

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Caso de estudio Perfil de suelo licuable.

Paul Alexander Guilca Cusquillo

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 01 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Título del Trabajo de la materia final de carrera

Paul Alexander Guilca Cusquillo

Nombre del profesor, Título académico

Juan Villacreses, Doctor

Quito, 01 de diciembre de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Paul Alexander Guilca Cusquillo

Código: 00216479

Cédula de identidad: 1722347851

Lugar y fecha: Quito, 01 de diciembre de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

Este estudio se centra en un caso particular de un perfil de suelo con susceptibilidad a la licuación. Se implementa un modelo numérico diseñado para simular el fenómeno de la licuación, utilizando propiedades derivadas de estudios geotécnicos basados en ensayos CPT y SPT. Además, se aplica la teoría de desencadenamiento de licuación propuesta por Boulanger e Idriss para evaluar si este perfil de suelo cumple con las condiciones que lo clasifiquen como licuable. Finalmente, se discuten las limitaciones inherentes al modelo numérico, destacando los desafíos de replicar con alta fidelidad las condiciones reales del fenómeno.

Palabras clave: licuación, modelo numérico, teoría SPT y CPT, teoría de Boulanger e Idriss

ABSTRACT

This study focuses on a specific case of a soil profile with susceptibility to liquefaction. A numerical model is implemented to simulate the phenomenon of liquefaction, utilizing properties derived from geotechnical studies based on CPT and SPT tests. Additionally, the liquefaction triggering theory proposed by Boulanger and Idriss is applied to evaluate whether this soil profile meets the conditions to be classified as liquefiable. Finally, the inherent limitations of the numerical model are discussed, highlighting the challenges of accurately replicating real-world conditions of the phenomenon.

Key words: liquefaction, numerical model, CPT and SPT tests, Boulanger and Idriss theory

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	10
2.	Modelo Numérico Opensees.....	18
2.1.	Descripción De La Estructura De Capa.....	18
2.2.	Modelo De Rigidez Finita Del Lecho De Roca	19
2.3.	Geometría Del Perfil De Suelo.....	19
2.4.	Condiciones De Contorno	20
2.5.	Definiciones De Materiales	20
2.6.	Aplicación De Sismo.....	21
3.	Criterios De Licuación Propuesto Por Boulanger R.W. Y Idriss I.M.	22
4.	Resultados.....	26
5.	Discusión Y Conclusiones	33
6.	Referencias Bibliográficas.....	36
7.	Anexo A: Modelo Numérico	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de acelerógrafos Machala	11
Figura 1.2 Índice de comportamiento del suelo y fuerza de fricción.....	12
Figura 1.3 densidad del suelo y presión de poros	13
Figura 1.4 resistencia en punto y velocidad de onda	14
Figura 1.5 pasante tamiz 200 y índice de plasticidad	15
Figura 1.6 número de golpes.....	16
Figura 1.7 aceleración en roca dirección este-oeste.....	17
Figura 1.8 aceleración en roca dirección norte-sur	17
Figura 1.9 aceleración en roca componente vertical.....	17
Figura 1.10 Transformada de Fourier este-oste	17
Figura 1.11 transformada de Fourier norte-sur	18
Figura 1.12 transformada de Fourier componente vertical.....	18
Figura 2.1 aplicación de sismo.....	21
Figura 2.2 Elemento cuadrilátero de nueve nodos, orden de nodos: i j k l m n p q r	21
Figura 4.1 aceleración en superficie ACHI este-oeste.....	26
Figura 4.2 transformada de Fourier este-oeste.....	27
Figura 4.3 aceleración en superficie ACH1 dirección norte-sur.....	27
Figura 4.4 transformada de Fourier norte-sur	27
Figura 4.5 aceleración en superficie componente vertical.....	28
Figura 4.6 transformada de Fourier componente vertical.....	28
Figura 4.7 aceleración en nodo de la base	28
Figura 4.8 transformada de Fourier en base.....	29
Figura 4.9 aceleración en superficie	29
Figura 4.10 transformada de Fourier en la superficie	29

Figura 4.11 desplazamiento en base	30
Figura 4.12 desplazamiento en superficie.....	30
Figura 4.13 curva de magnitud propuesta por Boulanger e Idriss, basada en la resistencia en punta.....	31
Figura 4.14 Curva de contenido de finos propuesta por Boulanger e Idriss, basada en la resistencia de punta	31
Figura 4.15 curva propuesta por Boulanger e Idriss, basada en número de golpes.....	32
Figura 4.16 curva de magnitud propuesta por Boulanger e Idriss, basada en número de golpes	32

1. INTRODUCCIÓN

Un sismo con epicentro en el extremo nororiental de la Isla Puná, en el Golfo de Guayaquil, alcanzó una magnitud momento (M_w) de 6.64 y tuvo una profundidad de 63.1 km, según el método de inversión de formas de onda MECAVEL. Este evento ocurrió en la parte superior de la placa oceánica que subduce bajo el continente y que fue desencadenado por fracturas preexistentes. Según reportes del Instituto Geofísico (2023), la intensidad macro sísmica estimada para la provincia de El Oro, especialmente en las ciudades de Machala, Santa Rosa y Huaquillas, fue de V a VI en la escala EMS. La provincia de El Oro donde el fenómeno de licuación se observó se caracteriza por la presencia de depósitos sedimentarios no consolidados, principalmente de origen fluvial. Estos depósitos presentan horizontes superficiales variables, predominando texturas franco arenoso y franco arcillo arenosas, que usualmente reposan sobre suelos arcillosos. Adicionalmente, en algunas zonas se observa la presencia de capas superficiales arenosas. Durante este terremoto, se identificaron casos de licuación en suelos arenosos en esta área, lo que subraya la importancia de estudiar las condiciones geológicas y dinámicas del sector para evaluar la susceptibilidad de los suelos frente a fenómenos como la licuación.

Los registros de aceleración en roca fueron obtenidos en la estación ARNL, parte de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) de Ecuador, ubicada en las coordenadas -3.55° de latitud y -80.07° de longitud. Por su parte, los datos de aceleración en superficie se recolectaron en la estación ACH1 de la misma red, localizada en las coordenadas -3.29° de latitud y -79.91° de longitud.

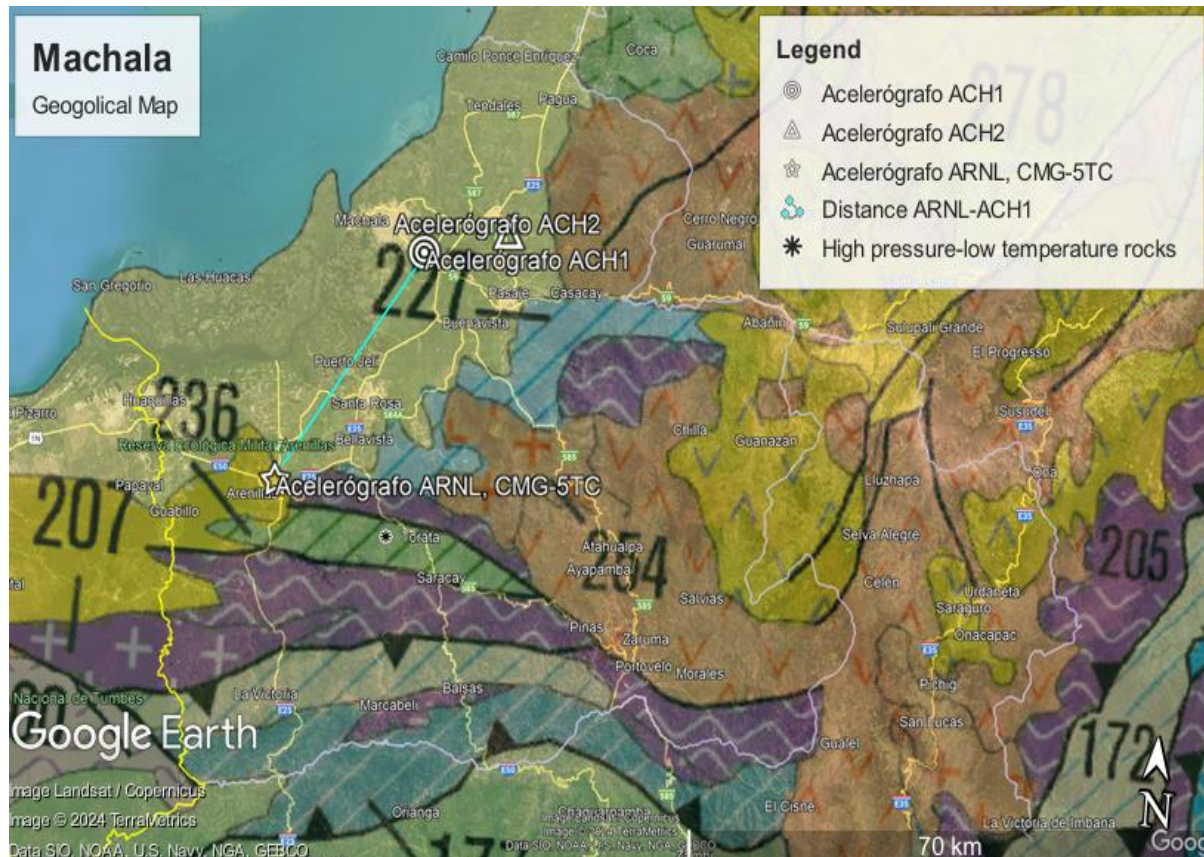


Figura 1.1 Mapa de acelerógrafos Machala

Para evaluar el potencial de licuación se emplea ensayos de campo que provienen de un estudio de caracterización geotécnica realizado en el área del subsuelo, con el objetivo de evaluar las condiciones de cimentación para la construcción del Centro Comercial Oro Plaza. Este estudio incluyó análisis de límite de falla y de servicio, aunque para el presente trabajo se considerarán únicamente las propiedades fundamentales requeridas para el análisis de licuación, debido a la observación de fenómenos de licuación en el terreno durante eventos sísmicos. La caracterización geotécnica abarcó la descripción de la estratigrafía del depósito en cinco puntos de exploración, incluyendo propiedades clave como el contenido de humedad, el porcentaje de finos y el índice de plasticidad. Adicionalmente, se realizaron ensayos de penetración estática (CPT) en tres puntos, los cuales proporcionaron información detallada sobre la presión de poros, el índice de comportamiento del suelo (I_c SBT), la fuerza

de fricción (F_s), la resistencia de punta (q_c) y la densidad en masa. Estas propiedades son fundamentales para evaluar la susceptibilidad del terreno a fenómenos de licuación y se presentan en los gráficos que se describen a continuación.

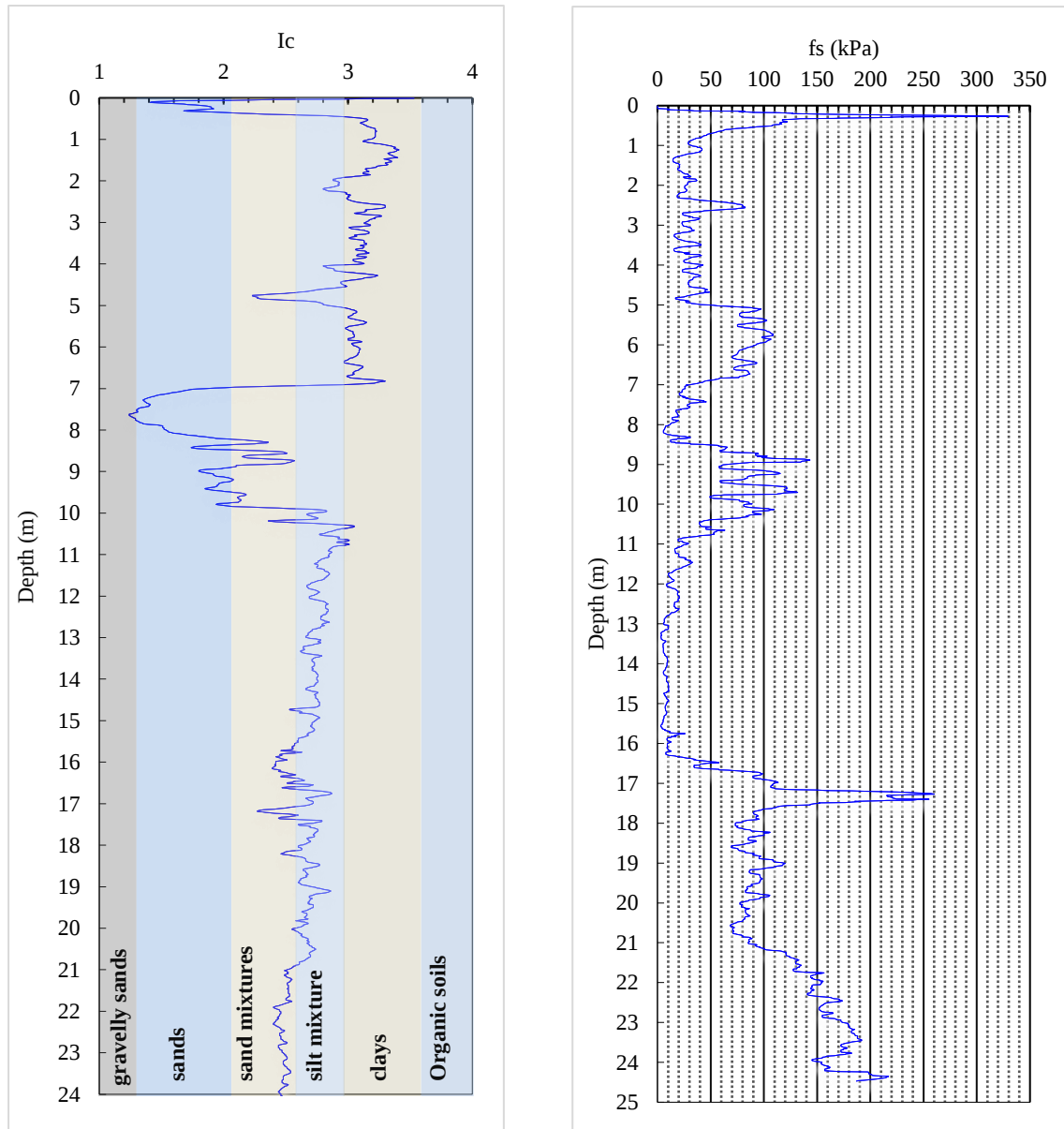


Figura 1.2 Índice de comportamiento del suelo y fuerza de fricción

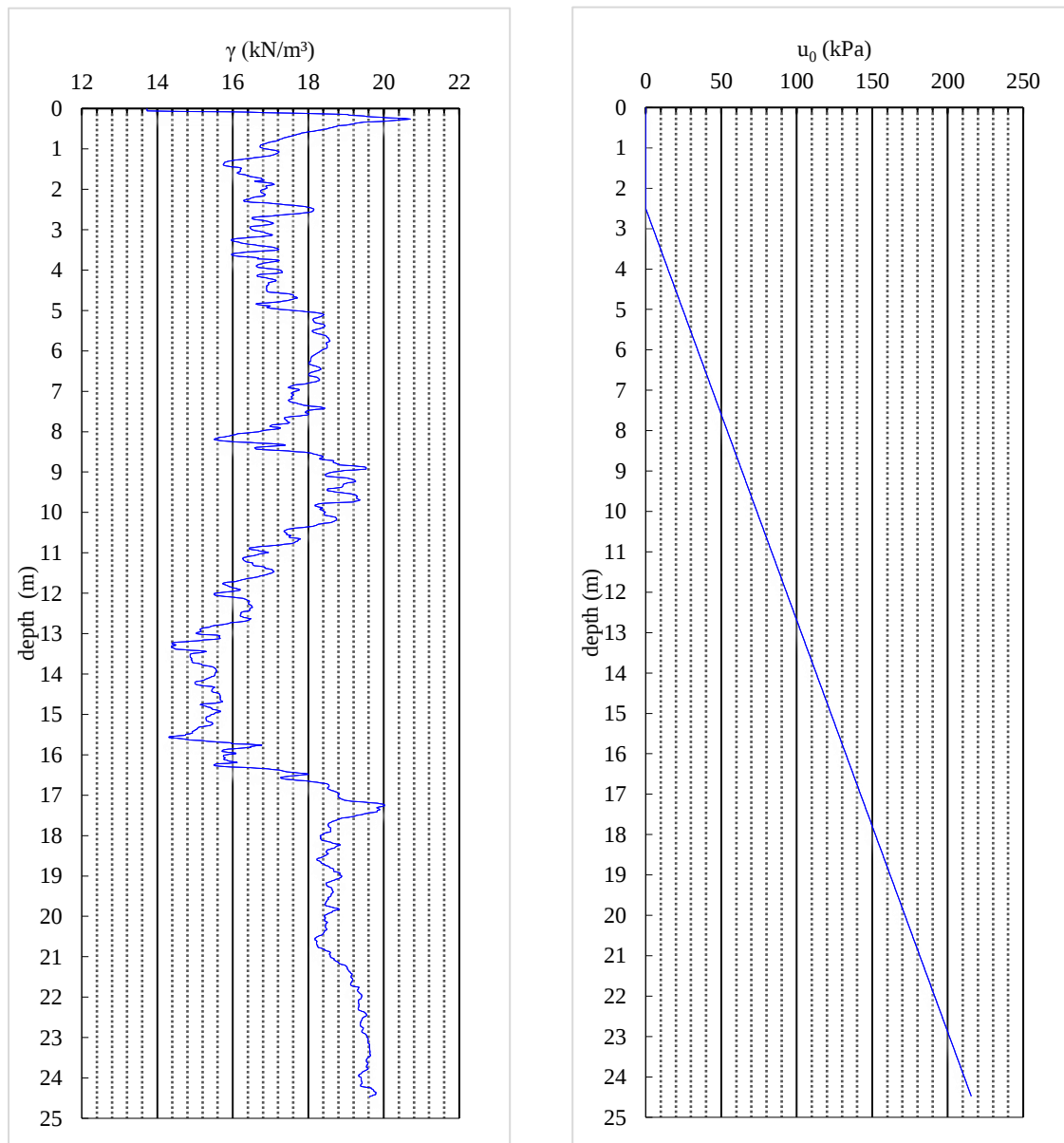


Figura 1.3 densidad del suelo y presión de poros

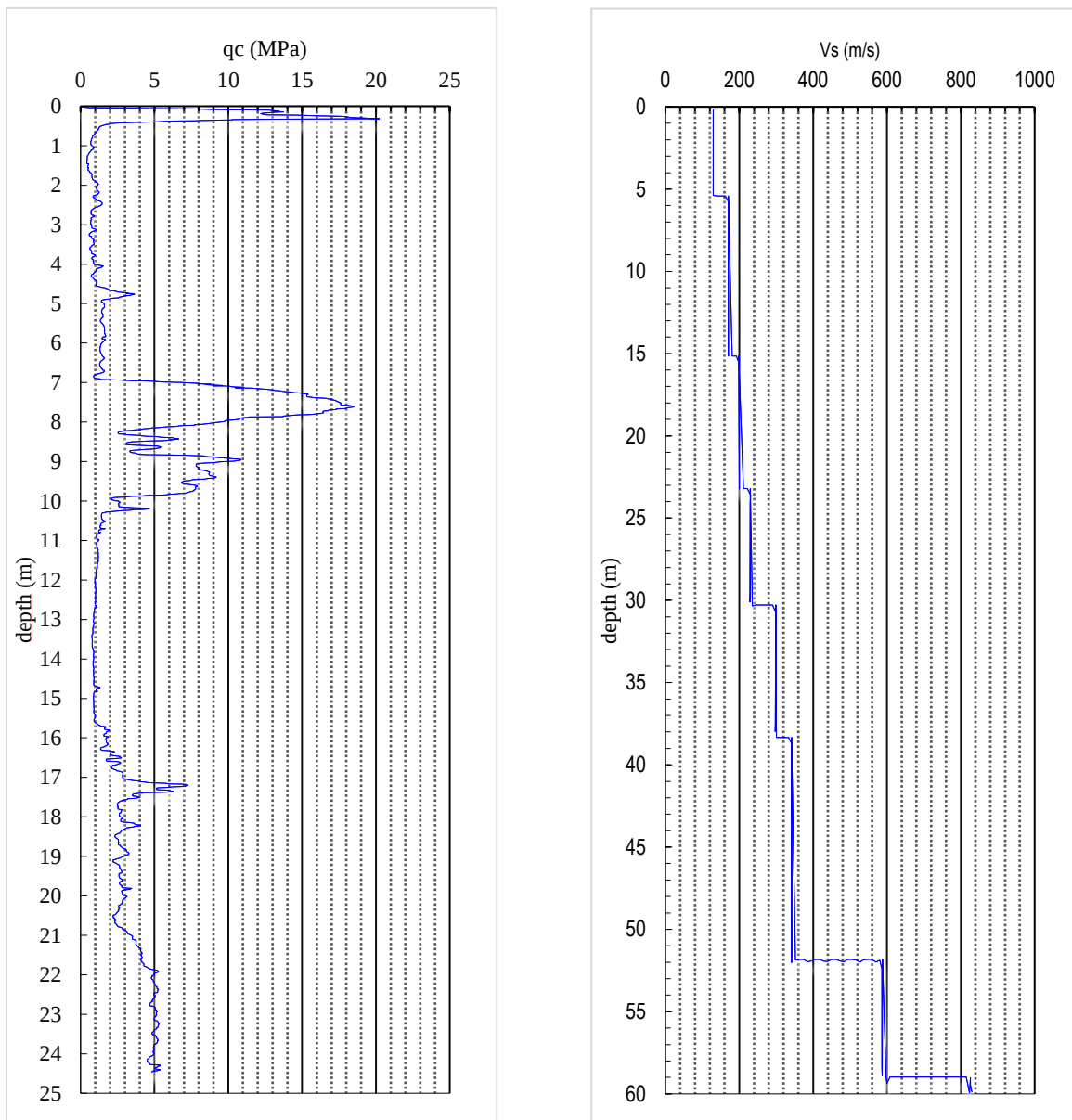


Figura 1.4 resistencia en punto y velocidad de onda

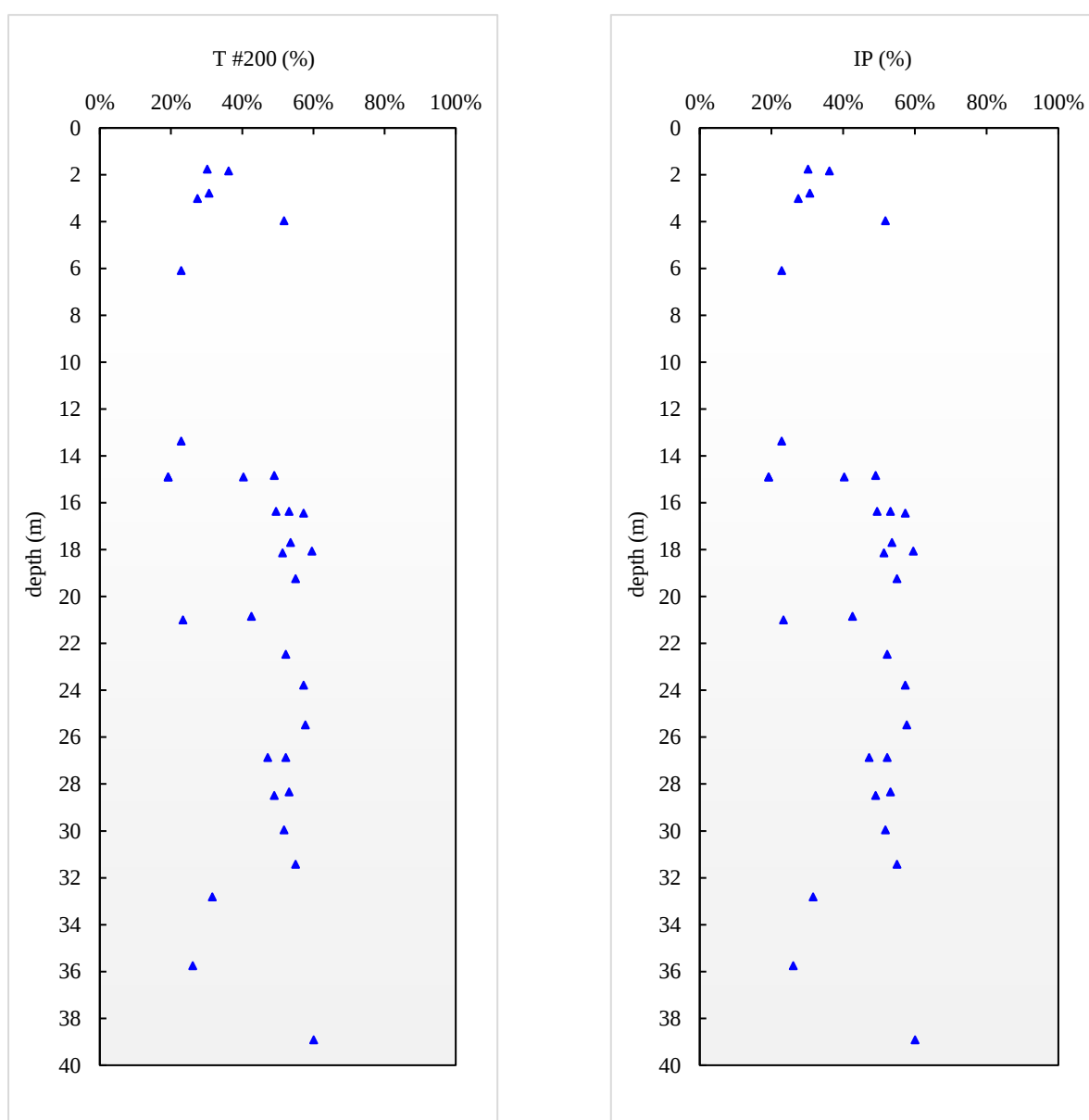


Figura 1.5 pasante tamiz 200 y índice de plasticidad

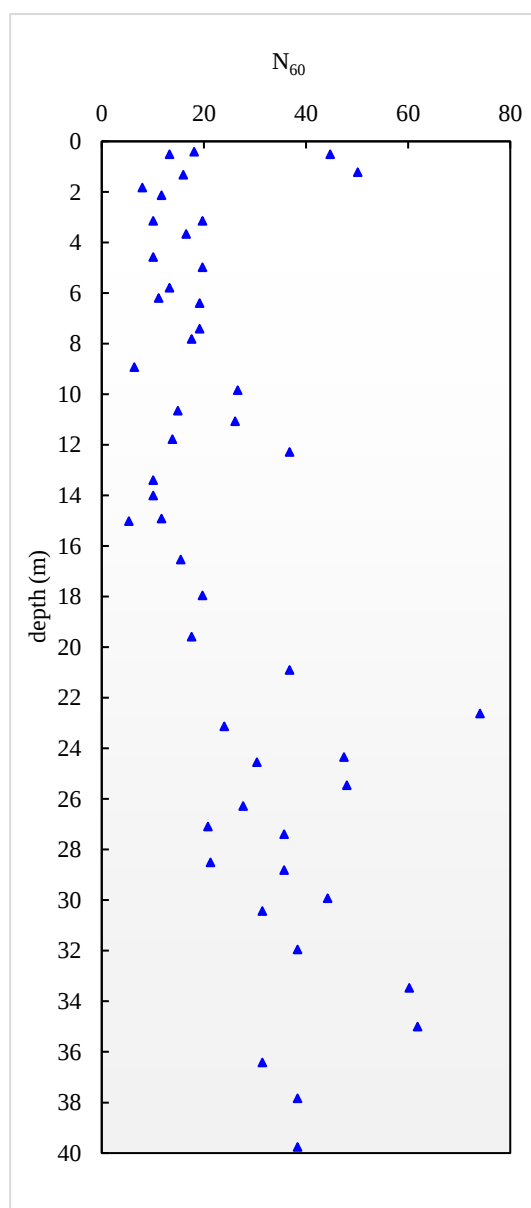


Figura 1.6 número de golpes

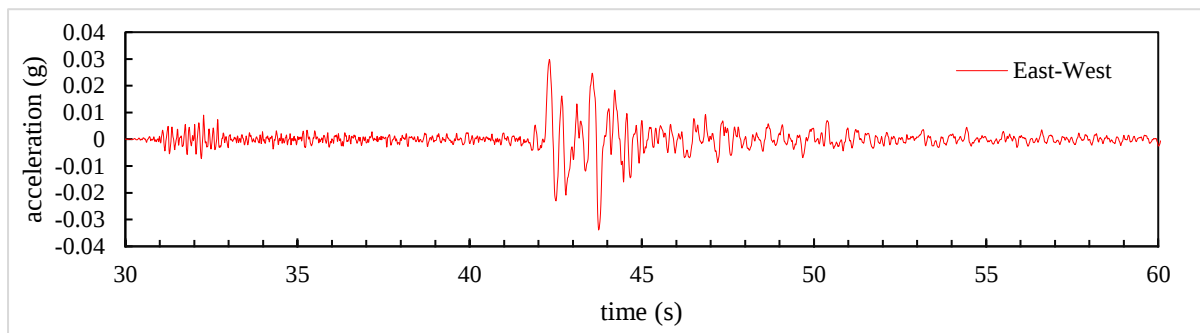


Figura 1.7 aceleración en roca dirección este-oeste

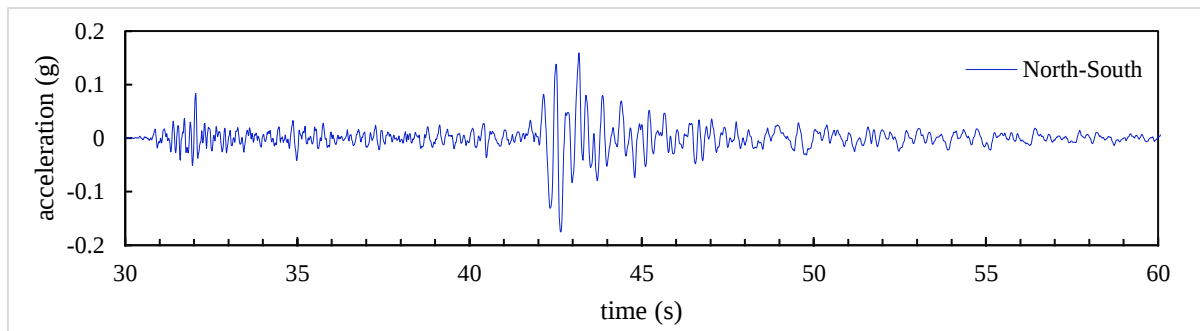


Figura 1.8 aceleración en roca dirección norte-sur

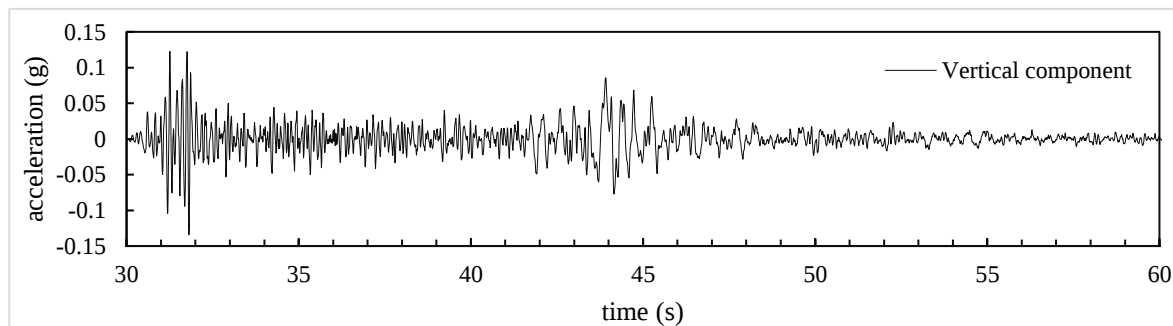


Figura 1.9 aceleración en roca componente vertical

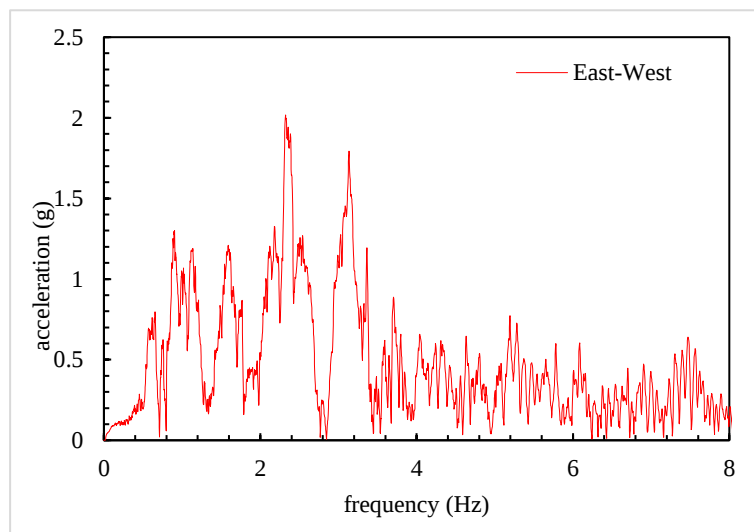


Figura 1.10 Transformada de Fourier este-oste

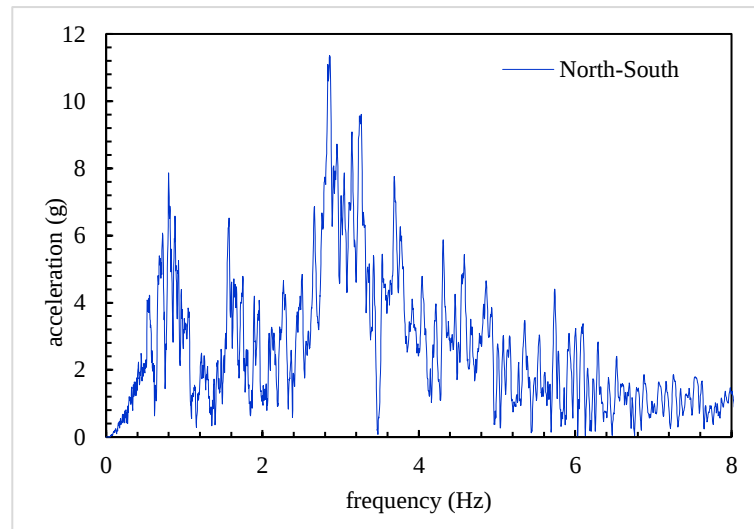


Figura 1.11 transformada de Fourier norte-sur

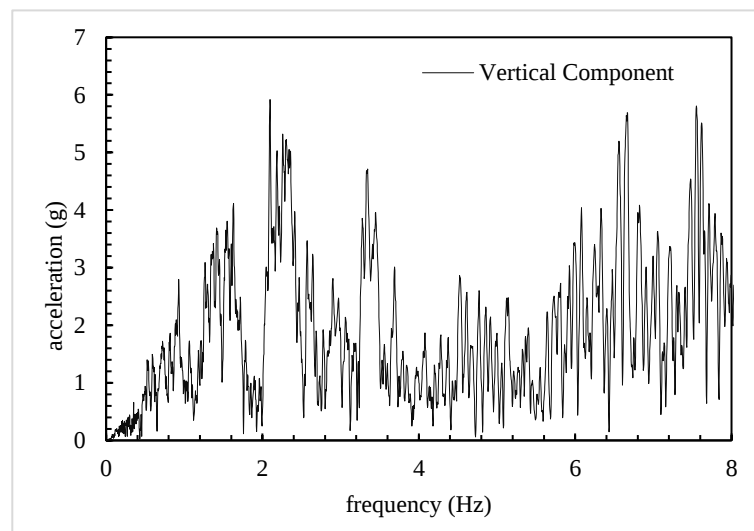


Figura 1.12 transformada de Fourier componente vertical

2. MODELO NUMÉRICO OPENSEES

2.1.DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE CAPA

El modelo en OpenSees realizará un análisis de esfuerzos efectivos en dos dimensiones, representando un perfil de suelo basado en las propiedades previamente descritas, compuesto por siete capas de espesores variables. El nivel freático se sitúa a 2 metros de profundidad desde la superficie. Se asumirá que todas las capas son horizontales,

es decir, sin pendiente (cero grados). Este perfil de suelo descansará sobre un semi-espacio elástico que simula la rigidez finita del lecho de roca.

2.2.MODELO DE RIGIDEZ FINITA DEL LECHO DE ROCA

Para considerar la rigidez finita del semi-espacio subyacente, se incorpora un amortiguador Lysmer-Kuhlemeyer en la base de la columna de suelo mediante un elemento de longitud cero, es decir dos nodos en la misma ubicación conectados por un material uniaxial viscoso que representa la relación fuerza-deformación. A este amortiguador se le asigna un coeficiente de amortiguamiento calculado como el producto de la densidad de masa, la velocidad de la onda transversal de la capa subyacente y el área de la base de la columna de suelo. En este caso, se emplean las propiedades de una capa de lecho rocoso (OpenSees, 2011b).

2.3.GEOMETRÍA DEL PERFIL DE SUELO

El modelo utiliza elementos cuadriláteros de nueve nodos (figura 17). Este elemento llamado 9_4_QuadUP modela la unión fluido-sólido el cual nos permite evaluar eventos de licuefacción y expansión lateral. Este elemento es compuesto nodos en las esquinas, mostrados en azul que tienen tres grados de libertad: dos de traslación y uno de presión de poros, mientras que los nodos interiores solo tienen dos grados de libertad de traslación. Para la creación de elementos, se incluyen parámetros como el espesor del elemento, las fuerzas horizontales y verticales debidas a la gravedad, el módulo volumétrico no drenado y las permeabilidades horizontal y vertical, los cuales varían de una capa a otra. El modelo genera automáticamente los elementos y sus respectivos nodos. Asimismo, los elementos por capa se crean especificando cuántos elementos se requieren por cada capa. Esto se define configurando la frecuencia más alta que el usuario desea resolver con precisión y el número

de elementos deseados por longitud de onda de una onda transversal que se propaga a esa frecuencia. La longitud de onda utilizada para establecer la geometría de la malla se determina dividiendo la velocidad mínima de la onda transversal del perfil del suelo por la frecuencia de corte especificada. El tamaño horizontal de los elementos se establece como el tamaño mínimo de los elementos verticales en la columna de suelo (OpenSees, 2011a).

2.4.CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno adecuadas se generan automáticamente en función de la geometría especificada. Los nodos en la base de la columna de suelo se restringen contra la traslación vertical, y los nodos de presión de poros por encima del nivel freático se fijan en el grado de libertad de presión de poros, representando una condición de drenaje abierto. Para la condición de contorno periódica, a los nodos que comparten la misma ubicación vertical se les asignan los mismos grados de libertad de traslación. Para los nodos de esquina en una ubicación en particular no deben vincularse porque se ha encontrado que esto puede llevar a errores en el análisis (OpenSees, 2011a).

2.5.DEFINICIONES DE MATERIALES

En el modelo se emplean dos tipos de materiales. El material PressureDependMultiYield es un modelo elástico-plástico que simula las características esenciales de respuesta de suelos sensibles a la presión en condiciones de carga general. Estas características incluyen la dilatación (cambio de volumen inducido por el esfuerzo cortante) y la licuefacción sin flujo, fenómenos típicos en arenas y limos durante cargas monótonas o cíclicas. Por otro lado, PressureIndependMultiYield se usa para modelar el comportamiento de suelos en condiciones de carga rápida sin drenaje, como en el caso de las arcillas; en este modelo, la respuesta es lineal-elástica y no depende del confinamiento.

Las principales propiedades del suelo incluyen densidad de masa, velocidad de onda transversal y coeficiente de Poisson, a partir de las cuales se calculan los módulos elásticos, de corte y volumétrico, también en el caso del material dependiente de la presión se incluye valores de contractancia y dilatancia, mientras que para el material independiente de la presión un parámetro relevante que se debe proporcionar es la cohesión del material. Para el módulo volumétrico no drenado, se utiliza un valor igual al módulo del fluido dividido por la porosidad de la capa de suelo. En las capas por encima del nivel freático, se asigna un valor pequeño de 5e-6 kPa (OpenSees, 2011a).

2.6.APLICACIÓN DE SISMO

La columna de suelo se somete a excitación en su base mediante un historial de fuerza horizontal proporcional al historial temporal de la velocidad conocida del movimiento del suelo. Este historial de fuerza se calcula multiplicando el historial de velocidad conocido por un factor constante, definido como el producto del área de la base de la columna de suelo (ancho x espesor), la densidad de masa y la velocidad de onda transversal de la capa subyacente, este historial de fuerza es aplicado al primer nodo en la base del perfil de suelo. (OpenSees, 2011a).

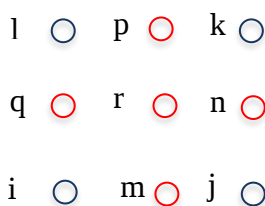


Figura 2.6.2 Elemento cuadrilátero de nueve nodos, orden de nodos: i j k l m n p q r

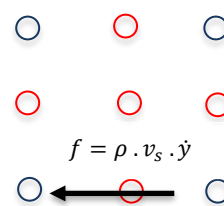


Figura 2.6.1 aplicación de sismo

2.7.Proceso de Análisis

El primer análisis realizado es de tipo gravitacional compuesto de dos etapas, la primera un análisis elástico seguido por una evaluación plástica que se lleva a cabo como un análisis transitorio. Este procedimiento es clave para verificar que el modelo ha sido generado correctamente. Después, realiza el análisis dinámico, esta evaluación emplea un integrador de Newmark con los coeficientes gamma y beta, que evitan la introducción de amortiguamiento numérico. El modelo considera un comportamiento elastoplástico del suelo, lo que genera una amortiguación por histéresis de forma inherente. Adicionalmente, se aplica una cantidad mínima de amortiguamiento Rayleigh. Se emplea un método de penalización que garantiza que las restricciones en los nodos se cumplan adecuadamente. Para resolver los problemas no lineales que surgen durante el análisis, se utiliza el algoritmo Krylov-Newton, que ofrece un enfoque eficiente para este tipo de modelos complejos (OpenSees, 2011a).

3. CRITERIOS DE LICUACIÓN PROPUESTO POR BOULANGER R.W. Y IDRIS I.M.

Para evaluar la licuación del suelo, se utiliza la teoría propuesta por Boulanger R.W. e Idriss I.M., basada en estudios de suelos ampliamente reconocidos a nivel mundial. Los ensayos de penetración CPT y SPT son los métodos principales empleados para identificar el potencial de licuación. El enfoque de estos autores se fundamenta en la comparación entre las relaciones de esfuerzos cíclicos inducidos por el sismo (CSR) y las relaciones de resistencia cíclica (CRR). Los parámetros de resistencia cíclica están directamente relacionados con factores como la resistencia de penetración obtenida del CPT, el número de golpes del SPT y la velocidad de propagación de las ondas de corte. Para determinar los esfuerzos cíclicos inducidos por el sismo, se presenta la siguiente expresión:

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0.65 \cdot \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v}$$

La ecuación se calcula para una magnitud específica de terremoto y un esfuerzo efectivo in situ. Por otro lado, la determinación del esfuerzo cortante inducido por el sismo requiere un análisis dinámico. Sin embargo, para simplificar este proceso, se desarrolló el procedimiento simplificado de evaluación de licuación propuesto por Seed e Idriss.,

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0.65 \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d$$

Donde σ_v representa el esfuerzo total vertical a la profundidad evaluada, a_{max}/g es la aceleración horizontal máxima expresada como una fracción de la gravedad en la superficie del suelo, r_d es el factor de reducción de esfuerzo cortante. Por otro lado, la relación de resistencia cíclica (CRR) se vincula con los ensayos de penetración CPT y SPT, una vez que se aplican las correcciones necesarias tanto de procedimiento como por los efectos del esfuerzo de sobrecarga. Las resistencias de penetración de ambos ensayos (CPT y SPT) se ajustan para considerar los efectos del esfuerzo de sobrecarga.

$$q_{c1N} = C_N \cdot q_{cN} = C_N \cdot \frac{q_c}{P_a}$$

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot N_{60}$$

Donde C_N es el factor de corrección por sobrecarga, P_a representa la presión atmosférica, mientras que q_{cN} y $(N_1)_{60}$ son las resistencias a la penetración correspondientes a una misma arena bajo un esfuerzo de sobrecarga de 1 atm, asumiendo que todos los demás parámetros permanecen constantes. El CRR depende de la duración del movimiento sísmico, expresada a través del factor de escala de magnitud (MSF), y del esfuerzo efectivo de sobrecarga ($K\sigma$). Por ello, el desarrollo del CRR ajusta los valores de CSR obtenidos de los registros históricos a una magnitud de referencia ($M=7.5$) y a un esfuerzo efectivo vertical igual a 1 atm.

$$CSR_{M=7.5, \sigma'_v=1} = \frac{CSR_{M, \sigma'_v}}{MSF \cdot K_\sigma}$$

La relación CRR para $M=7.5$ $\sigma'_v = 1$ se ajusta posteriormente para considerar otros valores de M y σ'_v .

$$CRR_{M, \sigma'_v} = CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1} \cdot MSF \cdot K_\sigma$$

La relación entre CRR y q_{c1N} o $(N_1)_{60}$ en suelos no cohesivos también se ve influenciada por el contenido de finos (FC), y puede expresarse de la siguiente manera.

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

3.1. Coeficiente de reducción de esfuerzo cortante r_d

Se han realizado diversos análisis paramétricos de la respuesta del sitio, llegando a la conclusión de que este parámetro puede representarse como:

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

Donde z es la profundidad bajo la superficie del terreno de posible estrato licuable.

3.2. Factor de corrección de sobrecarga, CN

Esta relación fue desarrollada por Boulanger, quien analizó datos publicados de pruebas realizadas en cámaras de calibración SPT. Los resultados mostraron una buena concordancia con una base de datos correspondiente a cámaras de calibración para ensayos CPT. Para esta relación, los valores de q_{c1Ncs} deben limitarse entre 21 y 254, mientras que $(N_1)_{60cs}$ debe restringirse a valores menores o iguales a 46.

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^m \leq 1.7$$

$$m = 1.338 - 0.249 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264}$$

$$m = 0.784 - 0.0768 \cdot \sqrt{(N_1)_{60cs}}$$

3.3. Factor de corrección de sobrecarga K_σ

Esta relación fue derivada a partir de la demostración del CRR para una arena limpia reconstituida en laboratorio, la cual podría estar relacionada con el índice del parámetro de estado relativo de la arena.

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.1$$

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55 \cdot \sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3$$

3.4. Factor de escalado de magnitud, MSF

Estas relaciones provienen de ensayos de laboratorio que correlacionan el CRR con el número de ciclos de carga uniforme equivalente, y el número de ciclos de carga uniforme equivalente con la magnitud del terremoto.

$$MSF = 6.9 \cdot \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0.058 \leq 1.8$$

Los datos de licuación denotan que el contenido de finos (FC) es importante ya que puede aumentar el riesgo de licuación en un estrato, las correcciones para ajustar a una arena limpia equivalente fueron derivadas a partir de datos de licuación que toman en cuenta el contenido de finos tanto la resistencia cíclica y penetración SPT y CPT.

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1Ncs}}{14.6}\right) \exp\left(1.63 - \frac{9.7}{FC + 2} - \left(\frac{15.7}{FC + 2}\right)^2\right)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left(\frac{15.7}{FC + 0.01}\right)^2\right)$$

4. RESULTADOS

La respuesta de aceleración registrada en la estación ACH1 de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) de Ecuador, ubicada en superficie, constituye un elemento clave para validar los resultados obtenidos mediante el modelo numérico. Además, se analiza la transformada de Fourier correspondiente a cada componente del movimiento sísmico, lo que permite una evaluación más detallada de las características dinámicas del evento.

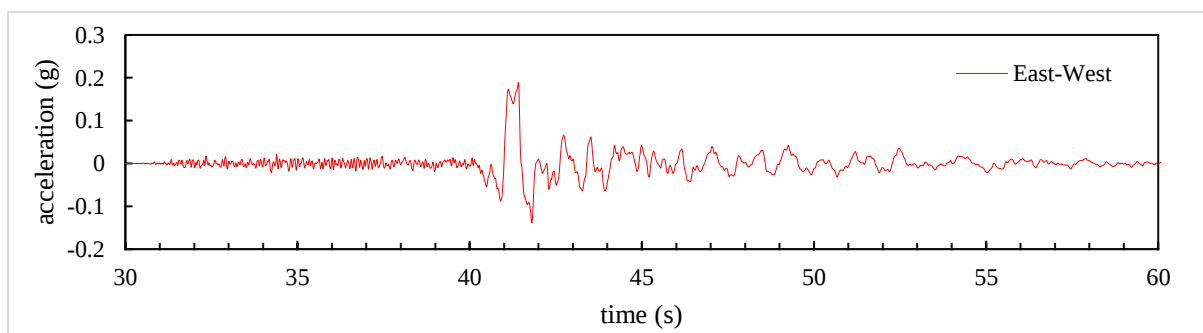


Figura 4.1 aceleración en superficie ACHI este-oeste

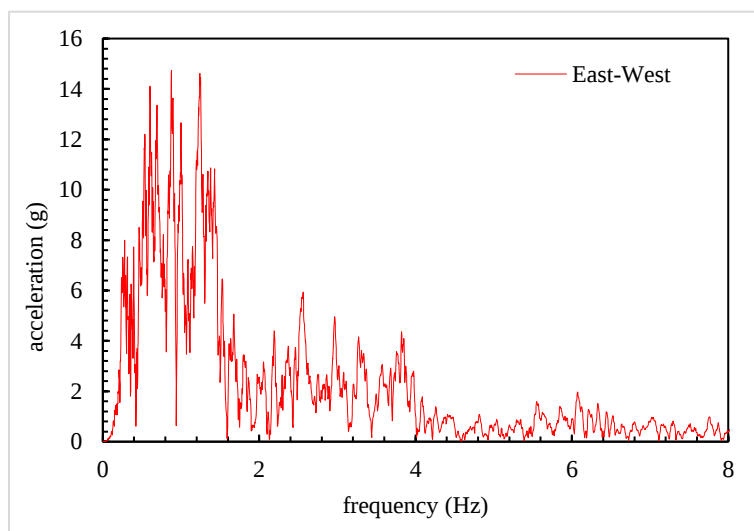


Figura 4.2 transformada de Fourier este-oeste

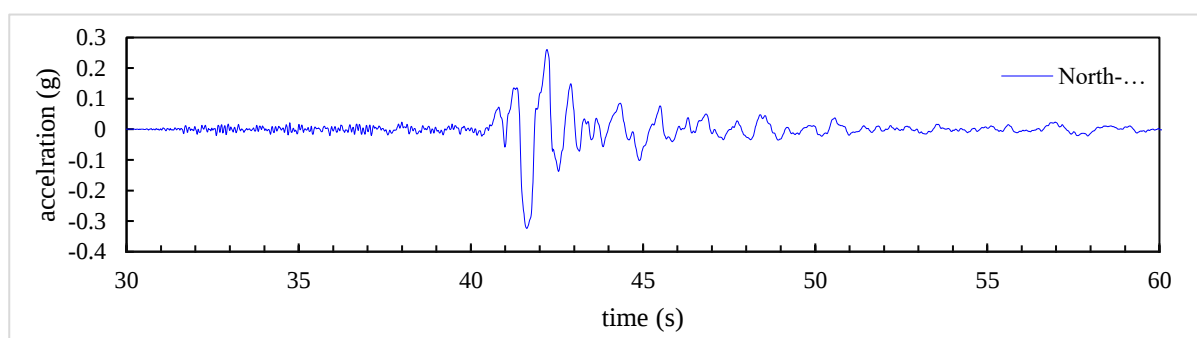


Figura 4.3 aceleración en superficie ACH1 dirección norte-sur

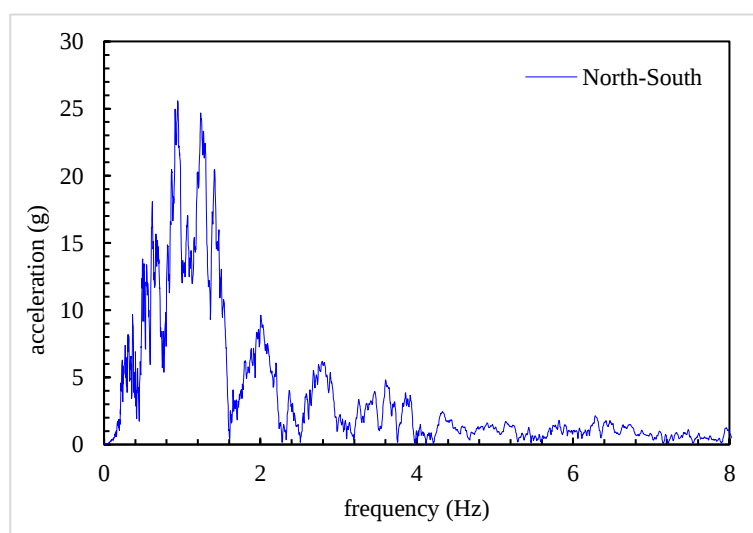


Figura 4.4 transformada de Fourier norte-sur

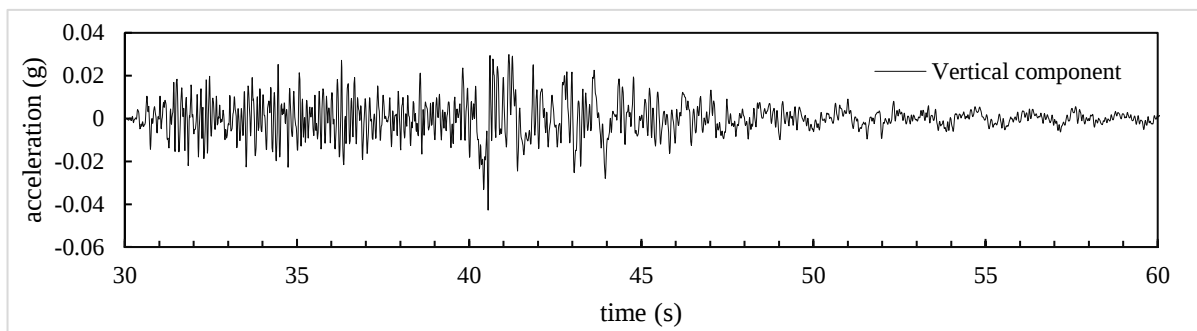


Figura 4.5 aceleración en superficie componente vertical

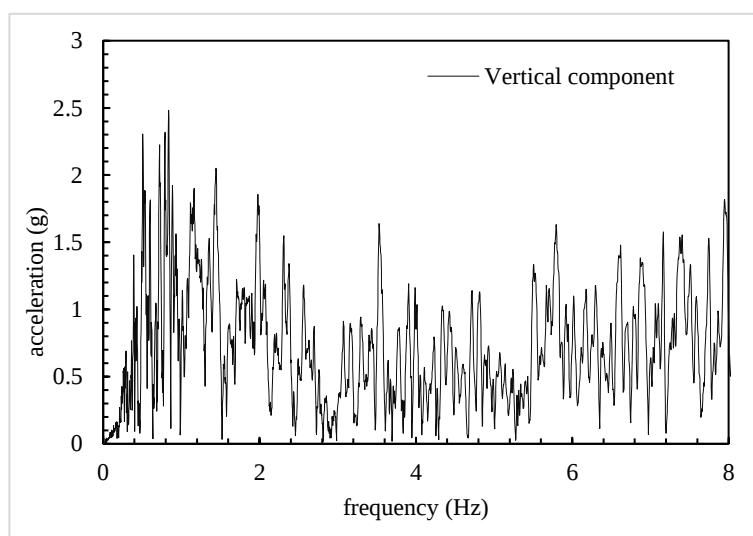


Figura 4.6 transformada de Fourier componente vertical

En primer lugar, se presenta la respuesta de aceleración obtenida a partir del modelo numérico, recopilada en dos puntos clave: el nodo inferior, donde se aplica el historial de carga, y un nodo en la superficie. Asimismo, se incluye el análisis de la transformada de Fourier para ambos casos. Este análisis inicial tiene como objetivo verificar la precisión de la aceleración ingresada al modelo numérico. Además, la comparación de la respuesta de aceleración en superficie permitirá evaluar su similitud con los registros obtenidos en la estación ACH1 de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC), ubicada en superficie.

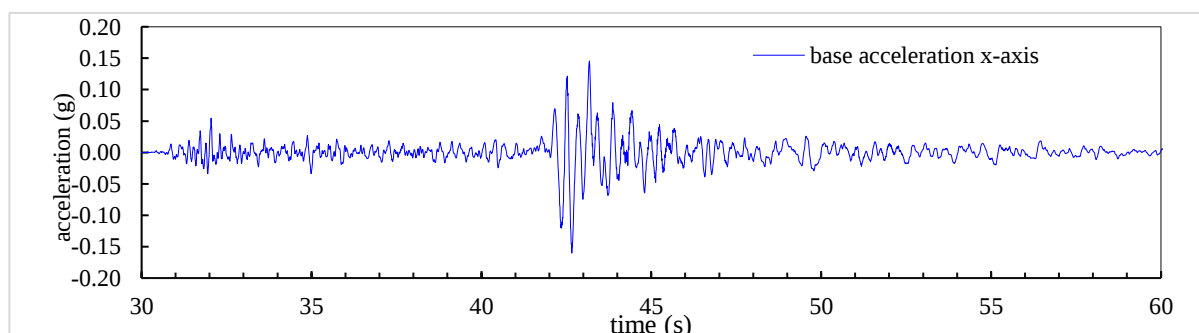


Figura 4.7 aceleración en nodo de la base

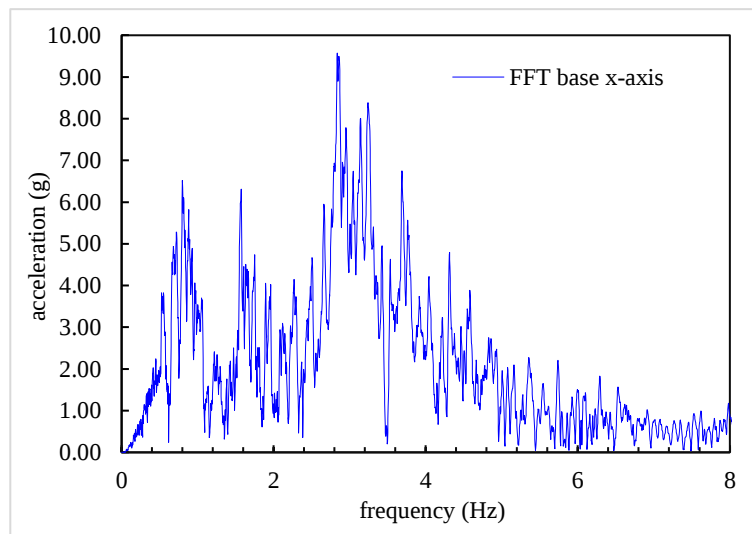


Figura 4.8 transformada de Fourier en base

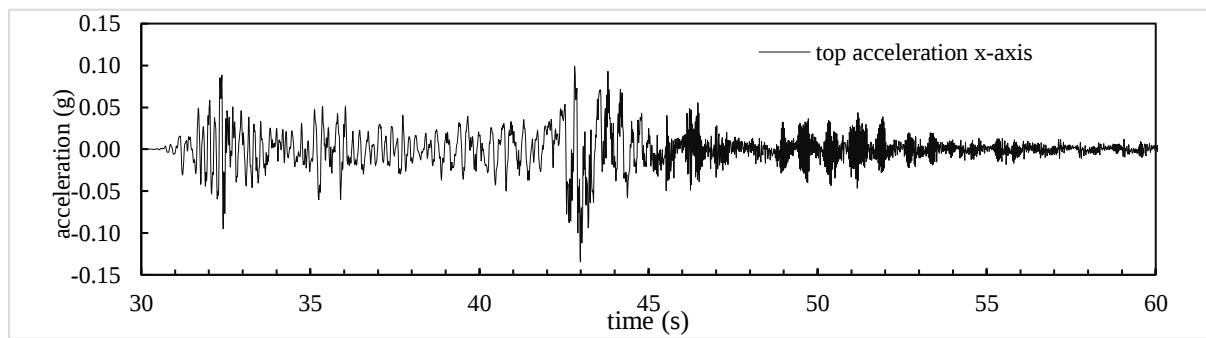


Figura 4.9 aceleración en superficie

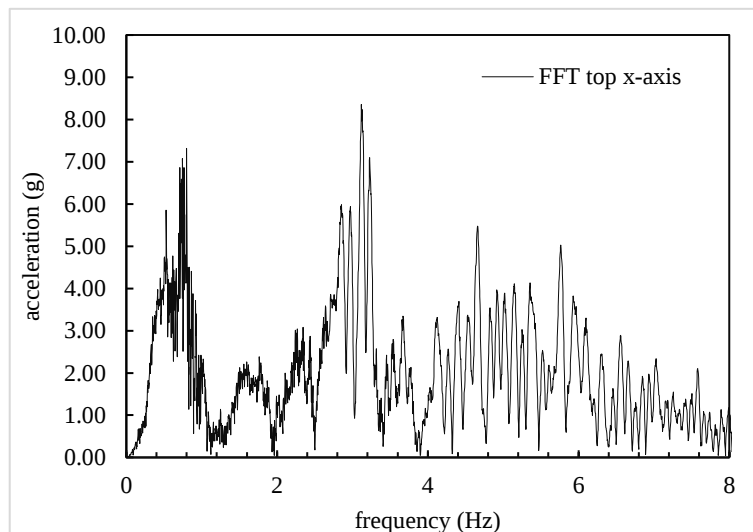


Figura 4.10 transformada de Fourier en la superficie

Los desplazamientos en la componente vertical obtenidos mediante el modelo numérico, tanto en la base como en la superficie, se compararán con los resultados registrados en campo. El desplazamiento en la superficie será determinado a partir de un nodo específico del modelo. Cabe destacar que estos datos corresponden exclusivamente a la etapa dinámica del análisis, ya que es en esta fase donde se desarrolla el fenómeno de licuación.

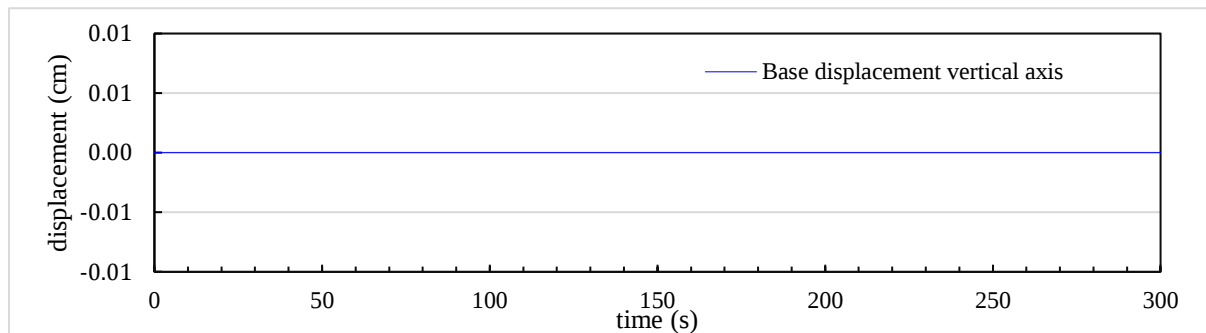


Figura 4.11 desplazamiento en base

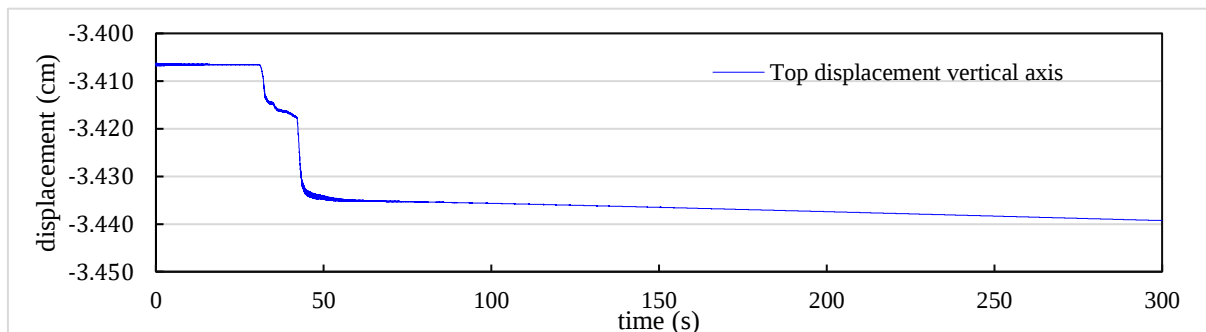


Figura 4.12 desplazamiento en superficie

Para evaluar el posible caso de licuación considerado en este estudio, se utiliza la teoría propuesta por Boulanger R.W. e Idriss I.M., incorporando los datos en las gráficas desarrolladas por estos autores. El cálculo de los parámetros necesarios requiere un proceso iterativo, el cual se detalla y se ilustra con el caso de estudio representado en dichas gráficas.

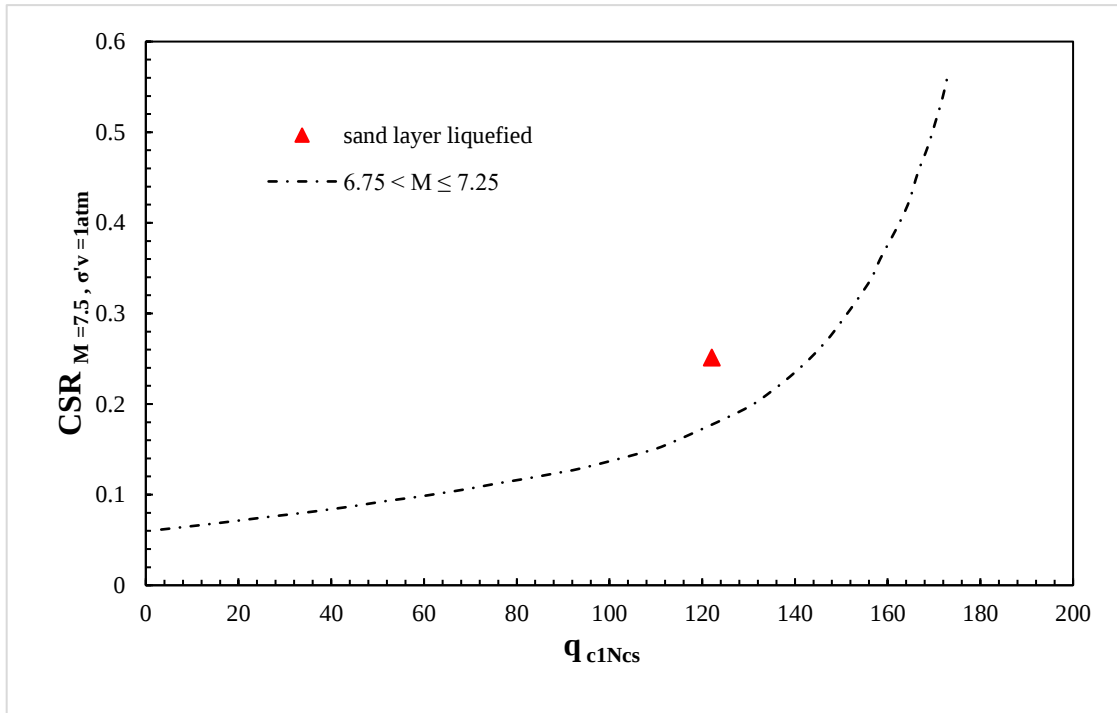


Figura 4.13 curva de magnitud propuesta por Boulanger e Idriss, basada en la resistencia en punta.

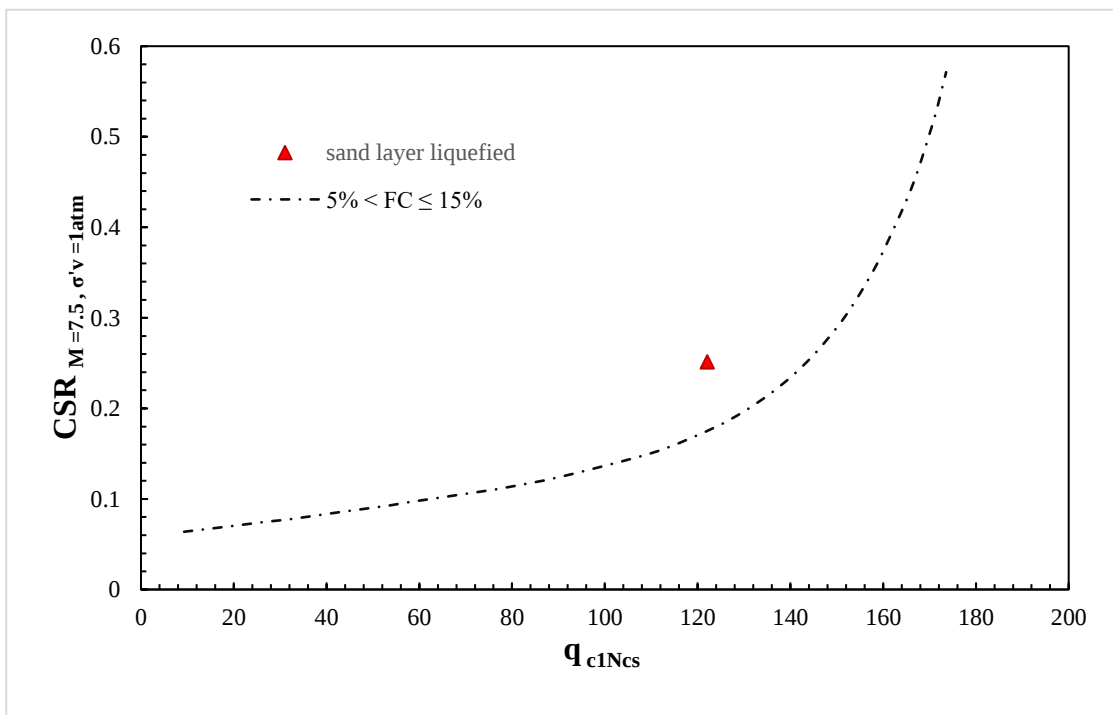


Figura 4.14 Curva de contenido de finos propuesta por Boulanger e Idriss, basada en la resistencia de punta

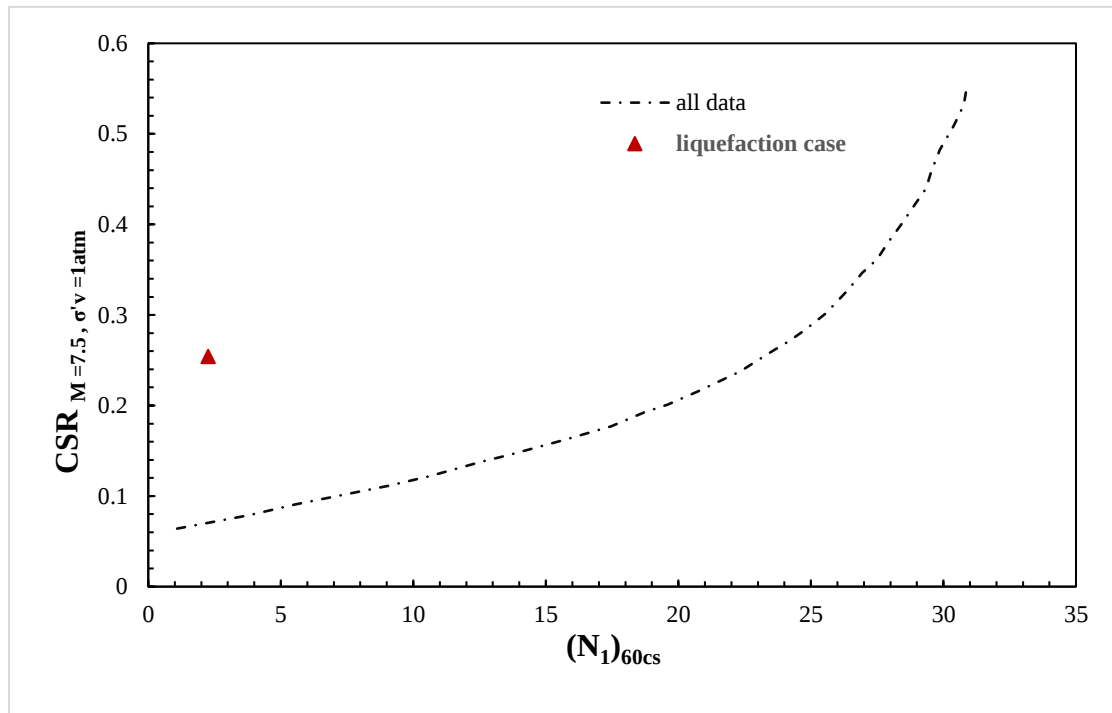


Figura 4.15 curva propuesta por Boulanger e Idriss, basada en número de golpes

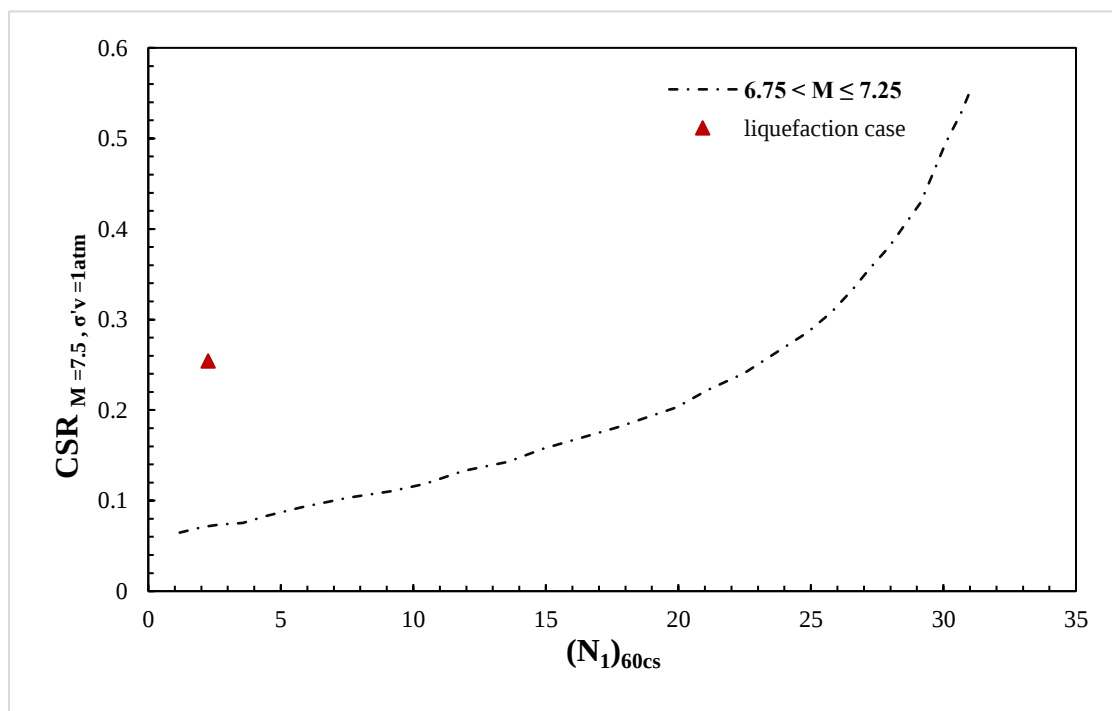


Figura 4.16 curva de magnitud propuesta por Boulanger e Idriss, basada en número de golpes

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1. El historial de velocidad considerado en la etapa dinámica del análisis corresponde a la dirección norte-sur, donde se registra la mayor velocidad y una aceleración máxima de 0.17g.
2. El historial de aceleración utilizado como entrada en el modelo numérico es similar al registro de aceleración en roca. Esto indica que, en la etapa dinámica, el modelo considera un historial de aceleración que emula correctamente las condiciones deseadas. Asimismo, las frecuencias obtenidas mediante la transformada de Fourier en ambos casos muestran similitudes, lo que confirma que, en términos de historial de aceleración, los resultados del modelo son consistentes y se asemejan a los datos registrados en campo.
3. La aceleración en superficie obtenida del modelo numérico, tras la etapa dinámica, difiere de la registrada por los acelerógrafos de la Red Nacional. Esta discrepancia se debe principalmente a las simplificaciones inherentes al modelado. Mientras que un sismo real implica movimientos en múltiples direcciones simultáneamente, el modelo considera únicamente una excitación lateral. Además, las propiedades de los materiales empleados en el modelo no representan completamente las características reales del suelo. Por ejemplo, en algunos estratos se encuentran partículas finas mezcladas con contenido gravoso, lo que dificulta definir con precisión las propiedades del material. Estas condiciones pueden combinar cohesión con un ángulo de fricción significativo, lo que plantea un desafío al momento de modelar. Por tanto, es fundamental realizar aproximaciones cuidadosas para emular de manera más precisa el comportamiento real del suelo.

4. Para la selección del material representativo de cada estrato de suelo en el modelo, se consideran diversas propiedades clave del suelo, como el porcentaje de partículas pasantes por el tamiz #200, el índice de plasticidad, la relación de vacíos, la densidad saturada y la densidad total (bulk), entre otras. En este contexto, un suelo clasificado como arcilla limosa se modela como una arcilla, mientras que una arena limosa se representa como una arena, simplificando las características del material para ajustarlas al análisis.
5. Aplicando la teoría de Boulanger e Idriss al estrato de arena ubicado a 7 metros de profundidad, se determina que dicho estrato es susceptible a licuación. Tras calcular sus parámetros correspondientes, se confirma que este estrato se encuentra dentro de la zona que caracteriza a los suelos licuables. Por lo tanto, la teoría propuesta resulta adecuada para analizar este caso de estudio y valida las condiciones observadas en el terreno.
6. Los asentamientos registrados en campo fueron de aproximadamente 5-6 cm, mientras que los estimados por el modelo numérico alcanzaron cerca de 3.5 cm. Esta discrepancia puede atribuirse a diversos factores. En primer lugar, el modelo numérico considera una columna de perfil de suelo simplificada, mientras que en campo se observa una pérdida de esfuerzos en un estrato completo. Además, la elección de los materiales empleados en el modelo influye significativamente, ya que no representan con precisión los materiales reales. Factores como la dilatancia y la contractancia desempeñan un papel crucial, pero estos parámetros no se conocen con exactitud y fueron estimados a partir de literatura. Finalmente, las limitaciones inherentes al modelo numérico también pueden haber contribuido a esta diferencia, afectando la capacidad de replicar con fidelidad el comportamiento real del suelo.

7. A pesar de que el modelaje no refleja de manera completamente exacta la realidad, se consideran las limitaciones del modelo y las posibles mejoras que podrían implementarse para optimizar su precisión.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Budhu, M. (2010). *Soil Mechanics and Foundations* (Third Edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Gobierno Provincial de El Oro. (s/f). *FISCALIZACION Y CONSTRUCCION DE AUTOPISTA Y DE CORRALITOS TILLALES*. Gobierno Provincial de El Oro. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/LITERAL_K_PROYECTO_175200000.0000.374939.pdf
- Huang, Y., & Yu, M. (2013). Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes of the twenty-first century. *Natural Hazards*, 65(3), 2375–2384. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0433-9>
- OpenSees. (s/f). [Software]. <https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/#>
- OpenSees. (2011a). *Effective Stress Site Response Analysis of a Layered Soil Column* [Software]. OpenSees. https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Effective_Stress_Site_Response_Analysis_of_a_Layered_Soil_Column
- OpenSees. (2011b). *Site Response Analysis of a Layered Soil Column (Total Stress Analysis)* [Software]. [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Site_Response_Analysis_of_a_Layered_Soil_Column_\(Total_Stress_Analysis\)](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Site_Response_Analysis_of_a_Layered_Soil_Column_(Total_Stress_Analysis))
- Ortiz-Hernández, E., Chunga, K., Pastor, J. L., & Toulkeridis, T. (2022). Assessing Susceptibility to Soil Liquefaction Using the Standard Penetration Test (SPT)—A Case Study from the City of Portoviejo, Coastal Ecuador. *Land*, 11(4), 463. <https://doi.org/10.3390/land11040463>
- Quinde Martínez, P., & Reinoso Angulo, E. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca. *Ingeniería sísmica*, 94, 1–26.
- Zhou, Y.-G., Xia, P., Ling, D.-S., & Chen, Y.-M. (2020). Liquefaction case studies of gravelly soils during the 2008 Wenchuan earthquake. *Engineering Geology*, 274, 105691. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105691>

7. ANEXO A: MODELO NUMÉRICO

```

import numpy as np
import math as mm
import openseespy.opensees as op
import time as tt
import opsvis as opsv

#-----
# 1. DEFINE SOIL AND MESH GEOMETRY
#-----

op.wipe()
nodes_dict = dict()

#---SOIL GEOMETRY
# thicknesses of soil profile (m)
soilThick = 40.0
# number of soil layers
numLayers = 7
# layer thicknesses
layerThick=[10.0,15.0,6.0,6.0,1.0,1.0,1.0]

# depth of water table
waterTable =2.0

# define layer boundaries
layerBound=np.zeros((numLayers,1))
layerBound[0]=layerThick[0];
for i in range(1,numLayers):
    layerBound[i]=layerBound[i-1]+layerThick[i]

#---MESH GEOMETRY
# number of elements in horizontal direction
nElemX = 1
# number of nodes in horizontal direction
nNodeX =2 * nElemX+1
# horizontal element size (m)
sElemX = 1.0

# number of elements in vertical direction for each layer
nElemY = [20,30,12,12,2,2,2]

# total number of elements in vertical direction
nElemT = 80

```

```

sElemY = np.zeros((numLayers,1))

# vertical element size in each layer
for i in range(numLayers):
    sElemY[i] = [layerThick[i-1]/nElemY[i-1]]
    print('size:',sElemY[i])

# number of nodes in vertical direction
nNodeY = 2 * nElemT+1

# total number of nodes
nNodeT = nNodeX * nNodeY

print("nNodeT:",nNodeT)

#print(f"it is sElemY: {sElemY} ")

#-----
# 2. CREATE PORE PRESSURE NODES AND FIXITIES
#-----
op.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)

count = 1
layerNodeCount = 0
dry_Node=np.zeros((500,1))
node_save=np.zeros((500,1))

# loop over soil layers
for k in range(1,numLayers+1):
    # loop in horizontal direction
    for i in range(1,nNodeX+1,2):
        if k==1:
            bump = 1
        else:
            bump = 0
        j_end=2 * nElemY[k-1] + bump # 2*24+1=49, 48
        for j in range(1,j_end+1,2):
            xCoord = (i-1) * (sElemX/2)
            yctr = j + layerNodeCount
            yCoord = (yctr-1) * (float(sElemY[k-1].item()))/2
            nodeNum = i + ((yctr-1) * nNodeX)
            op.node(nodeNum, xCoord, yCoord)

        # output nodal information to data file
        nodes_dict[nodeNum] = (nodeNum, xCoord, yCoord)
        node_save[nodeNum] = int(nodeNum)
        # designate nodes above water table
        waterHeight = soilThick - waterTable
        if yCoord >= waterHeight:

```

```

        dry_Node[count] = nodeNum
        count = count+1
    layerNodeCount = yctr + 1

#print(f"coordenadas de nodos:{nodes_dict}")
#print(f"otro:{node_save}")

dryNode=np.trim_zeros(dry_Node)
Node_d=np.unique(node_save)
Node_d=np.trim_zeros(Node_d)
np.savetxt('Node_record_model.txt',Node_d)
print('Finished creating all -ndf 3 nodes')
print('Number of Dry Nodes:',len(dryNode))

#print(f"Node_d:{Node_d}")

# define fixities for pore pressure nodes above water table
for i in range(count-1):
    n_dryNode=int(dryNode[i].item())
    op.fix(n_dryNode, 0, 0, 1)

op.fix(1, 0, 1, 0)
op.fix(3, 0, 1, 0)
print('Finished creating all -ndf 3 boundary conditions...')

# define equal degrees of freedom for pore pressure nodes
for i in range(1,((3*nNodeY)-2),6):
    op.equalDOF(i, i+2, 1, 2)

print("Finished creating equalDOF for pore pressure nodes...")

#-----
# 3. CREATE INTERIOR NODES AND FIXITIES
#-----
op.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 2)

xCoord = float(sElemX/2)

# loop over soil layers
layerNodeCount = 0

for k in range(1,numLayers+1):
    if k==1:
        bump = 1
    else:
        bump = 0
    j_end=2 * nElemY[k-1] + bump

```

```

for j in range(1,j_end+1,1):
    yctr = j + layerNodeCount
    yCoord = (yctr-1) * (float(sElemY[k-1].item()))/2
    nodeNum = (3*yctr) - 1
    op.node(nodeNum, xCoord, yCoord)
    # output nodal information to data file
    nodes_dict[nodeNum] = (nodeNum, xCoord, yCoord)

layerNodeCount = yctr

# interior nodes on the element edges
# loop over layers

layerNodeCount = 0

for k in range(1,numLayers+1):
    # loop in vertical direction
    for j in range(1,((nElemY[k-1])+1)):
        yctr = j + layerNodeCount;
        yCoord = float(sElemY[k-1].item())*(yctr-0.5)
        nodeNumL = (6*yctr) - 2
        nodeNumR = nodeNumL + 2

        op.node(nodeNumL ,0.0, yCoord)
        op.node(nodeNumR , sElemX, yCoord)

        # output nodal information to data file
        nodes_dict[nodeNumL] = (nodeNumL ,0.0, yCoord)
        nodes_dict[nodeNumR] = (nodeNumR , sElemX, yCoord)
    layerNodeCount = yctr

print("Finished creating all -ndf 2 nodes...")

# define fixities for interior nodes at base of soil column
op.fix(2, 0, 1)
print('Finished creating all -ndf 2 boundary conditions...')

# define equal degrees of freedom which have not yet been defined
for i in range(1,((3*nNodeY)-6),6):
    op.equalDOF(i , i+1, 1, 2)
    op.equalDOF(i+3, i+4, 1, 2)
    op.equalDOF(i+3, i+5, 1, 2)

op.equalDOF(nNodeT-2, nNodeT-1, 1, 2)
print('Finished creating equalDOF constraints...')

#-----
# 4. CREATE SOIL MATERIALS
#-----

```

```

# define grade of slope (%)
grade = 0.0
slope = mm.atan(grade/100.0)
g     = -9.81

xwgt_var = g * (mm.sin(slope))
ywgt_var = g * (mm.cos(slope))
thick = [1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0,1.0]
xWgt = [xwgt_var, xwgt_var, xwgt_var, xwgt_var, xwgt_var, xwgt_var, xwgt_var]
yWgt = [ywgt_var, ywgt_var, ywgt_var, ywgt_var, ywgt_var, ywgt_var, ywgt_var]
uBulk = [3.42E6,3.77E6,5.05E6,4.75E6,3.54E6,5E-6,5E-6] # bottom-top
hPerm = [1.00E-8, 1.00E-8, 1.00E-8, 1.00E-8, 1.00E-8,1.00E-8, 1.00E-8]
vPerm = [1.00E-8, 1.00E-8, 1.00E-8, 1.00E-8, 1.00E-8,1.00E-8, 1.00E-8]

G_shear = [
6.04E+04,
6.00E+04,
5.58E+04,
1.50E+05,
9.12E+04,
1.30E+04,
1.52E+05,
]

rho_dep=[
1.74,
1.54,
1.53,
1.74,
1.83,
1.30,
1.93,
]

k_bulk=[
1.69E+05,
3.13E+05,
3.30E+05,
7.50E+05,
2.23E+05,
6.79E+04,
7.47E+05
]

frictionAng=[
31,

```

```
00,  
00,  
31,  
32,  
00,  
00,  
]
```

```
peakShearStra=[  
0.1,  
0.1,  
0.1,  
0.1,  
0.1,  
0.1,  
0.1  
]
```

```
refPress=[  
101,  
101,  
101,  
101,  
101,  
101,  
101  
]
```

```
pressDependCoe=[  
0.5,  
0.0,  
0.0,  
0.5,  
0.5,  
0.0,  
0.0  
]
```

```
PTAng=[  
31,  
00,  
00,  
31,  
26,  
00,  
00  
]
```

```
e=[
```

```

0.84,
0.00,
0.00,
0.86,
0.78,
1.40,
1.81
]

```

```

contract1=[
0.087,
0.000,
0.000,
0.087,
0.067,
0.000,
0.000
]

```

```

contract2=[
0.18,
0.00,
0.00,
0.18,
0.23,
0.00,
0.00
]

```

```

#

```

```

=====

```

```

=====

```

```

# nDMaterial PressureDependMultiYield02

```

```

# nDMaterial('PressureDependMultiYield02', matTag, nd, rho, refShearModul,
refBulkModul,\

```

```

# frictionAng, peakShearStra, refPress, pressDependCoe, PTAng,\

```

```

# contrac[0], contrac[2], dilat[0], dilat[2], noYieldSurf=20.0,\

```

```

# *yieldSurf=[], contrac[1]=5.0, dilat[1]=3.0, *liquefac=[1.0,0.0],e=0.6, \

```

```

# *params=[0.9, 0.02, 0.7, 101.0], c=0.1)

```

```

#

```

```

=====

```

```

=====

```

```

# nDMaterial('PressureIndependMultiYield', matTag, nd, rho, refShearModul,

```

```

# refBulkModul, cohesi, peakShearStra, frictionAng=0., refPress=100.,

```

```

# pressDependCoe=0., noYieldSurf=20, *yieldSurf)

```

```

#

```

```

=====

```

```

=====

```

```

#capa 1 top
=====
=====
op.nDMaterial('PressureDependMultiYield02',7, 2,rho_dep[0], G_shear[0], k_bulk[0],
frictionAng[0], peakShearStra[0], \
                                refPress[0], pressDependCoe[0], PTAng[0], contract1[0],
contract2[0], 0.00, \
                                0.00, 20, 5.0, 3.0, 1.0, \
                                0.0, e[0], 0.9, 0.02,0.7, 101.0)

#capa 2
=====
=====
op.nDMaterial('PressureIndependMultiYield', 6, 2, rho_dep[1], G_shear[1],\
k_bulk[1], 37 , peakShearStra[1], 0.0, refPress[1],\
0.0, 20)

#capa 3
=====
=====
op.nDMaterial('PressureIndependMultiYield', 5, 2, rho_dep[2], G_shear[2],\
k_bulk[2], 37 , peakShearStra[2], 0.0, refPress[2],\
0.0, 20)

#capa 4
=====
=====
op.nDMaterial('PressureIndependMultiYield', 4, 2, rho_dep[3], G_shear[3],\
k_bulk[3], 75 , peakShearStra[2], 0.0, refPress[3],\
0.0, 20)

#capa 5
=====
=====
op.nDMaterial('PressureDependMultiYield02',3, 2, rho_dep[4], G_shear[4], k_bulk[4],
frictionAng[4], peakShearStra[4], \
                                refPress[4], pressDependCoe[4], PTAng[4], contract1[4],
contract2[4], 0.06, \
                                0.27, 20, 5.0, 3.0, 1.0, \
                                0.0, e[4], 0.2, 0.02, 0.7 , 101.0)

#capa 6
=====
=====
op.nDMaterial('PressureIndependMultiYield', 2, 2, rho_dep[5], G_shear[5],\
k_bulk[5], 18 , peakShearStra[5], 0.0, refPress[5],\
0.0, 20)

#capa 7
=====
=====
op.nDMaterial('PressureIndependMultiYield', 1, 2, rho_dep[6], G_shear[6],\
k_bulk[6], 75 , peakShearStra[6], 0.0, refPress[6],\
0.0, 20)

```

```

print("Finished creating all soil materials...")
#-----
# 5. CREATE SOIL ELEMENTS
#-----

for j in range(1,nElemT+1):
    nI = ( 6*j) - 5
    nJ = nI + 2
    nK = nI + 8
    nL = nI + 6
    nM = nI + 1
    nN = nI + 5
    nP = nI + 7
    nQ = nI + 3
    nR = nI + 4

    lowerBound = 0.0
    for i in range(1,numLayers+1):
        if j * sElemY[i-1] <= layerBound[i-1] and j * sElemY[i-1] > lowerBound: #0.5<= 12 &
1 > 0
            # permeabilities are initially set at 1.0 m/s for gravity analysis,
            op.element('9_4_QuadUP', j, nI, nJ, nK, nL, nM, nN, nP, nQ, nR, \
                thick[i-1], i, uBulk[i-1], 1.0, 1.0, 1.0, xWgt[i-1], yWgt[i-1])

            lowerBound = layerBound[i-1]

print("Finished creating all soil elements...")
#-----
# 6. LYSMER DASHPOT
#-----
# define dashpot nodes
dashF = nNodeT+1
dashS = nNodeT+2

op.node(dashF, 0.0, 0.0)
op.node(dashS, 0.0, 0.0)

# define fixities for dashpot nodes
op.fix(dashF, 1, 1)
op.fix(dashS, 0, 1)

# define equal DOF for dashpot and base soil node

op.equalDOF(1, dashS, 1) # igualando grados de libertad al nodo 1 y dashS
print('Finished creating dashpot nodes and boundary conditions...')

# define dashpot material
colArea    = sElemX * thick[0]
rockVS     = 700.0 #m/s

```

```

rockDen    = 2.5    #Mg/m3
dashpotCoeff = rockVS * rockDen

#uniaxialMaterial('Viscous', matTag, C, alpha)
op.uniaxialMaterial('Viscous', numLayers+1, dashpotCoeff * colArea, 1)

# define dashpot element
op.element('zeroLength', nElemT+1, dashF, dashS, '-mat', numLayers+1, '-dir', 1)

print("Finished creating dashpot material and element...")

opsv.plot_model(fig_wi_he=(20,150))

#-----
# 7. CREATE GRAVITY RECORDERS
#-----

# create list for pore pressure nodes
load_nodeList3=np.loadtxt('Node_record_model.txt')
nodeList3=[]

for i in range(len(load_nodeList3)):
    nodeList3.append(int(load_nodeList3[i]))
# record nodal displacment, acceleration, and porepressure
#op.recorder('Node','-file','Gdisplacement.txt','-time','-node',*nodeList3,-dof, 1, 2, 'disp')
#op.recorder('Node','-file','Gacceleration.txt','-time','-node',*nodeList3,-dof, 1, 2, 'accel')
#op.recorder('Node','-file','GporePressure.txt','-time','-node',*nodeList3,-dof, 3, 'vel')

# record elemental stress and strain (files are names to reflect GiD gp numbering)
#op.recorder('Element','-file','Gstress1.txt','-time','-eleRange', 1,nElemT,'material','1','stress')
#op.recorder('Element','-file','Gstress2.txt','-time','-eleRange', 1,nElemT,'material','2','stress')
#op.recorder('Element','-file','Gstress3.txt','-time','-eleRange', 1,nElemT,'material','3','stress')
#op.recorder('Element','-file','Gstress4.txt','-time','-eleRange', 1,nElemT,'material','4','stress')
#op.recorder('Element','-file','Gstress9.txt','-time','-eleRange', 1,nElemT,'material','9','stress')
#op.recorder('Element','-file','Gstrain1.txt','-time','-eleRange', 1,nElemT,'material','1','strain')
#op.recorder('Element','-file','Gstrain2.txt','-time','-eleRange', 1,nElemT,'material','2','strain')
#op.recorder('Element','-file','Gstrain3.txt','-time','-eleRange', 1,nElemT,'material','3','strain')
#op.recorder('Element','-file','Gstrain4.txt','-time','-eleRange', 1,nElemT,'material','4','strain')
#op.recorder('Element','-file','Gstrain9.txt','-time','-eleRange', 1,nElemT,'material','9','strain')

print("Finished creating gravity recorders...")

#-----
# 8. DEFINE ANALYSIS PARAMETERS
#-----

#---GROUND MOTION PARAMETERS
# time step in ground motion record
motionDT = 0.01

```

```

# number of steps in ground motion record
motionSteps = 30001

#---RAYLEIGH DAMPING PARAMETERS
# damping ratio
damp = 0.02 #damping 0.02
# lower frequency
omega1 = 2 * np.pi * 0.2
# upper frequency
omega2 = 2 * np.pi * 20 # 6
# damping coefficients
a0 = 2*damp*omega1*omega2/(omega1 + omega2)
a1 = 2*damp/(omega1 + omega2)
print("Damping Coefficients: a_0 = $a0; a_1 = $a1")

#---DETERMINE STABLE ANALYSIS TIME STEP USING CFL CONDITION
# maximum shear wave velocity (m/s)
vsMax = 280.0
# duration of ground motion (s)
duration = motionDT*motionSteps
# minimum element size
minSize = sElemY[0]

for i in range(2,numLayers+1):
    if sElemY[i-1] <= minSize:
        minSize = sElemY[i-1]

# trial analysis time step

kTrial = minSize/(vsMax**0.5)
# define time step and number of steps for analysis
if motionDT <= kTrial:
    nSteps = motionSteps
    dT = motionDT
else:
    nSteps = int(mm.floor(duration/kTrial)+1)
    dT = duration/nSteps

print("Number of steps in analysis: $nSteps")
print("Analysis time step: $dT")

#---ANALYSIS PARAMETERS
# Newmark parameters
gamma = 0.50
beta = 0.25

#-----
# 9. GRAVITY ANALYSIS

```

```

#-----
# update materials to ensure elastic behavior

op.updateMaterialStage('-material', 1, '-stage', 0)
op.updateMaterialStage('-material', 2, '-stage', 0)
op.updateMaterialStage('-material', 3, '-stage', 0)
op.updateMaterialStage('-material', 4, '-stage', 0)
op.updateMaterialStage('-material', 5, '-stage', 0)
op.updateMaterialStage('-material', 6, '-stage', 0)
op.updateMaterialStage('-material', 7, '-stage', 0)

op.constraints('Penalty', 1.0E14, 1.0E14) #1.0E10 default 1.0E14
op.test('NormDispIncr', 1e-4, 35, 0) #1e-2
op.algorithm('KrylovNewton')
op.numberer('RCM')
op.system('ProfileSPD')
op.integrator('Newmark', gamma, beta)
op.analysis('Transient')

startT = tt.time()
op.analyze(10,4e2)
print('Finished with elastic gravity analysis...')

# update material to consider elastoplastic behavior
op.updateMaterialStage('-material', 1, '-stage', 1)
op.updateMaterialStage('-material', 2, '-stage', 1)
op.updateMaterialStage('-material', 3, '-stage', 1)
op.updateMaterialStage('-material', 4, '-stage', 1)
op.updateMaterialStage('-material', 5, '-stage', 1)
op.updateMaterialStage('-material', 6, '-stage', 1)
op.updateMaterialStage('-material', 7, '-stage', 1)

# plastic gravity loading
op.analyze(40,4e2)

print('Finished with plastic gravity analysis...')

#-----
# 10. UPDATE ELEMENT PERMEABILITY VALUES FOR POST-GRAVITY
# ANALYSIS
#-----

# choose base number for parameter IDs which is higher than other tags used in analysis
ctr = 10000.0
# loop over elements to define parameter IDs
for i in range(1,nElemT+1):
    op.parameter(int(ctr+1.0), 'element', i, 'vPerm')

```

```

op.parameter(int(ctr+2.0), 'element', i, 'hPerm')
ctr = ctr+2.0

# update permeability parameters for each element using parameter IDs
ctr = 10000.0
for j in range(1,nElemT+1):
    lowerBound = 0.0
    for i in range(1,numLayers+1):
        if j * sElemY[i-1] <= layerBound[i-1] and j*sElemY[i-1] > lowerBound:
            op.updateParameter(int(ctr+1.0), vPerm[i-1])
            op.updateParameter(int(ctr+2.0), hPerm[i-1])
            lowerBound = layerBound[i-1]
        ctr = ctr+2.0

print("Finished updating permeabilities for dynamic analysis...")

#-----
# 11. CREATE POST-GRAVITY RECORDERS
#-----

# reset time and analysis
op.setTime(0.0)
op.wipeAnalysis()
op.remove('recorders')

# recorder time step
recDT = motionDT

# record nodal displacment, acceleration, and porepressure
op.recorder('Node','-file','displacement_output_nodel.txt','-time', '-dT',recDT,'-
node',*nodeList3,'-dof', 1, 2, 'disp')
op.recorder('Node','-file','acceleration_output_model.txt','-time', '-dT',recDT,'-
node',*nodeList3,'-dof', 1, 2, 'accel')
#op.recorder('Node','-file','porePressure_output.txt','-time', '-dT',recDT,'-node',*nodeList3,'-
dof', 3, 'vel')

# record elemental stress and strain (files are names to reflect GiD gp numbering)
#op.recorder('Element','-file','stress1.txt','-time', '-dT',recDT,'-eleRange',
1,nElemT,'material','1','stress')
#op.recorder('Element','-file','stress2.txt','-time', '-dT',recDT,'-eleRange',
1,nElemT,'material','2','stress')
#op.recorder('Element','-file','stress3.txt','-time', '-dT',recDT,'-eleRange',
1,nElemT,'material','3','stress')
#op.recorder('Element','-file','stress4.txt','-time', '-dT',recDT,'-eleRange',
1,nElemT,'material','4','stress')
#op.recorder('Element','-file','stress9.txt','-time', '-dT',recDT,'-eleRange',
1,nElemT,'material','9','stress')
#op.recorder('Element','-file','strain1.txt','-time', '-dT',recDT,'-eleRange',
1,nElemT,'material','1','strain')

```

```

#op.recorder('Element','-file','strain2.txt','-time', '-dT',recDT,'-eleRange',
1,nElemT,'material','2','strain')
#op.recorder('Element','-file','strain3.txt','-time', '-dT',recDT,'-eleRange',
1,nElemT,'material','3','strain')
#op.recorder('Element','-file','strain4.txt','-time', '-dT',recDT,'-eleRange',
1,nElemT,'material','4','strain')
#op.recorder('Element','-file','strain9.txt','-time', '-dT',recDT,'-eleRange',
1,nElemT,'material','9','strain')

print("Finished creating all recorders...")

#-----
# 12. DYNAMIC ANALYSIS
#-----
op.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)

# define constant scaling factor for applied velocity
cFactor = colArea * dashpotCoeff

# define velocity time history file
velocityFile='velocidad_hist';
data_gm=np.loadtxt('velocidad_hist.txt')
#motionSteps=len(data_gm)
#print('Number of point for GM:',motionSteps)

# timeseries object for force history
op.timeSeries('Path', 2, '-dt', motionDT, '-filePath', velocityFile+'.txt', '-factor', cFactor)
op.pattern('Plain', 10, 2)
op.load(1, 1.0, 0.0, 0.0)

print( "Dynamic loading created...")

op.constraints('Penalty', 1.0E16, 1.0E16)
op.test('NormDispIncr', 1e-3, 35, 0)
op.algorithm('KrylovNewton')
op.numberer('RCM')
op.system('ProfileSPD')
op.integrator('Newmark', gamma, beta)
op.rayleigh(a0, a1, 0.0, 0.0)
op.analysis('Transient')

# perform analysis with timestep reduction loop
ok = op.analyze(nSteps,dT)

# if analysis fails, reduce timestep and continue with analysis
if ok !=0:
    print("did not converge, reducing time step")
    curTime = op.getTime()
    mTime = curTime

```

```

print("curTime: ", curTime)
curStep = curTime/dT
print("curStep: ", curStep)
rStep = (nSteps-curStep)*2.0
remStep = int((nSteps-curStep)*2.0)
print("remStep: ", remStep)
dT = dT/2.0
print("dT: ", dT)

ok = op.analyze(remStep, dT)
# if analysis fails again, reduce timestep and continue with analysis
if ok !=0:
    print("did not converge, reducing time step")
    curTime = op.getTime()
    print("curTime: ", curTime)
    curStep = (curTime-mTime)/dT
    print("curStep: ", curStep)
    remStep = int((rStep-curStep)*2.0)
    print("remStep: ", remStep)
    dT = dT/2.0
    print("dT: ", dT)

    ok = op.analyze(remStep, dT)

endT = tt.time()
print("Finished with dynamic analysis...")
print("Analysis execution time: ",(endT-startT))
op.wipe()

```