



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**MOVIMIENTOS FUERA DE FASE EN ESTRUCTURAS DE
GRANDES CLAROS, REVISIÓN DEL NUEVO AEROPUERTO
INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :

CARLOS IVAN CASTILLO OLIVARES

TUTOR:

DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ



FECHA:
FEBRERO DE 2018

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. LÓPEZ BÁTIZ OSCAR ALBERTO
Secretario: DR. GARCÍA PÉREZ JAIME
Vocal: DR. ESCOBAR SÁNCHEZ JOSÉ ALBERTO
1^{er}. Suplente: DR. POZOS ESTRADA ADRIÁN
2^{do}. Suplente: DR. DÍAZ LÓPEZ ORLANDO JAVIER

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por el apoyo desde pequeño y enseñarme el valor del trabajo y la constancia.

Le doy las gracias a mi tutor, Dr. José Alberto Escobar Sánchez, por haberme dado su confianza y tiempo.

Y agradezco al gobierno que, por medio del CONACYT, me brindó una beca a lo largo de mis estudios de maestría.

RESUMEN

En este trabajo se determinan los efectos de los movimientos fuera de fase en la cimentación y superestructura de la terminal del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM). Por sus dimensiones, el edificio de la terminal, se cimentará en suelos con al menos, tres diferentes características que producirán diferentes respuestas sísmicas. Esto podría ocasionar movimientos fuera de fase cuando ocurra un sismo y, por lo tanto, aumentar los esfuerzos o desplazamientos en la estructura.

Para analizar los efectos de los movimientos fuera de fase en el edificio de la terminal del NAICM, se desarrolló un modelo analítico de elementos finitos, considerando la geometría y elementos estructurales del proyecto. Se consideró al suelo como resortes y se realizó un análisis paso a paso.

ABSTRACT

In this paper, the effects of out-of-phase movements on the foundation and superstructure of the New Mexico City International Airport terminal (NAICM) are determined. Due to its dimensions, the terminal building, will be founded on soils with at least, three different characteristics that produces different seismic responses. This can cause out-of-phase motions when an earthquake occurs and thus increase stresses or displacements in the structure.

To analyze the effects of out-of-phase movements in the terminal building of the NAICM, an analytical model of finite elements was developed, considering the geometry and structural elements of the project. The soil was considered as springs and a stepwise analysis was performed.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
INTRODUCCIÓN	7
JUSTIFICACIÓN	7
OBJETIVOS	7
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	9
1.1.- VARIACIÓN ESPACIAL DEL MOVIMIENTO DEL SUELO	9
1.2.-EFECTOS DE SITIO.....	10
1.3.-VARIACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA EN SUELOS DE VALLES.....	16
1.3.1.-Ciudad de México	16
1.3.1.-San Francisco.....	18
1.4.-RESPUESTA DE ESTRUCTURAS CON CIMENTACIÓN RÍGIDA	19
1.5.-CONDICIONES DE REGULARIDAD DE ACUERDO CON EL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DEL DISTRITO FEDERAL	20
CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL CASO DE ESTUDIO.....	21
2.1.-DESCRIPCIÓN GENERAL.....	21
2.2.-DESCRIPCIÓN DE LA CUBIERTA.....	23
CAPÍTULO 3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	25
3.1.-SIMULACIÓN DEL SUELO.....	25
3.2.-FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA LOS SITIOS UBICADOS EN EL EDIFICIO DE LA TERMINAL DEL NAICM.....	26
3.3.-CIMENTACIÓN Y CUBIERTA.....	28
3.4.-ANÁLISIS PASO A PASO	31
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	33
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	37
REFERENCIAS.....	39

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se desarrolló, presentó e inició el proyecto de la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM), el segundo más grande a nivel mundial después del de Estambul en Turquía. Para resolver los retos que presenta un proyecto de estas dimensiones, se dividió en: el lado aire y el lado tierra. En el lado aire se encuentra todo lo relacionado con las pistas de aterrizaje y sus instalaciones y en el lado tierra los edificios.

Dentro del lado tierra se encuentra el edificio de la terminal de pasajeros con dimensiones aproximadas de 1.6 km por 0.6 km, motivo de este estudio. En una estructura de estas dimensiones y en la que se observan variaciones considerables en las dimensiones de la geometría, se pueden presentar movimientos relativos verticales y horizontales principalmente ocasionados por la no homogeneidad del suelo y los sismos, entre otros.

Para controlar los asentamientos diferenciales se optó (ARUP, 2016b) por colocar pilotes, una capa de tezontle, drenes durante la construcción y desplantar la estructura sobre una losa de cimentación. Debido a las características del suelo, la estructura y/o la propagación de ondas sísmicas, además de los asentamientos diferenciales, durante un sismo podrían aparecer movimientos fuera de fase.

Para estudiar los efectos de los movimientos fuera de fase en la terminal se deben tomar en cuenta las condiciones del suelo, la interacción suelo, cimentación y la estructura. Los movimientos fuera de fase se pueden abordar desde dos enfoques, el primero es la excitación multi-soporte y el segundo las condiciones estructurales. Es común observar que la excitación multi-soporte se estudia en estructuras largas como puentes, tuberías y presas, mientras que el movimiento fuera de fase en estructuras irregulares se puede reducir o evitar con juntas sísmicas.

JUSTIFICACIÓN

Durante la exploración geotécnica del sitio en el que se ubicará el NAICM, se encontró variación en el periodo característico del suelo a lo largo de la terminal, entre los que destacan 2.1, 2.7 y 2.9 s (II-UNAM, 2014 y ARUP, 2016). Este hecho puede ocasionar que los movimientos en el suelo, debido a excitación sísmica, difieran de un sitio a otro. Además, el edificio de la terminal del NAICM cuenta con una geometría irregular en planta que, aún sin considerar el suelo, podría ocasionar movimientos fuera de fase. Por lo anterior, y tomando en cuenta que se trata de una estructura de gran importancia, es necesario estudiar el riesgo que se pudiera presentar.

OBJETIVOS

Considerando la variación de las características del suelo, se determinará la respuesta sísmica del edificio de la terminal del NAICM. Para lograr esto, se construirá un modelo estructural con base en los planos del proyecto y tomando en cuenta las características dinámicas del suelo sobre el que se construirá.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

En esta investigación se consideró que los movimientos fuera de fase en la cubierta del edificio de la terminal del NAICM se pueden presentar por tres factores. El primero es que se cimentará en suelos con diferentes características dinámicas. El segundo es la rigidez de la cimentación en su plano, pudiendo presentar deformaciones considerables. El tercero es la irregularidad en planta y en elevación de la cubierta del edificio de la terminal del NAICM.

A continuación, se presentan los criterios de la variación en el movimiento del suelo. Se presentan estudios hechos a estructuras de grandes claros, más de 30 m, y cimentadas en, al menos, dos suelos con diferentes características dinámicas.

1.1.- VARIACIÓN ESPACIAL DEL MOVIMIENTO DEL SUELO

Al ocurrir un sismo, se espera que las amplitudes de las ondas disminuyan conforme se alejan de la fuente de estas, ya que la energía se pierde por diferentes factores, como la absorción en los materiales por los que han atravesado. Este fenómeno es conocido como ley de atenuación o atenuación de las ondas, y varía de acuerdo con diferentes factores como el tipo de sismo, su profundidad y las condiciones del medio por las que han viajado las ondas, (Zúñiga, 2011).

Los efectos de sitio son mencionados en investigaciones desde 1910, (Trifunac, 2008). Los primeros estudios surgieron de observar el daño estructural y no estructural en construcciones ante eventos sísmicos. Los niveles de daño en las construcciones mostraban variaciones complejas y en algunos casos no obedecían a la ley de atenuación. El nivel de daño de las construcciones, se correlacionó con la información de las condiciones del sitio en que se encontraban, principalmente extraída de mapas topográficos y geológicos. Se concluyó, con una idea simplificada, que en suelos blandos y sedimentos, el movimiento se amplifica. Así, se inició la formulación de los primeros códigos de diseño de estructuras.

En 1970, a partir de registros sísmicos, se observó que existen diferencias significativas en la medición de las aceleraciones para diferentes localizaciones de un lugar. Esto impulsó a encontrar las causas y determinar su efecto en estructuras largas como puentes, tuberías y presas (Harichandran, 1999).

Esteva et al., (1980) mostraron un método probabilista para considerar el efecto de sitio en el análisis estructural de construcciones. Concluyeron que la respuesta sísmica de una gran cantidad de estructuras extendidas en planta, puede ser sensible a las diferencias de movimiento en los diferentes puntos de la cimentación.

Lupoi et al. (2005), realizaron un análisis en puentes con distintas tipologías estructurales sometidos a excitación multisoporte. En su investigación consideraron la variación espacial debido a los distintos tiempos de arribo, y efecto de paso de onda. También, consideraron las modificaciones que sufre el movimiento debido a las condiciones locales del suelo, efectos de sitio. En este estudio, se mostró que las mayores respuestas estructurales se presentan para el caso de suelos con mayor heterogeneidad.

Fernández et al. (2013), analizaron la respuesta de puentes simples bajo excitación multisoporte, tomando en cuenta la variación de la respuesta sísmica del suelo debido a la topografía. Se resaltó la importancia del desfase y el efecto de sitio, así como la influencia de los accidentes topográficos en la respuesta de algunas estructuras.

Tian y Lou (2014), presentaron un método de análisis simplificado para puentes atirantados tomando en cuenta la diferencia en el tiempo de llegada de las ondas sísmicas a los diferentes soportes, siendo el claro mayor de 1088 m. Al comparar la respuesta del movimiento uniforme de soportes con el provocado por los movimientos fuera de fase, observaron diferencias significativas.

Tian y Lou concluyeron que la respuesta de los puentes estudiados se puede amplificar en unas zonas y disminuir en otras. Por lo tanto, los movimientos fuera de fase no son desfavorables para todos los elementos estructurales. Esto se confirmó en investigaciones (Nazmy y Abdel-Ghaffar, 1992), que mostraron que en estructuras de grandes claros, más de 30 m, los movimientos no sincronizados de los apoyos pueden incrementar o disminuir algunas de las respuestas estructurales (Fernández et al., 2013).

1.2.-EFECTOS DE SITIO

El efecto de sitio se puede definir como la respuesta del suelo ante el paso de las ondas sísmicas, relacionado directamente con las condiciones de la geología, tipo de suelo, hidrología y geomorfología que afectan la amplitud, frecuencia, composición y duración del movimiento del suelo. Lo cual se interpreta principalmente por el periodo dominante del suelo y el factor de amplificación máximo (González, 2015).

El efecto de sitio es un tema principal cuando se estudian o diseñan estructuras en zonas sísmicas. Ya sea de manera directa, como los estudios geofísicos, o de manera indirecta con los espectros de diseño. Sin embargo, las previsiones específicas en las que se toman en cuenta los efectos de sitio se incorporaron a códigos a partir de 1976 (Harichandran, 1999).

Al conocer el movimiento esperado en un sitio, a una cierta distancia de la fuente del evento sísmico, es necesario correlacionar factores que tomen en cuenta la amplificación o atenuación adicional producidas debido a los estratos locales en la zona. Es común que las leyes de atenuación estén especificadas para tipos de suelo: duro y blando.

En muchos casos se requiere conocer las condiciones exactas del sitio ya que se pueden experimentar efectos particulares como es el caso de la licuación de arenas o de amplificaciones locales. De las leyes de atenuación se pueden hacer las siguientes observaciones (Zúñiga, 2011).

1. Las amplitudes y frecuencia de las ondas sísmicas varían con la distancia.
2. Las ondas P no son las más energéticas, y dadas sus características de dirección de vibración no es de esperar que afecten a las estructuras en la dirección vertical (ya que por lo general los sitios de interés están lo suficientemente lejos del sismo para que estas ondas no lleguen con incidencia casi vertical).
3. Los movimientos más energéticos corresponden a las ondas S y superficiales. Si se hacen las mismas consideraciones que en el caso anterior en cuanto a la distancia, se podría esperar que dichas ondas estén polarizadas en una dirección horizontal (excepto para el caso de las ondas Rayleigh). Es decir, transversales a la dirección de propagación. Esto sugiere que los mayores movimientos en el sitio durante el sismo se esperan en dirección horizontal.

En diferentes países existen ciudades construidas sobre cuencas sedimentarias de varios tamaños y profundidades. Por ejemplo, se tiene a la Ciudad de México, Los Ángeles, Tokio, Osaka y Bogotá. Esta situación ha impulsado a la investigación de los efectos de sitio en este tipo de depósitos (Vargas, 2011).

El efecto de sitio se puede aproximar mediante técnicas teóricas (aproximación numérica) y empíricas (aproximación instrumental). En las técnicas teóricas es necesario el conocimiento de un modelo

estratificado de suelo, y sus propiedades dinámicas. Ya que la respuesta dinámica del suelo ante un sismo está relacionada con algunas propiedades de sus estratos. Destacan la velocidad de las ondas de corte, el espesor y la densidad de cada capa de suelo.

Las propiedades dinámicas de los estratos se definen mediante métodos geofísicos de propagación de ondas. En este caso se busca encontrar un estrato con alta resistencia a la propagación de ondas, al fondo, con la finalidad de que los estratos superiores sean capaces de representar los depósitos de suelo responsables del efecto de sitio local. Estas técnicas se apoyan en estudios de campo y de laboratorio (González, 2015).

Los ensayos de campo tienen por objeto determinar la velocidad de transmisión de las ondas sísmicas y los ensayos de laboratorio, a su vez, pretenden determinar la respuesta del suelo ante una excitación de tipo dinámico (Vargas, 2011).

Las técnicas empíricas se basan en registrar movimientos débiles (microsismos o microtemblores) y fuertes (sismos) en los sitios de geología local diferente, para obtener la respuesta de suelos suaves respecto a la roca firme (González, 2015).

Lermo y Limaymanta (2007) destacan algunas observaciones generales que incluyen estudios empíricos de respuesta local (todas ellas localizadas en México y América Central). Entre ellas destacan:

- La amplificación espectral depende de la frecuencia.
- Salvo condiciones especiales (ej. Ciudad de México), en promedio, los factores de amplificación no exceden un factor de 10.
- En cualquier diseño sísmico en la región, es aconsejable considerar un factor mínimo de amplificación de dos a 3.
- Las frecuencias predominantes varían en los distintos emplazamientos, dependiendo del tipo de suelo. Sin embargo, la mayoría de amplificación ocurre en la banda de frecuencias de 1 a 10 Hz. (González, 2015)

El método más completo para estudiar el efecto de sitio en la respuesta local, corresponde al análisis directo de registros de aceleración de movimientos sísmicos fuertes. Estos registros cuentan con algunos tipos de efectos no lineales y amplio contenido de frecuencias. Por lo tanto, la técnica más utilizada para analizar el efecto de sitio se basa en el uso de las funciones de transferencia. Una función de transferencia se determina como la relación entre los registros de aceleración medidos en la superficie del sitio y los registrados en la roca base (Vargas, 2011).

Una de las formas más sencillas de determinar la función de transferencia consiste en establecer la relación espectral entre la señal de salida (superficie) y la señal de entrada (roca). Sin embargo, en ocasiones no se cuenta con registros de aceleración de movimientos sísmicos fuertes, ya sea porque no existen estaciones que los registren o porque desde que se instalaron no han ocurrido eventos sísmicos considerables.

En la figura 1.1, se muestra un esquema para obtener la función de transferencia de un sitio de interés. En este caso, se obtiene a partir de dos registros sísmicos, el primero corresponde al sitio de interés y el segundo a un sitio de referencia. El sitio de referencia debe representar a la roca base, del fondo de los sedimentos aluviales.

Los dos registros sísmicos, el de la superficie de los sedimentos aluviales y el de la zona rocosa, se ponen en función de la frecuencia con la transformada de Fourier. Con los espectros de Fourier se obtiene el cociente espectral del sitio de interés con respecto al sitio de referencia. La función de transferencia de

la superficie en que se encuentran los sedimentos aluviales, está representada por dicho cociente espectral.

Se supone que la roca base, tienen una respuesta dinámica similar a la del sitio de referencia ante un evento sísmico. Entonces, la función de transferencia representa las frecuencias que se amplifican debido a las características dinámicas de los estratos del suelo, en el sitio de interés.

A partir de la función de transferencia, se puede concluir que la frecuencia a la que se presenta la máxima amplitud, corresponde indirectamente, al periodo dominante del suelo en el sitio estudiado. Por lo tanto, un indicativo de posibles efectos de movimientos fuera de fase en una estructura ante un evento sísmico, sería instrumentar con sismógrafos el suelo en el que se cimentará la estructura a cada determinada distancia. Una vez obtenidos los registros sísmicos, se obtendrían los cocientes espectrales con respecto a un punto de referencia y se compararían entre sí. La diferencia entre las amplitudes máximas y las frecuencias a las que se presentan serían, en teoría, un indicador de que se pueden presentar efectos debido a movimientos fuera de fase.

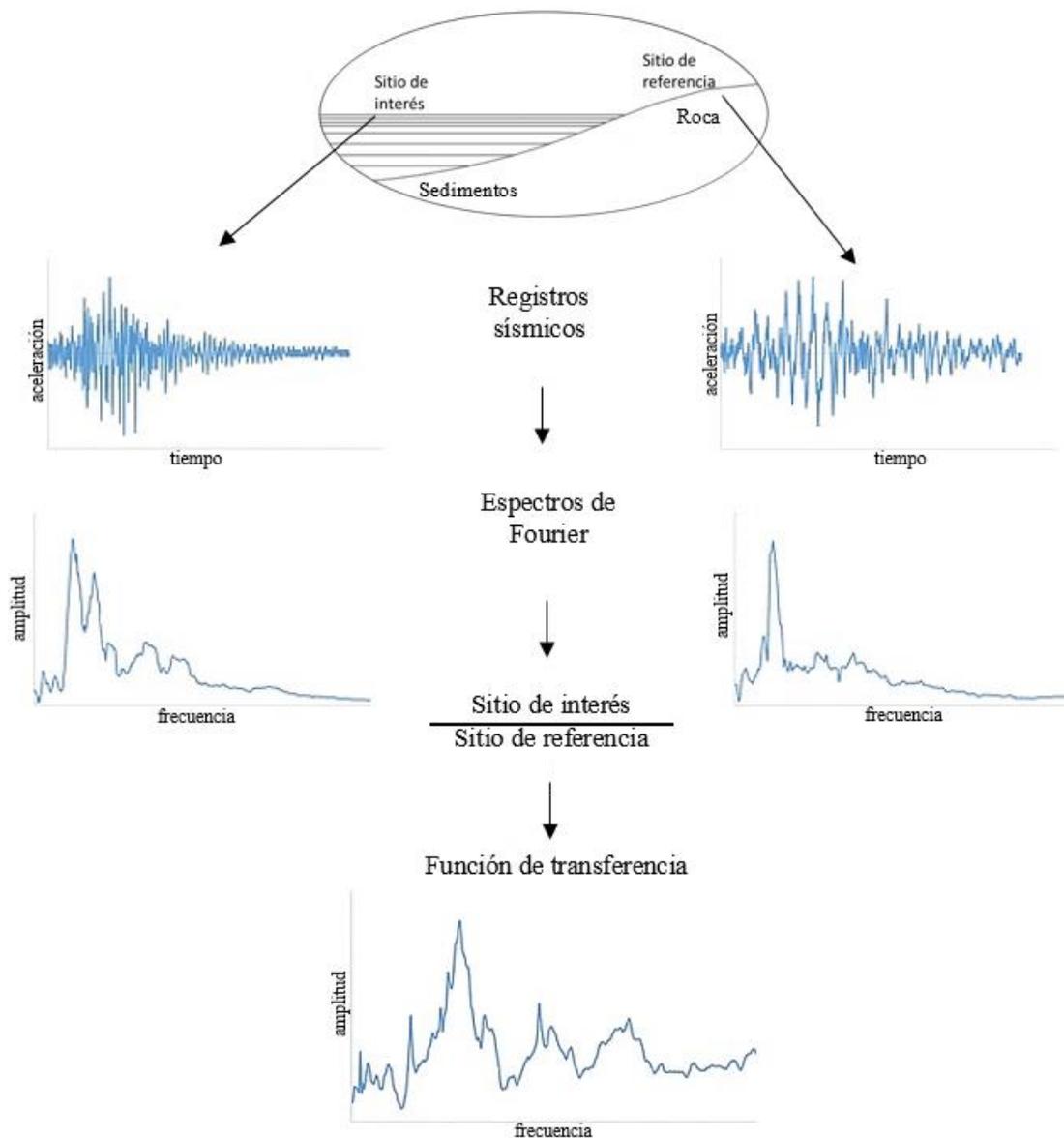


Fig. 1.1. Obtención de la función de transferencia (Modificada de Vargas, 2011)

Para llevar a cabo un método teórico que determina las funciones de transferencia, es necesario conocer las propiedades dinámicas de los estratos. La respuesta de un sitio depende de la rigidez del suelo cerca de la superficie, y las ondas que se reflejan y refractan. En general, es aceptable tomar 30 m de profundidad para considerar la variación de la velocidad en las ondas de corte. A esa profundidad la velocidad de las ondas de corte varía con la edad y el tamaño de grano de las unidades litológicas (Chen y Duan, 2000).

La Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2008) establece que para realizar la caracterización del suelo, la exploración geotécnica debe extenderse, al menos, hasta una profundidad de 10 m. Si la velocidad efectiva es menor que 180 m/s, entonces la profundidad de exploración deberá hacerse hasta encontrar una velocidad de propagación de ondas en el suelo igual o mayor que 720 m/s, o bien, realizarse hasta una profundidad de 45 m.

El código internacional NEHRP (FEMA, 2009), clasifica a los suelos en términos de la velocidad de las ondas de corte promedio a una profundidad de 30 m. Sin embargo, se reconoce que en algunos casos las velocidades de onda no están disponibles para el sitio, por lo que incluye alternativas basadas en parámetros geotécnicos: como la resistencia a la penetración estándar para suelos no cohesivos y rocas, así como la resistencia a la penetración estándar y resistencia a corte, sin drenaje, de suelos cohesivos. El valor promedio de las ondas de corte se calcula como:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (1.1)$$

donde: d_i y V_{si} denotan el espesor (m) y la velocidad de ondas de corte (m/s) de la i -ésima formación o capa, de un total de n , arriba de los 30 m.

Una vez conocidas las características del suelo, se puede estimar la función de transferencia del sitio, y así estimar una respuesta teórica. Se puede considerar un comportamiento lineal o no lineal del suelo. Para el comportamiento lineal se utilizan métodos como el de la matriz de transferencia planteado por Thomson y corregido por Haskell (Haskell, 1953). El comportamiento no lineal se describe mediante curvas de variación entre el módulo de corte y la relación de amortiguamiento, como función de la deformación angular del suelo (Rodríguez et al, 2016).

En la figura 1.2, se muestra el caso más simple en que se puede estimar, analíticamente, la función de transferencia de un sitio. La estructura del suelo de la figura 1.2, corresponde a un modelo idealizado, en este existe una capa de suelo uniforme, no amortiguada, isotrópica y de material lineal elástico sobre una roca base (infinitamente rígida).

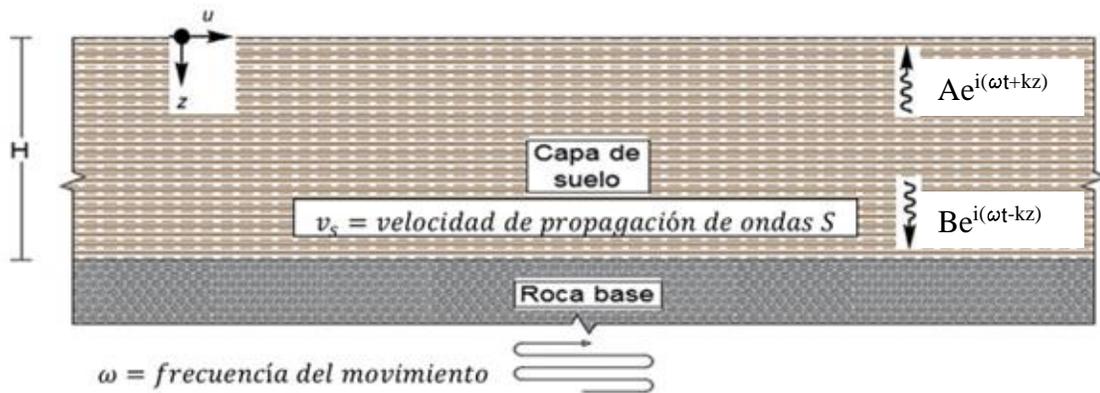


Fig. 1.2. Depósito de suelo elástico lineal, (Kramer, 1996).

Si se considera un movimiento horizontal armónico de la roca base, que produce una propagación de ondas de corte vertical en el suelo suprayacente. El resultado es un desplazamiento horizontal y se puede expresar como (Kramer, 1996):

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + kz)} + Be^{i(\omega t - kz)} \quad (1.2)$$

donde: ω es la frecuencia circular de la vibración del suelo; k el número de ondas (ω/v_s); A y B la amplitud de las ondas viajando en $-z$ (hacia arriba) y $+z$ (hacia abajo) respectivamente. En la superficie libre ($z = 0$), el esfuerzo cortante y de tensión deben desaparecer, como:

$$\tau(0, t) = G\gamma(0, t) = G \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} = 0 \quad (1.3)$$

donde: $\tau(0, t)$ es el esfuerzo de tensión nulo en la superficie en función del tiempo; G es el módulo de cortante del suelo; γ es la densidad del suelo; $G \frac{\partial u(0, t)}{\partial z}$ es el esfuerzo cortante nulo en la superficie en función del tiempo.

Sustituyendo (1.2) en (1.3) y aplicando el producto diferencial se obtiene:

$$Gik(Ae^{ik(0)} - Be^{-ik(0)})e^{i\omega t} = Gik(A - B)e^{i\omega t} = 0 \quad (1.4)$$

donde: G es el módulo de cortante del suelo; k es el número de ondas (ω/v_s); A y B la amplitud de las ondas viajando en $-z$ (hacia arriba) y $+z$ (hacia abajo) respectivamente; t es el tiempo.

La ecuación (1.4) se satisface cuando $A = B$. Entonces el desplazamiento $u(z, t)$ para una profundidad z en un tiempo t se puede expresar como:

$$u(z, t) = 2A \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} e^{i\omega t} = 2A \cos(kz) e^{i\omega t} \quad (1.5)$$

La ecuación (1.5) describe una onda de amplitud $2A \cos kz$. Esta onda se produce por la interferencia constructiva de las ondas que viajan hacia arriba y abajo, y tiene forma fija con respecto a la profundidad. La ecuación (1.5) se puede usar para definir la función de transferencia que describe la relación de las amplitudes de desplazamiento en dos puntos de la capa de suelo. Escogiendo uno de esos dos puntos en la parte superior y otro al fondo de la capa de suelo, se obtiene la función de transferencia $F(\omega)$, dando como resultado:

$$F(\omega) = \frac{u_{m\acute{a}x}(0, t)}{u_{m\acute{a}x}(H, t)} = \frac{2Ae^{i\omega t}}{2A \cos kH e^{i\omega t}} = \frac{1}{\cos kH} = \frac{1}{\cos(\omega H/v_s)} \quad (1.6)$$

donde: H es la altura del suelo; k es el número de ondas (ω/v_s); ω es la frecuencia circular de la vibración del suelo; v_s es la velocidad de ondas de corte (m/s).

El módulo de la función de transferencia es la función de amplificación, definida como:

$$|F(\omega)| = \sqrt{\{Re[F(\omega)]\}^2 + \{Im[F(\omega)]\}^2} = \frac{1}{|\cos(\omega H/v_s)|} \quad (1.7)$$

En la figura 1.3, se representa gráficamente la ecuación (1.7). Así $|F(\omega)|$, es la relación del movimiento de la superficie libre con el movimiento en la roca base. Esta relación entre la superficie y la roca base se puede reducir a dos casos que son:

- 1) Si el denominador de la ecuación (1.7) es igual a uno, la capa de suelo se mueve junto con la roca base. El denominador rige la ecuación (1.7), por lo que el desplazamiento de la superficie es, al menos, tan grande como el desplazamiento de la roca del fondo

$$\cos(\omega H/v_s) = 1 \therefore \omega = 0 \text{ y } \omega = \frac{n\pi v_s}{H} \in n = 1, 2, 3 \dots \quad (1.8)$$

- 2) Si el denominador de la ecuación (1.7) es igual a cero, el sistema entra en resonancia. Esto implica una amplificación infinita, en un suelo sin amortiguamiento

$$\cos(\omega H/v_s) = 0 \therefore \omega = \frac{n\pi v_s}{2H} \in n = 1, 3, 5 \dots \quad (1.9)$$

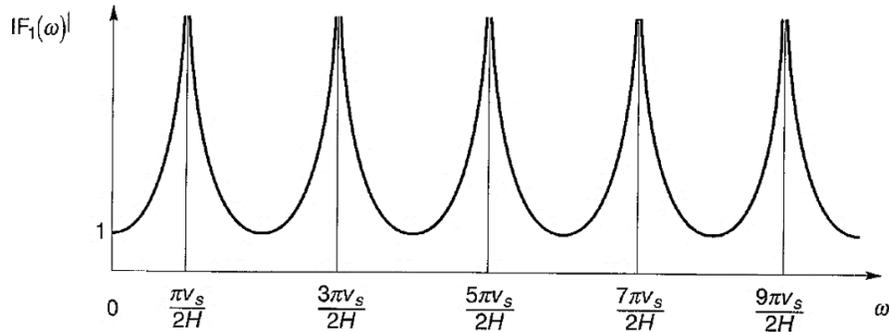


Fig. 1.3. Función de amplificación de una capa de suelo elástica lineal y no amortiguada, (Kramer, 1996).

Los modelos de capa uniforme y elástica son útiles para ilustrar la influencia de las condiciones del suelo durante un movimiento, pero resultan deficientes para el análisis de la respuesta en problemas prácticos.

En la figura 1.4, se muestra un depósito de suelo formado por capas sobre una base elástica. Cada una de las capas tiene espesor, h , y características dinámicas propias, módulo de cortante, G , densidad, ρ y amortiguamiento, ξ . Este suelo estratificado y amortiguado sobre roca elástica, representa una idealización más próxima a la realidad.

Así, de acuerdo con las características dinámicas de los diferentes suelos sobre los que se cimentará el edificio de la terminal del NAICM, es posible determinar las funciones de transferencia. La variación entre las funciones de transferencia indica una respuesta sísmica diferente del suelo y un posible movimiento fuera de fase del edificio de la terminal del NAICM.

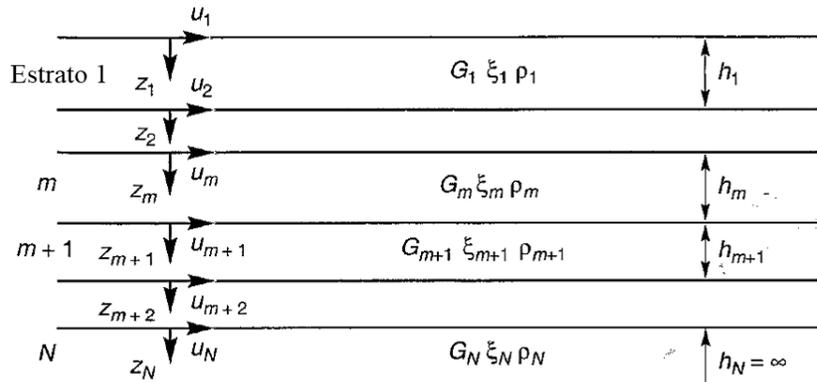


Fig. 1.4. Depósito de suelo formado por capas sobre una base elástica, (Kramer, 1996).

Para simular la respuesta sísmica del suelo estratificado debido a un movimiento sísmico se han desarrollado programas de computadora. Uno de los primeros programas fue SHAKE (Shnabel et al., 1972), que analiza la respuesta de un sistema de suelo estratificado sobre una roca base, utilizando un análisis unidimensional. Considera que los estratos son horizontalmente infinitos, sometidos a una incidencia vertical de ondas S. El programa aproxima el comportamiento cíclico del suelo, mediante un modelo lineal equivalente. El desarrollo analítico para obtener las funciones de amplificación de un depósito formado por capas y que se encuentra sobre una base elástica se encuentra en Kramer (1996).

Se han desarrollado otros programas como EERA (Bardet et al., 2000) y DEEPSOIL (Hashash, 2012), para análisis bidimensionales y tridimensionales. Sin embargo, si se tiene por objetivo considerar el efecto de heterogeneidad del suelo es necesario utilizar el método del elemento finito, (González, 2015).

En el presente documento se utilizó el programa SHAKE (Shnabel et al., 1972), para obtener las funciones de amplificación en tres zonas del terreno de la terminal del NAICM. Además, se utilizó un registro sísmico de la zona de lomas de la Ciudad de México, específicamente de la estación que se encuentra a un lado de la mesa vibradora del II-UNAM.

Las funciones de transferencia muestran la respuesta dinámica del suelo. Por lo tanto, si existe variación en la forma o amplitud, es posible que las variaciones en las propiedades dinámicas del suelo influyan directamente en los movimientos fuera de fase de la estructura.

La variación de la respuesta dinámica de los suelos en distancias relativamente cortas, menos de 500 m, se observa principalmente en cuencas de ríos o valles aluviales, como el que se encuentra debajo de la Ciudad de México.

1.3.-VARIACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA EN SUELOS DE VALLES

La variación de la respuesta sísmica en suelos se ha estudiado en algunas ciudades de diferentes países, principalmente en ciudades que se construyeron sobre cuencas sedimentarias de diferentes tamaños y profundidades como por ejemplo la Ciudad de México, Los Ángeles, Tokio, Osaka y Bogotá, (Vargas, 2011).

A continuación, se presentan algunos ejemplos:

1.3.1.-Ciudad de México

El 19 de septiembre de 1985, en Michoacán ocurrió un sismo que causó daños moderados en la proximidad de su epicentro (cerca de la costa del Pacífico de México), sin embargo, causó grandes daños en la Ciudad de México a unos 350 km de distancia.

Los registros sísmicos de diferentes sitios, en la Ciudad de México, mostraron una relación significativa entre las condiciones locales del suelo y los movimientos de tierra perjudiciales. Esto dio lugar a importantes avances en la comprensión de la respuesta cíclica de arcillas plásticas.

En la Ciudad de México, la zonificación sísmica consta de tres zonas con diferentes condiciones del subsuelo. Los suelos compactos son depósitos superficiales de suelo granular, basalto o toba volcánica al Oeste del centro llamada zona de lomas. En la zona del lago, se encuentran depósitos profundos de suelos muy blandos formados a partir de la erosión y transporte de limos, arcillas y cenizas de los volcanes cercanos a través de las aguas del antiguo lago de Texcoco.

Los suelos blandos consisten en dos capas de arcilla blanda separadas por una capa de arena compacta de 0 a 6 m de espesor. El nivel freático se encuentra a una profundidad de alrededor de 2 m sobre la mayor parte de la zona del lago. Entre las zonas de lomas y el lago se encuentra la zona de transición, donde los depósitos de suelo blando son delgados e intercalados con depósitos aluviales.

En la figura 1.5, se muestran los espectros de respuesta de dos sitios, obtenidos a partir del registro de 1985, ubicados en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). El sitio de la UNAM se encuentra en la zona de lomas, mientras que el sitio de la SCT se encuentra en los suelos blandos de la zona del lago.

El terremoto de Michoacán alcanzó una magnitud de 8.1 en la escala de Richter, sin embargo, por su distancia desde el epicentro hasta la Ciudad de México se produjeron aceleraciones en la zona Sur de tan sólo 0.03 a 0.04 *g*. En la zona de transición las aceleraciones pico fueron ligeramente mayores que en la zona Sur. Sin embargo, en la zona del lago las aceleraciones de la SCT eran hasta cinco veces mayores que en la zona Sur.

En la figura 1.5, se observa que para la zona del lago los periodos se amplifican alrededor de los 2 s, las aceleraciones espectrales en la SCT eran aproximadamente 10 veces mayores que los de la UNAM.

El sitio de la SCT está sobre una capa de arcilla de 35 a 40 m de espesor y la velocidad promedio de ondas S es de aproximadamente 75 m/s. Por lo que el periodo en el sitio está alrededor de los 2 s, un valor consistente con el valor máximo en el espectro de respuesta de la SCT de la figura 1.5, (Kramer, 1996).

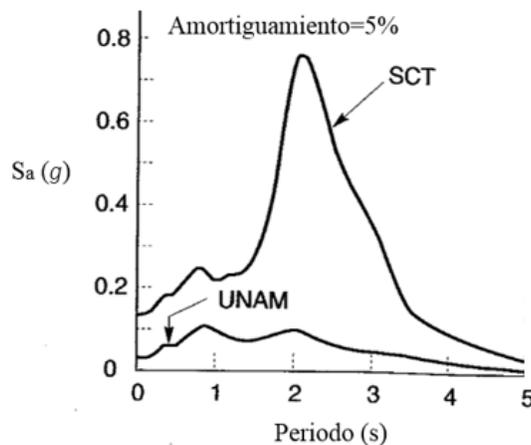


Fig. 1.5. Espectro de respuesta obtenido de los registros de los sitios de la UNAM y SCT, (Kramer, 1996).

Las aceleraciones en la Ciudad de México se amplificaron debido a los suelos sedimentados, capas de arcilla con espesor de más de 30 m. Lo anterior muestra un comportamiento dinámico diferente para cada suelo, sin embargo, no se menciona la distancia a la que se encuentran los suelos entre ellos. En general, se diseña a las estructuras considerando un solo tipo de suelo.

A continuación, se muestra una investigación desarrollada por Idriss y Seed (1968) en San Francisco, California, EUA. Esta investigación se realizó después del sismo de 1957, en ella se muestra que la respuesta sísmica de los suelos puede cambiar, significativamente, en menos de 500 m. En general, en la orilla de los valles es posible encontrar un cambio en la aceleración máxima y en el intervalo de frecuencias que se amplifica.

1.3.1.-San Francisco

Se compararon registros de acelerogramas en varios lugares de San Francisco, EUA, durante el sismo de 1957 ($M_s=5.3$). Como resultado, se observó que existían variaciones en la magnitud de la aceleración horizontal máxima y en los espectros de respuesta. En la figura 1.6, se muestran las condiciones del suelo y su variación a lo largo de una sección de 6.45 km a través de la ciudad. Los movimientos de suelo en la superficie fueron similares entre sí, pero el contenido de frecuencias y la amplitud fueron significativamente diferentes unas a otras. Estos efectos de sitio se observaron en la Ciudad de México durante el sismo de Michoacán (1985) y en California durante el sismo de Loma Prieta en 1989, (Kramer, 1996).

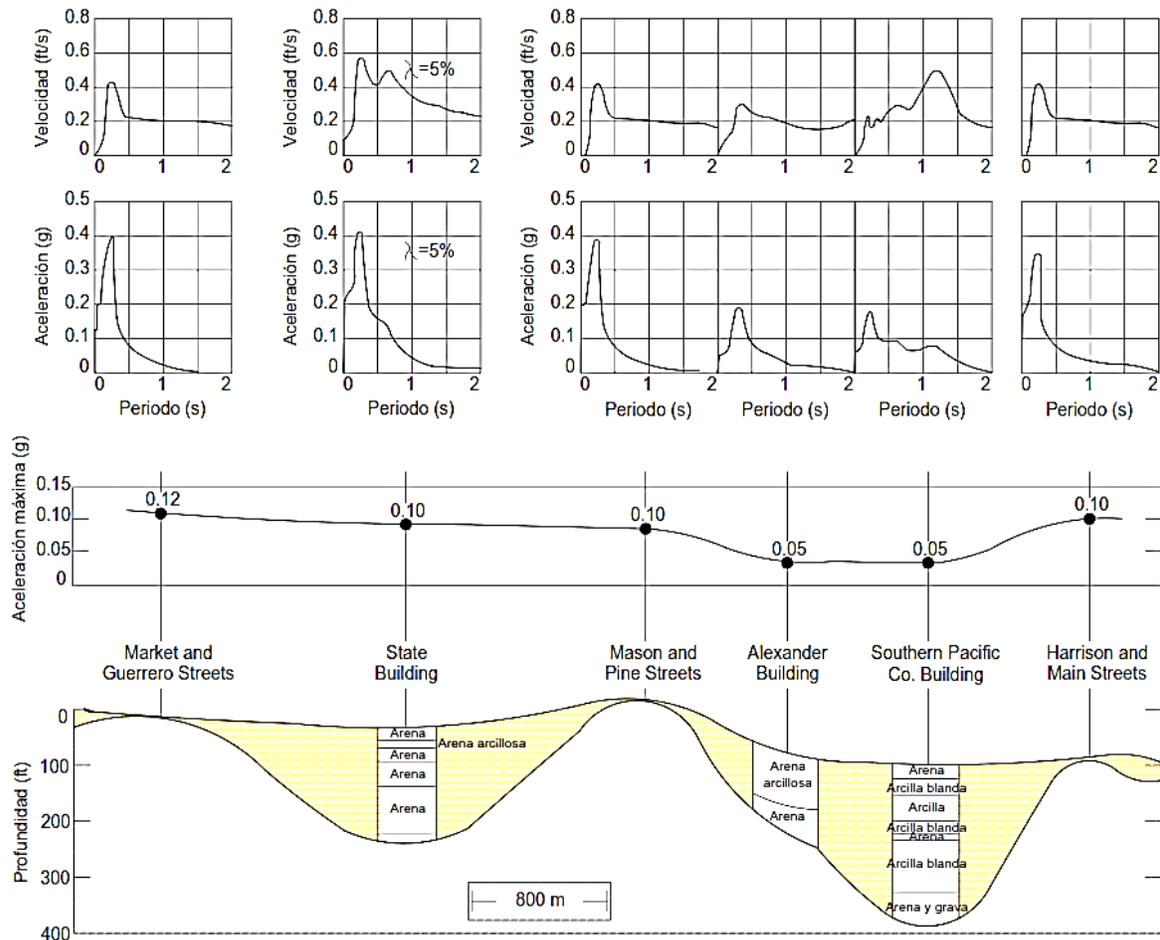


Fig. 1.6. Variación de la velocidad, aceleración y aceleración máxima en la superficie durante el sismo de San Francisco, California, EUA, en 1957 (Kramer, 1996).

En la figura 1.6, se muestra que en el valle de San Francisco el contenido de frecuencias que se amplifican y la aceleración máxima en la superficie del suelo pueden variar en una distancia menor a 500 m. El edificio de la terminal del NAICM tendrá una longitud, aproximada, de 1.6 km, por lo que se cimentará en al menos tres suelos con diferente respuesta sísmica.

El segundo factor que podría ocasionar movimientos fuera de fase en la cubierta de la terminal del NAICM es que la cimentación no tenga un comportamiento de cuerpo rígido. Si la cimentación presenta deformaciones considerables, los apoyos de la cubierta estarían sometidos a una excitación multisoporte.

1.4.-RESPUESTA DE ESTRUCTURAS CON CIMENTACIÓN RÍGIDA

Harichandran, (1987) investigó los efectos en un oscilador con cimentación rígida, causados por la variación en la respuesta sísmica del suelo, figura 1.7. En su investigación, concluyó que la cimentación promedia las aceleraciones del suelo, $\ddot{u}_g(x, y, t)$, produciendo una aceleración efectiva en la base de la estructura, de acuerdo con:

$$\ddot{u}_{eff}(t) = \frac{1}{\Delta_1 \Delta_2} \int_0^{\Delta_1} \int_0^{\Delta_2} \ddot{u}_g(x, y, t) dx dy \quad (1.10)$$

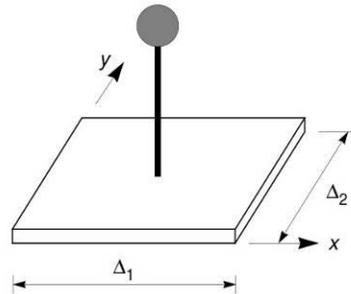


Fig. 1.7.- Oscilador idealizado en cimentación rígida, (Harichandran, 1999)

Además, en su investigación concluyó que al colocar cimentaciones rígidas sobre suelos con diferentes características dinámicas se reduce la respuesta del oscilador, filtrando en mayor medida frecuencias altas que bajas. Por lo que, la respuesta de estructuras rígidas se reduce más que la de flexibles. El factor de reducción de la base (BRF por sus iniciales en inglés) en la respuesta de un oscilador está dado por:

$$BRF = \frac{\text{respuesta máx. del oscilador por variación en propiedades del suelo}}{\text{respuesta máx. del oscilador aplicando la ecuación (1.10)}} \quad (1.11)$$

Con base en la investigación de Harichandran, se comparó el modelo suelo-cimentación de elementos finitos con la ecuación (1.10). Si la magnitud de la ecuación (1.10) corresponde con la del modelo analítico, podría indicar que se presentan las condiciones necesarias para que la cimentación se comporte como un cuerpo rígido en su plano.

La investigación de Harichandran no considera la posible torsión provocada en el oscilador, debido a la variación en la respuesta dinámica del suelo. Por lo tanto, si se coloca el oscilador de la figura 1.7 fuera del centro de masas y se presenta rotación con respecto al eje vertical en la cimentación, la respuesta del oscilador no se reduciría, lo que anularía la ecuación (1.11).

La respuesta dinámica en el suelo sobre el que se cimentará el edificio de la terminal del NAICM, incrementa de Norte a Sur. Esto podría ocasionar rotación, respecto al eje vertical, de la cimentación rígida en su plano. En este caso, el posible movimiento fuera de fase de la cubierta de la terminal del NAICM sería ocasionado por la rotación de la cimentación y no por su deformación (excitación multisoporte).

El tercer factor que podría ocasionar movimientos fuera de fase en la estructura del edificio de la terminal del NAICM es la irregularidad en planta y en elevación. A continuación, se muestra el criterio de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal del 2004 (NTC-Diseño por Sismo del RCDF-2004).

1.5.-CONDICIONES DE REGULARIDAD DE ACUERDO CON EL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DEL DISTRITO FEDERAL

Los movimientos fuera de fase en la estructura del edificio de la terminal del NAICM podrían ocurrir debido a su irregularidad en distribución de cargas y/o elementos resistentes. Se consideraron como referencia las condiciones de regularidad que se encuentran en la sección 6.1 de las NTC-Diseño por Sismo del RCDF-2004.

De acuerdo con las condiciones de regularidad la estructura del edificio de la terminal del NAICM es simétrica sólo en un eje, por lo que su distribución de masas y elementos resistentes no es uniforme, su relación entre la dimensión larga y ancha de la base excede de 2.5 y se tienen entrantes y salientes que exceden las permitidas. (RCDF, 2004)

El presente trabajo se desarrolló con los criterios presentados en este primer capítulo. En resumen, primero se obtuvieron las funciones de transferencia para tres suelos sobre los que se cimentará el edificio de la terminal del NAICM. La similitud entre las funciones de transferencia indicaría que los movimientos fuera de fase en la cubierta del edificio de la terminal del NAICM no tienen relación con la variación en la respuesta dinámica del suelo.

En segundo lugar, se realizaron dos modelos de elementos finitos del sistema suelo-cimentación. En el primer modelo se consideró la variación en las características dinámicas del suelo, periodos dominantes. En el segundo modelo se consideró el promedio de los periodos dominantes del suelo, de acuerdo con la ecuación (1.10). Con esto se analizó si la cimentación presentaba un comportamiento de cuerpo rígido en su plano o si existían deformaciones que ocasionaran excitación multisoporte en la cubierta del edificio de la terminal del NAICM.

En tercer lugar, se realizó un modelo de elementos finitos del sistema suelo-cimentación-estructura. En este modelo se analizaron los desplazamientos de la cubierta del edificio de la terminal del NAICM en busca de posibles movimientos fuera de fase.

Al realizar los tres enfoques anteriores no se pretendía sólo determinar si existían posibles movimientos fuera de fase. También, se realizaron para analizar que parte del sistema suelo-cimentación-estructura tenía mayor relación con estos posibles movimientos fuera de fase.

CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se presenta la descripción general y geometría de la estructura y cimentación del edificio de la terminal del NAICM. Se describen los elementos estructurales que los compondrán y las características de los materiales que se utilizaron para el modelo de elementos finitos.

2.1.-DESCRIPCIÓN GENERAL

El edificio de la terminal del NAICM tendrá dimensiones aproximadas de 1.6 km por 0.6 km, con forma de “X” (figura 2.1). Tiene una reducción en el ancho de sus extremos y 21 columnas principales. (figura 2.2).



Fig. 2.1. Terminal del NAICM (FP-FREE y Foster + Partners, 2015).

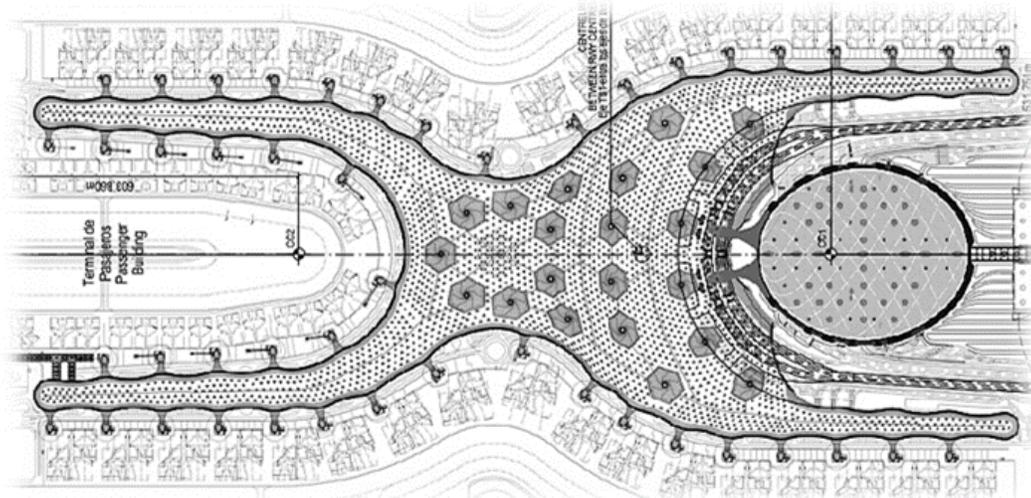


Fig. 2.2. Planta de la terminal del NAICM (FP-FREE y Foster + Partners, 2015).

En la figura 2.3 se muestra el corte transversal de uno de los extremos del edificio de la terminal del NAICM. Se observa que la losa de cimentación soporta la cubierta, armadura espacial, además de las construcciones interiores de varios pisos (cuerpos bajos). Las estructuras interiores no tendrán contacto directo con la cubierta, por lo que se pueden estudiar de forma independiente.

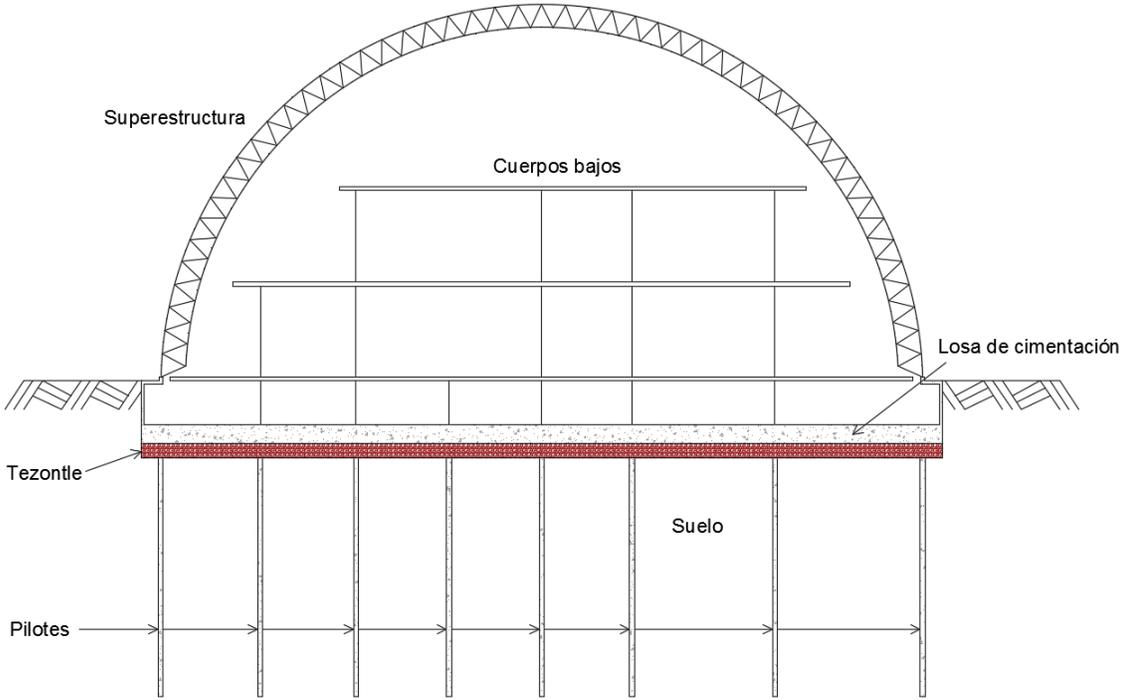


Fig. 2.3. Corte transversal de la terminal (ARUP, 2016)

En la figura 2.4, se muestra un detalle de la cimentación que consta de pilotes sobre los que se colocará una capa de tezontle, una plantilla y una losa de cimentación, con un espesor promedio de 1.5 m. Debido al espesor de la losa de cimentación se espera que se comporte como una placa rígida en su plano.

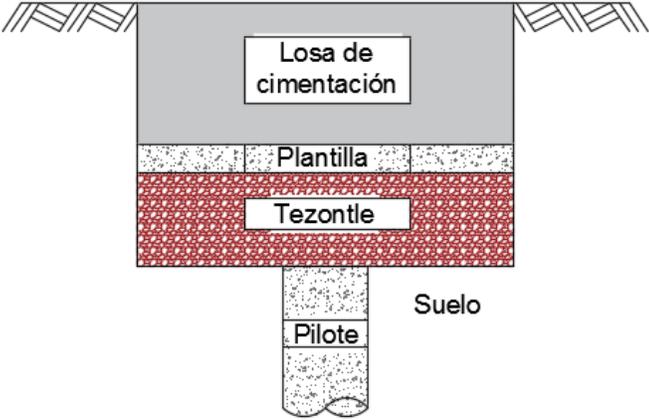


Fig. 2.4. Corte transversal de la cimentación (ARUP, 2016)

2.2.-DESCRIPCIÓN DE LA CUBIERTA

La cubierta del edificio de la terminal del NAICM tiene una altura máxima de 40 m y una superficie de más de 400,000 m². Estará soportada en la parte periferal por una estructura tridimensional y por 21 columnas en la parte central. En las figuras 2.5 y 2.6, se muestra un arreglo de la cubierta terminada. En su parte superior se colocará lámina continua y en su perímetro paneles de vidrio (figura 2.6).

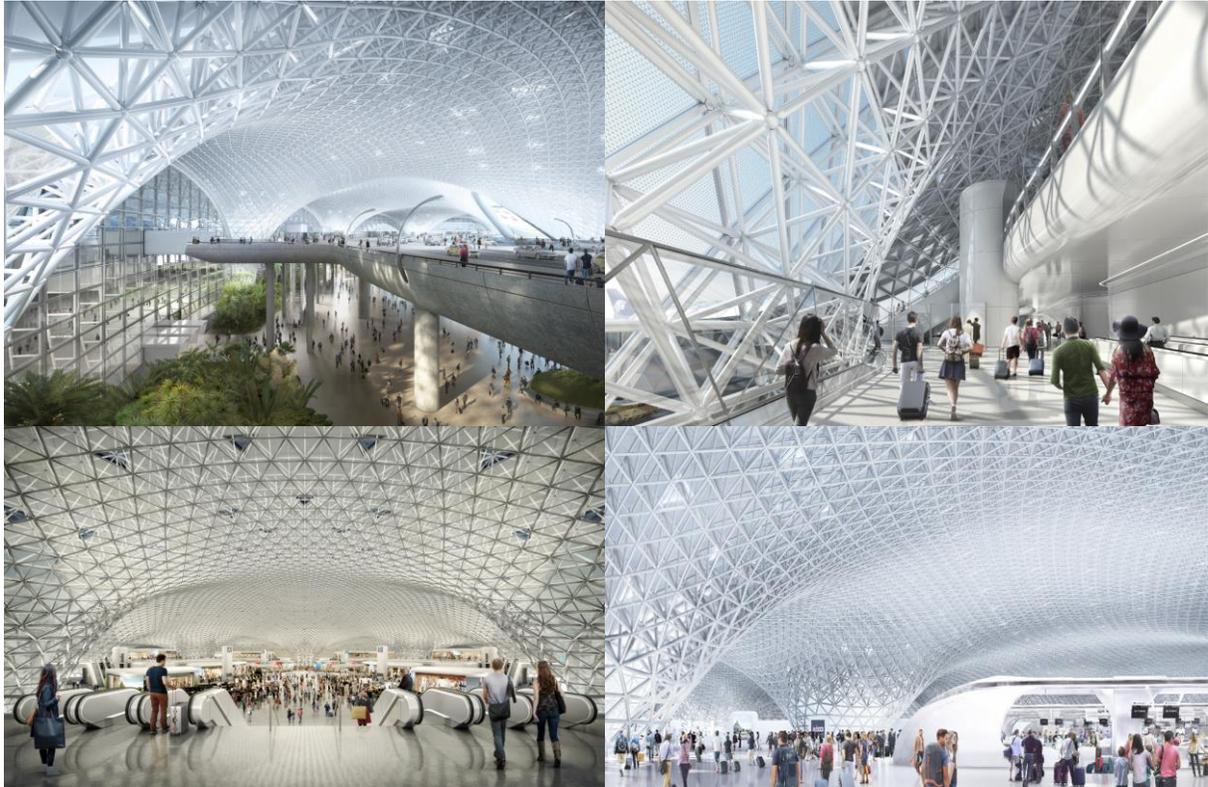


Fig. 2.5. Arreglo de la cubierta de la terminal del NAICM (FP-FREE y Foster + Partners, 2015)



Fig. 2.6. Corte transversal en 3D de la terminal del NAICM (FP-FREE y Foster + Partners, 2015)

La cubierta estará compuesta por módulos en forma de tetraedro que, en conjunto, forman una armadura espacial. Los módulos están a su vez formados por elementos de sección circular hueca (CHS), en total se utilizarán 52 secciones transversales diferentes, de diámetro exterior de entre 5 cm a 30 cm y espesor de 0.3 cm a 3 cm. El acero utilizado es ASTM A53 Gr. B con las siguientes propiedades: peso de 7850 kg/m³; resistencia a fluencia de $F_{y\text{mín}} = 2400 \text{ kg/cm}^2$; módulo de elasticidad de 2'040, 000 kg/cm². Los elementos barra de sección circular hueca se unirán con esferas sólidas forjadas con orificios roscados (figura 2.7).

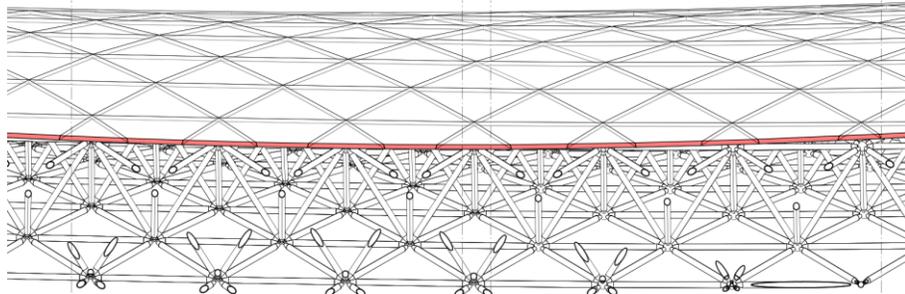


Fig. 2.7. Sistema estructural de la cubierta a base de armadura espacial (FP-FREE y Foster + Partners, 2015)

En la figura 2.8, se muestra que las columnas de la cubierta no tienen contacto directo con las estructuras interiores, denominados cuerpos bajos. Por lo tanto, la respuesta sísmica de los cuerpos bajos y de la cubierta del edificio de la terminal del NAICM se pueden analizar de forma independiente.

Además, se muestra que las columnas se apoyaran en la losa de cimentación que tiene diferentes profundidades y espesores.

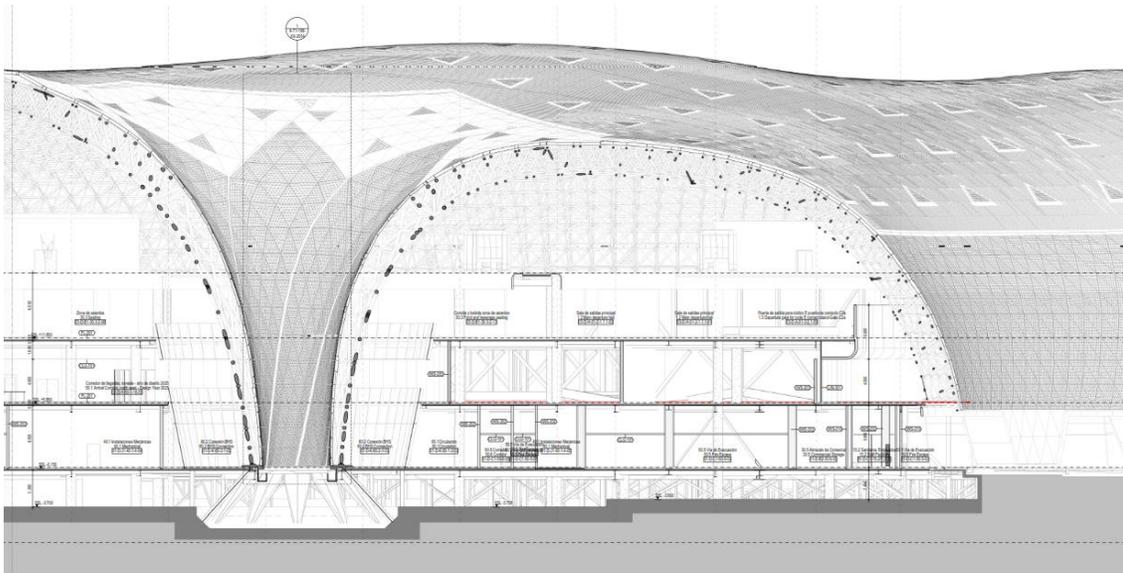


Fig. 2.8. Vista en elevación de columna y estructuras interiores (FP-FREE y Foster + Partners, 2015)

En el siguiente capítulo, se describe el procedimiento para encontrar las constantes de los resortes para modelar el suelo y se muestra el modelo de elementos finitos de la cimentación y estructura del edificio de la terminal del NAICM. Además, se muestra el primer análisis realizado, que consiste en obtener las funciones de transferencia y determinar si pudieran ocasionar movimientos fuera de fase en la cubierta del edificio de la terminal del NAICM.

CAPÍTULO 3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El edificio de la terminal del NAICM se modeló en el programa SAP2000 (CSI, 2009). Se desarrolló tomando en cuenta las características del suelo, de la cimentación y de la estructura. Utilizando los planos del proyecto y los estudios geotécnicos del sitio, se determinaron las características de los resortes para simular el suelo.

3.1.-SIMULACIÓN DEL SUELO

Para modelar el suelo sobre el que se apoyará la cimentación del edificio de la terminal del NAICM, se tomaron en cuenta tres valores de periodos dominantes del mismo. De Norte a Sur: 2.1, 2.6 y 2.8 s. Estos se obtuvieron por medio de sondeos hechos por el II-UNAM (2014) y ARUP (2016). Con estos datos se obtuvieron las constantes de los resortes, no se consideró la rigidez del suelo en el sentido vertical.

En la figura 3.1, se muestran los periodos dominantes en el terreno de la terminal del NAICM y la distancia, aproximada, en que se encuentran. El periodo dominante del suelo que tiene mayor contacto en la cimentación es el de 2.6 s, al centro de la misma.

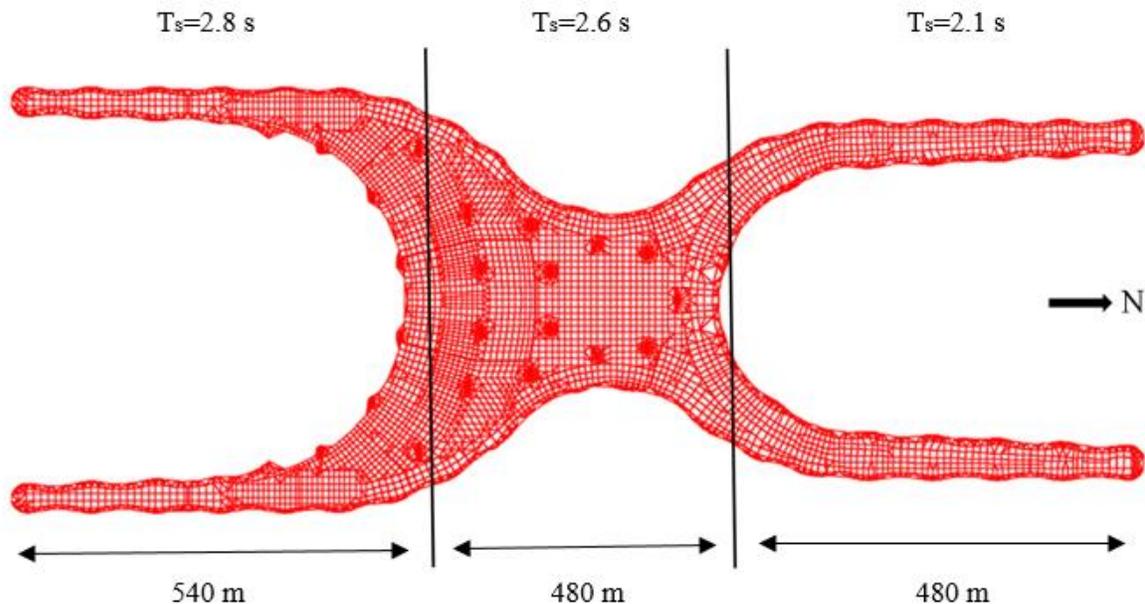


Fig. 3.1. Periodo dominante del suelo en el terreno de la terminal del NAICM

Las constantes de rigidez de los resortes se obtuvieron a partir de la relación entre la frecuencia dominante del suelo como:

$$K = m\omega^2 \quad (3.1)$$

donde: ω es la frecuencia dominante del suelo; m es la masa equivalente, en este caso la de la cimentación; K es la rigidez de los resortes.

En la tabla 3.1, se muestra la masa total de la cimentación del edificio de la terminal del NAICM y las constantes de rigidez de los resortes para simular el suelo. En este caso la cimentación tiene un espesor de 1.5 m y se consideró que el material es concreto tipo I. De acuerdo con la masa total y el periodo dominante de cada uno de los suelos.

Tabla 3.1. Masa de la cimentación y rigidez de los resortes

Zona	T _s (s)	Área (m ²)	peso (tf)	masa (t)	k resorte (t/cm)
Norte	2.1	61,350	220,860	22,513	174
Central	2.6	157,600	567,360	57,835	113
Sur	2.8	79,000	284,400	28,991	98
		297,950	1,072,620	109,339	

A continuación, se obtuvieron las funciones de transferencia de los suelos mostrados (figura 3.1). este análisis tiene la finalidad de comparar la amplificación de las frecuencias en cada suelo.

3.2.-FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA LOS SITIOS UBICADOS EN EL EDIFICIO DE LA TERMINAL DEL NAICM

Al no contar con registros sísmicos de los diferentes sitios sobre los que se cimentará el edificio de la terminal del NAICM, las funciones de transferencia se obtuvieron a partir de un método analítico, método de Thomson-Haskell, descrito en el capítulo 1. En la figura 3.2, se muestran la profundidad y las velocidades de corte para cada uno de los tres sitios estudiados (II-UNAM, 2014). De acuerdo con las velocidades de corte y el espesor de los estratos se obtuvieron las funciones de transferencia con el programa SHAKE, (Shnabel et al., 1972).

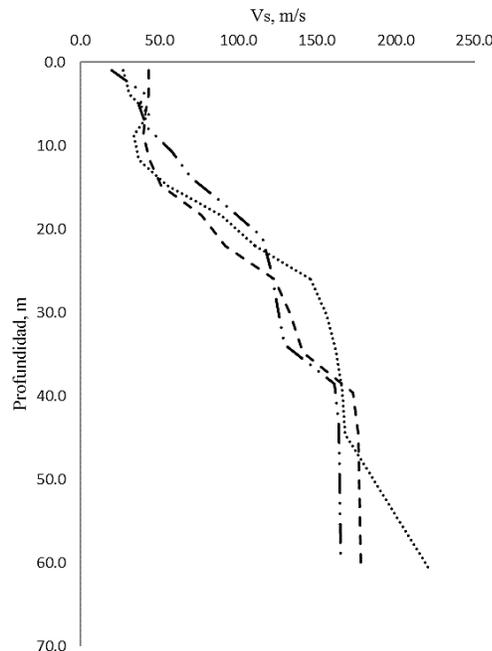


Fig. 3.2. Profundidad y velocidades de corte para los sitios estudiados, (II-UNAM, 2014).

Para obtener las funciones de amplificación se utilizó un registro del sismo del 19 de septiembre de 1985 (Ms=8.1). Al ser necesario un sitio que representara la roca base, el registro se tomó de la estación que se encuentra en la mesa vibradora del II-UNAM.

Al dibujar las funciones de amplificación de cada una de las zonas (figura 3.3) se puede observar que difieren en amplitud para frecuencias menores que 0.8 Hz, aproximadamente. Para frecuencias mayores que 0.8 Hz incluso, difieren entre sí para valores de las frecuencias que entran en resonancia. En la figura 3.3, se muestra que al comparar las funciones de transferencia entre sí, para frecuencias mayores a 0.6 Hz, aproximadamente, podrían existir efectos de movimientos fuera de fase.

El periodo natural de la cubierta del edificio de la terminal del NAICM es de aproximadamente 0.7 s. En la figura 3.3, se muestra que para la frecuencia natural de la cubierta los suelos tienen una amplificación de la aceleración en la superficie con respecto a la roca base de 1, 1.5 y 2 para los periodos de suelo dominante de 2.1, 2.6 y 2.8 s, respectivamente. Por lo tanto, la diferencia en la amplitud máxima de los suelos sería de 2 a 1, aproximadamente, esto significa que mientras el suelo con periodo de 2.1 s presenta aceleraciones iguales a las de la roca base, para la frecuencia natural de la cubierta, el suelo que tiene un periodo dominante de 2.8 s tiene una aceleración de 2 veces la de la roca base.

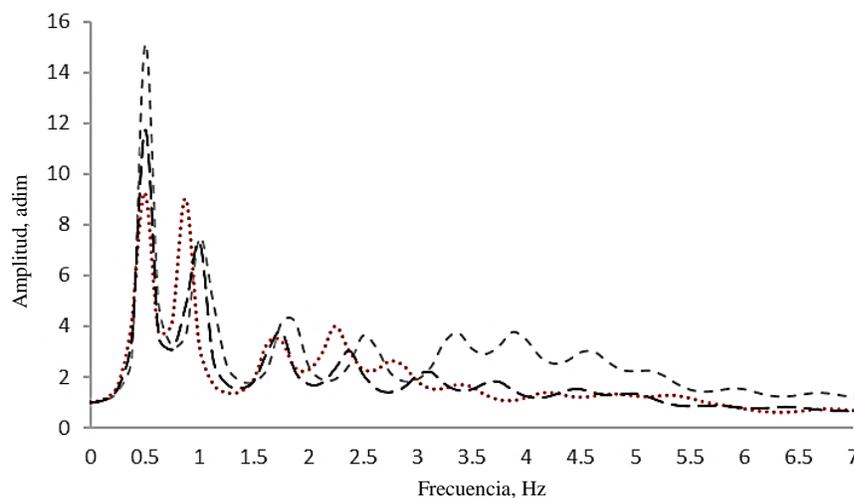


Fig. 3.3. Funciones de amplificación de los sitios estudiados

Por lo tanto, con base en las funciones de transferencia podrían ocurrir movimientos fuera de fase en la cubierta del edificio de la terminal del NAICM debido a que la variación en las características dinámicas del suelo amplifica la aceleración de la roca base con un factor diferente para la frecuencia natural de la cubierta en los diferentes suelos.

Las funciones de amplificación toman en cuenta las características dinámicas del suelo, sin embargo, no consideran las características de la estructura. Por lo tanto, se necesitó complementar el análisis con un modelo analítico de la terminal del NAICM. El modelo analítico representa al mismo tiempo el suelo, la cimentación y la estructura dando como resultado la interacción del sistema suelo-cimentación-estructura.

A continuación, se muestra el modelo de elementos finitos de la cimentación y la cubierta del edificio de la terminal del NAICM. A partir del que se analizó si la rigidez en la cimentación y la irregularidad de la cubierta del edificio de la terminal del NAICM influyen en posibles movimientos fuera de fase de la cubierta.

Además, el siguiente modelo de elementos finitos se utilizó para analizar la respuesta de la cubierta ante un evento sísmico considerando el sistema suelo-cimentación-estructura.

3.3.-CIMENTACIÓN Y CUBIERTA

Para el modelo de elementos finitos del sistema suelo-cimentación estructura, no se consideraron los cuerpos bajos que se encuentran dentro de la cubierta del edificio terminal del NAICM, tampoco se consideraron los puentes de abordaje. La losa de cimentación cuenta con diferentes desniveles, sin embargo, en el modelo de elementos finitos se consideró una losa plana, de espesor constante. En las especificaciones del proyecto (ARUP, 2016), hasta la fecha, se especifica una resistencia a compresión mínima del concreto que se utilizará en la cimentación, más no se especifica una en particular.

En la figura 3.4, se muestra la losa de cimentación en planta. De acuerdo con la información del proyecto (ARUP, 2016) se construirá de concreto reforzado con una resistencia a compresión de 400 kg/cm^2 , en el presente estudio se consideró un espesor promedio de 1.5 m.

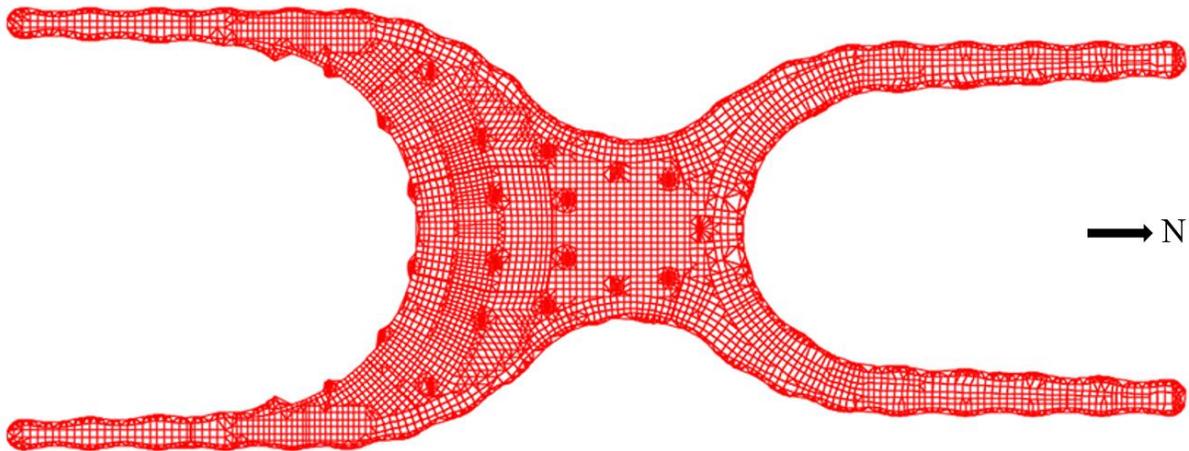


Fig. 3.4. Planta de la cimentación. modelo de elementos finitos de la cimentación del edificio de la terminal del NAICM

En la figura 3.5, se muestra la cubierta en planta y la ubicación de las 21 columnas centrales. Al comparar la figura 3.5 y la 3.4 se muestra que en la parte sur del edificio de la terminal del NAICM una parte de la cubierta se encuentra fuera de la losa de cimentación. Se trata de una armadura espacial continua en toda su extensión, no tiene juntas constructivas.

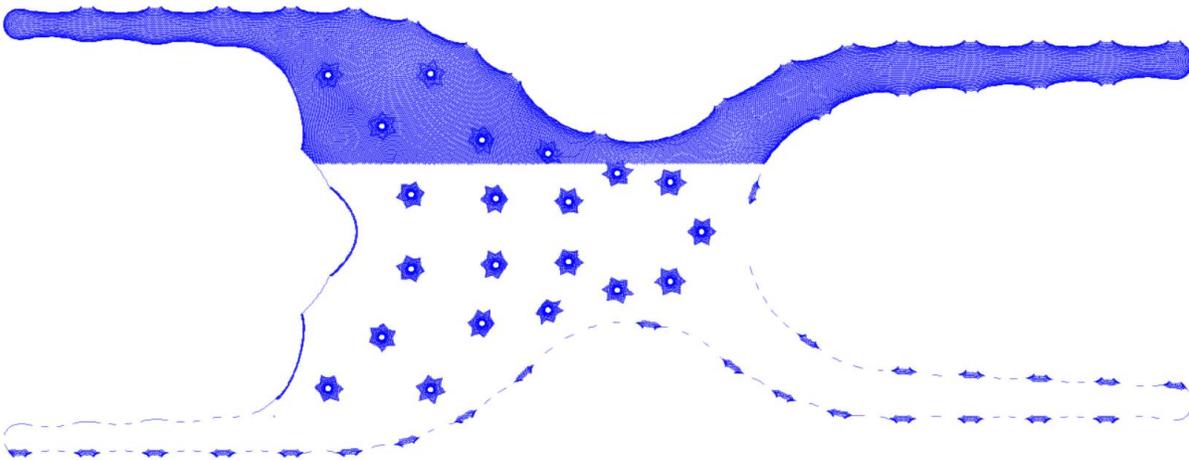


Fig. 3.5. Vista en planta de la cubierta del edificio de la terminal del NAICM

En la figura 3.6 se muestra el modelo estructural de elementos finitos de la cubierta del edificio de la terminal del NAICM. Se distinguen las columnas, los huecos de los puentes de abordaje y los tres arcos exteriores del lado Sur.

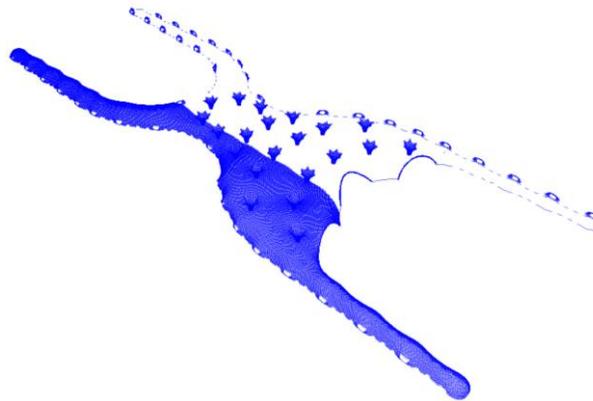


Fig. 3.6. Modelo de elementos finitos de la cubierta de la terminal del NAICM

En la figura 3.7 se muestra un detalle del modelo matemático de la cubierta de la terminal del NAICM. Se pueden observar las columnas que sostienen la cubierta al centro de la estructura. Además, por su cantidad de elementos estructurales se puede observar que la estructura de la cubierta tiene una alta redundancia.



Fig. 3.7. Detalle de la cubierta del edificio de la terminal del NAICM

La distancia entre columnas de la cubierta en la terminal del NAICM es de 100 m, excepto en el centro, donde existe un área circular sin columnas. Este espacio circular sin columnas tiene un diámetro, aproximado, de 160 m. Considerando como una estructura de grandes claros a aquella en las que existe un claro libre mayor a 30 m, la terminal del NAICM entra en esta categoría.

En la figura 3.8, se muestra una vista en elevación del modelo de elementos finitos de la cubierta de la terminal del NAICM con una altura máxima de 40 m. La cubierta en sus claros libres tiene una curva en forma de arco.

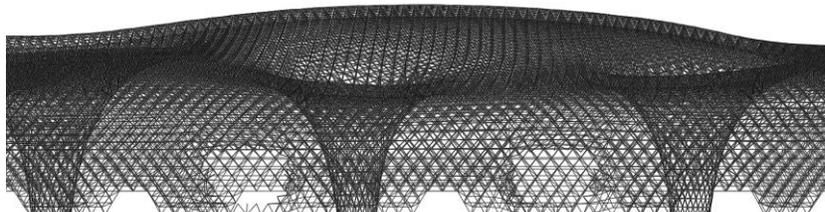


Fig. 3.8. Vista en elevación de la cubierta del edificio de la terminal del NAICM

En la figura 3.9, se muestra una columna de la cubierta de la terminal del NAICM. Cada una de las columnas de la cubierta tiene un diámetro, aproximado, de 8 m en su parte inferior y va aumentando de acuerdo con la altura.

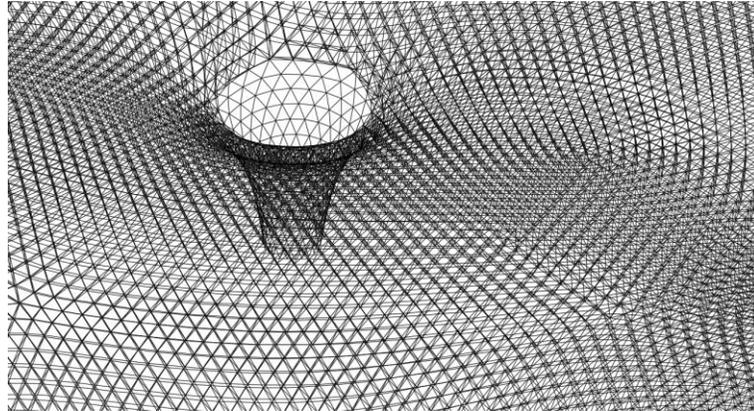


Fig. 3.9. Vista de una columna central de la cubierta del edificio de la terminal del NAICM

En la figura 3.10, se muestra un extremo de la cubierta del edificio de la terminal del NAICM. En comparación con la parte central de la terminal, los extremos son de un claro libre entre apoyos menor, por lo que su rigidez lateral es mayor a la del resto de la estructura.

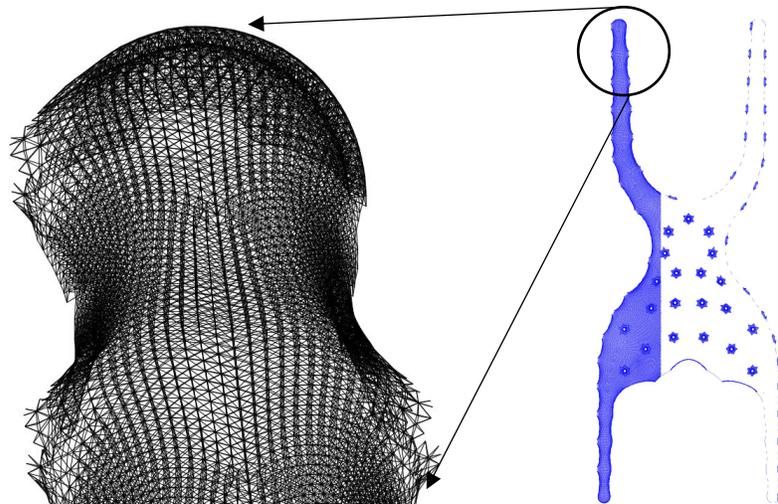


Fig. 3.10. Vista del extremo de la cubierta de la terminal del NAICM

Por lo tanto, la estructura de la cubierta se trata de una armadura espacial formada de perfiles de acero. La carga muerta a la que se someterá la estructura es solo debida a su peso propio y al recubrimiento. Por sus características, se trata de una estructura en la que su principal característica son los grandes claros libres, de más de 30 m entre apoyos verticales.

De acuerdo con el modelo de elementos finitos de la cimentación y la cubierta del edificio de la terminal del NAICM, que se describió, se estudiaron los posibles movimientos fuera de fase mediante un análisis paso a paso. A continuación, se define el procedimiento que se siguió para obtener el acelerograma sintético.

3.4.-ANÁLISIS PASO A PASO

El análisis paso a paso del sistema suelo-losa de cimentación-estructura se realizó utilizando como excitación un acelerograma sintético, obtenido para un sismo con un periodo de retorno de 2475 años, en que se consideró, entre otros factores, la importancia de la estructura (II-UNAM, 2014).

En la figura 3.11, se muestra el espectro de respuesta correspondiente a este sismo, $S_{am\acute{a}x} = 2200$ Gal, se consideraron las frecuencias que se amplifican en el terreno sobre el que se cimentara la terminal del NAICM. En él se pueden observar dos líneas, una punteada que corresponde al espectro de respuesta del acelerograma sintético y una continua que representa al espectro de respuesta objetivo. (II-UNAM, 2014)

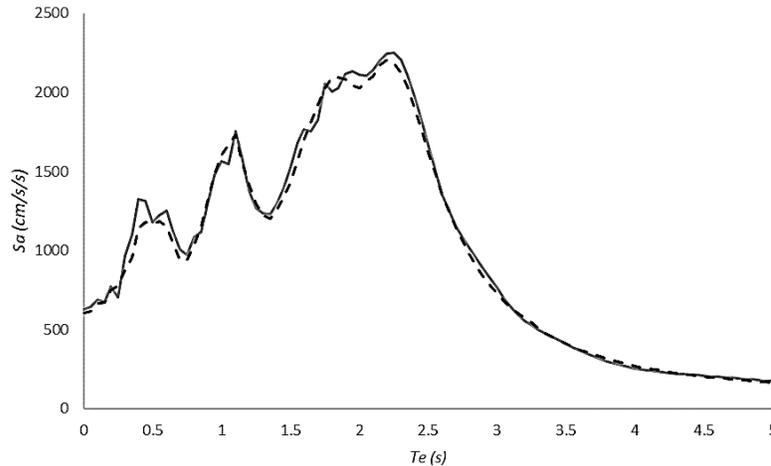


Fig. 3.11. Espectro de respuesta objetivo y obtenido del acelerograma sintético para un periodo de retorno de 2475 años, (II-UNAM, 2014)

En la figura 3.12, se muestra el acelerograma sintético que se obtuvo de la aproximación al espectro de respuesta objetivo para un sismo con periodo de retorno de 2475 años. En el acelerograma se puede observar que la aceleración máxima es de 600 cm/s² y su duración es de 1 min 40 s.

El análisis paso a paso se realizó aplicando el acelerograma sintético en dirección transversal al edificio de la terminal del NAICM, esto es en dirección Este-Oeste.

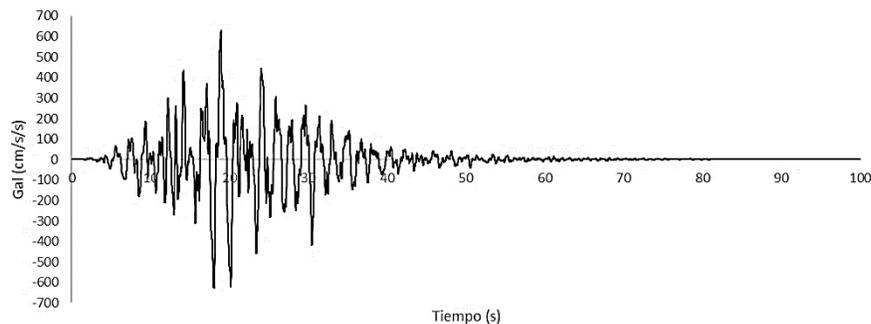


Fig. 3.12. Acelerograma sintético en el terreno de la terminal del NAICM para un periodo de retorno de 2475 años, (II-UNAM, 2014)

El acelerograma sintético se utilizó en tres ocasiones, la primera para analizar la rigidez de la cimentación, sistema suelo-cimentación. La segunda para la cubierta simplemente apoyada y, por último, para el análisis del sistema suelo-cimentación-estructura. Con esto se buscó determinar cuál de los subsistemas aportaba una mayor participación en posibles movimientos fuera de fase.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Uno de los puntos a revisar es cómo influye que el suelo tenga diferentes periodos naturales y que estos estén en contacto con una misma cimentación, losa de cimentación.

En la tabla 4.1 se muestra el promedio de los periodos tomando en cuenta el área de contacto con la cimentación, los datos de la tabla se obtuvieron:

Para la zona Norte se tomó en cuenta que el periodo dominante del suelo es de 2.10 s y considerando que el área de contacto entre el suelo y la zona Norte de la cimentación es de 61,350 m², se obtiene el porcentaje de área con respecto al total es 20.59 %.

Al obtener el porcentaje de área de la zona Norte se puede obtener un factor de participación que correspondería a la participación del periodo del suelo, en este caso en la zona Norte, en el periodo efectivo.

$$factor = (2.10)(20.59) = 0.43 s$$

Una vez obtenidos los factores de participación de cada una de las zonas se suma para obtener el periodo efectivo del suelo, considerando la cimentación rígida.

$$T_{seff} = 0.43 + 1.38 + 0.74 = 2.55 s \quad (\text{Ec. 4.1})$$

En la tabla 4.1, se muestra que a partir del criterio de Harichandran para la aceleración efectiva, se espera que el periodo efectivo del sistema-cimentación sea de aproximadamente 2.55 s, este resultado sirve como punto de comparación con el periodo obtenido en el modelo estructural, tomando en cuenta solo el suelo y la cimentación.

Tabla 4.1. Periodo característico del sitio con criterio de Harichandran

Zona	T _s (s)	Área (m ²)	Área (%)	factor
Norte	2.10	61,350	20.59%	0.43
Central	2.60	157,600	52.89%	1.38
Sur	2.80	79,000	26.51%	0.74
SUMA		297,950	100.00%	2.55s

En la tabla 4.1, se muestra que el periodo dominante de los suelos que tienen una mayor participación en la respuesta del sistema suelo-cimentación es el de mayor área de contacto con la cimentación.

En el modelo estructural del sistema suelo-cimentación, se obtuvo un periodo efectivo de 2.62 s, en torsión, si se compara con el esperado de 2.55 se tiene un error de menos del 2.7%. La ecuación (1.9) para estructuras con cimentación rígida, proporciona una buena aproximación con los resultados obtenidos con el modelo de elementos finitos.

Por lo tanto, es posible que las condiciones de la variación en la respuesta sísmica del suelo y las características de la cimentación, sean idóneas para que la cimentación se comporte como un cuerpo rígido en su plano, esto indica que en caso de ocurrir movimientos fuera de fase en la cubierta del edificio de la terminal del NAICM, no serán provocados por la deformación de la cimentación en su plano ante eventos sísmicos.

Para confirmar lo anterior, se analizó el modelo del sistema suelo-cimentación para dos casos, En el modelo (a) la cimentación se encuentra sobre un suelo con características dinámicas uniformes y en el modelo (b) la cimentación se encuentra en suelo con variación espacial en sus características dinámicas.

Después de realizar el análisis paso a paso se revisaron los desplazamientos a intervalos de 5 s. En cada uno de ellos se observó que la cimentación tiene un comportamiento de cuerpo rígido. Una vez hecha esta comprobación, se tomaron varios puntos de los extremos y se obtuvo la historia del desplazamiento transversal, para encontrar el instante en que existía un mayor desplazamiento. A continuación, se presenta una discusión de los puntos que se revisaron.

En la figura 4.2, se muestra la historia de desplazamientos transversales del punto P1, localizado en uno de los extremos de la cimentación del edificio de la terminal del NAICM (figura 4.1). Se puede observar que el desplazamiento máximo se encuentra aproximadamente en el segundo 20. Por tal motivo, se eligió ese instante, de 20 s, para revisar los desplazamientos en la cimentación.

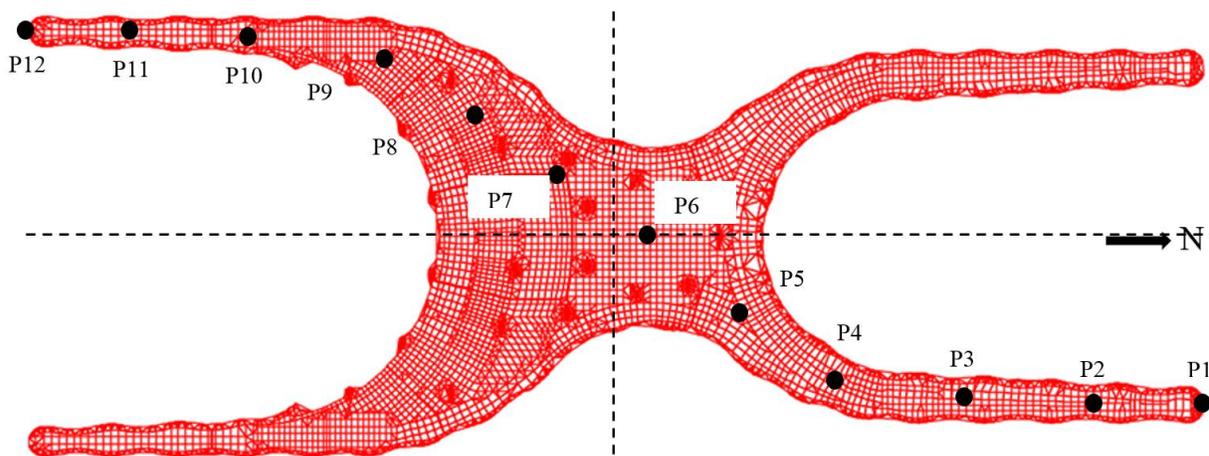


Fig. 4.1. Puntos en los que se obtuvo el desplazamiento transversal de la cimentación del edificio de la terminal del NAICM

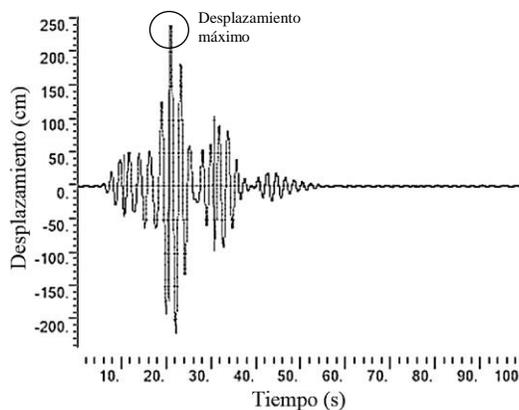


Fig. 4.2. Desplazamiento transversal de un punto P1, en el extremo de la cimentación del edificio de la terminal del NAICM

A continuación, se presentan los desplazamientos transversales en los nudos de cada uno de los modelos del sistema suelo-cimentación. En el caso (a) se utilizó el periodo dominante promedio del suelo, 2.62 s y en el caso (b) se consideró la variación en las características dinámicas del suelo, periodos dominantes de 2.1, 2.6 y 2.8 s. A partir de estos modelos se determinó si la rigidez de la cimentación es suficiente para que se comporte como un cuerpo rígido.

En la figura 4.3, se muestra el desplazamiento transversal, aumentado 1000 veces, debido al acelerograma sintético en los extremos de cada uno de los modelos. En la figura 4.3 a, se muestran los desplazamientos transversales en el modelo (a), en que se consideró el promedio del periodo del suelo. Y en la figura 4.3 b, se muestran los desplazamientos transversales de la cimentación en el modelo (b), en el que se consideraron los diferentes periodos del suelo.

En el modelo (a), se observa que el desplazamiento transversal es uniforme, con diferencia de menos de 5 cm. Sin embargo, en el modelo (b) se muestra que los desplazamientos transversales son mayores en la parte baja de la figura, zona Sur, que los de la parte alta, zona Norte. Los desplazamientos transversales de la cimentación tienen una diferencia de 3.3 m, de extremo a extremo de la cimentación.

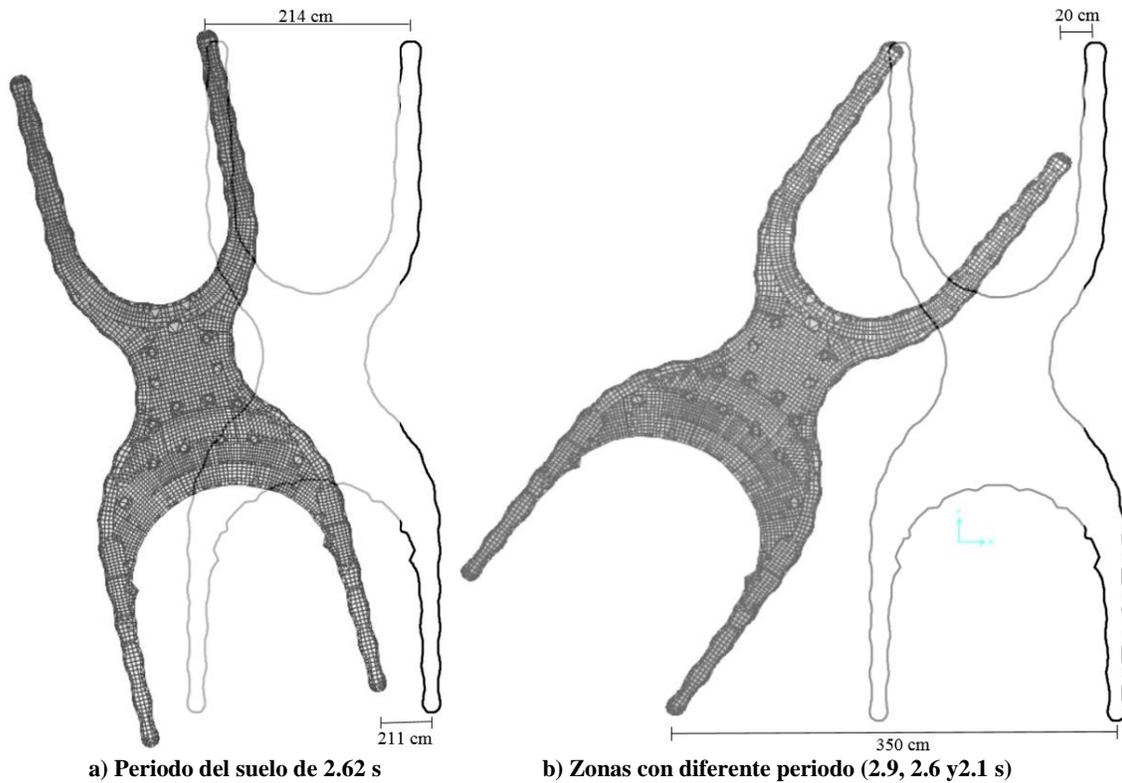


Fig. 4.3. Desplazamientos transversales de la cimentación debido al registro sintético en sentido transversal a los 20 s

La cimentación del edificio de la terminal del NAICM se comportó como un cuerpo rígido en su plano, en los dos modelos. En la figura 4.3 b, se muestra rotación de la cimentación respecto al eje vertical al considerar la variación en las características dinámicas del suelo. Sin embargo, no existen desplazamientos transversales relativos, en la cimentación, que ocasionen posibles movimientos fuera de fase en la estructura.

En el centro de la cimentación se tienen movimientos relativamente pequeños entre sí. Los cuatro extremos del edificio de la terminal del NAICM presentan movimientos relativos más evidentes que el centro, sin embargo, no son movimientos fuera de fase.

Los movimientos fuera de fase podrían ocurrir debido a la irregularidad de la estructura del edificio de la terminal del NAICM, A continuación, se presenta un modelo de elementos finitos en el que se consideró la cubierta con apoyos articulados. Este modelo representa a la estructura de la estructura cimentada sobre un solo tipo de suelo y bajo las aceleraciones del sismo sintético.

En la figura 4.4, se muestran los desplazamientos transversales máximos de la cubierta con apoyos fijos articulados, el desplazamiento transversal máximo es de 18 cm y se encuentra en la mitad de los extremos Norte. Estos movimientos fuera de fase se producen por la irregularidad de la cubierta. En un último modelo se incluyó la variación en las características dinámicas del suelo, la cimentación y la cubierta del edificio de la terminal del NAICM.

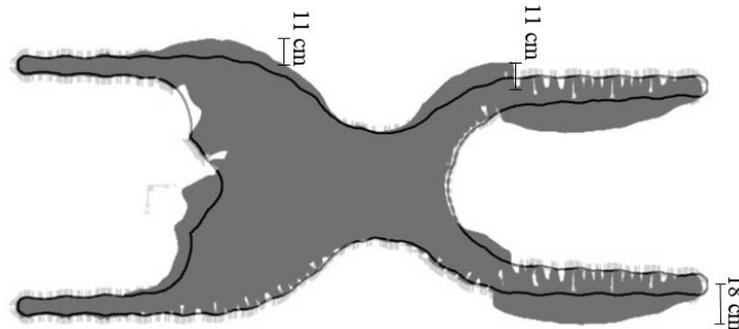


Fig. 4.4. Desplazamientos transversales máximos de la cubierta, simplemente apoyada, debido al registro sintético en sentido transversal

En la figura 4.5, se muestran los desplazamientos transversales en la cubierta del edificio de la terminal del NAICM. Estos difieren en aproximadamente 40 cm de extremo a extremo, en 1600 m. La cubierta tiene una diferencia en sus desplazamientos horizontales contiguos de 0.025 %, lo que significa 2.5 cm por cada 100 m.

Si se compara el desplazamiento transversal máximo de la cubierta con apoyos articulados de 18 cm, figura 4.4, y los ocurridos considerando el sistema suelo-cimentación-estructura de 21 cm, figura 4.5, se tiene que la diferencia relativa es de 17 %, aproximadamente. Este aumento en los desplazamientos se puede atribuir a la rotación de la cimentación, debido a la variación de las características dinámicas del suelo. Sin embargo, en la figura 4.5, se observa que se trata de desplazamientos graduales y no de movimientos fuera de fase.

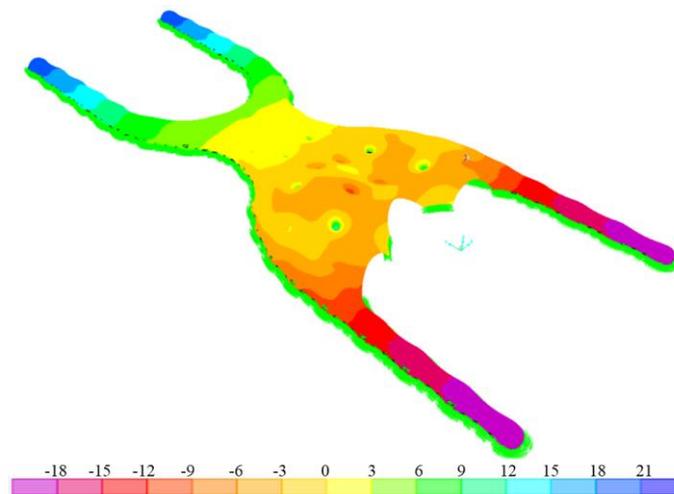


Fig. 4.5. Desplazamientos transversales de la cubierta debido al registro sintético en dirección transversal a los 20 s, (cm)

En el análisis paso a paso del sistema suelo-cimentación-estructura se comprobó analíticamente que la cimentación tiene un comportamiento de cuerpo rígido en su plano. Además, al realizar la revisión de los desplazamientos en la cubierta se observó que difieren en aproximadamente 40 cm de extremo a extremo, 2.5 %, esto es 2.5 cm por cada 100 m.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En el presente estudio se analizó el comportamiento sísmico del edificio de la terminal del NAICM. Se consideró la variación en las características dinámicas del suelo, en el que se cimentará, ante posibles efectos debidos a movimientos fuera de fase.

A partir de las diferentes características dinámicas del suelo en el que se desplantará la estructura, se utilizaron las funciones de transferencia de los sitios en los que se cimentará. Estas indicaron que la amplificación de las aceleraciones, para algunas frecuencias, presentaba diferencias considerables. Por lo que se podrían presentar movimientos fuera de fase en la cubierta, debido a la diferencia en la respuesta sísmica de los suelos.

Las funciones de transferencia son un indicador de posibles efectos debido a movimientos fuera de fase, sin embargo, no son determinantes por lo que se realizó un análisis paso a paso. Para este análisis se utilizó el sistema suelo-cimentación, la cubierta con apoyos articulados, el sistema suelo-cimentación-estructura y un acelerograma sintético obtenido para un sismo con un periodo de retorno de 2475 años.

En el sistema suelo-cimentación, a partir del análisis paso a paso, se buscó determinar si la cimentación presentaba movimientos fuera de fase o si, por el contrario, se comportaba como un cuerpo rígido. Se compararon dos modelos, uno considerando el promedio del periodo dominante de los suelos y el otro considerando la variación del periodo dominante. Se concluyó que la cimentación presenta un comportamiento de cuerpo rígido y que la variación en las características dinámicas de los suelos produce una rotación de la cimentación con respecto al eje vertical.

En la cubierta con apoyos articulados, se mostró que la irregularidad de la estructura produce movimientos fuera de fase, siendo el máximo de 18 cm en una distancia de 300 m, aproximadamente, esto significa un 6 % (6 cm por cada 100 m).

Por último, en el sistema suelo-cimentación-estructura, se mostró que al interactuar todos los subsistemas, el desplazamiento transversal máximo es de 21 cm al final de los extremos Norte. Al comparar este valor con el de la cubierta simplemente apoyada se tiene un aumento del 17 %, aproximadamente. Sin embargo, los desplazamientos en el sistema suelo-cimentación-estructura son de 40 cm en 1600 m, o bien de 2.4 % (2.4 cm por cada 100 m).

Si se compara la variación de los desplazamientos transversales máximos a lo largo de la estructura, se muestra que en el caso del sistema suelo-cimentación-estructura se reducen en un 60 %, con respecto a la cubierta con apoyos articulados. Aunque es cierto que para otras partes de la estructura los desplazamientos aumentan de magnitud, estos se presentan de una forma gradual a lo largo de la cubierta.

En conclusión, la cubierta está conformada como una armadura 3D o bien una armadura espacial, por lo que se trata de una estructura de acero con perfiles sección hueca circular, y un periodo fundamental menor a 1 s. Esto hace que el diseño estructural este regido por las acciones de viento y no las sísmicas. Así que el enfoque de diseño debe realizarse, principalmente, para resistir los esfuerzos debido a viento y asentamientos diferenciales.

REFERENCIAS

- ARUP, (2016), “Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, Reporte de Diseño Geotécnico Preliminar”, ARUP, Londres, Inglaterra.
- ARUP, (2016b), “Informe del Análisis de Pilotes para la Terminal y el Centro de Transportación Terrestre”, ARUP, Londres, Inglaterra.
- Bardet, J. P., Ichii, K., y Lin. C. H. (2000), “EERA, A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits”, Universidad del Sureste de California, California, EUA.
- CFE (2008), “Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo”, Comisión Federal de Electricidad, Ciudad de México, México.
- Chen, W. y Duan, L. (2000), “Bridge engineering handbook”. CRC Press. USA.
- Esteva, L., Ruiz, S. E., y Reyes, A. (1980), “Seismic Response of multi-support structures”. Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Estambul, Turquía.
- FEMA (2009), “NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures”, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., EUA.
- Fernández, L., Sánchez, R., y Suárez, M. (2013), “Respuesta dinámica de puentes simples sometidos a excitación multisoporte debida a la topografía”. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Veracruz, México.
- FP-FREE y Foster + Partners, (2015), “Planos de la Terminal de Pasajeros del NAICM, Planos de Trazo e Información y Planos Estructurales”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, México.
- González, M. (2015), “Replanteamiento en la estimación de periodos fundamentales del suelo para la ciudad de Querétaro”, Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.
- Harichandran, R. S. (1987), “Stochastic analysis of rigid foundation filtering”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Michigan, EUA.
- Harichandran, R. S. (1999), “Spatial variation of earthquake ground motion”, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan, EUA.
- Hashash Y. M. (2012), “DEEPSOIL, User Manual and Tutorial”, Universidad de Illinois, Illinois, EUA.
- Haskell, N. H. (1953), “The dispersion of surface waves in multilayered media”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 43, pp. 17-34. EUA.
- Idriss, I. M. y Seed, H. B. (1968), “An analysis of ground motions during the 1957 San Francisco earthquake”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No. 6, pp. 2013-2032.
- II-UNAM, (2014), “Información sobre peligro sísmico y eólico”, Proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, 3er Informe Parcial y Final, Estructuras del II-UNAM para ASA, noviembre.
- Kramer, S. L. (1996), “Geotechnical earthquake engineering”, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, EUA.
- Lermo, S. y Limaymanta, F. (2007), “Uso de las funciones de transferencia empíricas (HVNR) obtenidas con microtemblores para construir mapas con la clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico”, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, México.
- Lupoi, A., Franchin, P. E., y Monit, G. (2005), “Seismic design of bridges accounting for spatial variability of ground motion”, Earthquake Engineering Structural Dynamics, pp 327-348.
- Nazmy, A. S. y Abdel-Ghaffar, A. M. (1992), “Effects of Ground Motion Spatial Variability on the Response of Cable-Stayed Bridges”, Earthquake Engineering Structural Dynamics.

- RCDF-2004, (2004), “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, Gobierno del Distrito Federal, Ciudad de México, México.
- Rodríguez, H., Domínguez, T., Aguilar, A., Sánchez, E., Cabrera, M., Tejeda, J. y Bojorquez E. (2016), “Comparación de los espectros de sitio específico obtenidos a partir de sismos reales y aplicando la normativa MOC-CFE2008 para la ciudad de Colima, México”, Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Mayagüez, Puerto Rico.
- SAP2000, CSI, (2009), “SAP2000, Analysis Reference”, Vols I y II, Computers and Structures Inc., Berkeley California, EUA.
- Seed, H. B., Murarka, R., Lysmer, J., e Idriss, I. M. (1976), “Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source and local site conditions for moderately strong earthquakes”, Bulletin of the Seismological Society of America, California, EUA.
- Shnabel, P.B., Lysmer, J., y Seed, H.B. (1972), “SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites”, Report No. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, EUA.
- Tian, Z., y Lou, M. (2014), “Traveling wave resonance and simplified analysis method for long-span symmetrical cable-stayed bridges under seismic traveling wave excitation”, Shock and Vibration, Hindawi Publishing Corporation, Shanghai, China.
- Trifunac, M. (2008), “The nature of site response during earthquakes”, Coupled site and soil-structure interaction effects with application, Springer. Borovets, Bulgaria.
- Vargas, E. (2011), “Análisis de la respuesta del depósito de suelos en Bogotá con base en la información registrada en la RASB para el sismo de Quetame de 2008”, Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Zúñiga, F. (2011), “Notas introductorias: sismología”, Centro de Geociencias, UNAM. Juriquilla, Querétaro.