Capítulo IV - Estudio de propagación de ondas sísmicas – caso particular de sitio

José Alviar

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

ALVIAR, J. Estudio de propagación de ondas sísmicas – caso particular de sitio. In: INGA ORTEGA, E., ed. *Aplicaciones e innovación de la ingeniería en ciencia y tecnología* [online]. Quito: Editorial Abya-Yala, 2019, pp. 143-164. ISBN: 978-9978-10-491-0.
<https://doi.org/10.7476/9789978104910.0006>.

All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença [Creative Commons Atribuição 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia [Creative Commons Reconocimiento 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

CAPÍTULO IV

Estudio de propagación de ondas sísmicas – caso particular de sitio

Study of seismic waves propagation - site specific case

José Alviar*

Universidad Politécnica Salesiana Ecuador

*Email: jalviar@ups.edu.ec

Resumen

Uno de los problemas con que se enfrenta el ingeniero civil es el diseño adecuado de estructuras. En ese sentido, existen normas a nivel mundial que regulan el diseño y construcción de edificaciones solicitadas por acciones sísmicas. El objeto es hacer a las estructuras dúctiles, es decir que puedan experimentar grandes deformaciones, sin pérdida de resistencia y que no colapsen aun cuando actúe el sismo más severo.

En numerosas normas a nivel mundial se establece realizar estudios particulares de sitio o de propagación de ondas sísmicas en obras importantes, sin embargo no se descarta su aplicación en obras que pudiesen ser consideradas como poco importantes por el aspecto económico, sin dejar de serlo por el aspecto de salvar vidas. En ese sentido, en aquellos casos en que la edificación se encuentre en la cercanía a fallas activas o exista la presencia de estratos de suelos susceptibles a licuar o de suelos que degradan su rigidez o resistencia con la deformación bajo el efecto de carga cíclica deben ser objeto de la realización de estudios particulares de sitio. Por ello, se presenta en el siguiente trabajo la metodología utilizada para realizar un estudio particular de sitio, mostrando entre otros aspectos la degradación de rigidez y resistencia de los suelos, la evaluación del potencial de licuación de arenas, los niveles de deformación que experimentan los estratos de suelos y el espectro de diseño obtenido como insumo para el análisis dinámico de estructuras.

Palabras clave

Deformación cíclica, efectos de sitio, espectro de diseño, licuación, ondas sísmicas, propagación, respuesta dinámica.

Abstract

One of the problems facing the civil engineer is the proper design of structures. In that sense, there are worldwide standards that regulate the design and construction of buildings requested by seismic actions. The object is to make the structures ductile, so, it can undergo great deformations, without loss of resistance and do not collapse even when the most severe earthquake acts.

In numerous standards at world-wide it is established to realize particular studies of site or to evaluate the propagation of seismic waves in major constructions, nevertheless it is not discarded its application in works that could be considered as unimportant by the economic aspect, without ceasing to be for the aspect of saving lives. In this sense, in those cases in which the building is in the vicinity of active faults or there is the presence of strata of soils susceptible to liquefying or of soils that degrade their rigidity or resistance with the deformation under the effect of cyclic loading must be object of the realization of particular site studies. For this reason, the methodology used to carry out a particular site study is presented in the following work, showing, among other aspects, the degradation of soil stiffness and resistance, the evaluation of the liquefaction potential of sands, the deformation levels reached by the soil strata and the design spectrum obtained as input for the dynamic analysis of structures.

Keywords

Cyclic deformation, design spectrum, dynamic response, liquefaction, propagation, seismic waves, site effects.

1. Introducción

Existen en el país numerosos sistemas de fallas activas que por su cercanía a obras civiles, bien sea por construir, u obras existentes donde se desee evaluar cuál es el comportamiento dinámico de la estructura y qué medidas de reforzamiento deben ser implementados ante acciones sísmicas, amerita la realización de estudios particulares de sitio. Igualmente, la presencia de estratos o depósitos de suelos potencialmente licuables [1-2-3] o de suelos que degradan su rigidez o resistencia bajo el efecto sísmico deben ser objeto de un estudio particular de sitio, a fin de diseñar apropiadamente el sistema de cimentación, así como el cuantificar los niveles de degradación de rigidez y resistencia que puedan experimentar los suelos, determinar el factor de seguridad contra la licuación de los depósitos granulares sueltos saturados y la generación del espectro de diseño que servirá como insumo para la realización del análisis

dinámico de la estructura. En ese sentido se presenta a continuación la metodología seguida para realizar un estudio particular de sitio mostrando su aplicación en el análisis de licuación de los suelos y la generación del espectro de diseño para un sitio en particular.

2. Materiales y métodos

El presente trabajo constituye una investigación cuantitativa del tipo cuasi-experimental [4], por cuanto se estudia la relación causa-efecto de fenómenos naturales como los sismos, sobre depósitos de suelos donde no existe un control riguroso de la variable independiente que es la historia de aceleraciones sísmicas. Los mismos provienen de registros instrumentales disponibles en la red sismológica mundial [5]. De acuerdo con la definición operacional de variables, en este estudio se presentan:

Variables Independientes: comprende los registros sísmicos medidos en roca y los perfiles litológicos caracterizados por su espesor, peso unitario y velocidad de ondas de corte, entre otros.

Variables Intervinientes: comprende la herramienta o algoritmo de cálculo [6] que permite cuantificar los efectos que produce el sismo en el comportamiento dinámico del perfil del suelo. Esta variable no será sometida a investigación, por cuanto se parte de la premisa de que el algoritmo de cálculo ha sido desarrollado y validado por personal altamente especializado [7-8].

Variables Dependientes: comprende la historia de aceleraciones en superficie, espectros de respuesta, lazos de histéresis, trayectoria de esfuerzos, incremento en presión de poros, entre otros.

La muestra de estudio se circunscribe a depósitos de suelos, saturados, susceptibles a experimentar el fenómeno de licuación, estratos de suelos que pueden degradar su rigidez y resistencia bajo el efecto de carga cíclica, estratos de arenas o arcillas competentes en los que se desea cuantificar los niveles de deformación cíclico, así como los niveles de degradación que pueden alcanzar a fin de elaborar las curvas de capacidad portante de cimentaciones profundas con profundidad.

La metodología a seguir para cumplir con el objetivo propuesto en este estudio se presenta continuación:

Recopilación bibliográfica de trabajos realizados que tienen relación con el tema objeto de estudio, destacándose entre ellos: evaluación del potencial de licuación [9-10], modelos constitutivos que consideren degradación de resistencia, cambio en rigidez y amortiguamiento en los suelos con la deformación y aumento de presión de poros [11-12-13-14], entre otros.

Ubicación y selección de código de cálculo o programa que permita evaluar la respuesta dinámica de suelos, y particularmente considere los cambios de rigidez y amortiguamiento con el aumento de presión de poros, así como su disipación en el tiempo.

Construir un perfil de suelo representativo del lugar en donde se realizará el estudio particular de sitio. Seleccionar sismos instrumentales registrados en roca en correspondencia con el nivel de amenaza esperado en el sitio de estudio y su distancia o cercanía a las fallas activas. Aplicar en la base del perfil geotécnico los acelerogramas de entrada definidos previamente.

Obtener la historia de aceleraciones en superficie, lazos de histéresis, historia de aumento de presión de poros, entre otros.

A partir de la historia de aceleraciones en superficie construir los espectros de respuesta para una estructura elástica de 1 grado de libertad (gdl).

Realizar el análisis de las respuestas obtenidas cuantificando la aceleración máxima en superficie, la amplificación y la generación de espectros de respuesta. Así mismo cuantificar los niveles de deformación que se producen a lo alto del depósito, la determinación de los niveles de degradación de rigidez y resistencia de los suelos que componen la columna litológica, la evaluación de los factores de seguridad contra la licuación que puedan sufrir los suelos granulares, sueltos, saturados.

2.1. Respuesta dinámica de suelos bajo acciones sísmicas

El estudio particular de sitio o la respuesta dinámica del suelo bajo acciones sísmicas consiste en imponer en la base del depósito sismos representativos, cuyas características se correspondan con el estudio de amenaza, en cuanto a magnitud esperada, distancia epicentral y aceleración en roca, los cuales se propagan a través del

depósito de suelo o columna litológica y permiten determinar los valores de esfuerzos de corte y deformaciones máximas impuestas por el sismo, con profundidad, y las aceleraciones que podrían producirse o el espectro de respuesta.

Una vez determinadas las deformaciones máximas de corte con profundidad o la movilidad cíclica, podrán determinarse los valores de degradación de la rigidez y resistencia, utilizando resultados de ensayos de corte cíclicos normalizados reportados en la literatura [11] o de ensayos de corte cíclico a esfuerzo controlado o deformación controlada realizado en muestras representativas de la zona objeto de estudio.

Con los valores de esfuerzos de corte máximos con profundidad impuestos por el sismo se podrán determinar los valores de CSR o razón de esfuerzo cíclico correspondiente a 0.65 veces el valor máximo de corte dividido entre el esfuerzo vertical efectivo. En el caso de los suelos granulares se determinará si el estrato granular licuará o no al comparar los valores de CSR con los valores de CRR (cyclic resistance ratio) o la resistencia al corte cíclico de las arenas derivado de la resistencia de punta del cono del ensayo CPTU o del ensayo SPT [15]. En el caso de los suelos arcillosos, basado en los niveles de deformación alcanzados se degradará su rigidez y resistencia (movilidad cíclica).

Con los valores de rigidez y resistencia degradados con profundidad y la identificación de los estratos granulares que experimentan licuación, permitirá definir los factores que modifican tanto la rigidez como la resistencia de las curvas p-y y t-z al ser sometido el pilote o cimentación profunda a carga lateral o axial, respectivamente, tanto en el campo libre como en el campo cercano.

2.2. Estudio de la respuesta dinámica de un sitio en particular

Para la ejecución de un estudio particular de sitio se realizarían las siguientes actividades:

- Selección de sismos instrumentales de la red mundial, en lo posible, con origen tectónico similar al de la zona objeto de estudio.
- Selección de los perfiles geotécnicos y sus parámetros para realizar las corridas con el programa CYCLIC 1D.

- Procesamiento de la salida de resultados y elaboración de perfiles de respuesta de las deformaciones máximas de corte y esfuerzos de corte máximos con profundidad.
- Elaboración de espectros de respuesta en superficie para cada uno de los sismos incluidos en el estudio.
- Determinación de la mediana de los espectros y el correspondiente a la media más una desviación estándar.
- Elaboración de los espectros de diseño.

Se debe tener especial cuidado de seleccionar sismos cuyos registros han sido medidos en roca, sin estar influenciados por la presencia de estructuras cercanas. Este tipo de registros son considerados como obtenidos en afloramientos rocosos presentes en el campo libre (freefield-outcropping).

La cantidad de sismos seleccionados deberán ser como mínimo 3 en correspondencia con la norma ecuatoriana NEC-SE-DS [16], los cuales se consideran representativos y cumplen con lo mínimo exigido en las normativas vigentes para la realización de estudios particulares de sitio. Para la realización del presente estudio se han seleccionado 7 sismos instrumentales para realizar los análisis.

3. Movilidad cíclica

Con el objeto de determinar los niveles de deformación inducidos por los sismos en los estratos que componen el Perfil Litológico, se recurrió al uso del programa o código de cálculo Cyclic 1-D.

El programa CYCLIC 1-D [6-7-8], fue desarrollado para evaluar la respuesta dinámica de suelos donde está involucrado el comportamiento no lineal e histerético asociado a los cambios en rigidez y amortiguamiento con la deformación por efecto sísmico, además de incluir los incrementos y disminuciones de la presión de poros y como ello afecta los esfuerzos totales y efectivos y en consecuencia la resistencia al corte del material.

Mediante el uso del programa se obtendrán los valores de deformación por corte máximos con profundidad a fin de identificar por sectores cuales son los niveles de deformación máximos alcanzados cuando la columna de suelo es sometida en su base al escenario de sismos previamente establecido de los estudios de amenaza.

A partir de los valores de deformaciones máximas alcanzadas (g_{max}) se determinará la deformación por corte cíclica equivalente ($0.65 g_{max}$), que al introducirlo en la Figura 1, envolvente de resultados obtenidos de ensayos de corte cíclicos realizados en muestras seleccionadas, se obtendrían los respectivos valores de degradación de rigidez que se producen en el campo libre.

Particularmente se presenta en la figura 1, en el eje de las ordenadas la degradación del módulo de corte (G/G_{max}) con la deformación por corte cíclica al someter las muestras de suelos a ensayos de corte a deformación controlada bajo la acción de 15 a 30 ciclos de carga y descarga.

Figura 1. Degradación de rigidez de los suelos con la deformación por corte cíclico en muestras sometidas a ensayos de corte cíclico (DSS)

Los valores derivados de los ensayos dinámicos indican que hasta deformaciones por corte cíclicos de 0.6%, la degradación de rigidez (δ) es del orden de 0.8. Para deformaciones por corte de 1% y 2% el valor de δ es de 0.7 y 0.5 respectivamente.

El estudio de propagación de ondas sísmicas a través de la columna litológica del suelo ha permitido elaborar la gráfica de los valores de deformación equivalentes correspondientes a 0.65 veces la deformación máxima que se representan en las Figuras 2 y 3 al utilizar sismos representativos del estudio de amenaza considerando periodos de

retorno de 200 años, escenario SLE (Strength Level Earthquake) y 1000 años, escenario DLE (Ductility Level Earthquake) respectivamente.

Figura 2. Deformación equivalente por corte cíclico con profundidad – Escenario SLE, periodo de retorno 200 años

Figura 3. Deformación equivalente por corte cíclico con profundidad – escenario DLE, periodo de retorno 1000 años

De las figuras 2 y 3 se concluye que los estratos ubicados por debajo de los 7 m de profundidad experimentan una movilidad o una deformación por corte cíclica equivalente que no supera el 0.3% bajo los escenarios SLE y DLE, la cual va disminuyendo con profundidad, valor bajo de movilidad cíclica que producirá bajos valores de degradación de rigidez y resistencia. Mientras que el estrato de suelo ubicado entre los 0 y 7 m de profundidad, correspondiente a arenas sueltas saturadas experimenta altos niveles de deformación cuyo análisis del factor de seguridad contra la licuación se presenta en el siguiente aparte.

4 . Licuación de suelos

La licuación de los suelos es un fenómeno que ocurre en suelos granulares, sueltos, saturados ubicados por debajo del nivel freático. Se trata de arenas con poco contenido de finos o limos no plásticos que al ser sacudidos por la acción sísmica, tienden a disminuir de volumen. El agua intersticial presente en los poros o espacios vacíos no tiene la suficiente rapidez para migrar, lo cual provoca que la presión de poros aumente y se iguale al esfuerzo efectivo, bajo dicha condición se produce una pérdida significativa de resistencia haciendo que el suelo se comporte como un líquido y alcance lo que se conoce como licuación con un valor de resistencia al corte muy bajo o resistencia residual.

Una simulación realizada con el programa Cyclic 1-D, el cual permite aplicar en la base del depósito sismos instrumentales registrados en la red mundial permite visualizar como es el comportamiento bajo la acción sísmica.

El esfuerzo de corte impuesto por el sismo tiende a aumentar linealmente con profundidad, como se muestra en la Figura 4, al igual que el esfuerzo confinante, al cual está asociada una mayor resistencia al corte o esfuerzo cedente, pero en algún punto del perfil, el esfuerzo de corte impuesto por el sismo iguala al esfuerzo cedente, haciendo que el material alcance la falla y se produzcan los mayores valores de deformación, Figura 5. Simultáneamente ocurre el aumento en presión de poros que hace que los esfuerzos efectivos disminuyan, al igual que la resistencia al corte del material, y en caso de que se iguale el esfuerzo confinante con la presión de poros, el esfuerzo confinante efectivo se anula, produciéndose lo que se denomina licuación, Figura 6.

Figura 4. Esfuerzo de corte impuesto por el sismo vs profundidad

Figura 5. Deformaciones de corte vs profundidad

Figura 6. Esfuerzo de confinamiento efectivo vs profundidad

Los resultados anteriormente mostrados se corresponden con la salida obtenida con el programa Cyclic 1-D para un perfil de 30 m de espesor, al aplicar en la base del depósito el sismo ocurrido en Chile en el año 1985. En este caso, se produjo licuación inicial desde los 0 m hasta los 23 m, dado que el esfuerzo confinante efectivo se anuló para este rango de profundidades (Figura 6).

Figura 7. Lazo de histéresis a 20 m de profundidad

Para observar si se produjo licuación en el sentido estricto, es decir si el suelo experimentó grandes deformaciones bajo estado residual de resistencia al corte, con disminución de rigidez y escasa variabilidad en la presión de poros en el estado licuado (comportamiento contractivo), se presenta a continuación los lazos de histéresis a 20 m de profundidad (Figura 7), la historia de incrementos de presión de poros (Figura 8) y la trayectoria de esfuerzos correspondiente (Figura 9).

Figura 8. Aumento de presión de poros a 20 m de profundidad

Figura 9. Trayectoria de esfuerzos a 20 m de profundidad

Se destaca de las figuras anteriores que después de ocurrida la licuación inicial, se mantuvo la presión de poros igual al esfuerzo confinante, se produjo a los 20 m de profundidad una caída brusca en resistencia y rigidez, alcanzando el suelo su estado residual con altas deformaciones.

En la Figura 7 se observa que una vez alcanzada la resistencia residual, el material presenta un comportamiento similar al modelo elasto-plástico, es decir durante los procesos de carga y descarga, la rigidez (pendiente de los lazos de histéresis) tienden a ser constantes, y resistencia cedente igual a la residual. Este hecho sustenta, que en el estado residual, el material aún posee poca resistencia y rigidez, es decir, no se produce una rigidez o resistencia al corte nula, semejante a la que posee el agua y esto permite que se transmitan ondas de corte sísmicas hacia la superficie y el material ofrezca una pequeña resistencia a la deformación.

En las trayectorias de esfuerzos se observa el comportamiento típico de arenas contractivas, es decir la trayectoria de esfuerzos tiende a acostarse hacia la izquierda, no mostrando comportamiento parcialmente contractivo o dilatante. Cabe destacar en este punto algunas definiciones que han sido convenidas para tratar el tema de licuación:

Licuación: denota la condición en que el suelo experimenta grandes deformaciones bajo un estado residual de resistencia al corte, también conocido como falla por flujo, con presión de poros igual al esfuerzo confinante.

Licuación Inicial: denota la condición durante el cual bajo la aplicación de esfuerzos de corte cíclico la presión de poros se iguala con el esfuerzo confinante.

Licuación Parcial: denota la condición en que el suelo después de alcanzar la licuación inicial y durante subsecuentes ciclos de carga y descarga se deforma de manera limitada sin alcanzar el estado residual, también conocido como movilidad cíclica.

Numerosos casos han sido reportados en la literatura de daños a estructuras debido a licuación de suelos, observándose este fenómeno en sitios donde han ocurrido terremotos, con manifestación de volcamiento de edificios, caída de puentes, deslizamiento de presas, agrietamiento de pavimentos, tanques que salen a flote a la superficie, volcanes de arena, entre otros. Ver Fotos 1, 2, 3, 4 y 5.

Foto 1. Volcamiento de edificios en Niigata (Japón) 1964 [17]

Foto 2. Formación de volcanes de arena por migración de partículas hacia la superficie [17]

Foto 3. Agrietamiento del pavimento por licuación de arenas [17]

Foto 4. Volcamiento de edificio en Turquía por licuación de arenas y pérdida de capacidad de soporte del suelo de cimentación [17]

Foto 5. Asentamiento diferencial en tanque petrolero producto de licuación de arenas sueltas ante un evento sísmico [17]

4.1. Evaluación del Potencial de Licuación

Para determinar si el estrato granular ubicado entre 0 y 7 m de profundidad licuará bajo los escenarios de carga SLE (200 años de periodo de retorno) y DLE (1000 años de periodo de retorno) se recurrió a los resultados obtenidos del estudio particular de sitio obteniendo el valor de CSR con profundidad, el cual resulta de dividir el valor equivalente del esfuerzo cortante cíclico máximo inducido por el sismo ($0.65 t_{max}$) entre el esfuerzo vertical efectivo.

La comparación entre los valores de CSR y CRR (cyclic resistance ratio) obtenido de los valores de resistencia de punta del cono medido en tres perforaciones realizadas, aplicando la metodología de Robertson y Cabal [18], para los suelos granulares, permite determinar el Factor de Seguridad contra la licuación definido como:

$$FS = CRR/CSR$$

FS: Factor de seguridad contra la licuación

CRR: Resistencia al corte cíclico.

CSR: Razón de esfuerzo cíclico inducido por el sismo.

La representación gráfica de los valores de CSR y CRR, conjuntamente con el Factor de Seguridad (FS) con profundidad para el estrato granular ubicado entre 0 y 7 m de profundidad para los escenarios SLE y DLE se muestran en las Figuras 10 y 11 respectivamente.

Figura 10. Factor de seguridad contra la licuación del estrato granular – Escenario de carga SLE

Particularmente, bajo el escenario SLE algunos lentes dentro del estrato granular licúan (línea marrón por debajo del Factor de Seguridad de 1 en la Figura 10) y otros no, sin embargo conservadoramente, se va a considerar para efectos de diseño que todo el estrato experimentará licuación.

Bajo el escenario de carga DLE sucede un comportamiento similar al anterior pero abarcando una zona de mayor espesor o altura del estrato licuable como se muestra en la Figura 11.

**Figura 11. Factor de seguridad contra la licuación
del estrato granular – escenario de carga DLE**

El estrato granular potencialmente licuable degradará su resistencia al valor de resistencia residual (6 Kpa), que al compararlo con el valor de resistencia pico (23 Kpa) resulta un factor de degradación de resistencia de 0.26. La degradación de rigidez será de 0.1, basado en la medición de pérdida de rigidez, obtenida a partir de numerosos ensayos de corte cíclicos realizados en suelos granulares que han experimentado licuación [19] y [20].

Una vez determinadas los estratos potencialmente licuables y las variaciones de deformaciones equivalentes con profundidad en los demás estratos que componen el perfil litológico, se presentan en las tablas 1 y 2 los factores de degradación de rigidez y resistencia en el campo libre, con los cuales deberán afectarse las curvas p-y o t-z de capacidad portante de pilotes, para tomar en cuenta el efecto de degradación por carga sísmica en los escenarios SLE y DLE respectivamente.

Tabla 1. Factores de degradación de rigidez y resistencia con profundidad – Escenario de carga SLE

Profundidad (m)	Degradación de rigidez	Degradación de resistencia
0 – 7*	0.1	0.25
7 - 15	0.94	1
15 – 25	0.98	1
25 - 100	1	1

* Licuación del estrato granular

Tabla 2. Factores de degradación de rigidez y resistencia con profundidad – Escenario de carga DLE

Profundidad (m)	Degradación de rigidez	Degradación de resistencia
0 – 7*	0.1	0.25
7 - 15	0.88	1
15 – 25	0.90	1
25 – 40	0.94	1
40 – 60	0.98	1
60 - 100	1	1

* Licuación del estrato granular

5. Espectros de Diseño

Haciendo el estudio particular de sitio o de propagación de ondas sísmicas a través de la columna litológica de suelo se han obtenido los espectros de respuesta en superficie. En las Figuras 12 y 13 se muestran los espectros de respuesta para los escenarios de carga SLE y DLE, conjuntamente con el espectro derivado del estudio de amenaza sísmica para períodos de retorno de 200 años y 1000 años respectivamente.

Con los espectros de diseño obtenidos de los estudios particulares de sitio, podrán realizarse análisis dinámicos de las estructuras utilizando el método de superposición modal en estructuras por construir o ya construidas o existentes a fin de cuantificar si se amerita o no la implementación de alguna medida de adecuación o reforzamiento estructural.

6. Conclusiones

En el diseño de estructuras el análisis dinámico es muy importante, por cuanto las cimentaciones así como la superestructura van a estar sometidas a cargas variables en el tiempo, como son los sismos.

El efecto sísmico se ha tratado considerando los escenarios de carga Strength Level Earthquake (SLE) y Ductility Level Earthquake (DLE), correspondientes a períodos de retorno de 200 años y 1000 años, respectivamente.

Para ello y con base en el estudio de amenaza y los parámetros determinísticos de los posibles sismos que pudiesen ocurrir en la zona de estudio, se hace el análisis de propagación de ondas sísmicas en el subsuelo para ambos escenarios a fin de determinar los valores de esfuerzo y deformación por corte cíclica en campo libre a lo largo de todo el perfil litológico.

Una vez conocidos los valores de esfuerzo y corte cíclicos inducidos por el sismo en el campo libre se determinan los niveles de movilidad cíclica que se producen en los estratos y la susceptibilidad de los suelos granulares a la licuación, y como ello afecta los valores de rigidez y resistencia de los suelos bajo acción dinámica y su influencia en los valores de capacidad por carga axial y lateral de pilotes.

Bajo el análisis particular de sitio, basado en la selección de sismos de la red mundial y el estudio de propagación de ondas en el subsuelo, conjuntamente con el estudio de amenaza, se presenta el espectro de diseño propuesto para períodos de retorno de 200 años y 1000 años en la zona de estudio.

Con los espectros de diseño generados de los estudios particulares de sitio puede evaluarse cuál es el comportamiento esperado de estructuras por construir que se ubican en la cercanía a fallas activas o de aquellas estructuras ya construidas a fin de implementar

las medidas de adecuación o reforzamiento que sean necesarias para que la estructura no colapse aun cuando actúe el sismo más severo.

Referencias

- [1] Esmeraldas News. Historia de los terremotos en Ecuador. Disponible en: <http://esmeraldasnoticias.blogspot.com/2011/03/historia-de-los-terremotos-en-ecuador.html>.
- [2] Levantamiento geológico de los efectos del sismo del 16 de abril en la zona entre Esmeraldas y Manta. Disponible en: <http://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1332-levantamiento-geologico-de-los-efectos-del-sismo-del-16-de-abril-en-la-zona-entre-esmeraldas-y-manta>.
- [3] 16 de abril de 2016: Lecciones aprendidas – Dra. Alexandra Alvarado. Disponible en: <http://www.igepn.edu.ec/interactuamos-con-usted/1574-16-de-abril-de-2016-lecciones-aprendidas-dra-alexandra-alvarado>.
- [4] M. Tamayo, “El Proceso de la Investigación Científica”, Editorial Limusa, 3era edición, 1998, pp 37-90.
- [5] Base de datos sismológicos de California, Pacific Earthquake Engineering Center (PEER). Disponible en: <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- [6] Software Cyclic 1-D. A. Elgamal, Z. Yang, E. Parra and A. Ragheb, 2013. Disponible en: <http://soilquake.net/cyclic1d/references.html>.
- [7] E. Parra, “Numerical Modeling of Liquefaction and Lateral Ground Deformation Including Cyclic Mobility and Dilation Response in Soil Systems”, Ph.-D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 1996.
- [8] A. Elgamal, Z. Yang y E. Parra, “Computational Modeling of Cyclic mobility and Post-Liquefaction Site Response”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, pp. 259-271, Elsevier, January, 2002.
- [9] R.B. Seed, K. Cetin, R. Moss, A. Kammerer, J. Wu, J.M. Pestana y M. Riemer, “Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering and Seismic Site Response Evaluation”, Proceedings 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Symposium in Honor of Prof. W.D.L. Finn, California, March, 2001.
- [10] ASCE, “Soil Dynamics and Liquefaction 2000”, Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000, Geotechnical Special Publication, No. 107, Denver, Colorado, August, 2000.
- [11] Steven L. Kramer (1996). “Geotechnical Earthquake Engineering”. University of Washington. Prentice – Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, pp 184-417.
- [12] A. Vásquez y Dobry, “The Behavior of Undrained Contractive Sand and its effect of Earth Structures”, Ph. D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 1988.
- [13] W. D. Finn, P. M. Byrne y G. R. Martin “Seismic Response and Liquefaction of Sands”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, GT-8, 841- 856, August 1976.

- [14] W. D. Finn, K.W. Lee y G. R. Martin “An Effective Stress Model for Liquefaction”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, GT-6, 517-533, June, 1977.
- [15] ASTM D-1586, “Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils”, Soils and Rocks. American Society for testing and materials.
- [16] NEC-SE-DS (2014), “Norma Ecuatoriana de la Construcción. Peligro Sísmico y Diseño Sismo Resistente”. Dirección de Comunicación Social, MIDUVI, Ecuador.
- [17] UC Davis, Civil and Environmental Engineering, Earthquake Hazards. Disponible en: <https://research.engineering.ucdavis.edu/gpa/earthquake-hazards/>.
- [18] Robertson, P. K. y Cabal, K. L. (2015). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. (6th). California, EEUU: Gregg Drilling & Testing, Inc.
- [19] Stark, T. and Mesri, G. (1994) “Undrained Shear Strength of Liquefied Sands for Stability Analysis”. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 118, No. 11, 120(7), 1287–1287.
- [20] K. Ishihara (1993), “Liquefaction and flow failure during earthquakes”. Géotechnique, Volume 43, Issue 3, pages 351 –451.

Sobre el autor

José Domingo Alviar Malabet (Y´1962-M´06). El Ing. José Alviar se ha desarrollado dentro de la Ingeniería Civil especializándose en el área de la geotecnia y estructuras, así como en la docencia por más de 25 años. Ha gerenciado, liderizado y participado en la supervisión de proyectos geotécnicos y estructurales costafuera y en tierra firme, para el sector público, privado y para la industria petrolera. En el año 1985 se gradúa de Ingeniero Civil en la Universidad Católica

Andrés Bello, en el año 1993 recibe el Magister en Ingeniería Civil (Geotecnia) Universidad Simón Bolívar y en el año 2014 obtiene su grado de Ph.D en Estructuras de la Universidad Central de Venezuela. Actualmente es profesor de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, campus Sur en la carrera de Ingeniería Civil. Su principal línea de investigación está relacionada con los problemas de interacción suelo-estructura, el diseño sismo resistente de cimentaciones superficiales y profundas, los estudios de propagación de ondas sísmicas en el subsuelo y la generación de espectros de diseño.