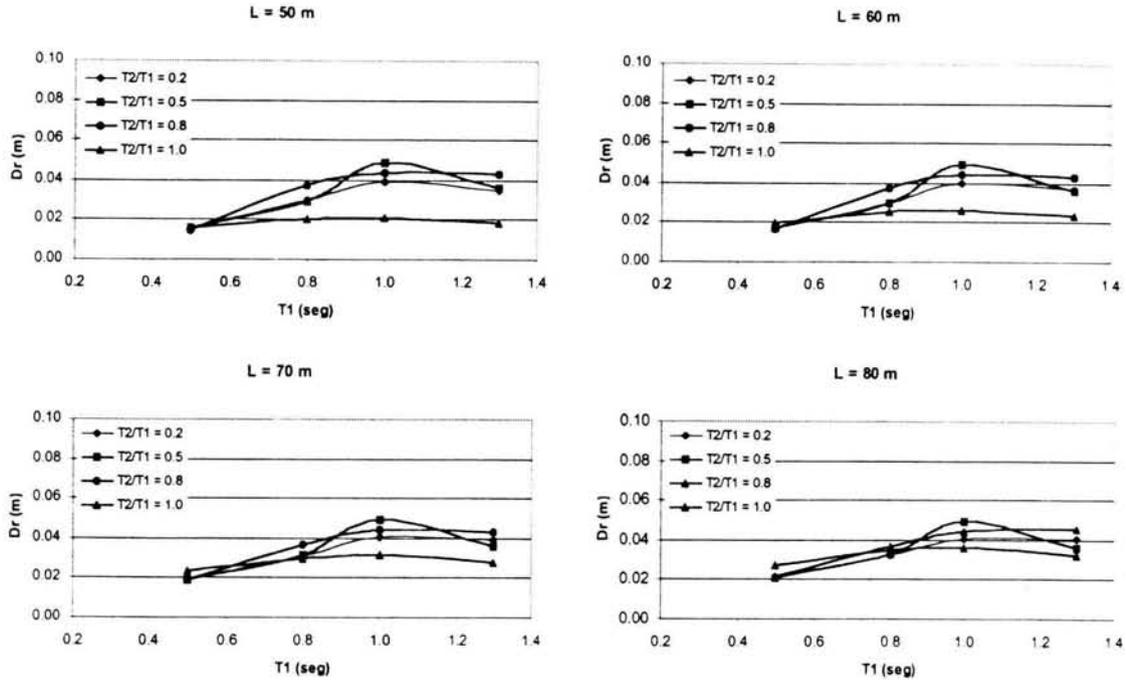


Figura 26. Variación de desplazamientos relativos con respecto al periodo de vibrar de la pila más flexible (T_1) en el sitio Viveros

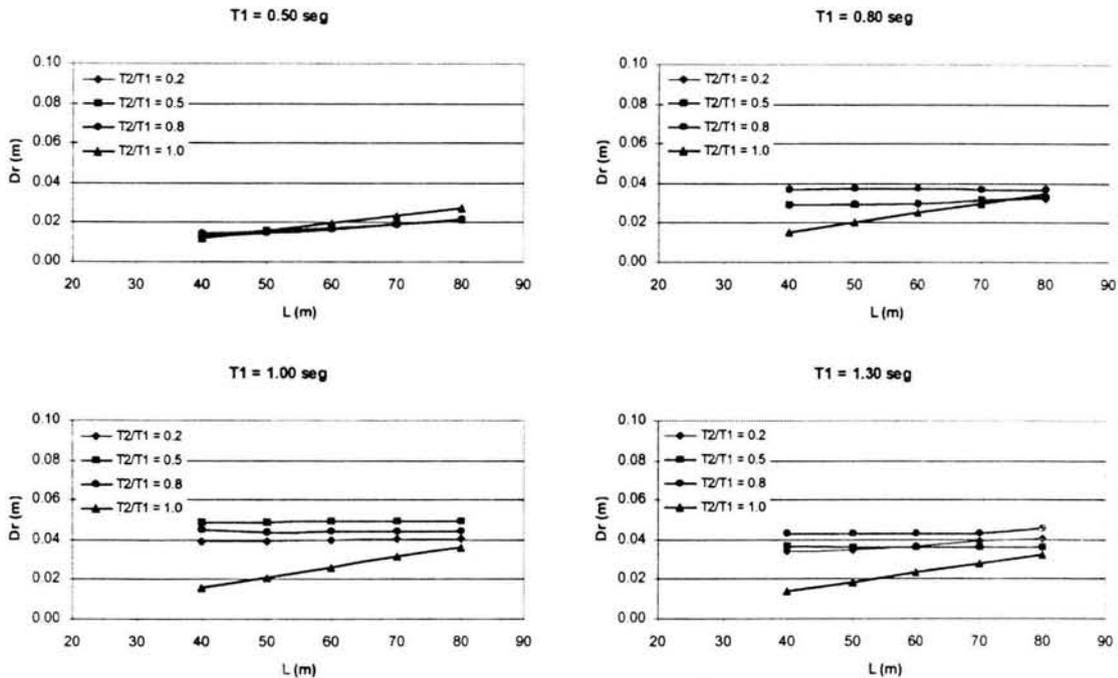


Figura 27. Variación de desplazamientos relativos con respecto a la longitud de separación de las pilas en el sitio Viveros

La forma de la variación de los desplazamientos relativos entre las pilas en un sitio es dependiente de la relación de los periodos dominantes del suelo con los de las pilas, así también al ser más flexibles tales pilas se tendrán mayores desplazamientos relativos entre ellas. En suelos blandos los periodos dominantes del suelo están por encima del intervalo de periodos de las pilas estudiado por lo que se tiene una variación lineal de los desplazamientos relativos con respecto al incremento del periodo de la pila más flexible; en el caso de suelos de transición y firme tales periodos dominantes están dentro del rango de periodos analizados por lo que no se presenta una variación lineal de tales desplazamientos como en el caso de suelos blandos. Para la obtención de la ecuación que representa los desplazamientos relativos en el caso de suelos de transición y firme no se sigue el mismo procedimiento que en el caso de suelo blando puesto que de esa forma nos conduciría a una ecuación mucho más compleja por la no linealidad de la variación de la respuesta con respecto al periodo de la pila más flexible y a la relación de los periodos de las pilas.

De acuerdo a la distribución de los resultados mostrados en las figura 26 se observa que los desplazamientos relativos no presentan variación lineal con respecto al periodo de vibrar T_1 , son mayores en periodos cercanos a un segundo, los cuales corresponden al periodo dominante del sitio; en la figura 27 tales desplazamientos presentan una dependencia lineal respecto a la longitud de separación de las pilas, en ambos casos para pilas con mismo periodo de vibrar.

Con respecto a la variación de los desplazamientos relativos al modificar la relación de periodos de vibrar relativo a los obtenidos para el caso de pilas con mismo periodo, en general existe una modificación de la respuesta que significa una amplificación que depende del periodo de vibrar de la pila más flexible como se observa en la figura 26. Dichas amplificaciones no presentan una variación significativa con respecto a la relación de periodos de vibrar de las pilas.

Debido a las amplificaciones señaladas anteriormente, para representar la variación de los desplazamientos relativos, se ajustará mediante mínimos cuadrados una curva a la respuesta presentada con respecto al periodo de vibrar de la pila más flexible, considerando de manera implícita el efecto de que las pilas no tengan el mismo periodo de vibrar.

Para cualquier caso de relaciones de periodos de las pilas diferente a la unidad, la respuesta presentada con respecto a la longitud de separación se mantiene relativamente constante, lo que indica que este efecto depende principalmente del periodo de la pila más flexible como se señaló anteriormente.

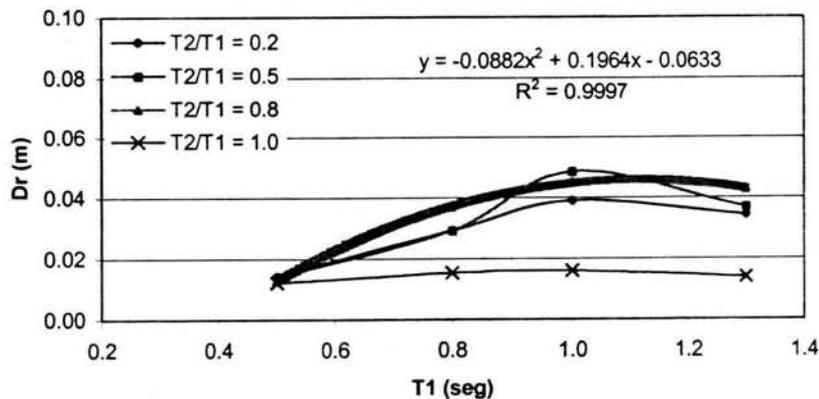


Figura 28. Desplazamientos relativos entre pilas y curva ajustada en el sitio Viveros

La forma de la variación de la respuesta presentada, se asemeja a la curva definida por una ecuación de segundo grado, por lo que realizando el ajuste a los resultados obtenidos de los análisis mostrados en la figura 28, se tiene la siguiente ecuación en función del periodo:

$$Dr(T_1) = -0.0882 \cdot T_1^2 + 0.196 \cdot T_1 - 0.063 \quad (13)$$

El efecto producido por el paso de las ondas en este sitio, localizado en terreno de suelo de transición, tiene una menor relevancia en los desplazamientos relativos, con respecto a los presentados en sitios con suelo blando, puesto que el tiempo de desfase entre el registro de las ondas en las pilas es menor al incrementarse la velocidad de propagación de estas conforme se tiene un suelo más firme.

En cuanto a la influencia de la longitud de separación de las pilas en los desplazamientos relativos presentados, en la figura 27 se observa que existe una variación lineal de tales desplazamientos, por lo que para tomarlo en cuenta se añade un término que contempla la influencia de este factor (L) a la ecuación 13. Este término se determina a partir de un ajuste por mínimos cuadrados de los resultados obtenidos mostrados en la figura 27 para pilas con el mismo periodo, por lo que realizado esto se tiene:

$$Dr(T_1, L) = 0.0003 \cdot L - 0.0882 \cdot T_1^2 + 0.196 \cdot T_1 - 0.063 \quad (14)$$

El factor que determina la influencia de la longitud de separación de las pilas en los desplazamientos relativos, no es tan relevante como el periodo de vibrar considerado (T1) como se puede observar en la ecuación 14, por lo que puede ser despreciable sin que afecte de manera importante la respuesta. La ecuación 14 representa una superficie que muestra una curvatura que define el comportamiento de los desplazamientos relativos con respecto al periodo de vibrar (T1), la variación de tales desplazamientos con respecto a la longitud de separación de las pilas es lineal con una pendiente relativamente baja.

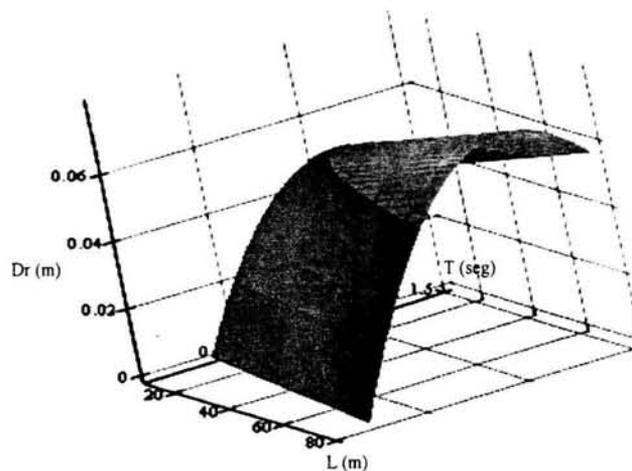


Figura 29. Distribución de desplazamientos relativos para el sitio Viveros.

La forma de la variación de los desplazamientos relativos, con respecto al periodo de vibrar de la pila más flexible mostrado en la figura 29, nos indica que la mayor respuesta se presenta en los periodos dominantes del suelo del sitio como lo indica el espectro de respuesta correspondiente al sitio Viveros mostrado en la figura 9.

Sitio La Unión, Gro.

En las figuras 30 y 31 se muestra la variación de los desplazamientos relativos entre pilas con diferente periodo de vibrar para una determinada longitud de separación y viceversa respectivamente.

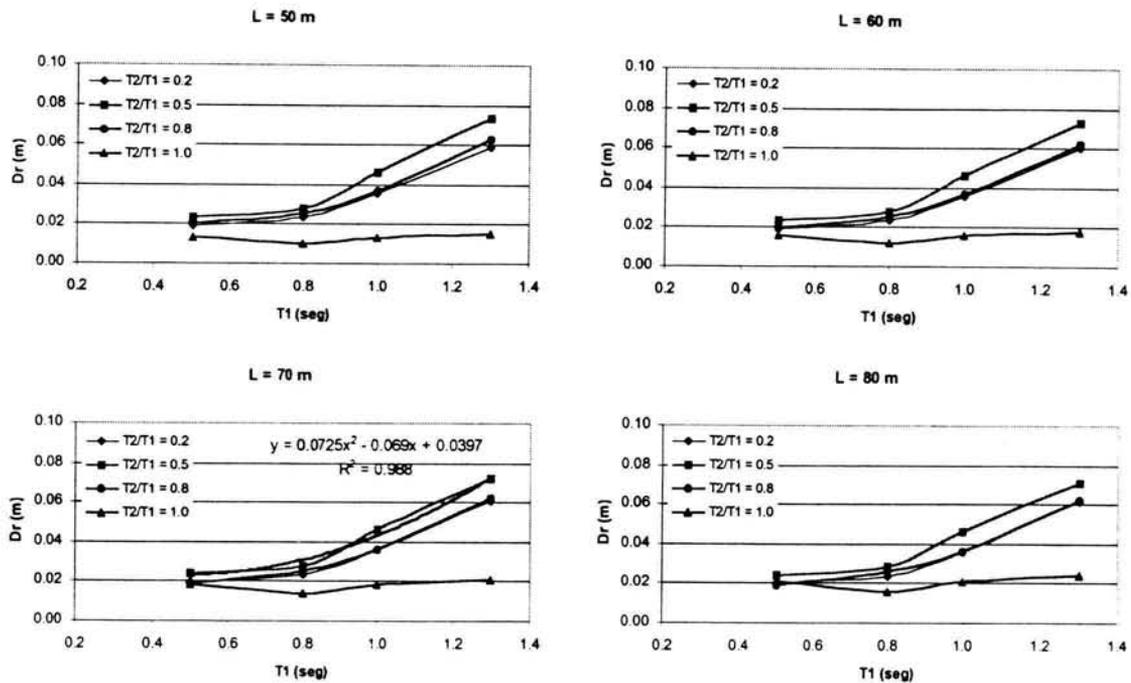


Figura 30. Variación de desplazamientos relativos con respecto al periodo de vibrar de la pila más flexible (T_1) en el sitio La Unión

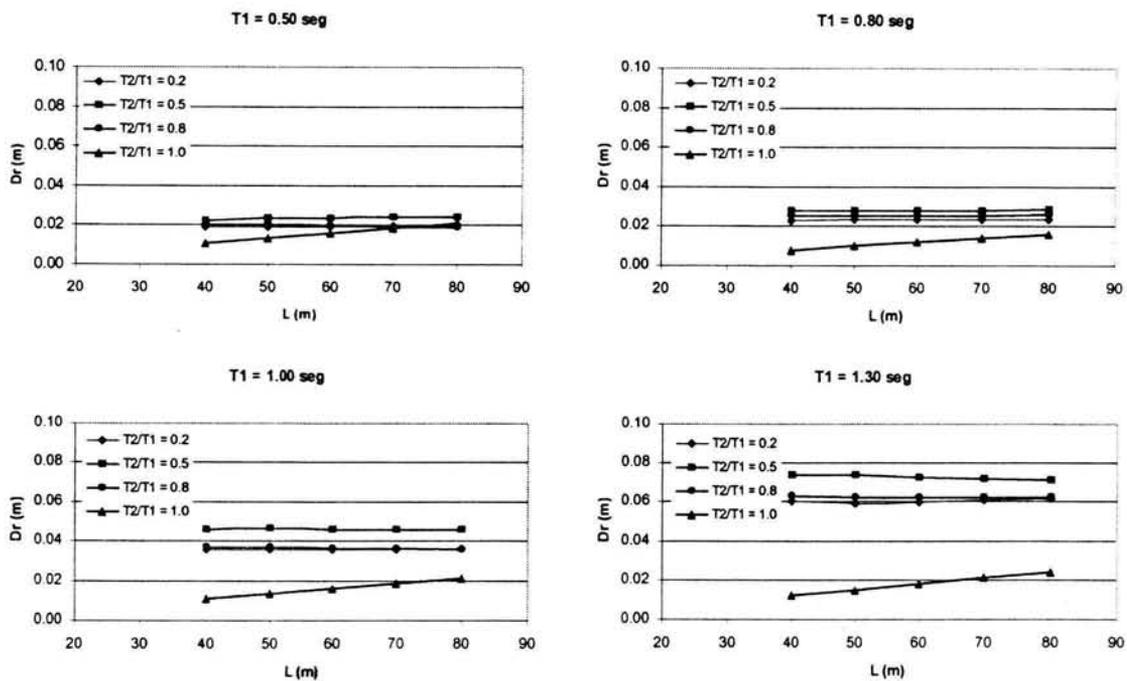


Figura 31. Variación de desplazamientos relativos con respecto a la longitud de separación de las pilas en el sitio La Unión

La distribución de los resultados mostrados en la figura 30 muestra que los desplazamientos relativos no presentan variación lineal respecto al periodo de vibrar T_1 , ciertamente tales desplazamientos son mayores en periodos largos pero en periodos bajos son mayores que los presentados en periodos mayores relativamente cercanos a ellos, debido a que en suelo firme los periodos dominantes son bajos; en la figura 31 tales desplazamientos presentan una dependencia lineal respecto a la longitud de separación de las pilas, en ambos casos para pilas con mismo periodo de vibrar.

Para la respuesta correspondiente a la modificación de la relación de periodos de vibrar relativa a la obtenida para el caso de pilas con mismo periodo, en general existe un cambio que significa una amplificación que depende del periodo de vibrar de la pila más flexible como se observa en la figura 30. Dichas amplificaciones no presentan un cambio significativo con respecto a la relación de periodos de vibrar de las pilas y son mucho mayores que las presentadas en el sitio Viveros.

Debido a las amplificaciones señaladas anteriormente, para representar la variación de los desplazamientos relativos se ajusta una curva mediante mínimos cuadrados a la respuesta presentada con respecto al periodo de vibrar de la pila más flexible, considerando de manera implícita el efecto de que las pilas no tengan el mismo periodo de vibrar.

Para cualquier caso de relaciones de periodos de las pilas diferente a la unidad, los desplazamientos relativos presentados con respecto a la longitud de separación se mantienen relativamente constantes, lo que indica que este efecto depende principalmente del periodo de la pila más flexible.

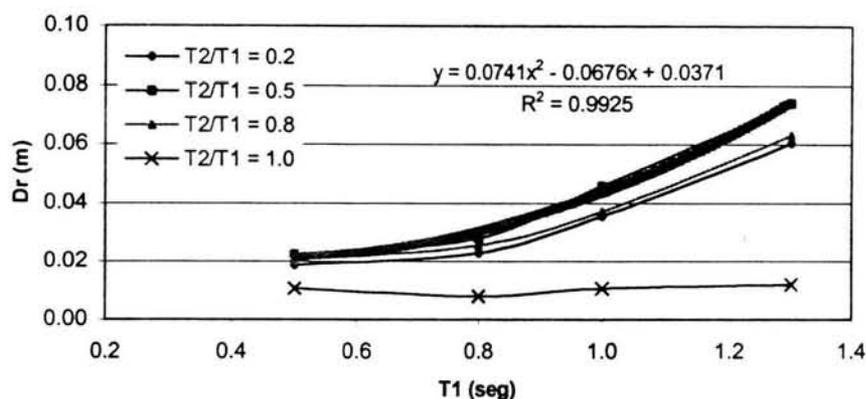


Figura 32. Desplazamientos relativos entre pilas y curva ajustada en el sitio La Unión

En general, la forma de la variación de los desplazamientos relativos presentados en este sitio es la que muestra la figura 32; la curva que se ajusta a esta distribución está representada por una ecuación de segundo grado la cual cubre los desplazamientos relativos para cualquier relación de periodos de las pilas, por lo que al realizar el ajuste se tiene la siguiente ecuación en función del periodo:

$$Dr(T_1) = 0.0741 \cdot T_1^2 - 0.068 \cdot T_1 + 0.037 \quad (15)$$

El efecto producido por el paso de las ondas en este sitio, localizado en terreno de suelo firme, tiene una menor relevancia en la respuesta con respecto a la presentada en sitios con suelo blando y de

transición, puesto que el tiempo de desfase entre el registro de las ondas en las pilas es menor al incrementarse la velocidad de propagación de estas conforme se tiene un suelo más firme.

En cuanto a la influencia de la longitud de separación de las pilas en los desplazamientos relativos presentados, en la figura 31 se observa que existe una variación lineal de tales desplazamientos, por lo que para tomarlo en cuenta se añade un término que contempla la influencia de este factor (L) a la ecuación 15; al igual que en el caso del sitio Viveros realizando el ajuste por mínimos cuadrados correspondiente a la respuesta de pilas con mismo periodo de la figura 31 se tiene:

$$Dr(T_1, L) = 0.0002 \cdot L + 0.0741 \cdot T_1^2 - 0.068 \cdot T_1 + 0.037 \quad (16)$$

El factor que determina la influencia de la longitud de separación de las pilas en los desplazamientos relativos, no es tan relevante como el periodo de vibrar considerado (T_1) como lo muestra la ecuación 16, por lo que puede ser despreciable sin que afecte de manera importante la respuesta. Como es de esperarse, este factor es menor al obtenido para el sitio Viveros puesto que ahora se trata de un sitio localizado en suelo firme con una mayor velocidad de propagación de las ondas.

La ecuación 16, representa una superficie que muestra una curvatura que define el comportamiento de los desplazamientos relativos con respecto al periodo de vibrar (T_1) correspondiente a variación de la respuesta calculada; tales desplazamientos varían linealmente con respecto a la longitud de separación de las pilas con una pendiente relativamente baja, puesto que el efecto del paso de las ondas es menor en este tipo de suelo por presentar una velocidad de las ondas relativamente alta.

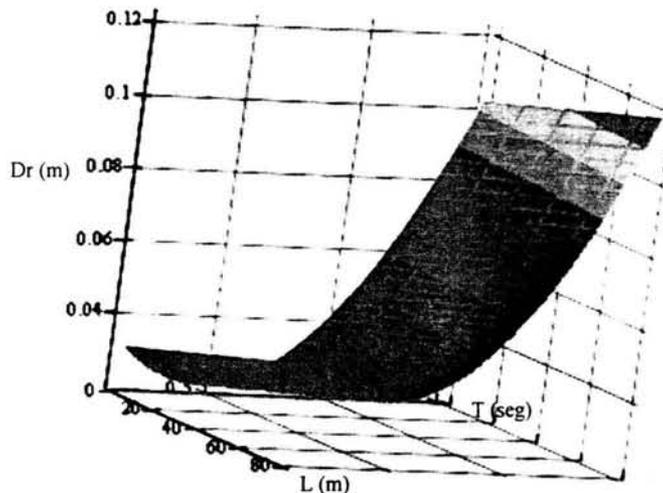


Figura 33. Distribución de desplazamientos relativos en el sitio La Unión.

La variación de los desplazamientos relativos, con respecto al periodo de vibrar de la pila más flexible mostrado en la figura 33, nos indica que la respuesta presentada en periodos bajos tiene cierta importancia y es comparable a la obtenida en periodos cercanos a 0.80 segundos, debido a que en este tipo de suelos el periodo dominante es relativamente bajo como lo muestra el espectro de respuesta correspondiente a este sitio en la figura 9. Al aumentar el periodo T_1 , los incrementos en los desplazamientos relativos debido a la no igualdad entre los periodos de las pilas tienden también a aumentar. Debido a lo anterior, la variación de la respuesta mostrada en la figura 33

presenta ese incremento tan pronunciado, puesto que considera implícitamente cualquier relación de periodos que se pueda presentar.

Comparación de las respuestas obtenidas en los sitios estudiados

La respuesta de una misma estructura localizada en varios sitios ante un evento sísmico, dependerá de las condiciones locales del suelo del sitio. En la figura 34 se presentan los desplazamientos relativos existentes entre dos pilas de un puente localizado en los sitios estudiados obtenidos analíticamente para ciertos parámetros indicados en ella, los cuales varían con respecto al periodo de la pila más flexible y a la longitud de separación de las pilas, respectivamente. Comparando tales respuestas observamos la importancia de las condiciones locales del suelo del sitio puesto que se trata de la misma estructura analizada. Se muestra que los resultados son mayores en sitios de suelo blando con respecto a los de suelo de transición y firme lo cual ya se discutió anteriormente.

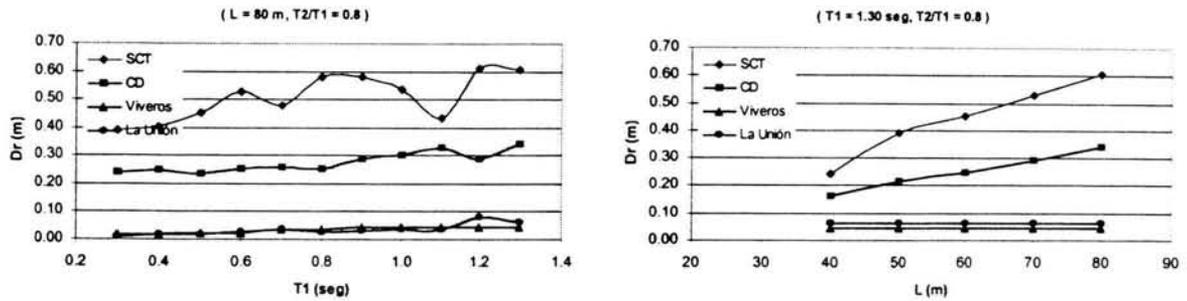


Figura 34. Desplazamientos relativos entre pilas obtenidos de forma analítica en los sitios estudiados

En la figura 35 se muestran los desplazamientos relativos que se presentan entre dos pilas de un puente obtenidos con las ecuaciones aquí propuestas para el cálculo de tal respuesta en cada sitio estudiado, respectivamente para los parámetros correspondientes a los de la figura 34. También se presenta la respuesta obtenida con la expresión propuesta por el AASHTO (1994) para el cálculo de la longitud necesaria de apoyo en este tipo de puentes, la cual es la misma para cualquier sitio, tal expresión es la siguiente:

$$L_{Apoyo} = (200 + 0.0017 \cdot L + 0.0067 \cdot H) \cdot (1 + 0.000125 \cdot S^2) \quad (17)$$

donde L , H son la longitud del tablero y la altura de la pila, respectivamente ambas en mm, S es el ángulo de esviaje en grados; la longitud de apoyo L_{Apoyo} está dada en mm.

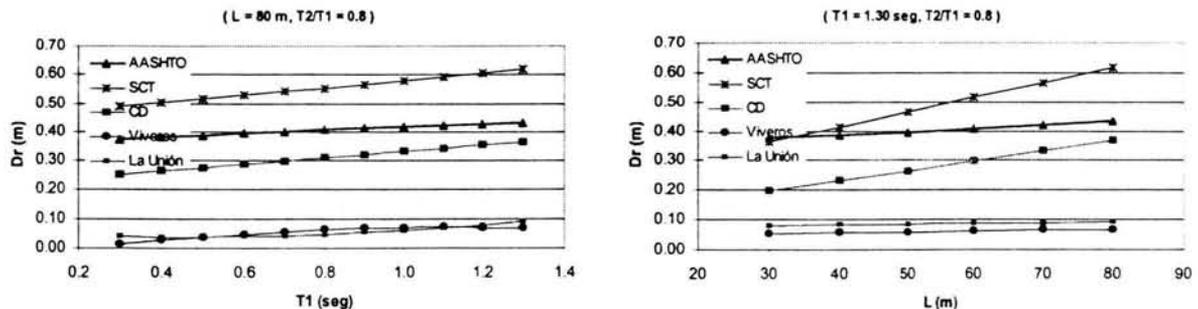


Figura 35. Desplazamientos relativos entre pilas obtenidos con las ecuaciones propuestas para cada sitio estudiado, respectivamente

Comparando los resultados obtenidos con la expresión del AASHTO (para los cuales se consideró un ángulo de esviaje de 0°) con los obtenidos con las expresiones aquí propuestas, se observa que la primera expresión arroja valores muy superiores a los obtenidos con las expresiones propuestas en los sitios de suelo de transición y firme aquí estudiados y valores relativamente parecidos a los obtenidos en el sitio CD de suelo blando, no obstante hay que destacar que en el sitio SCT los valores obtenidos con la expresión aquí propuesta para ese sitio son mayores a los obtenidos con la expresión del AASTHO, lo cual indica la importancia de las condiciones locales del sitio en la respuesta de una estructura sobre todo en suelos blandos, ya que tal expresión es usada de manera general para cualquier sitio, por lo que las expresiones aquí propuestas predicen la respuesta de manera más exacta al estar caracterizadas para un sitio en particular. Otro punto de comparación es que la ecuación 17 se basa en la altura de la pila, lo cual es subjetivo a la sección transversal de la misma que influye en el periodo de vibrar del cual depende la respuesta de las pilas; en las expresiones aquí propuestas este punto de comparación se basa en el periodo de vibrar de la pila, lo cual hace posible aplicar lo aquí obtenido a pilas con cierto periodo de vibrar independientemente de la forma de la sección transversal y altura de la pila.

En general los resultados obtenidos con las ecuaciones propuestas para cada sitio arrojan valores muy semejantes a los calculados analíticamente como se muestra en las figuras 34 y 35.

El comportamiento presentado en los distintos sitios, con respecto a la variación del periodo de vibrar de la pila más flexible, indica que los desplazamientos relativos dependen en cierta forma de la relación de tal periodo con el periodo dominante del suelo, no obstante al incrementar la flexibilidad de las pilas aumentan tales desplazamientos relativos.

Longitud mínima de apoyo de elementos de la superestructura de puentes

La longitud de apoyo de los elementos de la superestructura de un puente estructurado a base de claros simplemente apoyados, debe garantizar que no se presente la falla del puente ante un evento sísmico debido a la pérdida de apoyo de tales elementos, la causa de esto es la diferencia en los desplazamientos de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente. Considerando que éste es recto, tal causa se deberá solamente a la diferencia en los desplazamientos de las pilas en dirección longitudinal como es nuestro caso de estudio.

Según los resultados obtenidos en el estudio realizado en los distintos sitios, se identifican respuestas que corresponden al tipo de suelo de los sitios en cuestión. En general para suelo blando del cual se obtuvo la respuesta en dos sitios, se presenta un comportamiento relativamente parecido; para suelo de transición y firme se obtuvo la respuesta para un sitio, respectivamente. Se propone usar las ecuaciones obtenidas en los diferentes sitios para calcular la longitud mínima de apoyo de elementos de la superestructura del tipo de puentes estudiados, para el tipo de suelo correspondiente.

Para suelo blando se propone usar la ecuación 11 correspondiente al sitio SCT, puesto que presenta valores mayores a los correspondientes al sitio CD.

Para caso de suelo de transición y firme, se propone usar las ecuaciones 14 y 16, que corresponden a los sitios estudiados en esos tipos de suelo, respectivamente. Para estos tipos de suelo, los valores de las respuestas son relativamente parecidos para ciertos periodos, no obstante la forma de las curvas definidas por la variación en cada sitio no es la misma, por lo que son diferentes las expresiones para cada tipo de suelo.

El uso de estas ecuaciones es válido en sitios donde el suelo presente propiedades similares a los aquí estudiados, principalmente periodos dominantes cercanos a los de tales sitios.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se realizaron estudios para la obtención de los máximos desplazamientos relativos que se pueden presentar en pilas adyacentes a un claro en puentes urbanos en la dirección longitudinal de los mismos. Se analizaron modelos representativos del tipo de pilas empleadas en las subestructuras de puentes de este tipo, tomando en cuenta varios factores que influyen en dichas diferencias de desplazamiento.

De acuerdo a las consideraciones tomadas para el estudio y a los resultados obtenidos para un sitio en particular, la principal dependencia de las diferencias presentadas, es el periodo de vibración de la estructura en este caso se tomó como base el periodo correspondiente a la pila más flexible. Cuando las pilas comparadas tienen periodos de vibración muy cercanos al periodo dominante del suelo del sitio donde se encuentren, se presentan desplazamientos relativamente mayores de manera individual, los cuales al hacer la comparación de los obtenidos para las dos pilas, y tomando en cuenta la diferencia de tiempo en que éstos se presentan en cada una de las pilas, se pueden generar diferencias de desplazamiento considerables relativas a los mismos.

El análisis de los desplazamientos relativos obtenidos conforme a los factores de influencia considerados realizado anteriormente en los sitios de estudio nos generó una tendencia del comportamiento presentado de acuerdo al tipo de suelo.

Para los sitios localizados en suelo blando como lo son SCT y CD, los máximos desplazamientos relativos presentados muestran el siguiente comportamiento:

- Con respecto al periodo de vibrar de la pila más flexible, se presenta una variación lineal de la respuesta.
- Para el caso donde los periodos de vibrar de las pilas son distintos entre sí, no existe una variación significativa de los desplazamientos relativos con respecto al caso donde tales periodos no difieren entre sí. No obstante hay que destacar que al presentarse estructuras de pilas con periodos mayores a 1.3 segundos y distintos entre sí, se pueden presentar amplificaciones de la respuesta respecto al caso de que tales periodos sean similares, por lo que se recomienda que en esos casos tales periodos no difieran entre sí de manera significativa.
- En general, con respecto a la relación de periodos de las pilas la mayor respuesta se presenta cuando éstos son iguales entre sí ($T_2/T_1 = 1.0$). Esto se debe principalmente a la introducción del efecto del paso de las ondas, lo cual modifica para cada instante de tiempo la acción del sismo en cada pila.

Al considerar el efecto del paso de las ondas, los desplazamientos relativos presentados dependerán de los desplazamientos de cada una de las pilas, así como de la diferencia de los desplazamientos del suelo en la base de cada una de ellas. Cuando se considera la misma excitación en la base de las pilas, mientras mayor sea la diferencia en sus propiedades dinámicas se obtienen mayores desplazamientos relativos, puesto que tales sólo dependen del desplazamiento que se presente en cada pila.

- La respuesta obtenida al variar la longitud de separación de las pilas, presenta un comportamiento lineal, puesto que al aumentar tal longitud, se tiene un mayor intervalo de tiempo entre el registro de las ondas sísmicas en las pilas.

En lo referente a los sitios correspondientes a suelo de transición y firme, Viveros y La Unión respectivamente, se presenta el siguiente comportamiento:

- Los máximos desplazamientos relativos dependen principalmente del periodo de vibrar de la pila más flexible, tomado como base en este estudio (T1), y de la relación entre éste y el periodo dominante del suelo del sitio.
- Respecto a la relación de los periodos de las pilas, en general se presenta una amplificación significativa de los desplazamientos relativos cuando existen diferencias entre tales periodos respecto al caso contrario. Dichas amplificaciones son relativamente constantes para cualquier relación de periodos, claro está diferente de la unidad; además son dependientes del periodo de vibrar tomado como base. Estas amplificaciones son mayores en el sitio La Unión con respecto a las presentadas en el sitio Viveros, que se localizan en suelo firme y de transición, respectivamente.
- La respuesta obtenida al variar la longitud de separación de las pilas, presenta un comportamiento lineal con una pendiente mucho menor a la correspondiente a sitios de suelo blando, ya que en estos últimos se tiene un mayor intervalo de tiempo entre el registro de las ondas sísmicas en las pilas, que a su vez depende de la velocidad de propagación de las ondas en el suelo.

La respuesta obtenida en los sitios de suelo blando es mucho mayor a la correspondiente a los sitios ubicados en zonas de suelo de transición y firme, debido a las características del sismo empleado en el análisis, cuyo contenido de frecuencias hace que se presenten mayores amplificaciones espectrales en sitios con ese tipo de suelo. Además, el desfase en el registro de las ondas en las pilas comparadas tiene una gran relevancia en esa respuesta, el cual es mayor en suelos blandos.

Para obtener una configuración diferente de las respuestas obtenidas en los sitios de terreno firme y de transición mayores a las correspondientes para este sismo, cuya fuente sismológica es de subducción, son necesarios acelerogramas registrados durante sismos cuya fuente sea distinta a la de éste y cuyos efectos en este tipo de suelos sean relativamente comparables a los producidos en suelos blandos para este tipo de estructuras. Los sismos provenientes de la fuente sismológica de falla normal, presentan un mayor contenido de frecuencias que produce mayores amplificaciones espectrales en sitios con suelo firme con respecto a las amplificaciones presentadas en sismos de subducción en esos sitios.

En general los resultados obtenidos para los diferentes sitios y bajo las condiciones de modelado y análisis aquí empleadas, reflejan que existe la posibilidad de falla por pérdida de apoyo de la superestructura en este tipo de puentes, sobre todo para estructuras ubicadas en zonas de suelo blando y con periodos de pilas relativamente largos en las cuales no se cuente con la longitud necesaria de apoyo de la superestructura, además del consiguiente daño por golpeteo independientemente de tal falla. En general para este tipo de puentes ubicados en sitios de terreno firme se puede llegar a presentar daño por golpeteo entre elementos de la superestructura, en lo cual no está enfocado este estudio, lo cual no le resta importancia.

RECONOCIMIENTOS

Se hace un especial reconocimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, por el apoyo otorgado al autor durante la realización de los estudios de maestría, motivo por el cual se presenta este trabajo para la obtención del grado; así como por la promoción y fomento de la investigación científica y la formación de académicos en beneficio del desarrollo del país.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, se le reconoce el apoyo en cuanto a instalaciones y asesoría para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

AASHTO (1994), "LRFD bridge design specifications", *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington, D.C., First Edition, Cap. 4.

Chopra, A K (2001), "Dynamics of structures, Theory and applications to earthquake engineering", Pearson Education, Inc., Delhi, India, 2^a. Ed.

DDF (1988), "Estudio sobre sismicidad en el valle de México", *Departamento del Distrito Federal, Secretaría General de Obras*, PNUD, HABITAT, Parte 1, Cap. III, 1988.

DesRoches, R, S Muthukumar (2002) "Effect of pounding and restrainers on seismic response of múltiple – frame bridges", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 7, July 1, 2002.

Estrada, R J L, A E Reinoso (2003), "Diferencia de desplazamiento en pilas comunes a un mismo claro en puentes urbanos", *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto. México*, Noviembre, 2003.

EQE International's, (1995), "The january 17, 1995 Kobe earthquake", *Página consultada el 29 de marzo de 2004*. <http://www.eqe.com/publications/kobe/kobe.htm>.

Hao, H (1998), "A parametric study of the required seating length for bridge decks during earthquake", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, 91 – 103, 1998.

Malhotra, P K, (1998), "Dynamics of pounding at expansion joints of concrete bridges", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 7, July, 1998.

Newmark, N M, (1959), "A method of computation for structural dynamics", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 85, pp. 67 – 94.

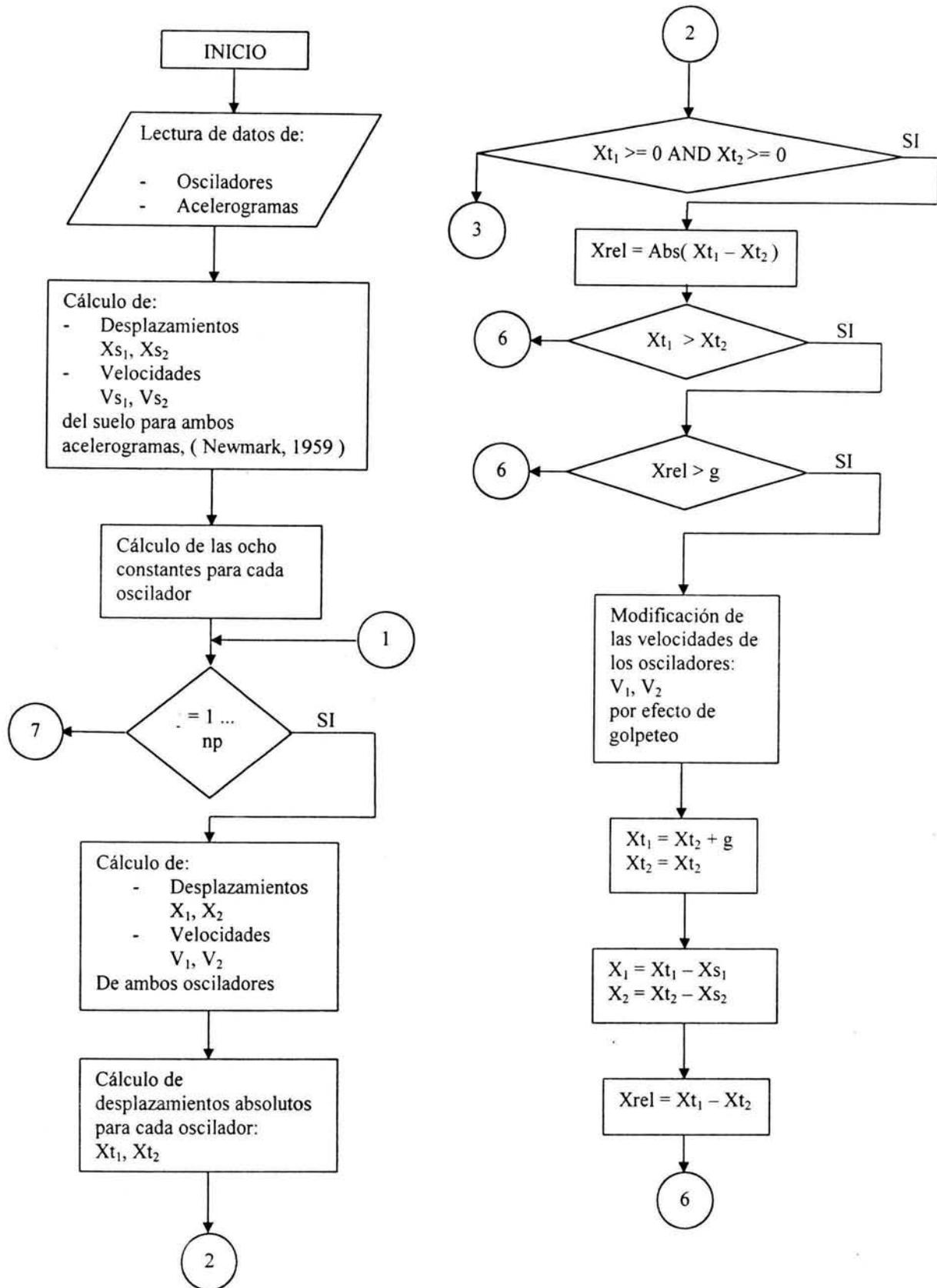
Priestley, M J N, F Seible and G M Calvi (1996), "Seismic design and retrofit of bridges", John Wiley & Sons, New York.

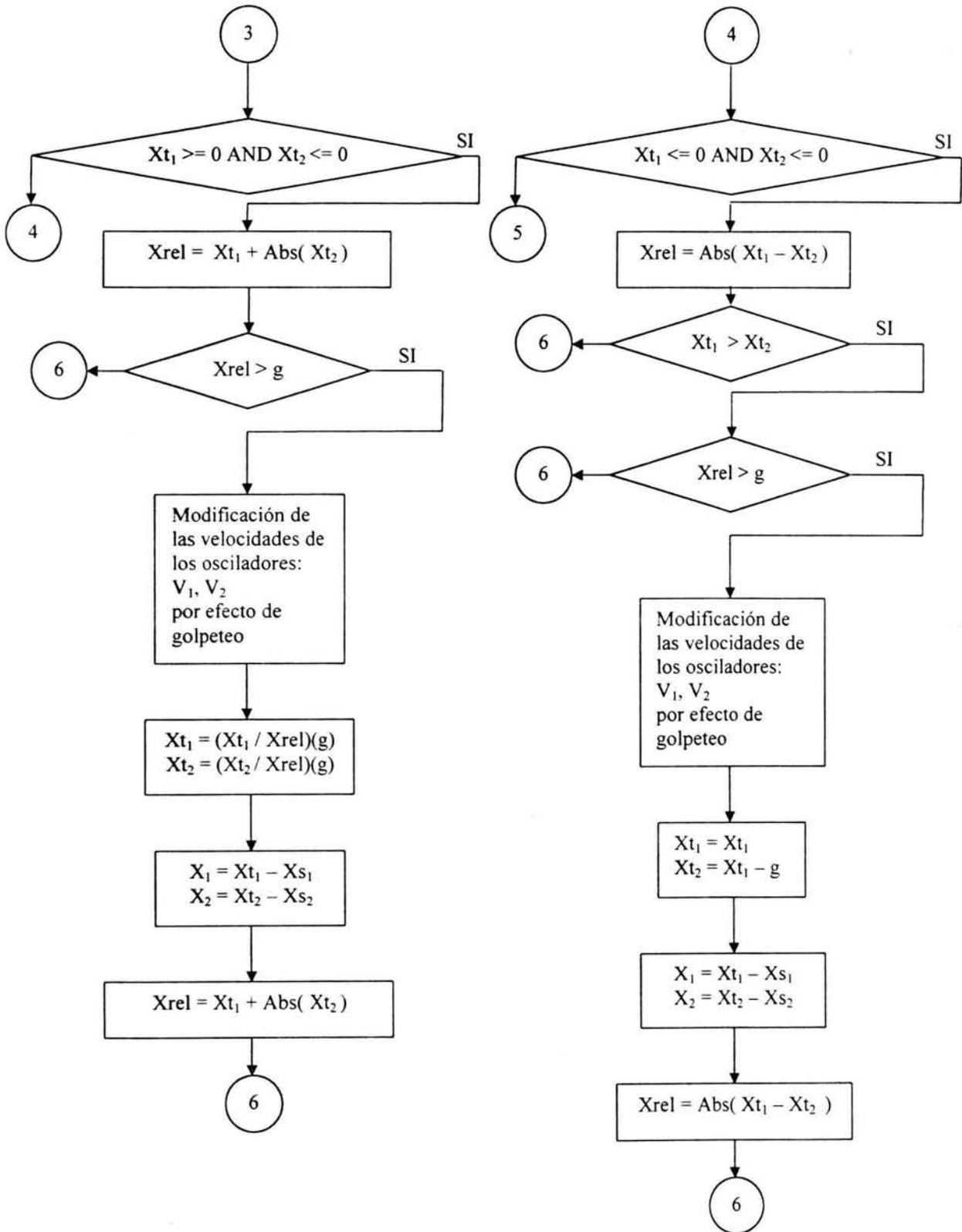
Roullé Agathe (2004), "El movimiento sísmico en el valle de México: Análisis de datos de un arreglo 3D de pequeña apertura en la colonia Roma", *Tesis doctoral en Ciencias de la Tierra, Posgrado en Ciencias de la Tierra del Instituto de Geofísica, UNAM*, Junio 2004.

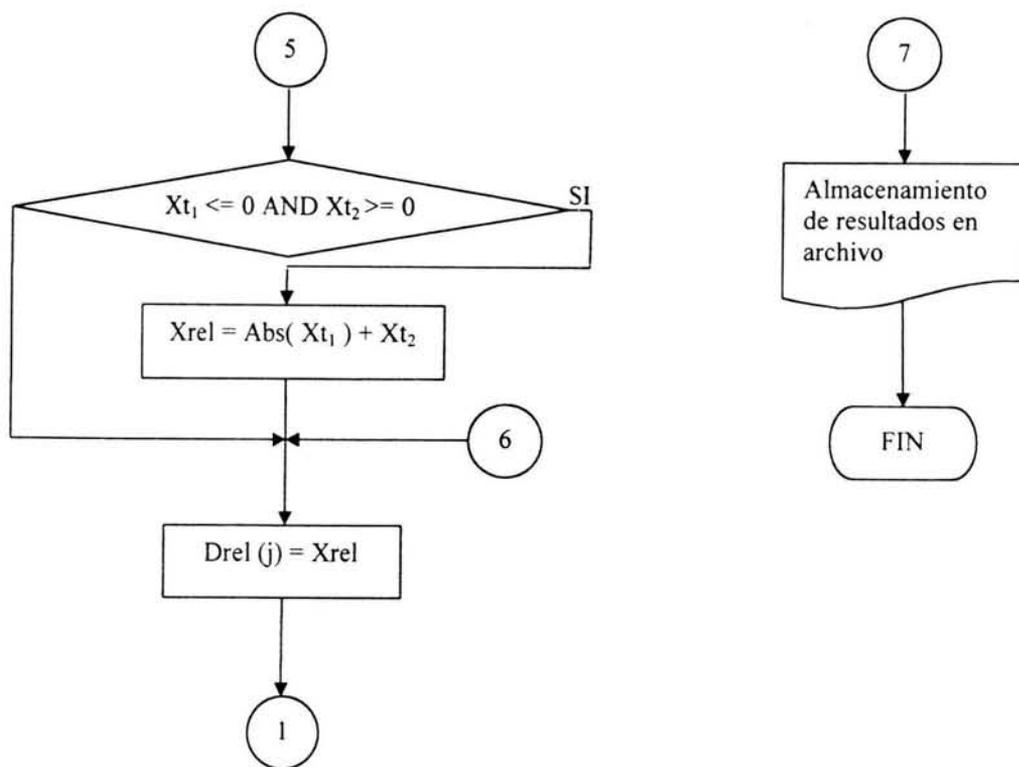
Sánchez, S H A, C E Del Valle y U L Vieitez (1995), "Demanda de ductilidad de estructuras tipo péndulo invertido (puentes elevados)", *Reporte FJBS/CIS – 95/01*, Centro de Investigación Sísmica A C.

Wallce, W J (1989), "BIAX a computer program for the analysis of reinforced concrete sections", University of California at Berkeley, July, 1989.

APÉNDICE A. Diagrama de flujo del análisis dinámico realizado







APÉNDICE B. Tablas de resultados obtenidos en cada sitio

Resultados correspondientes al sitio SCT

T1 = 0.5 seg	Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0
40	0.2498	0.2503	0.2577	0.2588
50	0.2972	0.2910	0.3198	0.3499
60	0.3940	0.3795	0.3620	0.4100
70	0.3977	0.4103	0.4045	0.4673
80	0.4827	0.4463	0.4521	0.5180

T1 = 0.8 seg	Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0
40	0.2575	0.2872	0.2795	0.3078
50	0.3846	0.3712	0.4090	0.4064
60	0.3546	0.4924	0.4880	0.4776
70	0.4465	0.5519	0.5273	0.4932
80	0.4449	0.5764	0.5805	0.6077

T1 = 1.0 seg	Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0
40	0.3348	0.2829	0.3369	0.3382
50	0.3511	0.3638	0.3463	0.4442
60	0.4171	0.3623	0.5124	0.5134
70	0.5289	0.4495	0.4564	0.5147
80	0.5469	0.5049	0.5343	0.3808

T1 = 1.3 seg	Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0
40	0.2878	0.3457	0.2409	0.4068
50	0.4374	0.4989	0.3887	0.4315
60	0.4877	0.5461	0.4519	0.5723
70	0.5642	0.6353	0.5283	0.5473
80	0.5980	0.6761	0.6052	0.6023

Resultados correspondientes al sitio CD

T1 = 0.5 seg	Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0
40	0.1333	0.1416	0.1432	0.1439
50	0.1696	0.1624	0.1598	0.1710
60	0.1882	0.2033	0.1827	0.1925
70	0.2357	0.2387	0.2164	0.2395
80	0.2215	0.2328	0.2358	0.2741

T1 = 0.8 seg		Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0	
40	0.1696	0.1519	0.1586	0.1507	
50	0.1562	0.2108	0.1637	0.2414	
60	0.1973	0.2307	0.1837	0.2174	
70	0.2385	0.2334	0.2344	0.2263	
80	0.2699	0.2548	0.2547	0.2684	

T1 = 1.0 seg		Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0	
40	0.1565	0.1697	0.1906	0.2165	
50	0.1902	0.2046	0.2273	0.2387	
60	0.2145	0.2214	0.2568	0.2210	
70	0.2358	0.2619	0.2791	0.3281	
80	0.2997	0.2618	0.3020	0.3495	

T1 = 1.3 seg		Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0	
40	0.1817	0.1763	0.1634	0.2068	
50	0.1931	0.2028	0.2140	0.2209	
60	0.2267	0.2375	0.2488	0.3173	
70	0.2507	0.2782	0.2924	0.3279	
80	0.2669	0.3430	0.3398	0.3591	

Resultados correspondientes al sitio Viveros.

T1 = 0.5 seg		Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0	
40	0.0143	0.0141	0.0129	0.0122	
50	0.0158	0.0157	0.0146	0.0161	
60	0.0174	0.0173	0.0164	0.0199	
70	0.0192	0.0189	0.0188	0.0234	
80	0.0213	0.0212	0.0214	0.0270	

T1 = 0.8 seg		Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0	
40	0.0293	0.0292	0.0370	0.0153	
50	0.0295	0.0292	0.0372	0.0203	
60	0.0298	0.0300	0.0372	0.0252	
70	0.0309	0.0317	0.0370	0.0299	
80	0.0321	0.0331	0.0365	0.0346	

T1 = 1.0 seg		Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0	
40	0.0390	0.0486	0.0452	0.0159	
50	0.0395	0.0490	0.0437	0.0212	
60	0.0400	0.0494	0.0440	0.0263	
70	0.0404	0.0493	0.0441	0.0314	
80	0.0408	0.0491	0.0441	0.0362	

T1 = 1.3 seg	Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0
40	0.0343	0.0368	0.0428	0.0139
50	0.0351	0.0364	0.0429	0.0185
60	0.0370	0.0358	0.0430	0.0231
70	0.0389	0.0359	0.0430	0.0277
80	0.0408	0.0360	0.0456	0.0322

Resultados correspondientes al sitio La Unión.

T1 = 0.5 seg	Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0
40	0.0188	0.0224	0.0205	0.0106
50	0.0190	0.0232	0.0200	0.0132
60	0.0192	0.0237	0.0196	0.0158
70	0.0197	0.0241	0.0192	0.0183
80	0.0203	0.0244	0.0192	0.0207

T1 = 0.8 seg	Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0
40	0.0229	0.0281	0.0256	0.0079
50	0.0231	0.0280	0.0255	0.0098
60	0.0233	0.0280	0.0255	0.0118
70	0.0232	0.0281	0.0256	0.0137
80	0.0232	0.0284	0.0257	0.0156

T1 = 1.0 seg	Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0
40	0.0355	0.0460	0.0372	0.0105
50	0.0355	0.0462	0.0369	0.0132
60	0.0356	0.0461	0.0365	0.0158
70	0.0359	0.0461	0.0363	0.0184
80	0.0360	0.0461	0.0358	0.0210

T1 = 1.3 seg	Dr (m)			
L (m)	T2/T1 = 0.2	T2/T1 = 0.5	T2/T1 = 0.8	T2/T1 = 1.0
40	0.0604	0.0739	0.0631	0.0120
50	0.0591	0.0734	0.0623	0.0149
60	0.0598	0.0726	0.0623	0.0179
70	0.0606	0.0719	0.0622	0.0208
80	0.0614	0.0710	0.0621	0.0238

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

APÉNDICE C. Velocidad de las ondas superficiales en sitios de suelo blando en el valle de México.

En nuestro caso de estudio el efecto de las ondas superficiales (en especial las de Rayleigh) sobre la estructura en estudio tiene una importancia relevante por la naturaleza de los efectos que producen en la superficie. Por tal motivo es necesario conocer la velocidad de propagación de este tipo de ondas, dicha velocidad es dependiente de la frecuencia de las ondas como se muestra en la figura C-1 y es cercana a la velocidad de las ondas de cuerpo de corte (S) que a su vez dependen de las propiedades elásticas del suelo. En sitios de suelos blandos como el caso de la ciudad de México, se presentan velocidades de la onda de corte (V_S) relativamente bajas y para el rango de periodos de interés en este estudio (0.3 – 1.3 seg), las velocidades de las ondas superficiales permanecen relativamente constantes como se puede observar en la figura C-1 y son muy cercanas a la velocidad de propagación de las ondas de corte.

Tabla C-1. Modelos estructurales de la cuenca de México encontrados en la literatura, Roullé (2004)

Modelo estructural											
Montalvo-Arrieta <i>et al.</i> (2004)				Iida (1999)				Shapiro <i>et al.</i> (2001)			
z (km)	V_P (km/s)	V_S (km/s)	ρ (g/cm ³)	z (km)	V_P (km/s)	V_S (km/s)	ρ (g/cm ³)	z (km)	V_P (km/s)	V_S (km/s)	ρ (g/cm ³)
0.03	0.80	0.050	2.00	0.030	1.43	0.065	1.20	0.03	0.80	0.050	2.00
0.02	1.20	0.100	2.00	0.015	1.43	0.165	1.40	0.02	1.20	0.100	2.00
0.10	1.38	0.800	2.05	0.055	1.70	0.360	1.60	0.30	2.00	0.400	2.05
0.21	1.90	1.100	2.05	0.112	1.90	0.600	1.80	0.20	2.50	0.800	2.05
1.21	2.60	1.500	2.20	0.923	2.60	1.120	2.00	2.00	3.00	1.700	2.20
0.80	3.46	2.000	2.30	0.800	3.30	2.600	2.30	5.00	5.28	3.050	2.40
5.00	5.28	3.050	2.40	1.900	4.50	3.000	2.50	12.00	5.71	3.300	2.40
12.00	5.71	3.300	2.40	5.165	5.60	3.700	2.70	28.00	6.40	3.700	2.70
28.00	6.40	3.700	2.70	∞	5.60	3.700	2.70	∞	8.13	4.700	3.30
∞	8.13	4.700	3.30								

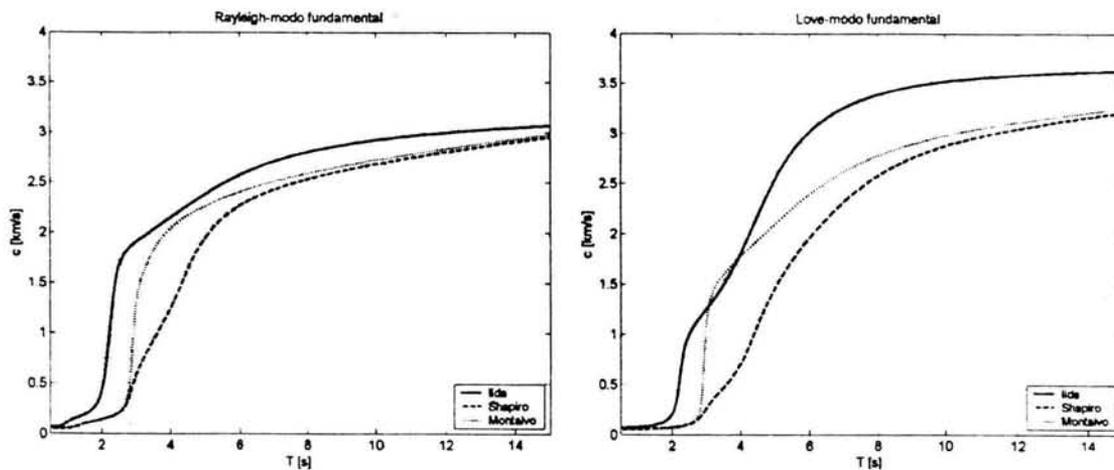


Figura C-1. Curvas de velocidad de fase para el modo fundamental de ondas de Rayleigh y de Love obtenidas para los tres modelos descritos en la tabla C-1, Roullé (2004).