



Análisis experimental de la propagación de ondas sísmicas en suelos finos que contienen una inclusión fluida

Experimental analysis of seismic waves propagation in soils with a fluid inclusion

 Jovan Ezequiel Basaldúa Sánchez*

 María de la Luz Pérez Rea

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, México

* jovan.basaldua@uaq.mx

04

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

J. E. Basaldúa Sánchez y M. L. Pérez Rea, "Análisis experimental de la propagación de ondas sísmicas en suelos finos que contienen una inclusión fluida," *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 8, no. 15, pp.49-72, 2025.



Resumen

Esta investigación experimental analiza el impacto de inclusiones fluidas (agua, aire y petróleo) en la propagación de ondas sísmicas, a través de un banco de pruebas con suelo arcilloso de alta compresibilidad diseñado para replicar condiciones de frecuencias sísmicas reales. Los resultados demuestran que la presencia de fluidos altera significativamente las características de propagación: reduce la velocidad de onda debido a cambios en la rigidez del medio y amplifica los picos de señal, en el caso particular de inclusiones de petróleo. El estudio revela patrones espectrales distintivos para cada tipo de fluido y establece correlaciones

entre las propiedades del fluido contenido y los parámetros de propagación ondulatoria. El modelo desarrollado ofrece un marco de referencia valioso para evaluar el comportamiento sísmico de suelos saturados, ofreciendo aplicaciones prácticas en la evaluación de estabilidad de terrenos en zonas sísmicas y en la caracterización de reservorios de hidrocarburos, con especial relevancia para áreas con alta saturación de agua subterránea. Por último, se destaca la importancia de considerar las inclusiones fluidas en modelos predictivos de riesgo geotécnico y exploración geofísica.

Palabras clave: análisis experimental, exploración de yacimientos, geotecnia, ondas planas, inclusión fluida, ondas sísmicas.

Abstract

This experimental research examines the effect of fluid inclusions (water, air and oil) on seismic wave propagation through a test bed loaded with highly compressible clay soil designed to replicate common seismic frequency parameters. The results demonstrate that fluids significantly change propagation characteristics: reducing wave velocity due to changes in medium stiffness while amplifying signal peaks, particularly with oil inclusions. The research reveals distinctive spectral patterns for each different fluid and helps to detect correlations between the

contained fluid properties and wave propagation parameters. The test model developed here represents a worthwhile point of reference for evaluating seismic behavior of saturated soils, which provides practical applications for the assessment of ground stability within seismic zones and the characterization of hydrocarbon reservoirs, with particular relevance for those areas of high groundwater saturation. The results highlight the importance of accounting for fluid inclusions in predictive models for geotechnical risk assessment and geophysical exploration.

Keywords: experimental analysis, reservoir exploration, geotechnics, plane waves, fluid inclusion, seismic waves.



Introducción

El estudio experimental del fenómeno de propagación de onda en el terreno emplea diferentes técnicas e instrumentos de detección, tanto en campo como en laboratorio. Estos métodos permiten caracterizar el comportamiento del suelo al ser excitado por ondas de cuerpo que se propagan en el medio. En los ensayos sísmicos se generan ondas planas que simulan los movimientos telúricos, las cuales provienen de una fuente mecánica localizada (generalmente) en la superficie del medio. Después, con ayuda de herramientas computacionales, se registran y analizan los tiempos de llegada y las amplitudes de las ondas directas, reflejadas o refractadas en las interfaces. Los datos recopilados permiten determinar las propiedades fundamentales de las ondas, como la velocidad de propagación y la atenuación, con base en la estructura material del medio, así como en el tamaño y geometría de las irregularidades que contiene.

Dimitrios Aggelis y Shiotani [1] utilizaron transductores piezoeléctricos para enviar una onda de Rayleigh a través de un medio homogéneo con inclusiones aleatoriamente distribuidas y observaron una alta dependencia de la velocidad de propagación respecto a la frecuencia y al contenido de la inclusión. Asimismo, Bogado y Francisca [2] evaluaron especímenes de suelo residual y encontraron que la velocidad de las ondas cortantes residuales en los suelos está fuertemente influenciada por el número y volúmenes de las inclusiones. Por otro lado, en función del tipo de fluido contenido por la inclusión, el comportamiento de la velocidad de onda y la atenuación se verán afectadas [7]. Con el fin de estudiar de manera experimental la influencia de la distribución del fluido en relación con la velocidad de las ondas elásticas, se han desarrollado métodos para saturar el medio en estudio, como en [5] y [6]. En esta última investigación, se desarrolló un modelo cuantitativo de la dispersión de onda elástica para una serie de inclusiones inmersas en un medio poroelástico distribuidas de manera aleatoria. En la misma línea, Agofack *et al.* [3] emplearon piezoeléctricos en especímenes tipo columna para analizar el comportamiento de ondas de cuerpo en espacios porosos y constataron que la saturación de gas en el medio disminuye significativamente las velocidades sísmicas.

Diversos procedimientos geofísicos son utilizados para identificar inclusiones o anomalías en suelos, como es el caso del método sísmico reflexivo, el cual requiere de equipo, instrumentos de medición y sofisticados procesadores de señales [4]. En aplicaciones de búsqueda petrolera y mineral son empleadas fuentes de excitación como vibradoras de alta energía o incluso material explosivo, y se colocan geófonos en la superficie libre como receptores de señal para cuantificar las propiedades básicas de la roca que contiene el hidrocarburo de interés. Sin embargo, la instalación de sensores y fuentes de excitación en el medio físico a examinar presenta desafíos



logísticos considerables; por esa razón es necesario extraer especímenes representativos de las características naturales del sistema en estudio.

Los ensayos de laboratorio aportan información de la dinámica de fluidos en función de la dispersión de la velocidad sísmica a partir de las frecuencias sísmicas y ultrasónicas recreadas de manera experimental. No obstante, las velocidades de las ondas P y S que se han medido por métodos ultrasónicos o de alta amplitud difieren de las correspondientes a las frecuencias sísmicas [8]; así, simular con precisión las velocidades de ondas permite interpretar la respuesta del medio con mayor seguridad y construir modelos predictivos robustos.

Las características de onda están fuertemente influenciadas por la movilidad del fluido incrustado en el medio sólido; por ejemplo, la velocidad de corte aumenta después de la saturación con fluidos de alta viscosidad, los cuales, a su vez, soportan de manera efectiva una onda de corte. Asimismo, las inclusiones de aceite y gas están relacionadas con la atenuación de las ondas sísmicas primarias (P) [9], [10], [11]. De tal modo, es posible inferir el tipo de fluido presente en las inclusiones en función de los desplazamientos espectrales registrados en la superficie libre del suelo. Rubino *et al.* [12] realizaron una investigación numérica orientada a los efectos de la presencia de fluido en un medio sólido sobre la atenuación de la onda; y para el caso experimental se pueden consultar las publicaciones de Paffenholz y Burkhardt [13] y Behura *et al.* [14]. Si bien los trabajos mencionados se basan en técnicas numéricas o empíricas por separado, Belibassakis *et al.* [15] recurrieron al método de elementos frontera y la construcción de especímenes de prueba; tras analizar la propagación y dispersión de ondas en columnas de agua por los procedimientos analítico y empírico, reportaron una correlación estadísticamente significativa entre ambas metodologías.

Los modelos matemáticos desarrollados para la propagación de onda en medios que contienen inclusiones fluidas suelen basarse en las ecuaciones de Biot [16]. En este sentido, diversas propuestas analíticas se han desarrollado para cuantificar la atenuación de la onda P [17], [18], [19], [20], [21] y la onda S en medios poroelásticos con inclusiones [22]. De hecho, se ha demostrado que las propiedades elásticas del medio, como la capacidad de atenuación de las ondas P y S, dependen de la distribución de poros y la presencia de inclusiones heterogéneas [23], [24].

La heterogeneidad de los materiales y la distribución espacial de los fluidos en los poros generan efectos de dispersión y atenuación que modifican en creces la respuesta sísmica. Por ejemplo, Sun *et al.* [25] demostraron, mediante imágenes micro-CT del comportamiento de ondas en medios parcialmente saturados, que la geometría de la saturación determina la dispersión y la velocidad de propagación. De manera similar, Sutiyoso *et al.* [26] realizaron mediciones en laboratorio en arenas no consolidadas y confirmaron que el nivel de saturación afecta tanto la



velocidad de onda como su atenuación en el rango de frecuencias sísmicas. En suma, las inclusiones dentro del medio dan lugar a fenómenos de dispersión múltiple que influyen en la energía transmitida por las ondas sísmicas, especialmente en medios poroelásticos complejos [27]. El presente estudio se perfila en esta línea de investigación, explorando el efecto combinado de la saturación fluida y la presencia de inclusiones sobre la propagación de ondas en suelos.

Materiales y métodos

Materiales e instrumentos utilizados en el desarrollo experimental

Se diseñó y fabricó un banco de pruebas con capacidad volumétrica de 0.42 m^3 , de 1.2 m de largo por 0.74 m de ancho por 0.47 m de alto (Figura 1), caracterizado a partir de las frecuencias sísmicas comunes (0.01-10 Hz). La muestra de suelo evaluada corresponde a una arcilla plástica [28] de alta compresibilidad (montmorillonita), dentro de la cual se alojaron modelos de inclusión para evaluar su efecto en la propagación de ondas sísmicas a través de la muestra. A fin de representarlos, se fabricaron tres contenedores esféricos de polietileno, todos con un espesor de pared igual a 1 mm, completamente saturados por uno de tres tipos de fluido: aire, agua o petróleo crudo. La excitación para producir la respuesta libre del banco de pruebas se generó por medio de un martillo de impacto ICP [29], mientras que para la respuesta forzada se utilizó un equipo vibrador inercial TIRA GmbH [30] configurado a frecuencias de 2.5 a 10 Hz. El comportamiento debido a la interacción de las ondas producidas por la fuente de excitación con la muestra de suelo y la inclusión fluida fue registrado con dos acelerómetros unidireccionales [31]; uno de ellos se posicionó en la parte baja, cercano a la fuente de excitación, y el otro en la superficie libre del banco de pruebas. Por último, los datos provenientes de ambos sensores fueron recopilados con una tarjeta de adquisición de la marca National Instruments [32] para posteriormente almacenarlos y procesarlos en el software de variable compleja GNU Octave.

Procedimiento de experimentación

En primer lugar, se evaluó el comportamiento del banco de pruebas vacío con los acelerómetros unidireccionales dispuestos a 0.1 m (inferior) y 0.42 m (superior) respecto a la base, orientados en el mismo sentido y alineados en el eje vertical. Luego, el banco de pruebas fue cargado a tres cuartas partes únicamente con la muestra de montmorillonita para repetir el ensayo (Figura 1c). Por último, se realizaron pruebas



separadas para los tres especímenes esféricos de polietileno; se posicionaron de manera individual a una distancia de 0.3 m desde la base del banco de pruebas y se cubrieron en su totalidad con la muestra de suelo, como se ilustra en la Figura 1a.

Respuesta libre

Se hizo incidir un impulso en la parte superior y uno más en la parte inferior del banco utilizando el martillo de impacto para obtener la respuesta libre generada por el banco de prueba para las tres configuraciones experimentales (vacío, muestra de suelo sin inclusión y con inclusiones fluidas). Las condiciones de magnitud, posición y duración del impacto se mantuvieron constantes en las tres configuraciones de prueba.

Respuesta forzada

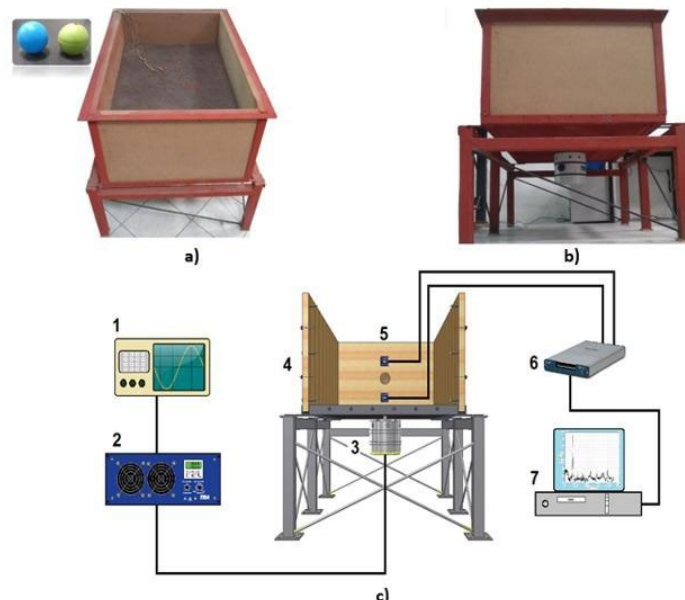
En el caso de la respuesta forzada (Figura 1c), se utilizó un generador de señales convencional (1), el cual permite mantener una amplitud constante mientras se varía la frecuencia de operación; el pulso modulado se envía al amplificador de tensión (2), que alimenta el vibrador inercial (3) posicionado bajo la base del banco de prueba (4). Los acelerómetros unidireccionales (5) registran las ondas que se propagan a través de la muestra de suelo y de la inclusión fluida. Luego, los datos cinéticos se recaban en la tarjeta de adquisición (6) para procesarse en un computador (7). Se asignó un tiempo de asentamiento de alrededor de 30 segundos con el fin de estabilizar la propagación de onda a cada nueva frecuencia de operación antes de renovar el registro de datos. Este proceso se repitió para la configuración de las muestras de suelo y con y sin inclusión fluida.

FIGURA 1.

Montaje del equipo experimental:

- a) Banco con muestra de suelo.
- b) Fuente de excitación.
- c) Esquema representativo:
 1. generador de funciones.
 2. amplificador de tensión.
 3. fuente de excitación.
 4. banco de prueba.
 5. acelerómetros.
 6. tarjeta de adquisición de datos.
 7. computador.

Fuente: elaboración propia.





Resultados

Banco de pruebas sin muestra de suelo

Respuesta libre

Se excitó el banco vacío con golpes individuales utilizando el martillo de impacto, primero en sentido ascendente y después descendente, y se registraron los datos provenientes de los acelerómetros durante 10 segundos. Tras aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) con un software de variable compleja, se construyeron los espectros de frecuencia correspondientes a los sensores superior (Figura 2a) e inferior (Figura 2b); se representa con línea sólida el espectro generado por el impacto ascendente y con línea discontinua el descendente.

Para el golpe ascendente, se registraron en el sensor inferior tres picos de frecuencias naturales; el primero se emite alrededor de los 382 Hz con una amplitud cercana a las tres unidades; el segundo se da alrededor de los 584 Hz con una amplitud cercana a las 2.5 unidades, y la última frecuencia natural se produce alrededor de los 1957 Hz para una amplitud cercana a las 1.3 unidades. Las frecuencias naturales registradas por el acelerómetro superior (Figura 2a) alcanzan casi 11 unidades de amplitud en el pico de 382 Hz, es decir, el valor inicial casi se cuadriplica; la segunda frecuencia natural exhibe los 584 Hz y mantiene una amplitud similar. La última frecuencia natural detecta cerca de los 1957 Hz y se aprecia una amplificación de 8 unidades, casi seis veces el valor inicial. Es pertinente señalar que en el sensor superior se registra otro pico con casi 7.5 unidades de amplitud a los 1036 Hz.

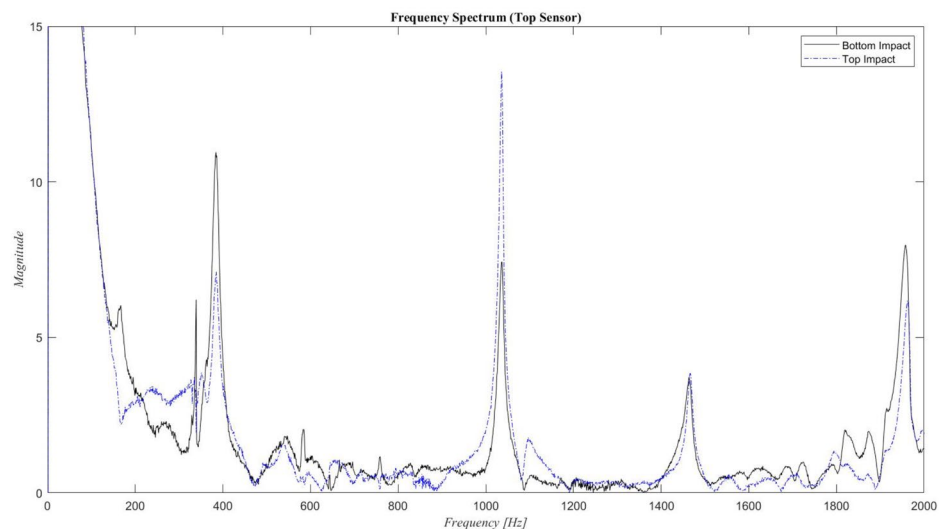
Respecto al impacto descendente, en el sensor inferior se pueden apreciar también tres picos; uno alrededor de los 382 Hz con una amplitud cercana a las 3.3 unidades, el segundo ronda los 1466 Hz con casi una unidad y el último se produce alrededor de los 1961 Hz para una amplitud cercana a una unidad. En cuanto al acelerómetro superior, se aprecia en la frecuencia natural de 382 Hz una amplitud de casi 7 unidades, o aproximadamente dos veces su valor inicial; el pico a los 1466 Hz aumenta a un valor cercano a las 4 unidades, cuatro veces su valor original; para la última frecuencia, a los 1961 Hz hay una amplificación de casi seis veces el valor inicial. Al igual que en los espectros producidos por el impacto ascendente, se registra a los 1036 Hz otro pico con amplitud de casi 13.5 unidades. Por último, en la Figura 2a se aprecia un valor muy elevado de amplitud en el punto cero con un rápido descenso, el cual se atribuye al impacto del martillo excitador muy próximo al acelerómetro.


FIGURA 2.

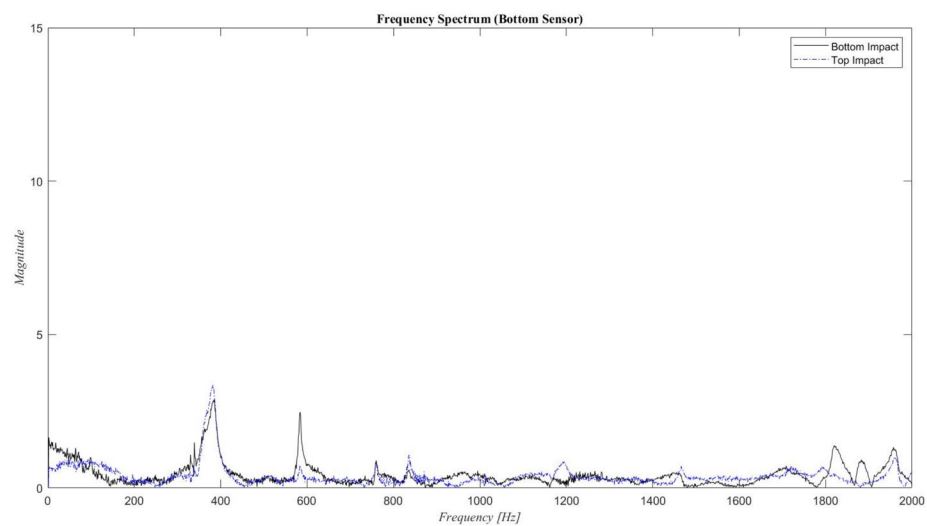
Espectros de respuesta libre generados por el banco de pruebas sin muestra de suelo:

- a) espectro generado con el acelerómetro superior.
- b) espectro generado por el acelerómetro inferior.

Fuente: elaboración propia.



a)



b)

Respuesta forzada

En esta etapa, el banco de pruebas sin muestra de suelo se osciló con el vibrador inercial a frecuencias de 2.5 a 10.0 Hz, con incrementos de 1 Hz y tiempo de excitación de 11 segundos por frecuencia. Las amplitudes (normalizadas a 270 unidades) de los espectros registrados con el acelerómetro inferior mostraron picos a frecuencias de ~450 Hz, y alcanzaron valores máximos cuando el banco osciló a 10 Hz (Figura 3a). En la Figura 3b se muestra un resumen comparativo de los datos del acelerómetro inferior.

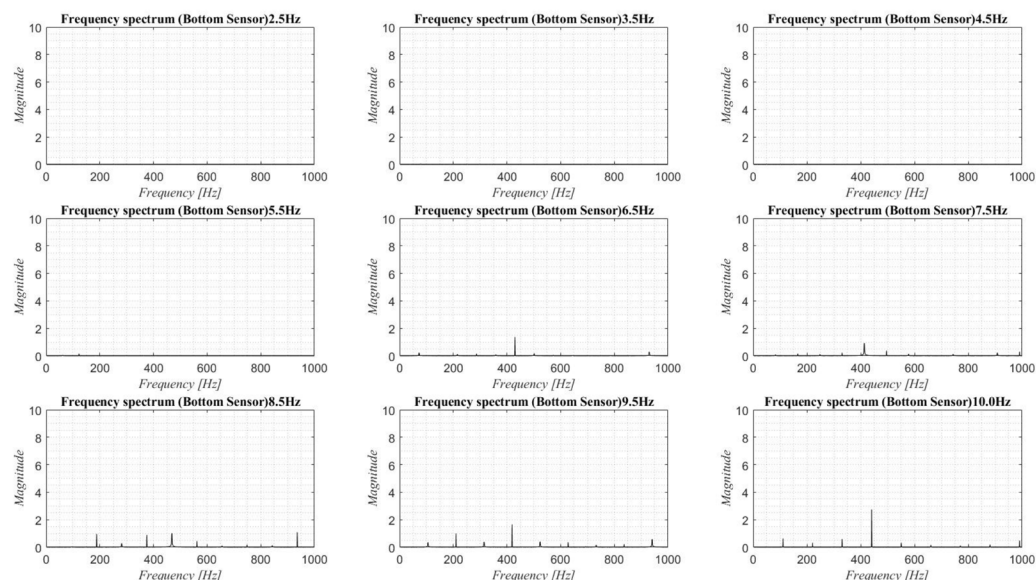

FIGURA 3.

Espectros de respuesta forzada generados por el banco de pruebas sin muestra de suelo utilizando el acelerómetro inferior:

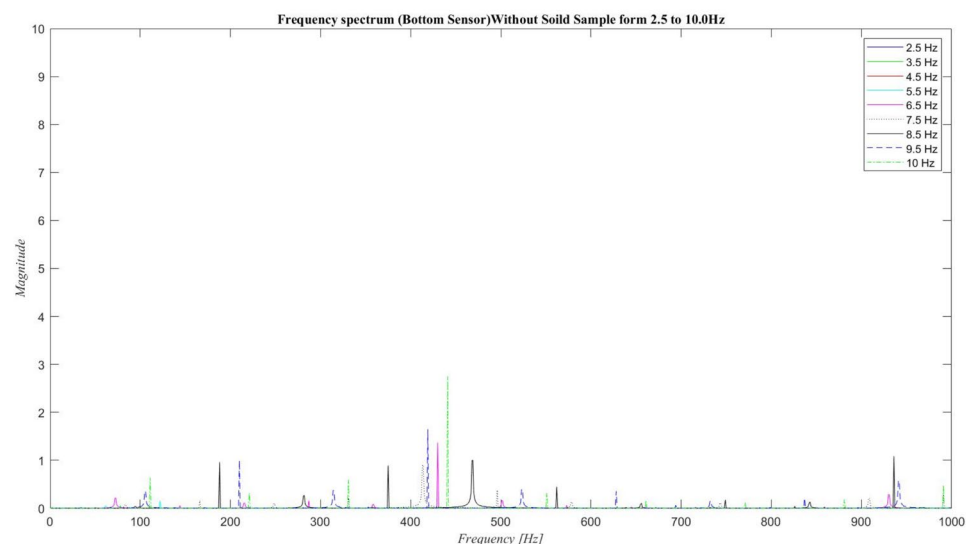
a) espectros de frecuencia individuales.

y b) espectro de frecuencia de 2.5 a 10.0 Hz.

Fuente: elaboración propia.



a)



b)

Asimismo, en la Figura 4a se exhiben los datos provenientes del acelerómetro superior, con los valores de amplitud normalizados también a 270 unidades. Tal en el caso anterior, los valores más elevados se generan a ~450 Hz, alcanzando un máximo cuando el banco de pruebas es excitado a 10 Hz. La Figura 4b representa desde los 2.5 hasta los 10 Hz, con incrementos de 1 Hz. Los valores tan elevados en amplitud de las Figuras 3 y 4 están directamente relacionados con la propagación de onda sobre la estructura metálica de la que está hecha el banco de pruebas. Como se verá en la siguiente sección, las amplitudes se reducen drásticamente al añadir la muestra de suelo al banco de pruebas. Con base en las respuestas libre y forzada expuestas en las Figuras 2 a 4, se asumió que el banco de pruebas no alcanzaría las frecuencias naturales al ser excitado por el vibrador inercial, por lo que no entraría en resonancia.

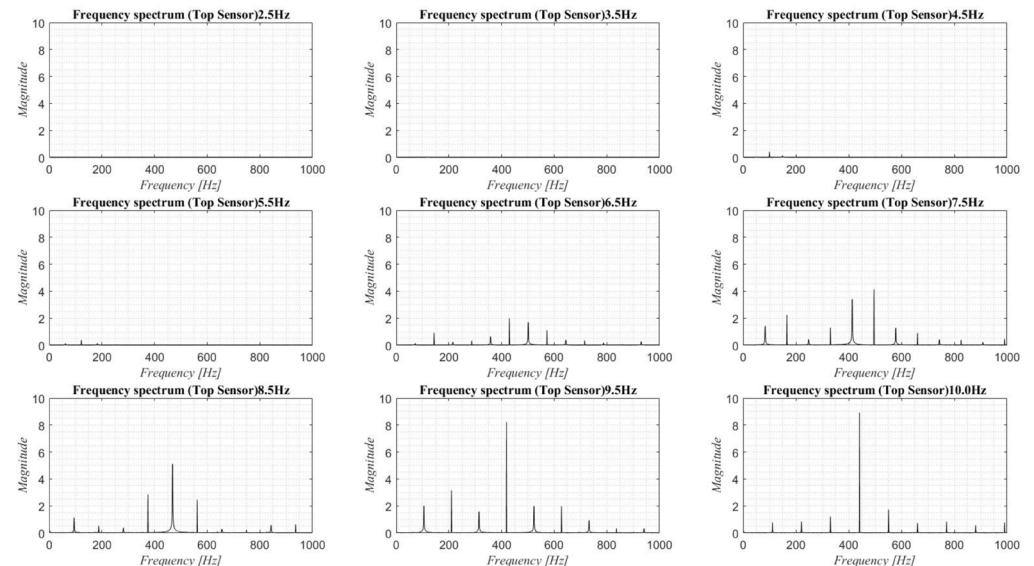

FIGURA 4.

Espectros de respuesta forzada generados por el banco de pruebas sin muestra de suelo utilizando el acelerómetro superior:

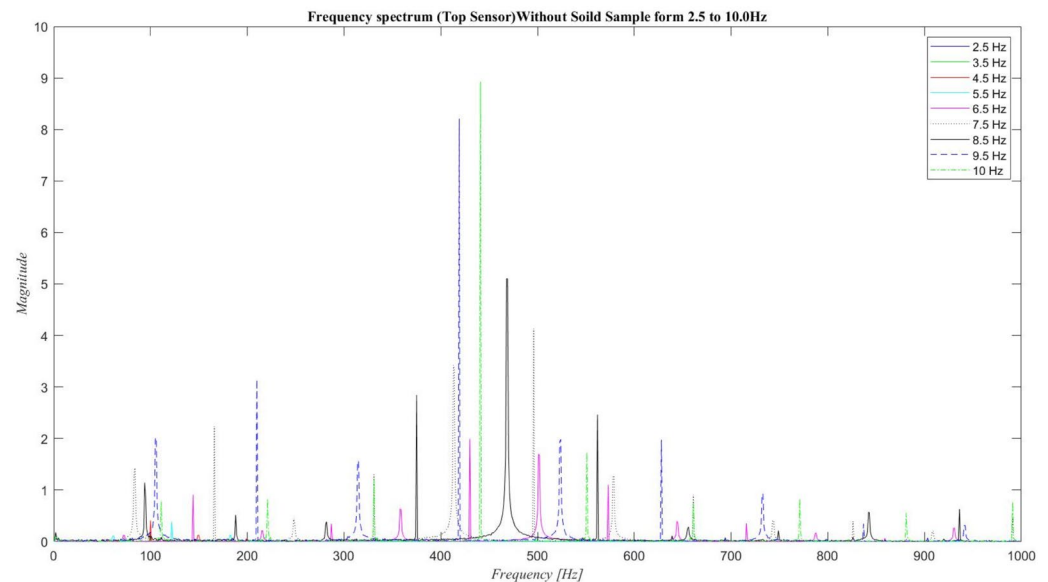
a) espectros individuales.

b) espectro para las frecuencias de excitación de 2.5 a 10.0 Hz.

Fuente: elaboración propia.



a)



b)

Banco de pruebas con muestra de suelo y muestra de suelo con inclusión vacía

Respuesta libre

Se aplicó un impacto de martillo ascendente en la base del banco de pruebas; los espectros generados a partir de los acelerómetros en esta configuración experimental se visualizan en la Figura 5. Las ondas se propagan por la muestra de suelo desde la fuente de excitación (Figura 5a) hasta la superficie libre (Figura 5b); a las frecuencias de ~56 Hz, las amplitudes decrecen ligeramente; las de ~100 Hz son amplificadas, y en el rango de 120 a 200 Hz, la atenuación es mayor; es menester resaltar que en el rango de 350 a 550 Hz se presentan ampliificaciones moderadas.

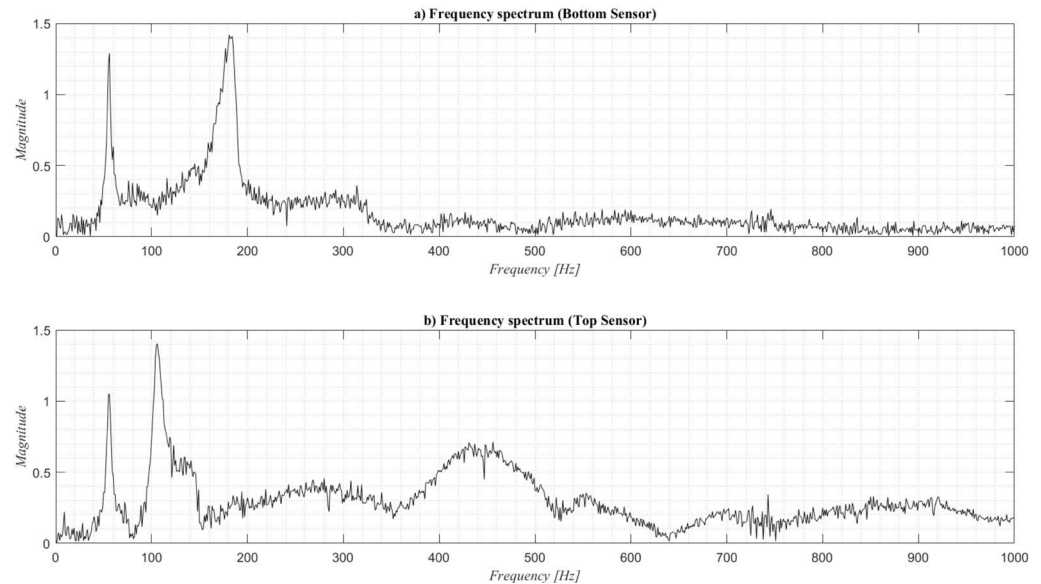

FIGURA 5.

Espectros de respuesta libre generados por el banco de pruebas con muestra de suelo:

a) espectro generado con el acelerómetro inferior.

b) espectro generado por el acelerómetro superior.

Fuente: elaboración propia.



Respuesta forzada

Las Figuras 6 y 7 muestran los espectros con amplitudes normalizadas a 270 unidades recogidos en periodos vibratorios de 5 segundos. Los evidenciados en la Figura 6a corresponden al acelerómetro inferior, localizado cerca de la fuente de excitación, y presentan la forma y amplitudes para las frecuencias de excitación desde los 2.5 hasta los 10 Hz, con incrementos de 1 Hz. Es claro que aparecen armónicos considerables a partir de 7.5 Hz, alcanzándose la mayor densidad de armónicos a los 9.5 Hz para después comenzar a disminuir; en último lugar, la amplitud máxima se alcanza en ~41 Hz a la frecuencia de excitación de 10 Hz. En la Figura 6c se conjuntan los espectros individuales de la Figura 6a, enfatizando la forma y amplitudes del espectro, y de manera análoga, 6d presenta el espectro completo de los datos en 6b. Al compararlos, puede apreciarse una gran semejanza entre ambos conjuntos de datos.

FIGURA 6.

Espectros de respuesta forzada, acelerómetro inferior:

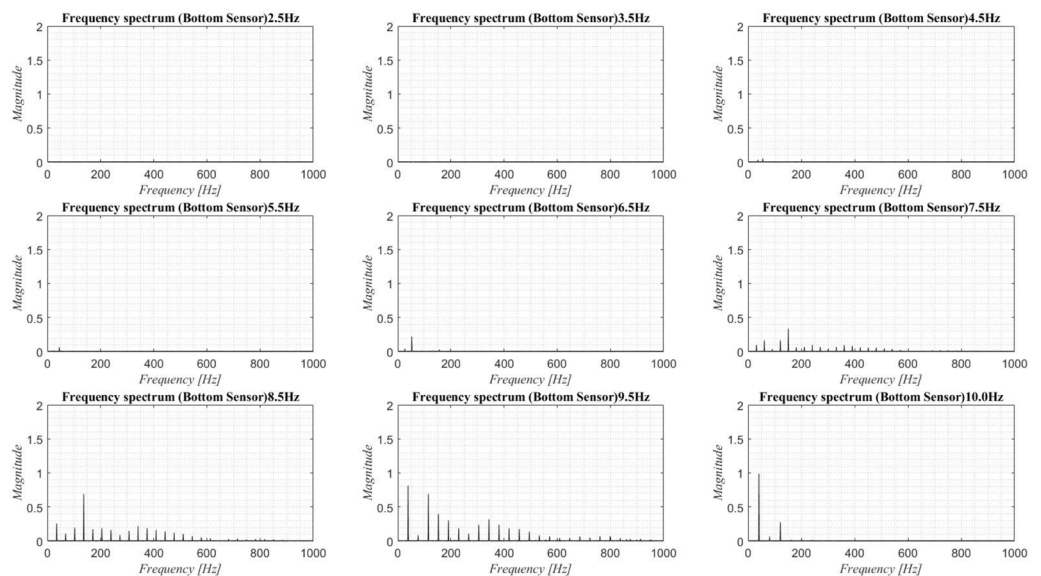
a) espectros individuales sin inclusión.

b) espectros individuales con inclusión vacía.

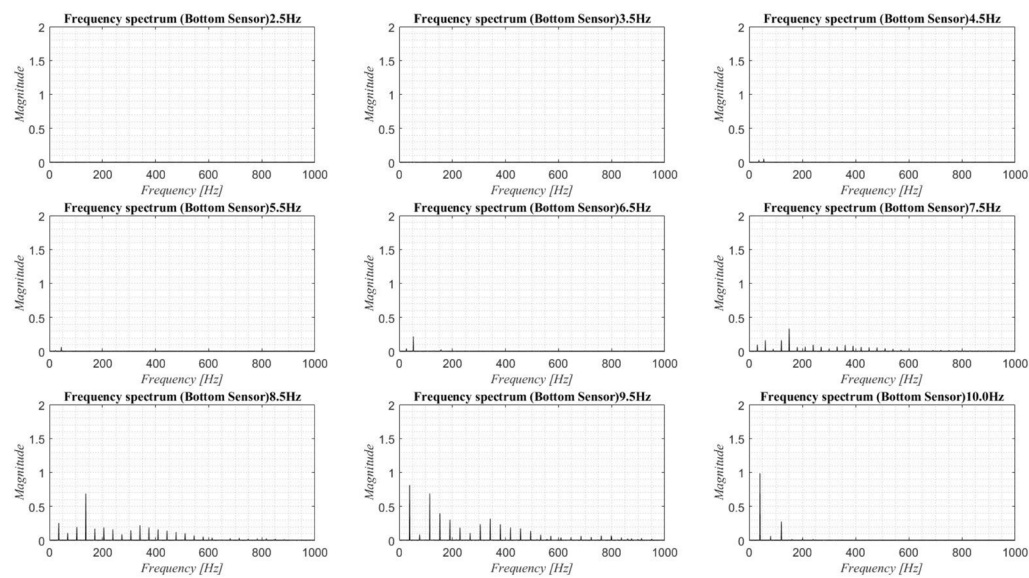
c) excitación de 2.5 a 10 Hz sin inclusión.

d) excitación de 2.5 a 10 Hz con inclusión vacía.

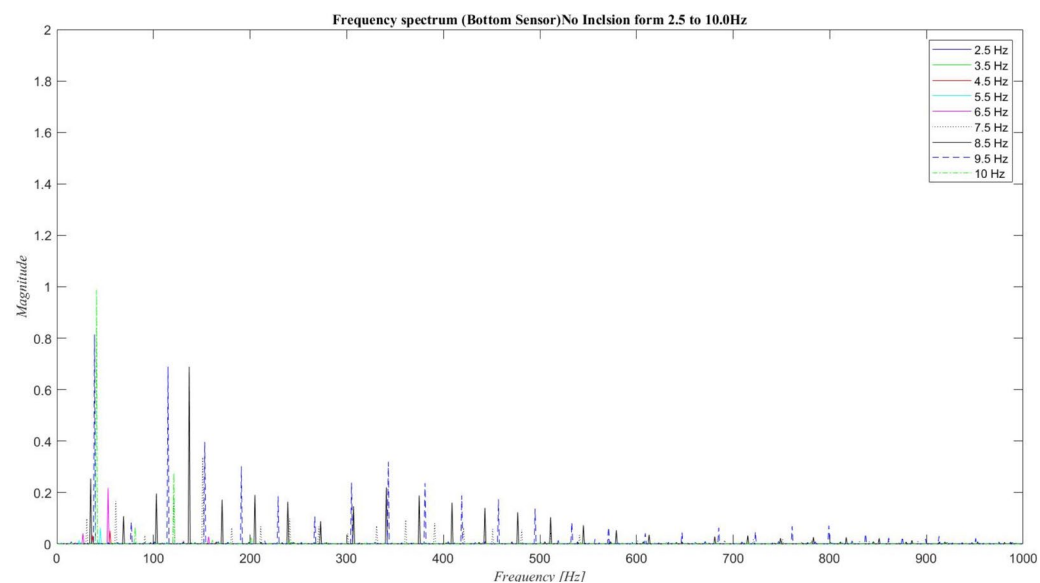
Fuente: elaboración propia.



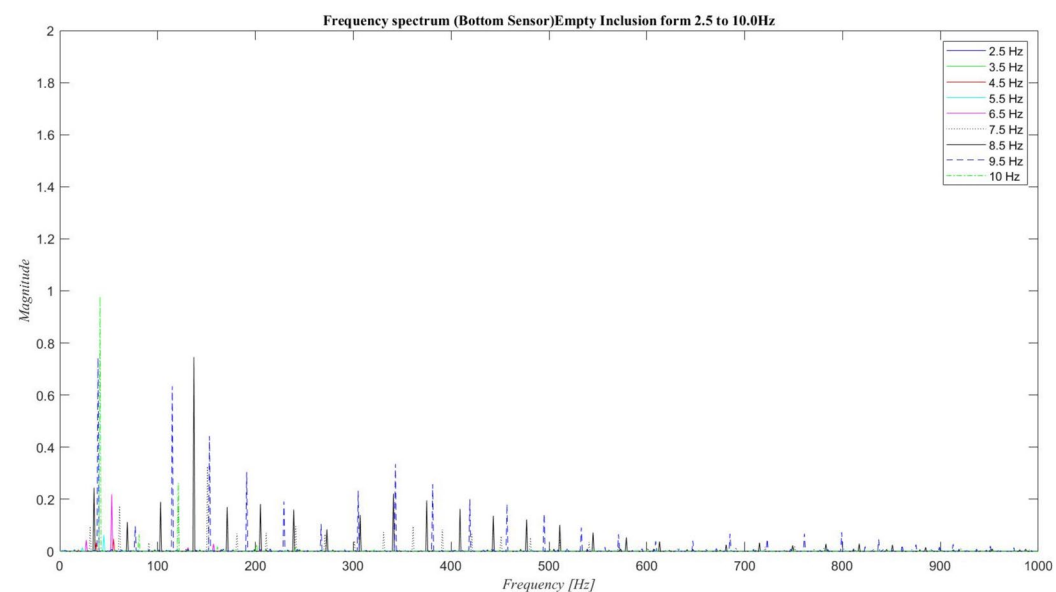
a)



b)



c)



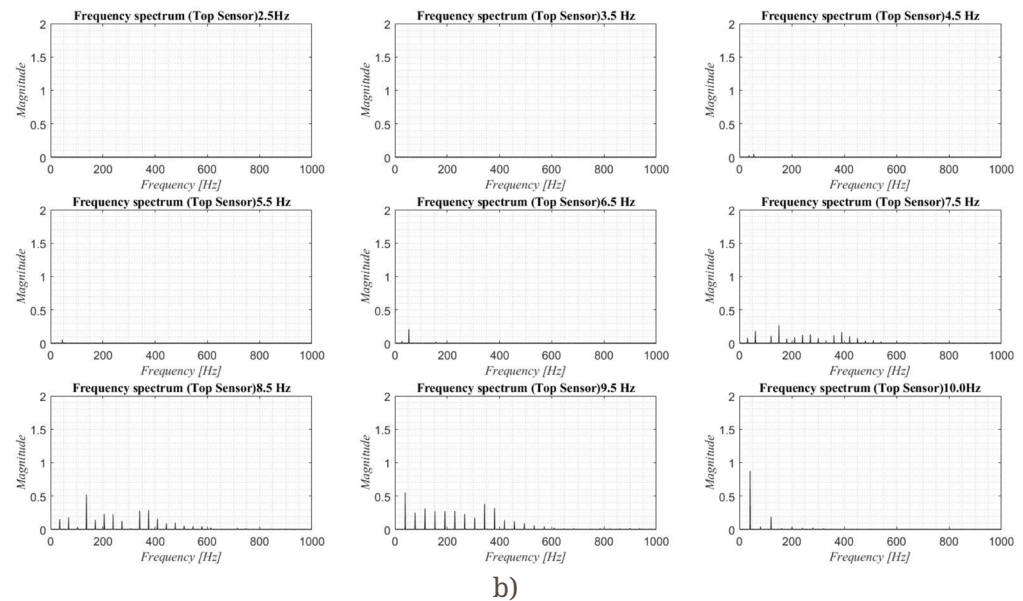
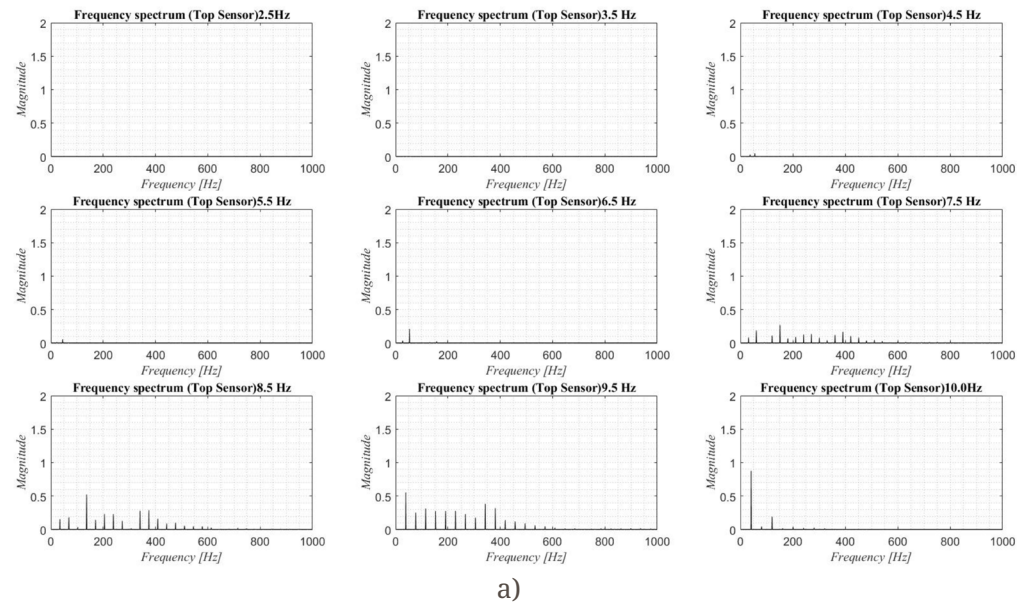
d)


FIGURA 7.

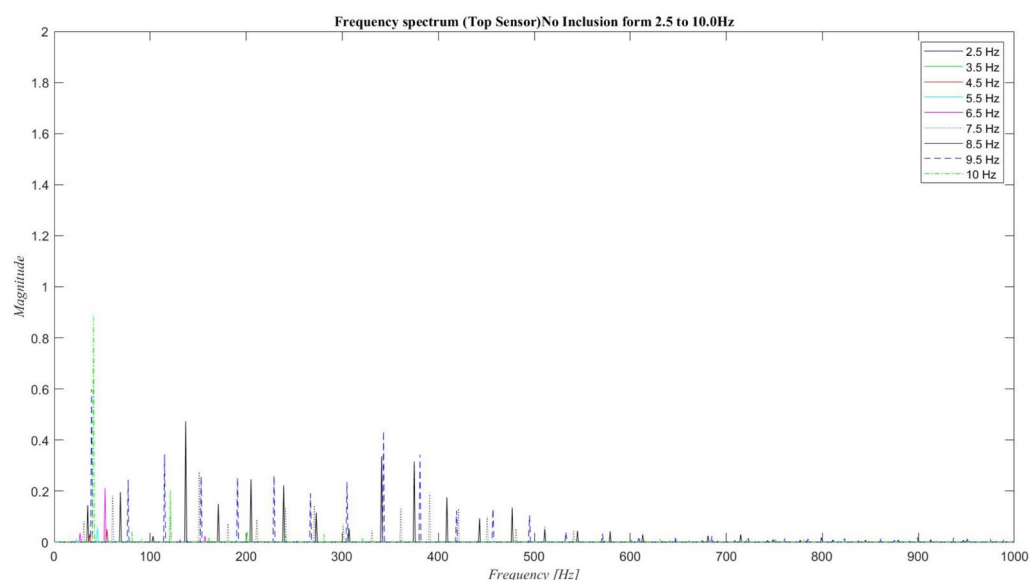
Espectros de respuesta forzada, acelerómetro superior:

- a) espectros individuales sin inclusión.
- b) espectros individuales con inclusión vacía.
- c) excitación de 2.5 a 10 Hz sin inclusión.
- d) excitación de 2.5 a 10 Hz con inclusión vacía.

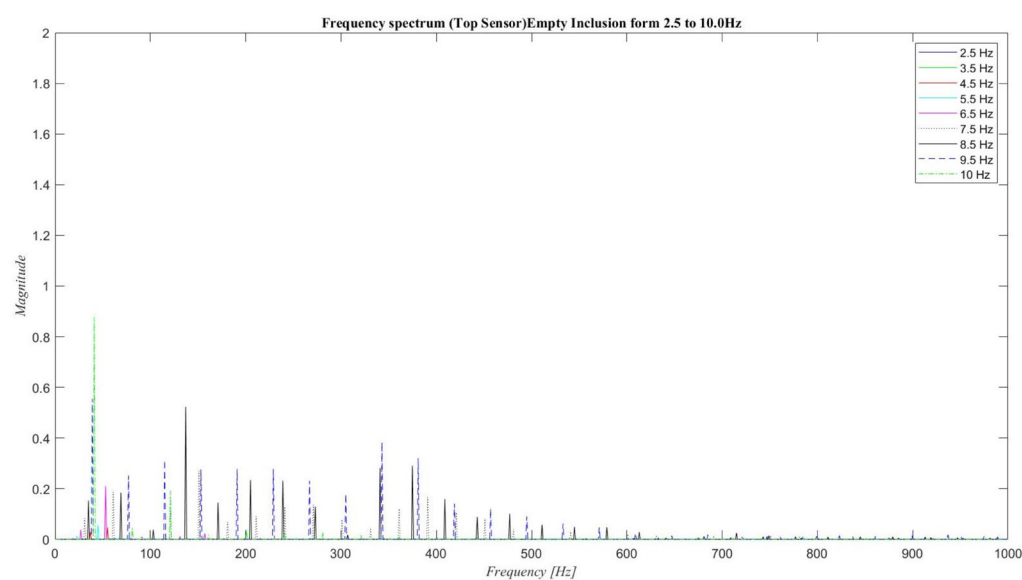
Fuente: elaboración propia.



La Figura 7a presenta los espectros registrados por el acelerómetro superior; el comportamiento y la forma de los armónicos se asemeja a los obtenidos por el acelerómetro inferior, salvo que los valores de las amplitudes se reducen debido al paso de las ondas a través de la muestra de suelo. Al igual que ocurrió en el caso anterior, los espectros de 7b y 7d generados por la muestra de suelo con inclusión vacía guardan una gran similitud con los espectros de 7a y 7c sin inclusión. Por último, también se observa un comportamiento similar entre los pares 6c-6d y 7c-7d.



c)



d)

Banco de pruebas con muestra de suelo e inclusión fluida de agua

Respuesta libre

La Figura 8 ilustra la respuesta libre de la muestra de suelo con inclusión de agua registrada durante un periodo de 5 segundos por los acelerómetros inferior (8a) y superior (8b). Al utilizar como fuente de excitación un impacto ascendente en la base del banco de pruebas, se generaron tres principales frecuencias naturales, alrededor de los 53, 167 y 282 Hz. Al comparar las amplitudes de estas frecuencias en el espectro del acelerómetro inferior (Figura 8a), se aprecia una ligera amplificación en del superior (Figura 8b).

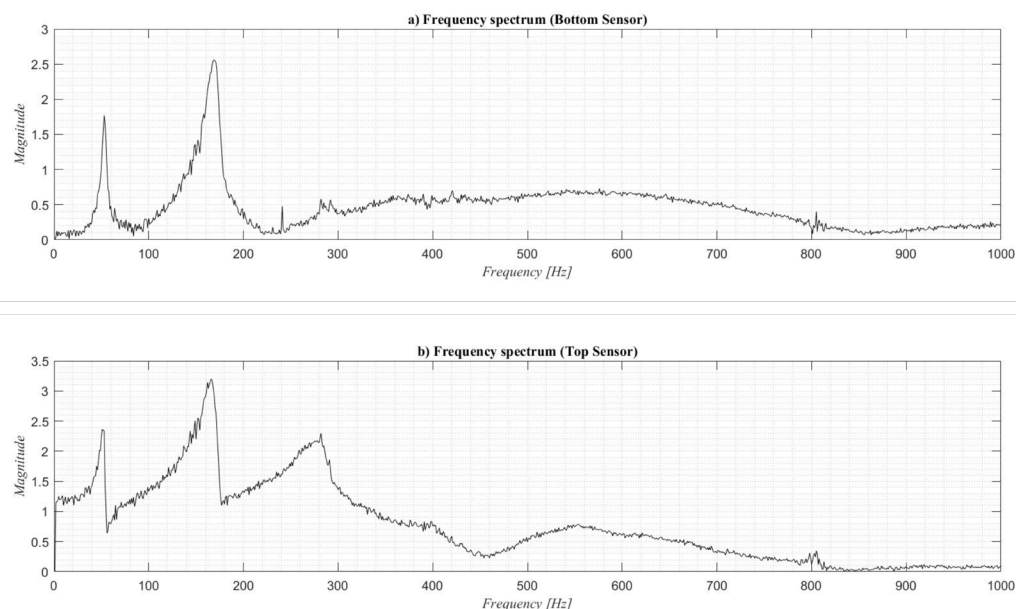


FIGURA 8.

Respuesta libre, muestra de suelo con inclusión de agua:
a) espectro registrado en el acelerómetro inferior.

b) espectro registrado en el acelerómetro superior.

Fuente: elaboración propia.



Respuesta forzada

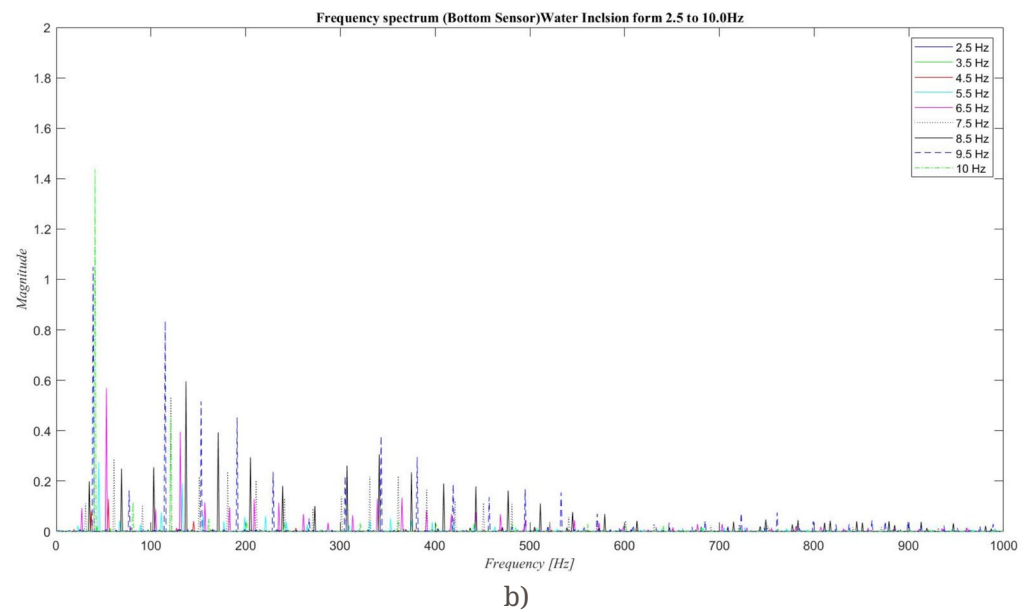
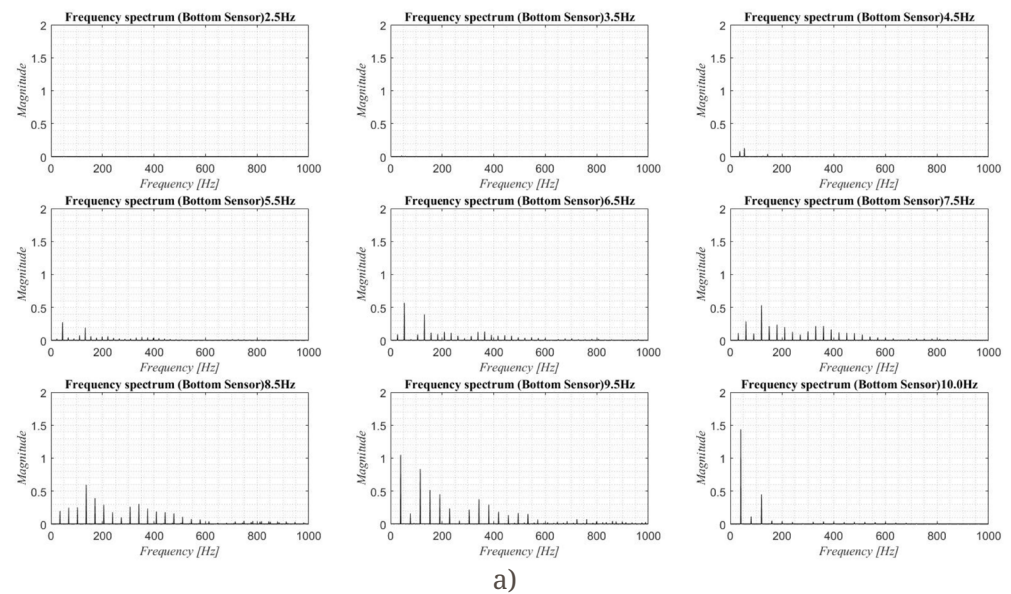
Las Figuras 9 y 10 muestran los espectros con amplitudes normalizadas a 270 unidades para los datos recogidos en un periodo de 5 segundos por los acelerómetros inferior y superior, utilizando las mismas frecuencias de excitación que los ensayos anteriores. A diferencia de los espectros de las Figuras 8a y 8b, se puede notar la aparición de armónicos con mayor densidad a partir de la excitación a 5.5 y hasta los 9.5 Hz; el valor máximo de amplitud en los 41 Hz se alcanza a la excitación de 10 Hz. En la Figura 9b se conjuntan los espectros individuales de la Figura 9a, enfatizando la forma y amplitudes del espectro.

La Figura 10a presenta los espectros recopilados por el acelerómetro superior. Aunque el comportamiento y la forma de los armónicos son similares a los obtenidos por el acelerómetro inferior, las amplitudes se reducen debido a la resistencia del material. La Figura 10b, que reúne todos los espectros individuales mostrados en 10a, asemeja la forma del espectro de la Figura 9b. A su vez, se puede observar a partir de los espectros generados, tanto por la inclusión vacía como por la inclusión de agua, que la densidad y la forma de los armónicos se mantienen similares en cada frecuencia de excitación, mientras que las amplitudes manifiestan ligeros aumentos con la inclusión de agua.

**FIGURA 9.**

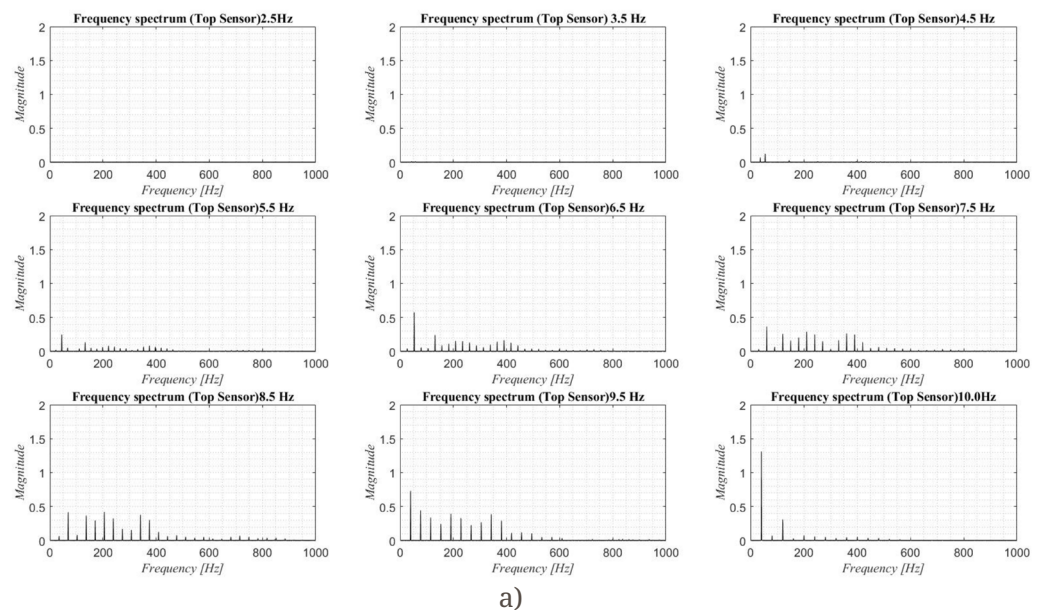
Espectros de respuesta forzada, muestra de suelo con inclusión de agua, acelerómetro inferior:
a) espectros individuales.
b) excitación de 2.5 a 10 Hz.

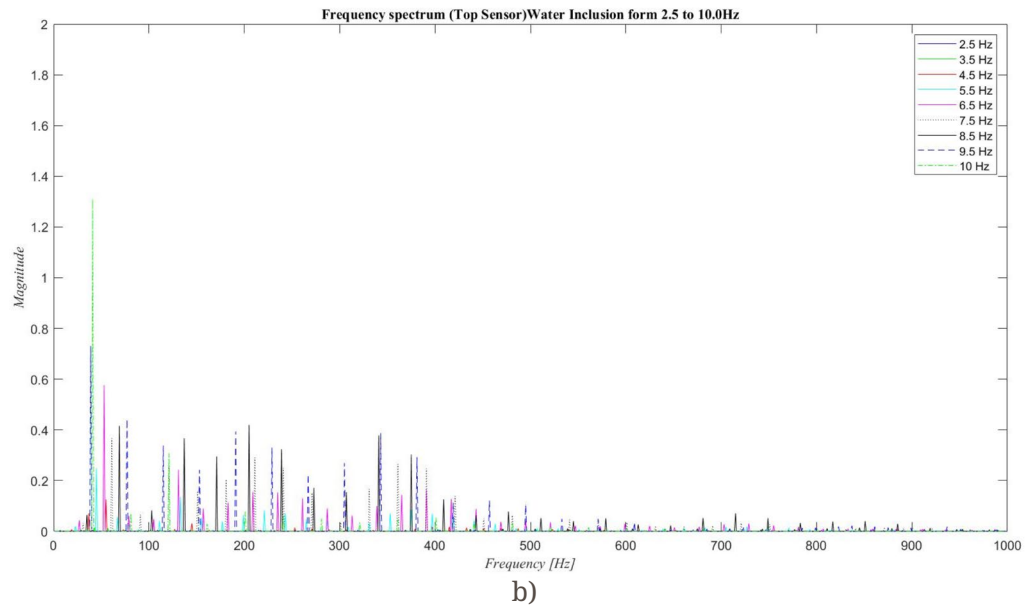
Fuente: elaboración propia.

**FIGURA 10.**

Espectros de respuesta forzada, muestra de suelo con inclusión de agua, acelerómetro superior:
a) espectros individuales.
b) excitación de 2.5 a 10 Hz.

Fuente: elaboración propia.



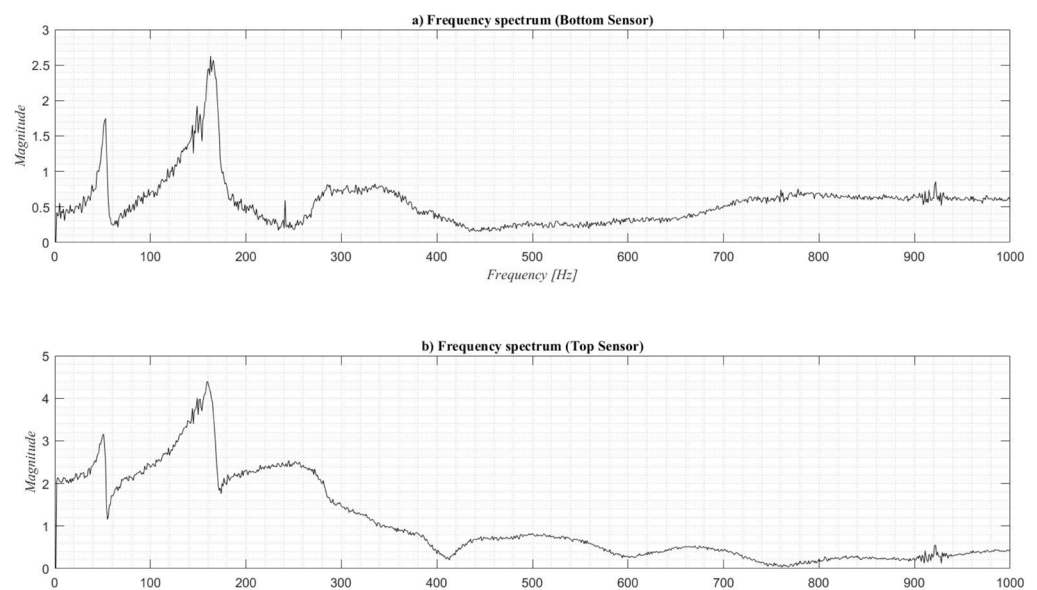


Banco de pruebas con muestra de suelo e inclusión fluida de petróleo

Respuesta libre

La Figura 11 presenta la respuesta libre de la muestra de suelo con inclusión de aceite captada durante un periodo de 5 segundos por los acelerómetros inferior (11a) y superior (11b). Para la respuesta libre de la Figura 11, se generan tres principales frecuencias naturales en ~ 53 , ~ 163 y ~ 241 Hz. Al comparar las amplitudes de estas magnitudes se pueden apreciar ampliificaciones de casi dos veces el valor inicial. Es de resaltar que los valores en amplitud para el caso de la inclusión de aceite son mayores respecto de la inclusión de agua (Figura 8), y aún más en cuanto a la muestra de suelo sin inclusión (Figura 5).

FIGURA 11.
 Respuesta libre generada por la muestra de suelo con inclusión de aceite:
 a) acelerómetro inferior.
 b) acelerómetro superior.
 Fuente: elaboración propia.





Respuesta forzada

Las Figuras 12 y 13 muestran los espectros con amplitudes normalizadas a 270 unidades recogidos en un periodo de 5 segundos por los acelerómetros. Los expuestos en 12a, correspondientes al acelerómetro inferior, presentan la forma y amplitudes para las frecuencias de excitación de 2.5 a 10 Hz con incrementos de 1 Hz. Al igual que en el caso de la inclusión de agua (Figura 9a y 9b), se observan armónicos con mayor densidad a partir de la frecuencia de excitación de 5.5 hasta los 9.5 Hz; de nuevo se alcanza el valor máximo de amplitud a la excitación de 10 Hz, en la frecuencia de ~31 Hz. En la Figura 12b se conjuntan los espectros individuales de la Figura 12a, enfatizando la forma y amplitudes del espectro.

FIGURA 12.

Espectros de respuesta forzada, muestra de suelo con inclusión de aceite, acelerómetro inferior:
a) espectros individuales.
b) excitación de 2.5 a 10 Hz.

Fuente: elaboración propia.

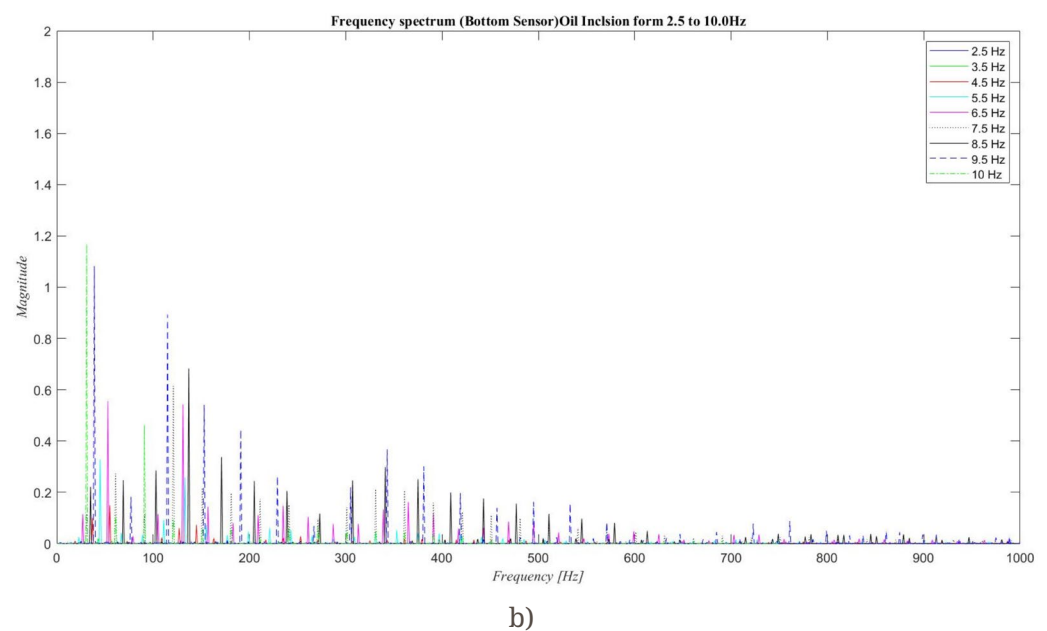
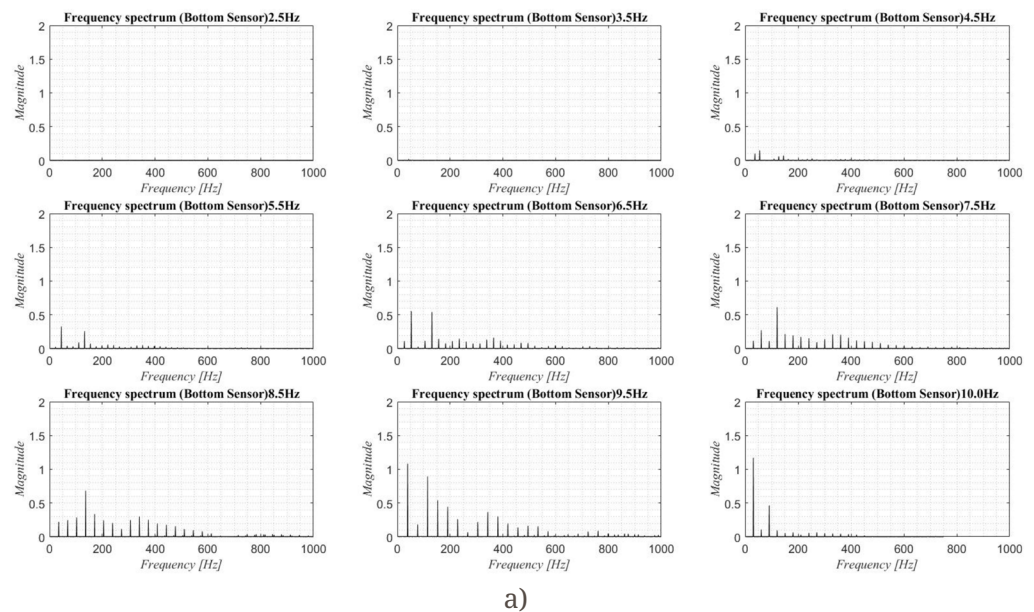


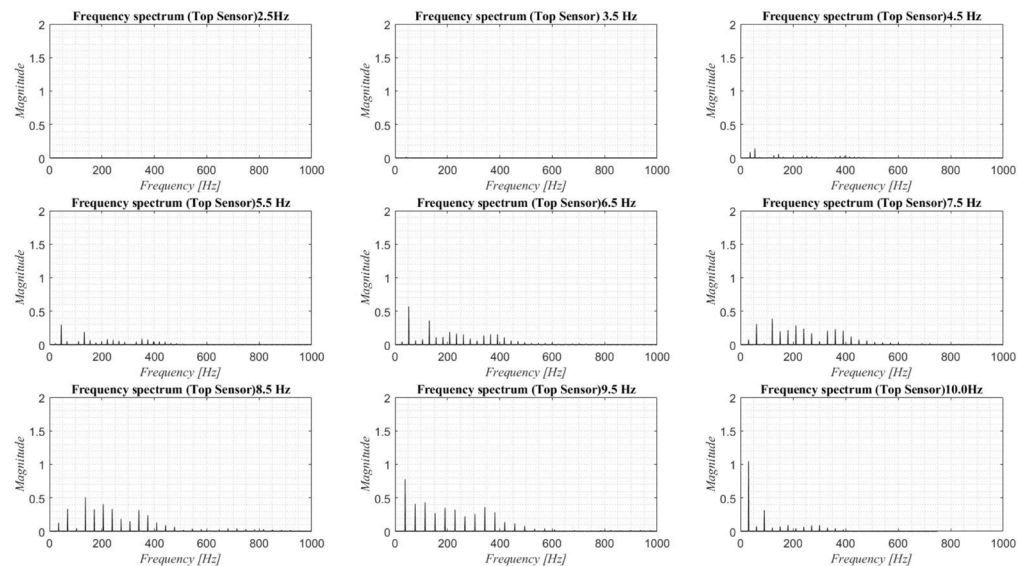

FIGURA 13.

Espectros de respuesta forzada, muestra de suelo con inclusión de aceite, acelerómetro superior:

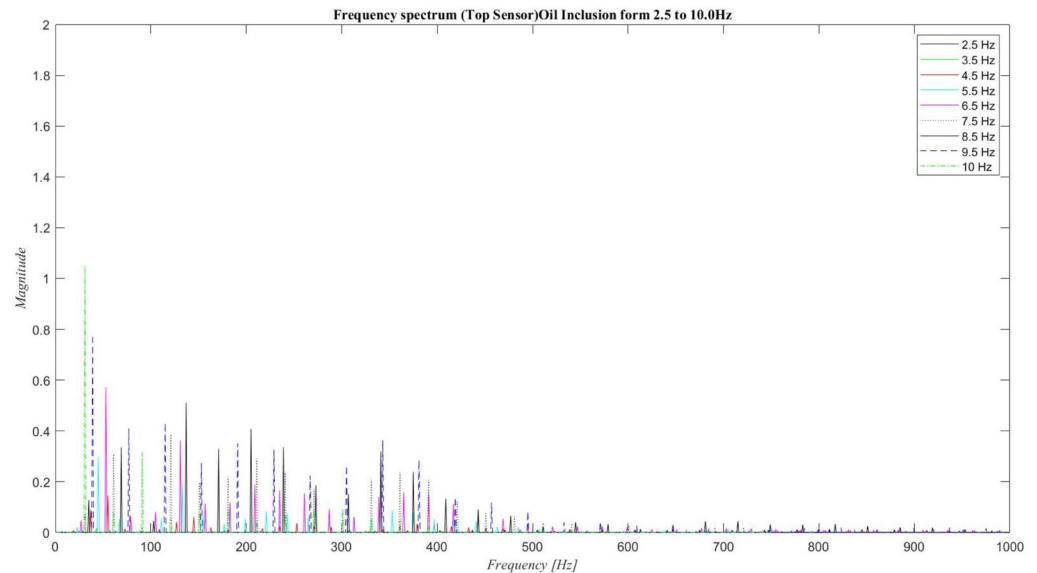
a) espectros individuales.

b) excitación de 2.5 a 10 Hz.

Fuente: elaboración propia.



a)



b)

Análisis de los ensayos

En este apartado se resaltan los aspectos más importantes del comportamiento de respuesta libre y forzada del banco de pruebas para los casos en que se encuentra vacío y en que contiene la muestra de suelo con y sin inclusiones (vacía, agua y acei-



te). Para el análisis de respuesta libre se presenta la Figura 14, mientras que la respuesta forzada se exhibe en la Figura 15. Ambas están conformadas por los datos recabados del acelerómetro superficial y expuestos en las secciones anteriores.

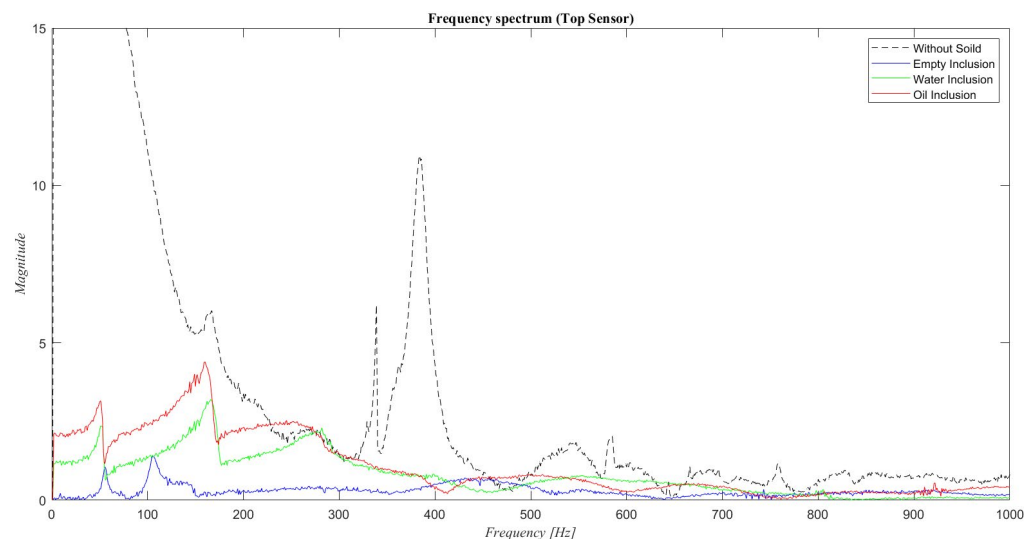
En la Figura 14, se grafica con línea discontinua el comportamiento del banco de pruebas vacío; se observa que las amplitudes máximas se generan a frecuencias mayores de 300 Hz. Este fenómeno es esencial para identificar las frecuencias críticas del banco de pruebas y evitarlas, pues podrían provocar que el banco entrara en resonancia, causando daños estructurales y comprometiendo los resultados del estudio. Por tal motivo, se aseguró que la excitación del banco de pruebas se llevara a cabo muy por debajo de esos valores. Asimismo, cabe reiterar que el valor tan elevado al inicio del espectro es atribuido al impacto del martillo de excitación.

Al comparar los ensayos, se observa que la respuesta de la inclusión vacía presenta las menores amplificaciones y que las inclusiones acuosa y oleosa responden de modo similar entre ellas; sin embargo, las amplificaciones derivadas del aceite son mayores que las del agua. Asimismo, si bien las amplitudes máximas para ambos fluidos se presentan en el rango de 50 a 180 Hz, al comienzo de sus espectros se aprecia una amplificación de alrededor de 1.2 unidades correspondientes a la inclusión de agua y aproximadamente 2 unidades para la de aceite. Dichas amplificaciones surgen de la interacción de las ondas de excitación con la muestra de suelo y la densidad del fluido, y contrastan con el comportamiento de la inclusión vacía, en cuyo espectro la amplificación inicial está ausente.

FIGURA 14.

Espectros de respuesta libre generados por el banco de pruebas vacío (línea discontinua) y con muestra de suelo e inclusiones.

Fuente: elaboración propia.

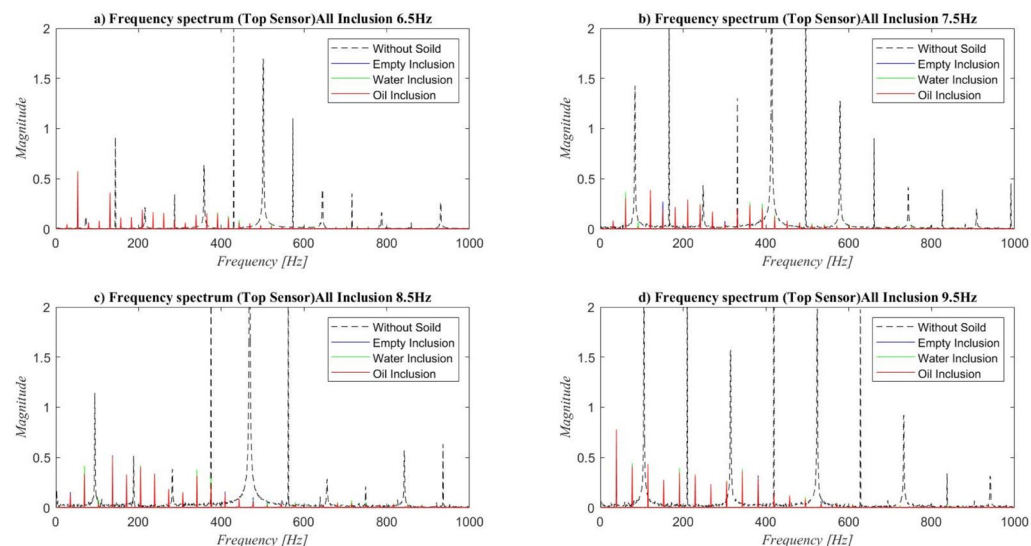


El análisis de respuestas forzadas (Figura 15) se centra en los valores de excitación de 6.5 a 9.5 Hz, debido a que en este rango se genera la mayor densidad de armónicos. Como se puede observar, las amplitudes máximas aparecen en la respuesta del banco de pruebas sin muestra de suelo a ~400 Hz, mientras que los valores


FIGURA 15.

Espectros de respuesta forzada generados por el banco de pruebas vacío (línea discontinua) y con muestra de suelo e inclusiones; vacía (línea continua azul), agua (línea continua verde) y aceite (línea continua roja) utilizando el acelerómetro superior.

Fuente: elaboración propia.

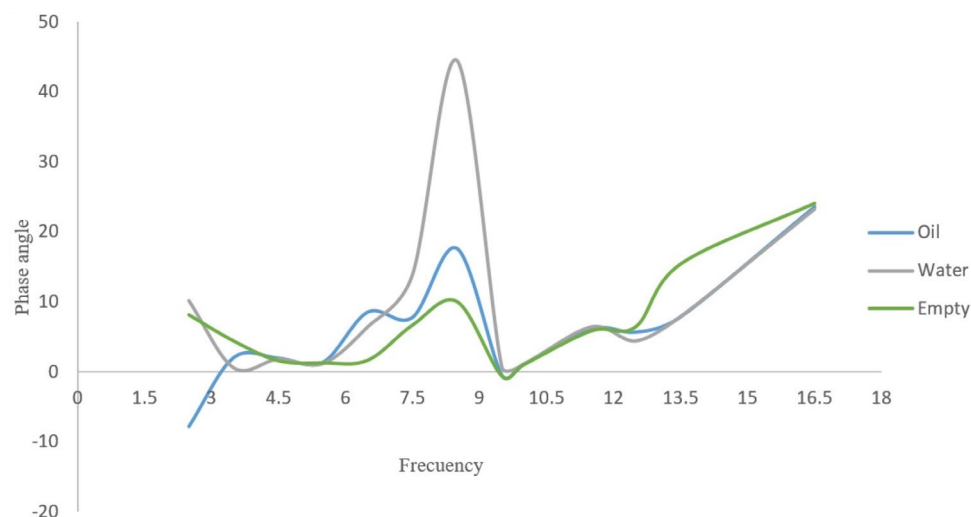


En último lugar, la Figura 16 ilustra el retardo de fase en función de los datos recopilados por los acelerómetros inferior y superior para los tres tipos de inclusión. Se evidencia que el mayor retardo significativo se presenta a la frecuencia de 8.5 Hz y corresponde a la inclusión acuosa.

FIGURA 16.

Retardo de fase para las inclusiones; vacía (línea azul), agua (línea gris) y aceite (línea verde).

Fuente: elaboración propia.



Conclusiones

El desarrollo experimental realizado muestra que los parámetros de interacción entre la fuente de excitación, la muestra de suelo y la presencia de una inclusión fluida determinan la manera en que se propagan y amplifican (o atenúan) las ondas



sísmicas. En cuanto a la velocidad de propagación, la respuesta libre de la muestra sin y con inclusiones (Figuras 5b, 8b y 11b) demuestra que el cambio de rigidez en el suelo ralentiza la onda. En relación con el comportamiento de amplitudes, la mayor magnitud para el suelo sin inclusión se produce a alrededor de los 100 Hz, mientras que con la inclusión de agua y aceite se alcanzan a alrededor de los 130 Hz. Por otro lado, tanto las inclusiones de agua como de aceite amplifican la señal inicial, pero la oleosa tiene un efecto más notorio. Para el caso del desfase (Figura 16), la inclusión acuosa presenta el mayor retardo en comparación con la inclusión vacía y de aceite.

La investigación propone contribuir al entendimiento de cómo las inclusiones fluidas afectan la propagación de ondas, en virtud de mejorar los diseños de edificaciones y otras infraestructuras para resistir de manera más efectiva los eventos telúricos. El modelo desarrollado tiene potencial como herramienta predictiva con el fin de evaluar la estabilidad de suelos propensos a movimientos tectónicos, especialmente aquellos con niveles elevados de saturación de agua subterránea. El estudio realizado puede ser de utilidad en la exploración petrolera, donde la presencia de fluidos en el subsuelo es común.

Para terminar, es necesario valorar que las pruebas de laboratorio están limitadas en cuanto a escala y complejidad, específicamente con las muestras de suelo, donde la heterogeneidad natural y las condiciones de saturación varían significativamente en campo, lo que puede afectar la generalización de los resultados. Del mismo modo, los modelos geométricos de las inclusiones simplifican ciertos aspectos del comportamiento de los fluidos y podrían reducir el poder predictivo del sistema. Con el fin de subsanar los aspectos anteriores, se puede llevar a cabo la experimentación de campo con el objetivo de validar y complementar los resultados de laboratorio, así como considerar una mayor variedad de condiciones geológicas y de saturación en pro de la aplicabilidad de los resultados a diferentes contextos.

Agradecimientos

Los autores expresan gratitud al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación, así como la facilidad para el uso de laboratorios e instrumentos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.



Referencias

- [1] D. G. Aggelis y T. Shiotani, "Experimental study of surface wave propagation in strongly heterogeneous media", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 122, núm. 5, p. 151-157, 2007, doi: 10.1121/1.2784151
- [2] G. O. Bogado y F. M. Francisca, "Shear wave propagation in residual soil-rigid inclusion mixtures", *Powder Technology*, vol. 343, pp. 595-598, 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2018.11.074
- [3] N. Agofack, S. Lozovyi y A. Bauer, "Effect of CO₂ on P- and S-wave velocities at seismic and ultrasonic frequencies", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 78, pp. 388-399, 2018. doi: 10.1016/j.ijggc.2018.09.010
- [4] U.S. Army Corps of Engineers (Washington, D.C., EUA, 1995), *Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations (EM 1110-1-1802)*. [En línea]. Disponible: [https://damtoolbox.org/wiki/Geophysical_Exploration_for_Engineering_and_Environmental_Investigations_\(EM_1110-1-1802\)](https://damtoolbox.org/wiki/Geophysical_Exploration_for_Engineering_and_Environmental_Investigations_(EM_1110-1-1802))
- [5] T. Cadoret, D. Marion y B. Zinszner "Influence of frequency and fluid distribution on elastic wave velocities in partially saturated limestones", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. B6, vol. 100, pp. 9789-9803, 1995, doi: 10.1029/95JB00757
- [6] R. Ciz, J. Toms y B. Gurevich, "Attenuation and dispersion of elastic waves in a poroelastic medium with spherical inclusions", en *Proceedings of the 3rd Biot Conference on Poromechanics*, Univ. Oklahoma, AA. Balkema, pp. 201-207, 2005. doi: 10.1201/NOE0415380416.ch32
- [7] J. E. White, "Computed seismic speeds and attenuation in rocks with partial gas saturation", *Geophysics*, vol. 40, pp. 224-232, 1975, doi: 10.1190/1.1440520
- [8] M. L. Batzle, D. H. Han y R. Hofmann, "Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity — Direct measurements", *Geophysics*, vol. 71, pp. 1-10, 2006, doi: 10.1190/1.2159053
- [9] M. B. Rapoport, L. I. Rapoport y V. I. Ryjkov, "Direct detection of oil and gas fields based on seismic inelasticity effect", *The Leading Edge*, vol. 23, pp. 276-278, 2004, doi: 10.1190/1.1690901
- [10] M. Chapman, E. Liu y X. Y. Li, "The influence of fluid sensitive dispersion and attenuation on AVO analysis", *Geophysical Journal International*, vol. 167, núm. 1, pp. 89-105, 2006, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02919.x
- [11] B. Quintal, S. M. Schmalholz y Y. Y. Podladchikov, "Impact of fluid saturation on the reflection coefficient of a poroelastic layer", *Geophysics*, vol. 76, pp. 1-12, 2011, doi: 10.1190/1.3553002
- [12] J. G. Rubino, D. R. Velis y M. D. Sacchi, "Numerical analysis of wave-induced fluid flow effects on seismic data: Application to monitoring of CO₂ storage at the Sleipner field", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 116, núm. B3, art. B03306, 2011, doi: 10.1029/2010JB007997
- [13] J. Paffenholz y H. Burkhardt, "Absorption and modulus measurements in the seismic frequency and strain range on partially saturated sedimentary rocks", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 94, núm. B7, pp. 9493-9507, 1989, doi: 10.1029/jb094ib07p09493
- [14] J. Behura, M. Batzle, R. Hofmann y J. Dorgan, "The shear properties of oil shales", *The Leading Edge*, vol. 28, pp. 850-855, 2009, doi: 10.1190/1.3167788
- [15] K. A. Belibassakis, G. Arnaud, V. Rey y J. Touboul, "Propagation and scattering of waves by dense arrays of impenetrable cylinders in a waveguide", *Wave Motion*, vol. 80, pp. 1-19, 2018, doi: 10.1016/j.wavemoti.2018.03.007
- [16] M. A. Biot, "General Theory of Three-Dimensional Consolidation", *Journal of Applied Physics*, vol. 12, pp. 155-164, 1941, doi: 10.1063/1.1712886
- [17] D. L. Johnson, "Theory of frequency dependent acoustics in patchy-saturated porous media", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, núm. 2, pp. 682-694, 2001, doi: 10.1121/1.1381021
- [18] S. R. Pride y J. G. Berryman, "Linear dynamics of double-porosity dual-permeability materials. I. Governing equations and acoustic attenuation", *Physical Review E*, vol. 68, art. 036603, 2003, doi: 10.1103/PhysRevE.68.036603
- [19] T. M. Müller y B. Gurevich, "One-dimensional random patchy saturation model for velocity and attenuation in porous rocks", *Geophysics*, vol. 69, pp. 1166-1172, 2004, doi: 10.1190/1.1801934
- [20] B. Vogelaar, D. Smeulders y J. Harris, "Exact expression for the effective acoustics of patchy-saturated rocks", *Geophysics*, vol. 75, núm. 4, pp. 87-96, 2010, doi: 10.1190/1.3463430
- [21] X. Liu, S. Greenhalgh y B. Zhou, "Scattering of plane transverse waves by spherical inclusions in a poroelastic medium", *Geophysical Journal International*, vol. 176, núm. 3, pp. 938-950, 2009, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.04026.x
- [22] S. Chapman, J. V. M. Borgomano, B. Quintal, S. M. Benson y J. Fortin, "Seismic Wave Attenuation and Dispersion Due to Partial Fluid Saturation: Direct Measurements and Numerical Simulations Based on X-ray CT", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 126, núm. 4, 2021, doi: 10.1029/2021JB021643
- [23] N. Tisato, K.T. Spikes, N. Saxena y R. Hofmann, "Scattering and Frequency Effects on Ultrasonic Velocities of Carbonates", *Journal of Geophysics Research: Solid Earth*, vol. 129, núm. 2, 2023, doi: 10.22541/essoar.167870433.38241636/v1



- [24] C. Sun, J. Fortin, G. Tang y S. Wang, "Prediction of dispersion and attenuation on the elastic wave velocities in partially saturated rock based on fluid distribution obtained from three-dimensional 3D micro-CT images", *Frontiers in Earth Science*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/feart.2023.1267522
- [25] H. S. Sutiyoso, S. K. Sahoo, L. J. North, T. A. Minshull, I.H. Falcon Suarez y A. I. Best, "Laboratory measurements of water saturation effects on the acoustic velocity and attenuation of sand packs in the 1–20 kHz frequency range", *Geophysical Prospecting*, vol. 72, núm. 9, pp. 3316–3337, 2024, doi: 10.1111/1365-2478.13607
- [26] R. Ma, J. Ba, M. Lebedev, B. Gurevich y Y. Sun, "Effect of pore fluid on ultrasonic S-wave attenuation in partially saturated tight rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 147, art. 104910, 2021, doi: 10.1016/j.ijrmms.2021.104910
- [27] M.L. Pérez Rea, "Predicción de propiedades mecánicas y reológicas de suelos usando teoría de percolación", Tesis de doctorado, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Estado de México, México, 2005.
- [28] PCB Piezotronics, "Products", 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.pcb.com>.
- [29] TIRA GmbH, "Vibration Test System", 2024. [En línea]. Disponible: https://www.tira-gmbh.de/fileadmin/inhalte/download/schwingprueftechnik/prospekte/EN/TIRA_selection_guide_01_2024.pdf
- [30] Analog Devices, "Products—ADXL103", 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.analog.com/en/products/adxl103.html>
- [31] National Instruments, "Support documentation—63xx Models", 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ni.com/en/support/documentation/cable-accessory-guide/daq-multifunction-i-o-cable-accessory-compatibility/main-page---daq-multifunction-i-o-cable-and-accessory-compatibility/63xx-models.html>



PERSPECTIVAS DE LA
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

¿Quieres publicar en esta revista?

¿Dudas o sugerencias? Escríbenos a:

? perspectivasci@uaq.mx

REVISTA INCLUIDA EN:



VISITA NUESTRO



Escucha de la voz de
los autores, entrevistas
y comentarios
relacionados a sus
artículos.

Disponible en:

MÁS REVISTAS UAQ EN:



revistas.uaq.mx



ingenieria.uaq.mx

EDICIÓN CUIDADA, DISEÑADA
Y MAQUETADA POR

**DESPACHO DE
PUBLICACIONES**

Visítanos y conoce
las publicaciones que la
FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO
tiene para ti:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA