

Trabajo Fin de Máster
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estudio de la validez de la modelización de suelos
estratificados mediante el método Vs30 para resolver
problemas dinámicos

Autor: Javier Naranjo Pérez

Tutor: Pedro Galvín Barrera

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Máster
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estudio de la validez de la modelización de suelos estratificados mediante el método Vs30 para resolver problemas dinámicos

Autor:

Javier Naranjo Pérez

Tutor:

D. Pedro Galvín Barrera
Profesor Titular de Universidad

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

A mi familia

*... y en lo de forzarles que estudien
esta o aquella ciencia no lo tengo por
acertado, aunque el persuadirles no será dañoso...*

Miguel de Cervantes en Don Quijote de la Mancha.

Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Introducción	1
1.2.1. Propagación de ondas de Rayleigh en suelos estratificados	2
1.3. Aproximación a la modelización del suelo en problemas dinámicos	4
1.3.1. Descripción del parámetro Vs30	6
1.4. Objetivos del trabajo	9
1.5. Estructura del trabajo	9
2. Caracterización de suelos aplicando el método directo de la rigidez	11
2.1. Propiedades de los suelos estudiados	12
2.1.1. Perfil litológico 1	12
2.1.2. Perfil litológico 2	12
2.1.3. Perfil litológico 3	13
2.2. Introducción al método directo de la rigidez para suelos estratificados	13
2.2.1. Ecuaciones de gobierno	14
2.2.2. Desplazamientos en una propagación bidimensional	17

2.2.3. Matrices de rigidez	18
2.3. Curvas de dispersión	19
2.3.1. Curvas de dispersión para los tres suelos	21
2.4. Curvas de atenuación	21
2.4.1. Curvas de atenuación para los tres suelos	22
2.5. Funciones de Green	23
2.5.1. Solicitación en dirección x	24
2.5.2. Solicitación en dirección y	24
2.5.3. Solicitación en dirección z	25
2.5.4. Resultados numéricos	25
2.6. Conclusiones	30
3. Interacción suelo-estructura mediante el análisis modal espectral	33
3.1. Introducción al análisis modal espectral	34
3.2. Espectros de pseudo-aceleraciones para los tres suelos	36
3.3. Descripción de la estructura	40
3.4. Resultados numéricos	42
3.5. Conclusiones	46
4. Conclusiones	51
A. Funciones de Green para sollicitación en dirección x e y	53
B. Espectros en pseudo-aceleraciones para sollicitación en dirección x e y	61
Bibliografía	69

Índice de figuras

1.1. Las componentes SV y SH de las ondas S [3].	2
1.2. Velocidad de fase para distintas longitudes de onda en un semiespacio homogéneo (izquierda) y un perfil estratificado (derecha) [7].	3
1.3. Curva de dispersión para una base elástica y para una base rígida [11].	4
1.4. Fenómeno de amplificación en terrenos con distintas capacidades [9].	8
2.1. Propagación de las ondas primarias y ondas secundarias [29].	15
2.2. Tipos de ondas superficiales propagándose: ondas de Rayleigh (arriba) y ondas de Love (abajo) [29]	20
2.3. Curvas de dispersión para todos los modos y para semiespacio homogéneo (línea gruesa) del (a) suelo 1, (b) suelo 2 y (c) suelo 3.	22
2.4. Curva de atenuación para todos los modos y para el semiespacio homogéneo (línea gruesa) del (a) suelo 1, (b) suelo 2 y (c) suelo 3.	23
2.5. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	26
2.6. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	27
2.7. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	28
2.8. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	29

2.9. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	30
2.10. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = zz$ (gris claro).	31
3.1. Espectro de pseudo-aceleraciones en superficie para el suelo 1. Suelo homogéneo (negro) y suelo estratificado (gris).	37
3.2. Espectro de pseudo-aceleraciones en superficie para el suelo 2. Suelo homogéneo (negro) y suelo estratificado (gris).	38
3.3. Espectro de pseudo-aceleraciones en superficie para el suelo 3. Suelo homogéneo (negro) y suelo estratificado (gris).	39
3.4. Geometría del aerogenerador. Adaptada de [32].	40
3.5. Modos de vibración fundamentales.	42
3.6. Tensiones máximas [MPa] en la estructura para una carga aplicada en dirección x (negro), dirección y (gris oscuro) y dirección z (gris claro). Comparación del modelo estratificado (línea sólida) y el modelo homogéneo (marcadores) del (a) suelo 1, (b) suelo 2 y (c) suelo 3.	44
3.7. Cortante máximo [kN] en la estructura para una carga aplicada en dirección x (negro), dirección y (gris oscuro) y dirección z (gris claro). Comparación del modelo estratificado (línea sólida) y el modelo homogéneo (marcadores) del (a) suelo 1, (b) suelo 2 y (c) suelo 3.	47
3.8. Cortante máximo [kN] en la estructura para una carga aplicada en dirección x (negro), dirección y (gris oscuro) y dirección z (gris claro). Comparación del modelo estratificado (línea sólida) y el modelo homogéneo (marcadores) con eje decimal del (a) suelo 1, (b) suelo 2 y (c) suelo 3.	48
A.1. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	53
A.2. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	54
A.3. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	54

A.4. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	55
A.5. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	55
A.6. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	56
A.7. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	56
A.8. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	57
A.9. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	57
A.10. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	58
A.11. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	58
A.12. Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).	59
B.1. Espectro de respuesta para carga actuando en dirección x en el suelo 1: (negro: homogéneo; gris: estratificado).	62
B.2. Espectro de respuesta para carga actuando en dirección y en el suelo 1: (negro: homogéneo; gris: estratificado).	63
B.3. Espectro de respuesta para carga actuando en dirección x en el suelo 2: (negro: homogéneo; gris: estratificado).	64
B.4. Espectro de respuesta para carga actuando en dirección y en el suelo 2: (negro: homogéneo; gris: estratificado).	65
B.5. Espectro de respuesta para carga actuando en dirección x en el suelo 3: (negro: homogéneo; gris: estratificado).	66

B.6. Espectro de respuesta para carga actuando en dirección y en el suelo 3:
(negro: homogéneo; gris: estratificado). 67

Índice de tablas

1.1. Clasificación del suelo en función del Vs30 según el NEHRP.	6
2.1. Propiedades del perfil litológico 1: modelo estratificado.	12
2.2. Propiedades del perfil litológico 1: modelo homogéneo.	12
2.4. Propiedades del perfil litológico 2: modelo homogéneo.	12
2.3. Propiedades del perfil litológico 2: modelo estratificado.	13
2.5. Propiedades del perfil litológico 3: modelo estratificado.	13
2.6. Propiedades del perfil litológico 3: modelo homogéneo.	13
3.1. Propiedades geométricas de la torre.	40
3.2. Propiedades del material del acero de la torre.	40
3.3. Frecuencias naturales del aerogenerador.	41
3.4. Tensiones máximas en la estructura para el suelo 1: modelo estratificado [MPa].	43
3.5. Tensiones máximas en la estructura para el suelo 1: modelo homogéneo [MPa].	43
3.6. Tensiones máximas en la estructura para el suelo 2: modelo estratificado [MPa].	43
3.7. Tensiones máximas en la estructura para el suelo 2: modelo homogéneo [MPa].	43
3.8. Tensiones máximas en la estructura para el suelo 3: modelo estratificado [MPa].	43
3.9. Tensiones máximas en la estructura para el suelo 3: modelo homogéneo [MPa].	43
3.10. Cortante vertical, V_z , para el suelo 1: modelo estratificado [kN].	45

3.11. Cortante vertical, V_z , para el suelo 1: modelo homogéneo [kN].	45
3.12. Cortante vertical, V_z , para el suelo 2: modelo estratificado [kN].	45
3.13. Cortante vertical, V_z , para el suelo 2: modelo homogéneo [kN].	46
3.14. Cortante vertical, V_z , para el suelo 3: modelo estratificado [kN].	46
3.15. Cortante vertical, V_z , para el suelo 3: modelo homogéneo [kN].	46

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El presente documento se enmarca bajo la normativa de Trabajo Fin de Máster de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla para la obtención de los créditos de la asignatura *Trabajo Fin de Máster* y así obtener el título de Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

El departamento adjudicador del Trabajo ha sido el Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, siendo el tutor D. Pedro Galvín Barrera.

1.2. Introducción

La modelización del terreno en problemas estructurales es un asunto que si bien se viene intentando abordar desde hace tiempo, hoy en día no está completamente resuelto debido a la complejidad que presenta. Centrando el estudio en las vibraciones del terreno, se pueden distinguir diversas fuentes que las producen. Entre las más cotidianas destacan el tráfico de vehículos en las carreteras, el tráfico de ferrocarriles y las maquinarias empleadas tanto en la construcción como en la actividad industrial, hasta llegar a los terremotos, cuya presencia es menos frecuente. Todas estas fuentes generan un campo de ondas que se propagan por el terreno, pudiendo producirse una interacción más o menos significativa con las infraestructuras cercanas.

La deformación se propaga como una onda sísmica por el interior del terreno. Esta propagación no es idéntica para todas las ondas ya que hay varios tipos de ondas y cada una está caracterizada por un movimiento diferente. La primera clasificación puede realizarse en dos grandes grupos: ondas internas o de volumen y ondas superficiales.

Dentro de las ondas internas existen, a efectos de la teoría de la elasticidad, dos tipos de ondas que se propagan en el terreno: ondas P y ondas S. Las ondas P (longitudinales, dilatacionales o primarias) son las que se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de propagación, produciendo compresiones y dilataciones en el medio. Las ondas S (de corte, transversales o secundarias) son aquéllas en las que las

partículas se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación. De las ondas P y S, las ondas P son más rápidas y por ello son registradas antes. Las ondas S no se propagan a través de líquidos ya que éstos no soportan los esfuerzos cortantes.

El desplazamiento de las partículas en el terreno durante el paso de las ondas S puede ser en cualquier dirección perpendicular a la de propagación. Sin embargo, a veces pueden desplazarse en una sola dirección y se dice que las ondas están polarizadas. Las dos componentes de las ondas transversales reciben el nombre de horizontalmente polarizadas (SH) cuando son paralelos a la superficie de referencia y verticalmente polarizadas (SV) cuando son perpendiculares a la superficie (Figura 1.1).

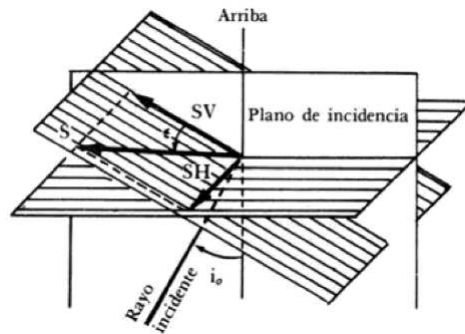


Figura 1.1: Las componentes SV y SH de las ondas S [3].

Las ondas superficiales viajan únicamente por la superficie ya que la amplitud a grandes profundidades es nula. Son causadas por la interferencia de las ondas internas y son más lentas que éstas. Un fenómeno que ocurre en las ondas superficiales es que se produce dispersión; es decir, las ondas de diferentes frecuencias viajan a velocidades diferentes. Dentro de este grupo se encuentran las ondas de Rayleigh y las ondas de Love.

Las ondas de Rayleigh, R, son aquellas en las que las partículas presentan un movimiento elíptico. A lo largo de este trabajo, conocer la propagación de estas ondas será de interés para ciertos cálculos por lo que se explica con mayor detalle más adelante en la sección 1.2.1.

Las ondas de Love, L, son ligeramente más rápidas que las ondas de Rayleigh pero no pueden darse en un semiespacio homogéneo, sino que requieren de al menos un estrato sobre un semiespacio. Esto se debe a que se producen como interferencia constructiva de las ondas SH solamente.

1.2.1. Propagación de ondas de Rayleigh en suelos estratificados

El conocimiento de la propagación de las ondas en suelos tiene diversas aplicaciones de interés: las soluciones se introducen en los análisis de interacción suelo-estructura; los campos de velocidad de onda se utilizan para conocer el perfil litológico del lugar en el caso de suelos estratificados y, por último, sirve para entender y predecir las vibraciones y las frecuencias provocadas por excitaciones naturales (sismos) o no naturales (tráfico rodado y de ferrocarriles).

La propia naturaleza del suelo, como cabía esperar, influye en el comportamiento de las ondas que lo atraviesa. Propiedades como el módulo de cizalladura, G , el coeficiente

de Poisson, ν o la densidad, ρ , repercuten en la velocidad con la que los frentes de onda son capaces de atravesar el terreno.

También es interesante analizar la diferencia que conlleva considerar un suelo como un semiespacio homogéneo o un perfil estratificado. En el primer caso, la velocidad de propagación o velocidad de fase es constante (se muestra independiente a la frecuencia) y sólo presenta un modo de vibración, mientras que en el medio heterogéneo, la velocidad de fase presenta una dependencia de la frecuencia o longitud de onda y la propagación es consecuencia de los distintos modos de vibración. Este fenómeno es conocido como dispersión y se representa en un gráfico frecuencia-velocidad de fase denominado curva de dispersión. Esta propiedad de los medios estratificados depende del perfil de velocidad de ondas de corte.

En la curva de dispersión de la Figura 1.2 se puede comprobar que el incremento de la frecuencia o el decremento de la longitud de onda hace que la velocidad de propagación tienda a la velocidad de propagación de un semiespacio elástico con las mismas propiedades dinámicas que el estrato superficial.

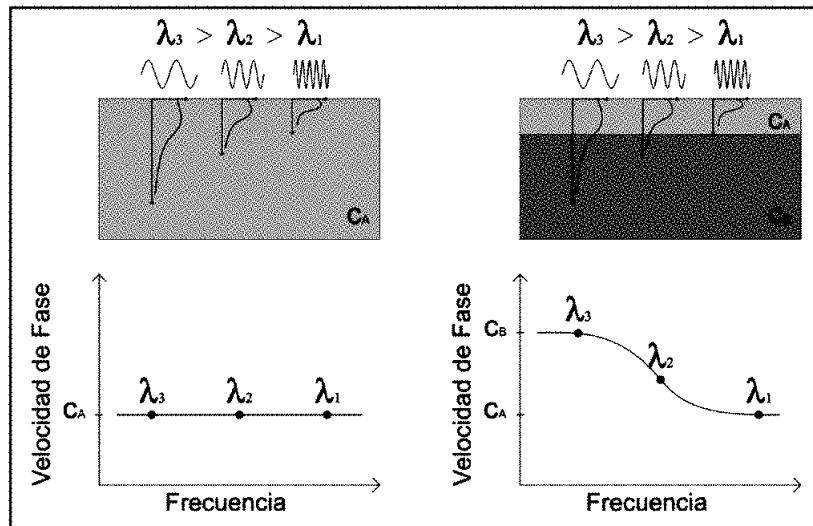


Figura 1.2: Velocidad de fase para distintas longitudes de onda en un semiespacio homogéneo (izquierda) y un perfil estratificado (derecha) [7].

No obstante, según se expone en [11], habría que hacer una distinción en función de las propiedades del semiespacio infinito sobre el que se apoyan los estratos, obsérvese la Figura 1.3. Si en un suelo estratificado los estratos se apoyan sobre un semiespacio elástico, la velocidad de propagación para el modo de vibración fundamental tiende al valor de la velocidad de propagación del semiespacio para una frecuencia $f = 0$ Hz (caso estático); para frecuencias altas la velocidad tiende a la de un semiespacio homogéneo con las características del estrato superficial. Cuando es sobre un semiespacio rígido, la curva de dispersión asume una velocidad infinita para una frecuencia $f = 0$ Hz y, al igual que en el caso anterior, para frecuencias altas tiende a la velocidad del semiespacio homogéneo con las propiedades del estrato superficial ya que la transmisión horizontal de energía se condensa en las capas superiores debido a que las longitudes de ondas son pequeñas y se completan en el estrato superior.

Se puede observar también en la Figura 1.2 que debido a que las ondas de Rayleigh

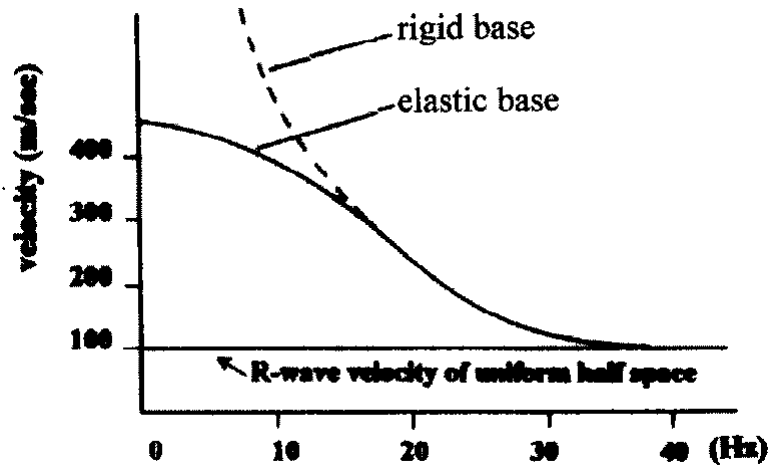


Figura 1.3: Curva de dispersión para una base elástica y para una base rígida [11].

movilizan el suelo hasta una profundidad dependiente de su longitud de onda, cuando ésta es pequeña, la velocidad de fase dependerá de las propiedades de la(s) capa(s) superficial(es), mientras que si la longitud de onda es mayor, la velocidad también dependerá de estratos más profundos.

No sólo a los efectos de dispersión están sujetas las ondas superficiales; existen dos fenómenos por los que también se ven afectadas. El primero es la atenuación de los desplazamientos horizontales y verticales debido a fenómenos de disipación mecánica, típica de materiales no elásticos, y ocasionada por disipación de energía por fenómenos de histéresis [11]. El segundo es la atenuación provocada por la disipación geométrica que se debe a la reducción de la energía de vibración con el aumento de la distancia a la fuente.

1.3. Aproximación a la modelización del suelo en problemas dinámicos

En el año 1903, Horace Lamb [18] publicó el primer artículo en el que se analizaba la propagación de vibraciones sobre la superficie de un semiespacio isotrópico y elástico producidas por una carga impulsiva puntual vertical.

A raíz de dicha publicación, diversos autores han tratado de encontrar la solución al problema, introduciendo nuevos parámetros y variables hasta llegar a los modelos actuales.

Las primeras aportaciones fueron de Pekeris en el año 1955 [22], Chao en 1960 [19] y Mooney en 1974 [26] los cuales obtuvieron la respuesta superficial ante una carga puntual de tipo escalón sobre la superficie de un semiespacio homogéneo con coeficiente de Poisson constante (Pekeris y Chao) y con coeficiente de Poisson arbitrario (Mooney).

En el año 1974, Johnson publicó la solución general tridimensional para cualquier coeficiente de Poisson y cualquier ubicación tanto de la fuente como del receptor, a modo de integrales temporales [24]. Hasta la fecha, esta solución de Johnson es la única solución analítica tridimensional en el dominio del tiempo.

A diferencia del semiespacio homogéneo, cuando se trata de un semiespacio estratificado horizontalmente, las primeras soluciones históricas no se obtuvieron en el dominio del tiempo. Para continuar, es necesario explicar una nueva magnitud denominada número de onda. El número de onda se define como el número de veces que oscila una onda en una unidad de longitud y se calcula como:

$$k = 1/\lambda \tag{1.1}$$

siendo λ la longitud de onda. Las soluciones para el estudio de un semiespacio estratificado horizontalmente se obtuvieron en el dominio frecuencia-número de onda.

Tal es el caso de la técnica analítica propuesta por Bouchon en 1981 [20]. Consiste en obtener las funciones de Green¹ ante una carga concentrada impulsiva considerando fuentes virtuales circulares centradas sobre la fuente original y distribuida en intervalos radiales iguales. Las fuentes virtuales representan las reflexiones de las ondas sobre las superficies de los estratos.

Aspel y Luco [25] presentaron en 1983 la respuesta tridimensional de un semiespacio estratificado para una fuente arbitraria. La formulación en el dominio de la frecuencia está basada en la representación de la respuesta completa en términos de integrales semi-infinitas respecto al número de onda después de realizar la transformada de Fourier.

Por último, uno de los métodos más empleados en la actualidad es el propuesto por Kausel y Roësset en 1981 [21], denominado método directo de la rigidez. Está basado en matrices de rigidez para resolver el problema tridimensional ante una fuente ubicada arbitrariamente en el semiespacio. Al igual que los modelos anteriores, la respuesta se obtiene en el dominio frecuencia-número de onda.

La solución en este dominio requiere de una doble integración, en la frecuencia y en el número de onda, lo que conlleva la necesidad de realizarla numéricamente mediante técnicas de aproximación. Durante más de una década, se manejaron las soluciones anteriores hasta que el propio Kausel en el año 1994 desarrolló el Thin Layer Method, TLM [23], que permite obtener las funciones de Green en el dominio del tiempo.

Este método es similar al método directo de la rigidez pero la matriz a la que se llega es más sencilla computacionalmente y mediante superposición modal en frecuencia se obtienen las funciones de Green, tras realizar un problema de autovalores y autovectores. De este modo se obtiene la respuesta en el dominio tiempo-número de onda por lo que sólo se requiere una integración sobre el número de onda. Entre otras ventajas, el TLM es más eficiente que el método directo de la rigidez cuando el número de capas es mayor y las propiedades varían continuamente en función de la profundidad.

Hasta este punto se ha realizado un recorrido histórico en relación a las distintas metodologías de cálculo empleadas tanto para los suelos homogéneos como los suelos estratificados. Igualmente importante es reparar en los parámetros utilizados para caracterizar los modelos. Es por ello que a continuación se va a describir el parámetro Vs30, que se emplea para modelizar los suelos estratificados como semiespacios homogéneos.

¹Las funciones de Green se definen como los desplazamientos provocados por una carga unitaria.

1.3.1. Descripción del parámetro Vs30

La clasificación de los suelos de un emplazamiento se lleva a cabo por medio de la interpretación de toda aquella información que exista de forma precedente como pueden ser los mapas geológicos y/o geotécnicos y las visitas a campo. No obstante, esta clasificación no logra determinar la profundidad del suelo que se identifica en la superficie.

Para paliar esta situación existen métodos de reconocimiento del terreno que permiten conocer la potencia de los diferentes estratos; en este contexto se encuentran los sondeos, las calicatas, ensayos de penetración, etc. Sin embargo, este apartado no se basa en el análisis de estos métodos sino en el método de clasificación que consiste en la determinación del parámetro Vs30.

Actualmente es uno de los parámetros más importantes a nivel mundial para la clasificación de los suelos y se corresponde al promedio de las velocidades de ondas de corte de los estratos que se localizan desde la superficie hasta 30 m de profundidad. La decisión de considerar únicamente los 30 m más superficiales obedece a que el suelo que se encuentra hasta ese límite es el que afecta en mayor medida al comportamiento de las estructuras cercanas. La determinación del parámetro Vs30 se realiza con la ecuación 1.2, siendo d_i el espesor de cada capa de suelo del perfil hasta alcanzar los 30 m de profundidad, V_{si} la velocidad de onda de corte de cada capa i en m/s y N el número de capas hasta alcanzar los 30 m.

$$Vs30 = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (1.2)$$

La importancia de este parámetro conlleva que las normas y códigos actuales lo empleen como un índice para la definición de las condiciones geológicas para la clasificación del lugar. Tal es el caso del *National Earthquake Hazard Reduction Program* que define las 5 clases definidas en la Tabla 1.1 o del Eurocódigo 8 [5].

Clase	Vs30 [m/s]	Características
A	$Vs30 > 1500$	Roca dura
B	$1500 > Vs30 > 760$	Roca
C	$760 > Vs30 > 360$	Suelo muy denso y roca suave
D	$360 > Vs30 > 180$	Suelo firme
E	$180 > Vs30$	Suelo débil

Tabla 1.1: Clasificación del suelo en función del Vs30 según el NEHRP.

A pesar de la importancia del parámetro en las investigaciones más recientes, las técnicas geofísicas requeridas para conocer este parámetro siguen siendo sumamente costosas, además de la complejidad técnica que presenta.

La ecuación 1.2 muestra la necesidad de conocer la velocidad de las ondas de corte, V_{si} , de los estratos que constituyen el perfil litológico. Las técnicas FK (frequency-wavenumber) y SPAC (spacial autocorrelation) permiten determinar perfiles de suelo, profundidad frente

a V_s , empleando las vibraciones ambientales (pasivas) como fuentes, por lo que no resultan ser ni invasivas ni destructivas [1]. Además de éstas, hay otras técnicas que emplean fuentes activas provocadas por una carga dinámica controlada que genera una perturbación en superficie y se registra en geófonos, como es el caso de la técnica SASW. Esta perturbación se genera con un mazo o martillo, o mediante mecanismos más sofisticados que permitan un mayor control.

Por el contrario, también existen métodos invasivos como el conocido ensayo SCPT (Seismic Cone Penetration Test), basado en el ensayo CPT al que se le colocan dos receptores (geófonos o acelerómetros), el Down-hole o el Suspension PS Logger. De manera resumida se hará una introducción a los métodos SASW, FK, SPAC y Suspension PS Logger.

La técnica SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) desarrollada por Nazarian en 1984 [31] es no invasiva y permite determinar el perfil de las velocidades de las ondas de corte. Se basa en las propiedades de dispersión de las ondas superficiales propagándose por un semiespacio estratificado. Consta de tres etapas. En la primera se realiza un ensayo in situ para determinar la curva de dispersión experimental. Las ondas se generan mediante una maza cayendo, un martillo o un sistema hidráulico. La respuesta se mide en diferentes receptores que permite determinar la velocidad de fase. En la segunda etapa se realiza un problema de inversión donde se identifica el perfil del suelo. En la tercera etapa, para minimizar el error, se determina una curva de dispersión teórica y se ajusta a la experimental mediante un algoritmo de optimización local.

La técnica FK, supone que los frentes de ondas originados atraviesan un conjunto de sensores que se ubican en la superficie del suelo separados una cierta distancia entre sí. Considerando una onda de frecuencia f con una dirección de propagación y una velocidad conocida, los tiempos de llegada son calculados en todos los sensores según su ubicación. La respuesta del conjunto es calculada sumando las señales transformadas al dominio de la frecuencia. Si las ondas viajan con velocidad y dirección específica, todas las contribuciones se acumularán constructivamente, resultando un conjunto de mayor energía. Posteriormente se construye un espectro de energía asociado a las respuestas del conjunto de sensores que permite conocer la curva de dispersión que es invertida para hallar la velocidad de las ondas de corte.

El método de la autocorrelación espacial (SPAC) asume que el campo de ondas que componen las vibraciones ambientales es un proceso estacionario, tanto en el tiempo como en el espacio. En el caso de una onda dispersiva, el coeficiente de autocorrelación es función de la velocidad de fase y de la longitud total del conjunto de sensores ubicados en la superficie. Para determinar V_s se lleva a cabo la inversión de las curvas de dispersión o de autocorrelación [7].

El cuarto método para determinar la velocidad de las ondas de corte es el que desarrolló en la década de los setenta la Corporación OYO de Japón, *Suspension PS Logger* [5]. Grosso modo, consiste en una sonda de 7 m de longitud que contiene una fuente y dos receptores que es introducida en una perforación hasta la profundidad especificada donde la fuente genera una onda de presión en el fluido, la cual es convertida a ondas sísmicas P y S en la pared de la perforación. En cada receptor las ondas son revertidas a ondas de presión y medidas por los geófonos, los cuales envían los datos al grabador situado en superficie. El tiempo transcurrido entre las llegadas de las ondas a los receptores determina la velocidad media de 1 m de altura del suelo situado alrededor de la perforación.

Existen muchos estudios actuales acerca de la determinación del parámetro V_{s30} . En la Referencia [1] se determina dicho parámetro en la Bahía de Cádiz aplicando dos técnicas explicadas anteriormente, el método FK y el SPAC. En la Referencia [6] se emplean también las vibraciones ambientales y el método SWPM (Stress Wave Propagation Methods) para determinar el perfil del suelo en Taiwan. El método SWPM combina la curva de dispersión del método SASW y la función de transferencia del método IR (Impulse Response). En la Referencia [4] se determina el parámetro V_{s30} mediante la técnica MASW. El método SASW sólo presenta un par de receptores lo que conlleva varias configuraciones distintas para realizar el ensayo y durante un tiempo alto mientras se registran todos los datos necesarios. El método MASW (Multi-channel Analysis of Surface Wave) se desarrolla para vencer esta limitación y consta de múltiples receptores. Esto le permite obtener un perfil bidimensional como combinación de varios perfiles de velocidad de ondas de corte unidimensional.

A pesar de su adopción casi universal como un parámetro clave en la clasificación sísmica, el parámetro V_{s30} no parece ser del todo adecuado en fenómenos de amplificación sísmica (denominado también *efecto de sitio*). La amplificación sísmica (Figura 1.4) consiste en la modificación de la señal sísmica debida a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas. Esta amplificación puede ser de varios órdenes de magnitud.

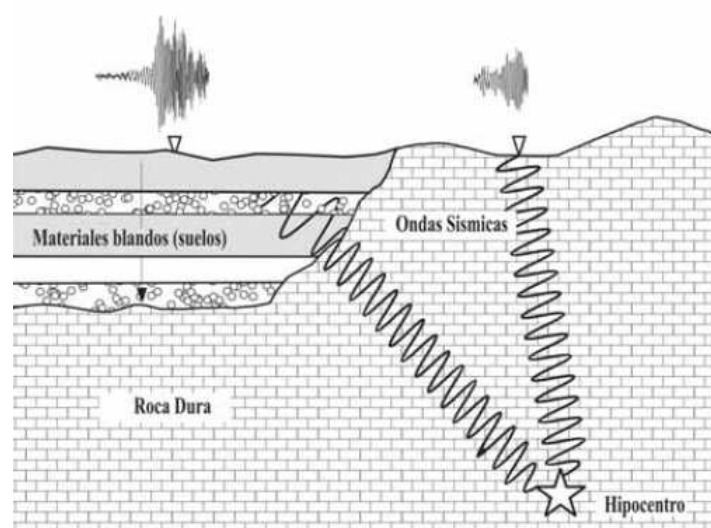


Figura 1.4: Fenómeno de amplificación en terrenos con distintas capacidades [9].

El hecho de que el parámetro V_{s30} no dé los mismos resultados en casos de amplificación sísmica se debe a que es un fenómeno demasiado complejo como para estar relacionado con el valor de la velocidad de las ondas de corte de solo los primeros 30 m. Además, el parámetro V_{s30} , al ser una media, suaviza las diferencias entre los distintos estratos y como la amplificación es mayor cuanto mayor sea la diferencia entre los materiales, considerarlo repercute en una disminución de los efectos de amplificación, lo que aleja el modelo de los datos reales [10, 8].

Estas líneas han servido para, brevemente, exponer la importancia de conocer el parámetro V_{s30} a la hora de realizar una clasificación del terreno en estudio. A lo largo de este trabajo, esta parámetro será esencial para caracterizar las propiedades del suelo homogéneo y dilucidar su papel en la comparación del comportamiento de éste con el suelo real estratificado.

1.4. Objetivos del trabajo

Modelizar un suelo estratificado horizontalmente como un semiespacio homogéneo presenta muchas ventajas computacionales, por lo que la investigación en este ámbito se encuentra actualmente en desarrollo de manera que se pueda encontrar un método válido y eficiente que compense realizar los cálculos.

El propósito de este trabajo es evaluar la validez de modelizar un suelo estratificado como un semiespacio homogéneo mediante el método Vs30, que se define como la velocidad media de las ondas de corte de los 30 m más superficiales. Para ello se va a realizar una serie de cálculos de los dos modelos para tres tipos de suelos distintos y comparar los resultados.

Entre esos cálculos se encuentran las funciones de Green, las curvas de dispersión y de atenuación de las ondas de Rayleigh mediante el método directo de la rigidez. Además se obtendrán los espectros de respuesta para las tres direcciones espaciales de la carga, los cuales solicitarán una estructura. Como resultados se analizarán las tensiones y los esfuerzos para los dos modelos de suelo y se compararán para ver la validez de emplear el método Vs30.

1.5. Estructura del trabajo

El trabajo se divide en dos partes diferenciadas del estudio de la propagación de ondas. La primera parte está enfocada a las vibraciones producidas por las ondas que se propagan en tres suelos hipotéticos. La segunda parte se centra en la interacción suelo-estructura para analizar los efectos que pueden ocasionar las ondas en una estructura cercana.

En base a esto, el trabajo está dividido en cuatro capítulos que constituyen el cuerpo del texto. Finalmente se incluyen dos apéndices que complementan los resultados analizados en el texto. Detalladamente, la estructura del texto es la que se indica a continuación.

El **capítulo 1** ha introducido el trabajo desarrollando la evolución histórica de las investigaciones y analizando la tendencia actual de los estudios. Además, se especifican los objetivos del trabajo y la organización del texto.

El **capítulo 2** explica el método directo de la rigidez para suelos estratificados horizontalmente. Este método se emplea para calcular las funciones de Green en el dominio frecuencia-número de onda y para determinar las curvas de dispersión y atenuación teóricas en tres tipos de suelo propuestos.

El **capítulo 3** analiza la interacción suelo-estructura. Para ello, se emplea el método de respuesta espectral para el que se han calculado los espectros para distintas separaciones entre la fuente y la estructura. Una vez obtenidos los espectros, se calculan las tensiones máximas y los esfuerzos máximos en un aerogenerador eólico.

El **capítulo 4** resume las conclusiones más importantes del trabajo.

En los **apéndices A y B** se incluyen todos los resultados obtenidos que complementan

aquéllos comentados en el texto, referentes a las funciones de Green y a los espectros de respuesta respectivamente para los tres tipos de suelos.

Capítulo 2

Caracterización de suelos aplicando el método directo de la rigidez

El presente capítulo tiene como objetivo realizar un análisis de los resultados obtenidos para dos distintos modelos de un mismo suelo. Como se explicó en la sección 1.2.1, existen diferencias en el comportamiento de un suelo estratificado horizontalmente frente al comportamiento que muestra un semiespacio homogéneo.

Bajo esta premisa, se realizará un análisis de 3 perfiles litológicos mediante los dos modelos citados, donde será importante conocer el valor del parámetro V_{s30} calculado mediante la ecuación 1.2 a partir de los datos del suelo real para caracterizar las propiedades dinámicas del semiespacio homogéneo.

El capítulo se estructura como se indica a continuación. En la sección 2.1 se describen los tres tipos de suelos que se van a estudiar. Las propiedades dinámicas varían de uno a otro mientras que la densidad y el coeficiente de amortiguamiento asociado tanto a las ondas P como a las ondas S se han mantenido constante para no realizar un estudio paramétrico tan profundo.

En la sección 2.2 se describe el método directo de la rigidez en medios estratificados horizontalmente. Este método será el empleado en la sección 2.5 donde se calcularán las funciones de Green. Tras realizar los cálculos, se representarán los resultados frente a la frecuencia para hacer una comparación entre los dos modelos distintos para cada tipo de suelo.

En la sección 2.3 se obtendrá la curva de dispersión teórica de los tres suelos mediante el método directo de la rigidez.

En la sección 2.4 se obtendrá, también por el método directo de la rigidez, la curva de atenuación teórica de los tres suelos.

2.1. Propiedades de los suelos estudiados

Con objeto de extraer conclusiones de más de un estudio, se presentan 3 litografías distintas donde únicamente se varían las propiedades dinámicas: la velocidad de las ondas de corte y la velocidad de las ondas longitudinales, C_s y C_p respectivamente. La geometría se mantiene común, los 3 suelos están constituidos por una capa homogénea de 4 m de espesor y el terreno subyacente a la misma es un semiespacio homogéneo hasta llegar a los 30 m de profundidad. La densidad y el coeficiente de amortiguamiento asociado tanto a las ondas P como a las ondas S son: $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ y $D = 0,05$.

La velocidad de las ondas longitudinales, C_p , se calcula como el doble de la velocidad de las ondas de corte ya que se considera un coeficiente de Poisson de $\nu = 1/3$. Por otro lado, las propiedades del semiespacio infinito que se encuentra subyacente al primer estrato se han tomado como las del doble del estrato superior. De esta manera, se evita que una capa más rígida se encuentre apoyada sobre una capa más flexible, lo cual conlleva ciertos inconvenientes en el cálculo como se verá en la sección 2.3.

2.1.1. Perfil litológico 1

En la Tabla 2.1 se muestran las propiedades del primer suelo. Tras aplicar la ecuación 1.2 se obtiene la velocidad de las ondas de corte del suelo homogéneo y, siguiendo la misma aproximación que anteriormente, la velocidad de las ondas longitudinales se estima el doble de las de corte. Estas propiedades del suelo homogéneo se indican en la Tabla 2.2.

	C_s [m/s]	C_p [m/s]	D [-]	ρ [kg/m ³]
Estrato 1	150	300	0.05	1800
Semiespacio	300	600	0.05	1800

Tabla 2.1: Propiedades del perfil litológico 1: modelo estratificado.

C_s [m/s]	C_p [m/s]	D [-]	ρ [kg/m ³]
264.71	529.41	0.05	1800

Tabla 2.2: Propiedades del perfil litológico 1: modelo homogéneo.

2.1.2. Perfil litológico 2

En la Tabla 2.3 se muestran las propiedades del segundo suelo. Tras aplicar la ecuación 1.2 se obtiene la velocidad de las ondas de corte del suelo homogéneo y la velocidad de las ondas longitudinales se estima el doble de las de corte. Estas propiedades del suelo homogéneo se indican en la Tabla 2.4.

C_s [m/s]	C_p [m/s]	D [-]	ρ [kg/m ³]
441.18	882.35	0.05	1800

Tabla 2.4: Propiedades del perfil litológico 2: modelo homogéneo.

	C_s [m/s]	C_p [m/s]	D [-]	ρ [kg/m ³]
Estrato 1	250	500	0.05	1800
Semiespacio	500	1000	0.05	1800

Tabla 2.3: Propiedades del perfil litológico 2: modelo estratificado.

2.1.3. Perfil litológico 3

En la Tabla 2.5 se muestran las propiedades del tercer suelo. Tras aplicar la ecuación 1.2 se obtiene la velocidad de las ondas de corte del suelo homogéneo y la velocidad de las ondas longitudinales se estima el doble de las de corte. Estas propiedades del suelo homogéneo se indican en la Tabla 2.6.

	C_s [m/s]	C_p [m/s]	D [-]	ρ [kg/m ³]
Estrato 1	350	700	0.05	1800
Semiespacio	700	1400	0.05	1800

Tabla 2.5: Propiedades del perfil litológico 3: modelo estratificado.

C_s [m/s]	C_p [m/s]	D [-]	ρ [kg/m ³]
617.65	1235.30	0.05	1800

Tabla 2.6: Propiedades del perfil litológico 3: modelo homogéneo.

2.2. Introducción al método directo de la rigidez para suelos estratificados

El suelo se modela como un semiespacio elástico estratificado horizontalmente, donde las propiedades dinámicas varían únicamente en la dirección vertical. El hecho de asumir estratos horizontales se debe a que la formación de una capa de suelo obedece a fenómenos de gran escala como son la erosión, el transporte de sedimentos y los procesos climáticos.

En el presente apartado se va a realizar una introducción al método directo de la rigidez, siguiendo la metodología explicada en la tesis de Mattias Schevenels [27], quien también desarrolló los programas de Matlab empleados para realizar los cálculos. El método directo de la rigidez se emplea en este trabajo para modelizar la propagación de ondas en medios estratificados. Se basa en el método de la matriz de transferencia de Haskell-Thompson que posteriormente Kausel y Roësset reestructuraron en una formulación de matrices de rigidez.

El método directo de la rigidez se basa en una transformación del dominio tiempo-espacio al dominio frecuencia-número de onda. En éste último, es posible obtener soluciones exactas a las ecuaciones de Navier que gobiernan el problema de propagación de ondas en capas homogéneas o semiespacios homogéneos. De este modo se obtienen matrices de rigidez elementales para los elementos de las capas homogéneas y del semiespacio. La matriz de rigidez de un suelo estratificado se obtiene mediante el ensamblaje de las matrices elementales.

En el presente capítulo, se emplea el método directo de la rigidez para calcular las funciones de Green, la curva de dispersión teórica y la curva de atenuación.

2.2.1. Ecuaciones de gobierno

A continuación se desarrollarán las bases del método, presentando las ecuaciones que gobiernan el problema en coordenadas cartesianas las cuales se emplean para resolver el problema bidimensional de la propagación de ondas.

En un sistema cartesiano de referencia, las componentes del vector de desplazamientos en un medio elástico en una posición \mathbf{x} y en un tiempo t se expresan como $u_i(\mathbf{x}, t)$. Las componentes ϵ_{ij} del tensor de deformaciones están relacionadas con los desplazamientos mediante:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{j,i} + u_{i,j}) \quad (2.1)$$

Para un material elástico la ley de Hooke relaciona el tensor de tensiones σ_{ij} con el tensor de pequeñas deformaciones ϵ_{kl} :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (2.2)$$

donde C_{ijkl} es la matriz de comportamiento del material, que para un material isótropo está dada por:

$$C_{ijkl} = \lambda\delta_{ij}\delta_{kl} + \mu(\delta_{ij}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \quad (2.3)$$

donde δ_{ij} es la Delta de Kronecker y λ y μ son las constantes de Lamé. Introduciendo la ecuación 2.3 en la ecuación 2.2 el tensor de tensiones se obtiene como:

$$\sigma_{ij} = \lambda\epsilon_{kk}\delta_{ij} + 2\mu\epsilon_{ij} \quad (2.4)$$

Por otro lado, la condición de equilibrio en un medio elástico se expresa como:

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i \quad (2.5)$$

donde ρb_i son las fuerzas de volumen. El punto denota derivada respecto al tiempo. Introduciendo las ecuaciones 2.4 y 2.1 en la ecuación de equilibrio 2.5 se obtienen las ecuaciones de Navier:

$$(\lambda + \mu)u_{j,i,j} + \mu u_{i,j,j} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i \quad (2.6)$$

que escritas en notación vectorial, se representan como:

$$(\lambda + 2\mu)\nabla\nabla \cdot \mathbf{u} - \mu\nabla \times \nabla \times \mathbf{u} + \rho\mathbf{b} = \rho\ddot{\mathbf{u}} \quad (2.7)$$

El sentido físico de las ecuaciones de Navier se puede explicar mediante una descomposición de Helmholtz del vector de desplazamientos en dos componentes; una primera es el gradiente de una función escalar Φ y una segunda es el rotacional de una función vectorial Ψ :

$$\mathbf{u} = \nabla\Phi + \nabla \times \Psi \quad (2.8)$$

El primer término hace referencia al movimiento dilatacional de las partículas, mientras que el segundo lo hace al movimiento equivoluminal.

Usando la descomposición anterior y asumiendo que no existen fuerzas de volumen, las ecuaciones de Navier 2.7 se transforman en las dos siguientes ecuaciones desacopladas:

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2\Phi = \rho\ddot{\Phi} \quad (2.9)$$

$$\mu\nabla^2\Psi = \rho\ddot{\Psi} \quad (2.10)$$

El movimiento longitudinal descrito por el potencial escalar Φ se encuentra desacoplado del movimiento rotacional descrito por el potencial vectorial Ψ . El desacoplamiento ocurre únicamente en medios homogéneos cuando no se tienen en cuenta las fuerzas de volumen. En suelos estratificados existe acoplamiento de los dos movimientos en las interfases entre las capas homogéneas.

En las ondas longitudinales (Figura 2.1) las partículas se mueven paralelas a la dirección de propagación de la onda y su velocidad es $C_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$. Se conocen también como ondas primarias. Por el contrario, en las ondas de corte las partículas se mueven perpendiculares a la dirección de propagación de la onda y su velocidad es $C_s = \sqrt{\mu/\rho}$. Se conocen también como ondas secundarias.

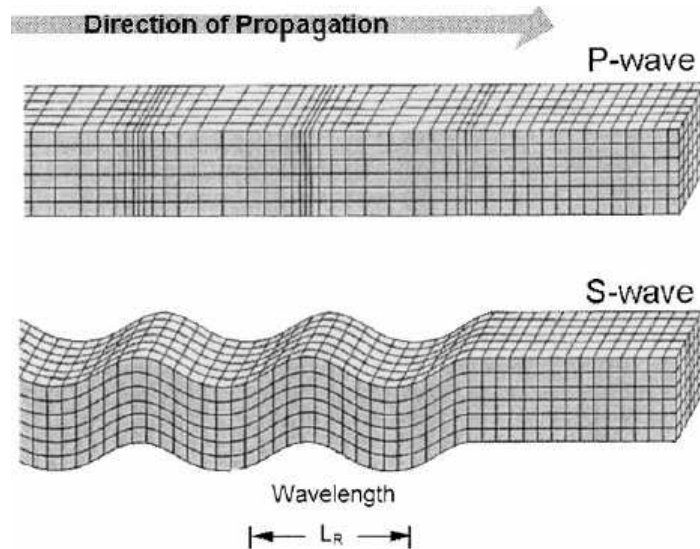


Figura 2.1: Propagación de las ondas primarias y ondas secundarias [29].

Los desplazamientos transversales de las partículas pueden, a su vez, descomponerse en dos ondas relativas a las dos direcciones del planos transversal. Al consistir este trabajo

en obtener la respuesta de un semiespacio homogéneo u horizontalmente estratificado, el plano horizontal de interfase (x,y) se toma como referencia y las ondas transversales se pueden descomponer en dos términos; un primer término paralelo a la superficie y otro segundo término perpendicular a la misma, que reciben el nombre de ondas horizontal (SH) y verticalmente polarizadas (SV). Teniendo en cuenta esta descomposición, las ecuaciones de Navier quedan:

$$\begin{aligned}(\lambda + 2\mu)\nabla^2\Phi &= \rho\ddot{\Phi} \\ \mu\nabla^2\Psi &= \rho\ddot{\Psi} \\ \mu\nabla^2\chi &= \rho\ddot{\chi}\end{aligned}\tag{2.11}$$

donde cada una de las ecuaciones desacopladas representa la propagación de las ondas longitudinales, de las ondas de corte normales a la superficie y de las ondas de corte paralelas a la superficie respectivamente. La función potencial escalar χ describe la propagación de las ondas de corte paralelas a la superficie.

En una propagación bidimensional en el plano (x, z) , la dependencia de la coordenada y desaparece, por lo que las componentes del vector de desplazamientos son:

$$\begin{aligned}u_x &= \frac{\partial\Phi}{\partial x} - \frac{\partial\Psi}{\partial z} \\ u_y &= -\frac{\partial\chi}{\partial x} \\ u_z &= \frac{\partial\Phi}{\partial z} + \frac{\partial\Psi}{\partial x}\end{aligned}\tag{2.12}$$

La solución del conjunto de ecuaciones de equilibrio 2.11 en términos de las funciones potenciales se realiza en el dominio frecuencia-número de onda. Para ello se realiza una doble transformada directa de Fourier desde el tiempo t a la frecuencia angular ω y desde la coordenada horizontal x al número de onda horizontal k_x de las ecuaciones 2.11 y se encuentra las tres soluciones en el dominio frecuencia-número de onda:

$$\begin{aligned}\tilde{\Phi}(k_x, z, \omega) &= \tilde{I}_P e^{-ik_{zp}z} + \tilde{R}_P e^{ik_{zp}z} \\ \tilde{\Psi}(k_x, z, \omega) &= \tilde{I}_{SV} e^{-ik_{zs}z} + \tilde{R}_{SV} e^{ik_{zs}z} \\ \tilde{\chi}(k_x, z, \omega) &= \tilde{I}_{SH} e^{-ik_{zs}z} + \tilde{R}_{SH} e^{ik_{zs}z}\end{aligned}\tag{2.13}$$

donde las amplitudes \tilde{I}_P , \tilde{I}_{SV} y \tilde{I}_{SH} hacen referencia a las ondas incidentes (propagación en dirección z positiva) longitudinales, P, de corte verticales, SV, y de corte horizontales, SH, mientras que las amplitudes \tilde{R}_P , \tilde{R}_{SV} y \tilde{R}_{SH} hacen referencia a las ondas reflejadas (propagación en dirección z negativa) longitudinales, P, de corte verticales, SV, y de corte horizontales, SH.

Para evaluar las funciones Φ , Ψ y χ en el dominio frecuencia-espacio se realiza una transformada inversa de Fourier del número de onda a la coordenada espacial x . Las tres funciones se calculan mediante las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned}
 \hat{\Phi}(x, z, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x x} \left(\tilde{I}_P e^{-ik_{zp}z} + \tilde{R}_P e^{ik_{zp}z} \right) dk_x \\
 \hat{\Psi}(x, z, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x x} \left(\tilde{I}_{SV} e^{-ik_{zs}z} + \tilde{R}_{SV} e^{ik_{zs}z} \right) dk_x \\
 \hat{\chi}(x, z, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x x} \left(\tilde{I}_{SH} e^{-ik_{zs}z} + \tilde{R}_{SH} e^{ik_{zs}z} \right) dk_x
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

2.2.2. Desplazamientos en una propagación bidimensional

A partir del conjunto de ecuaciones 2.12 se pueden extraer los desplazamientos en el dominio frecuencia-espacio, análogo a como se haría en el dominio tiempo-espacio:

$$\begin{Bmatrix} \hat{u}_x \\ \hat{u}_y \\ \hat{u}_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & -\frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\Phi} \\ \hat{\Psi} \\ \hat{\chi} \end{Bmatrix} \tag{2.15}$$

Introduciendo el conjunto de ecuaciones 2.14 en la ecuación 2.15 y realizando las derivadas parciales respecto a las coordenadas espaciales se obtiene:

$$\hat{\mathbf{u}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x x} \left(\tilde{\mathbf{B}}^I \tilde{\mathbf{Z}}^I \tilde{\mathbf{a}}^I + \tilde{\mathbf{B}}^R \tilde{\mathbf{Z}}^R \tilde{\mathbf{a}}^R \right) dk_x \tag{2.16}$$

Las matrices $\tilde{\mathbf{B}}^I$, $\tilde{\mathbf{B}}^R$, $\tilde{\mathbf{Z}}^I$ y $\tilde{\mathbf{Z}}^R$ se definen como:

$$\tilde{\mathbf{B}}^I = \begin{bmatrix} -ik_x & ik_{zs} & 0 \\ 0 & 0 & ik_x \\ -ik_{zp} & -ik_x & 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{\mathbf{B}}^R = \begin{bmatrix} -ik_x & -ik_{zs} & 0 \\ 0 & 0 & ik_x \\ ik_{zp} & -ik_x & 0 \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

$$\tilde{\mathbf{Z}}^I = \begin{bmatrix} e^{-ik_{zp}z} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-ik_{zs}z} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-ik_{zs}z} \end{bmatrix} \quad \tilde{\mathbf{Z}}^R = \begin{bmatrix} e^{ik_{zp}z} & 0 & 0 \\ 0 & e^{ik_{zs}z} & 0 \\ 0 & 0 & e^{ik_{zs}z} \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

Los vectores $\tilde{\mathbf{a}}^I$ y $\tilde{\mathbf{a}}^R$ contienen las amplitudes:

$$\tilde{\mathbf{a}}^I = \begin{Bmatrix} \tilde{I}_P \\ \tilde{I}_{SV} \\ \tilde{I}_{SH} \end{Bmatrix} \quad \tilde{\mathbf{a}}^R = \begin{Bmatrix} \tilde{R}_P \\ \tilde{R}_{SV} \\ \tilde{R}_{SH} \end{Bmatrix} \tag{2.19}$$

Para obtener los desplazamientos en el dominio frecuencia-número de onda, es necesario transformar en la ecuación 2.16 (que se presenta en el dominio frecuencia-espacio) la coordenada espacial x en el número de onda horizontal k_x mediante una transformada directa de Fourier:

$$\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{B}}^I \tilde{\mathbf{Z}}^I \tilde{\mathbf{a}}^I + \tilde{\mathbf{B}}^R \tilde{\mathbf{Z}}^R \tilde{\mathbf{a}}^R \quad (2.20)$$

No obstante, mediante la ecuación anterior, la matriz de rigidez resultante sería asimétrica, por lo que es necesario una última modificación que permita obtener una matriz de rigidez simétrica transformando el vector $\tilde{\mathbf{u}}$ en $\tilde{\mathbf{u}}$:

$$\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{T} \tilde{\mathbf{u}} \quad (2.21)$$

donde:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & i \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Empleando las ecuaciones 2.20 y 2.21, el vector de desplazamientos modificado se expresa como función de los potenciales:

$$\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{T} \tilde{\mathbf{B}}^I \tilde{\mathbf{Z}}^I \tilde{\mathbf{a}}^I + \mathbf{T} \tilde{\mathbf{B}}^R \tilde{\mathbf{Z}}^R \tilde{\mathbf{a}}^R \quad (2.23)$$

2.2.3. Matrices de rigidez

Elemento semiespacio

El elemento semiespacio se utiliza para modelizar la propagación de ondas en un semiespacio semiinfinito. En este elemento, sólo se consideran las ondas incidentes, es decir, se propagan en la dirección z positiva y están gobernadas por los potenciales de onda dados en las ecuaciones 2.14 donde, al no ser consideradas las ondas reflejadas, las amplitudes \tilde{R}_P , $\tilde{R}_S V$ y $\tilde{R}_S H$ son nulas.

Los desplazamientos $\tilde{\mathbf{u}}^e$ en la superficie del elemento se expresan mediante la ecuación 2.23 donde $\tilde{\mathbf{a}}^R = 0$ y $\tilde{\mathbf{Z}}^I(z=0)$ es una matriz identidad.

Igualmente se pueden obtener los esfuerzos en la superficie $\tilde{\mathbf{t}}^e$ teniendo en cuenta que $\tilde{\mathbf{a}}^R = 0$.

Elemento capa

El elemento capa modela la propagación de ondas en una capa de espesor L , donde se consideran tanto las ondas incidentes como las reflejadas. La propagación de las ondas se debe a los potenciales de las ecuaciones 2.14.

Los desplazamientos $\tilde{\mathbf{u}}^e$ en los contornos del elemento se expresan mediante la ecuación 2.23:

$$\tilde{\mathbf{u}}^e = \begin{bmatrix} \mathbf{T} \tilde{\mathbf{B}}^I \tilde{\mathbf{Z}}^I(z=0) & \mathbf{T} \tilde{\mathbf{B}}^R \tilde{\mathbf{Z}}^R(z=0) \\ \mathbf{T} \tilde{\mathbf{B}}^I \tilde{\mathbf{Z}}^I(z=L) & \mathbf{T} \tilde{\mathbf{B}}^R \tilde{\mathbf{Z}}^R(z=L) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\mathbf{a}}^I \\ \tilde{\mathbf{a}}^R \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

donde $\tilde{\mathbf{Z}}^I(z=0)$ y $\tilde{\mathbf{Z}}^R(z=0)$ son matrices identidad.

Igualmente se pueden obtener los esfuerzos en la superficie $\tilde{\mathbf{t}}^e$.

Ensamblaje de matrices elementales

Los desplazamientos y los esfuerzos obtenidos presentan, tanto para el elemento semi-espacio como para el elemento capa, la siguiente relación:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{K}}_{PSV}^e \tilde{\mathbf{u}}_{PSV}^e &= \tilde{\mathbf{t}}_{PSV}^e \\ \tilde{\mathbf{K}}_{SH}^e \tilde{\mathbf{u}}_{SH}^e &= \tilde{\mathbf{t}}_{SH}^e\end{aligned}\quad (2.25)$$

donde la primera ecuación se refiere a la propagación de las ondas longitudinales, P, y las ondas de corte verticales, SV, y la segunda ecuación hace referencia a la propagación de las ondas de corte horizontales. Las matrices $\tilde{\mathbf{K}}_{PSV}^e$ y $\tilde{\mathbf{K}}_{SH}^e$ son las matrices de rigidez de las dos propagaciones respectivamente y son submatrices de la matriz de rigidez del elemento correspondiente.

Tras obtener las matrices de rigidez elementales, se procede a realizar el ensamblaje para obtener la matriz de rigidez global. Las relaciones 2.25 también pueden ser expresadas como:

$$\tilde{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{p}} \quad (2.26)$$

donde los vectores de desplazamientos $\tilde{\mathbf{u}}$ y de esfuerzos $\tilde{\mathbf{p}}$ recogen los desplazamientos en la interfase $\tilde{\mathbf{u}}^i$ y las cargas externas en las interfases $\tilde{\mathbf{p}}^i$ respectivamente. La matriz de rigidez se monta a partir de las matrices de rigidez de los elementos.

No obstante, desde un punto de vista computacional, es recomendable realizar la separación de matrices de las ecuaciones 2.25, por lo que la ecuación 2.26 se expresa:

$$\tilde{\mathbf{K}}_{PSV}\tilde{\mathbf{u}}_{PSV} = \tilde{\mathbf{p}}_{PSV} \quad (2.27)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_{SH}\tilde{\mathbf{u}}_{SH} = \tilde{\mathbf{p}}_{SH} \quad (2.28)$$

donde $\tilde{\mathbf{u}}_{PSV}$ y $\tilde{\mathbf{p}}_{PSV}$ se corresponden con los desplazamientos y los esfuerzos en las direcciones x y z y los vectores $\tilde{\mathbf{u}}_{SH}$ y $\tilde{\mathbf{p}}_{SH}$ en la dirección y .

2.3. Curvas de dispersión

En el capítulo 1 ya se introdujo el concepto de curva de dispersión considerando las diferencias existentes entre un suelo estratificado y un semiespacio homogéneo.

En la presente sección se van a determinar las curvas de dispersión teóricas para las tres litologías mediante el método directo de la rigidez. El proceso para conocer la curva de dispersión teórica se expone a continuación.

Mediante el método directo de la rigidez explicado en la sección 2.2 se calculan los modos de las ondas superficiales de un semiespacio estratificado. Al existir desacoplamiento entre las ondas longitudinales y las ondas de corte, se puede realizar una descomposición entre las ondas superficiales que provocan deformaciones en el plano (ondas de Rayleigh) y las que provocan deformaciones fuera del plano (ondas de Love) (Figura 2.2). Es habitual

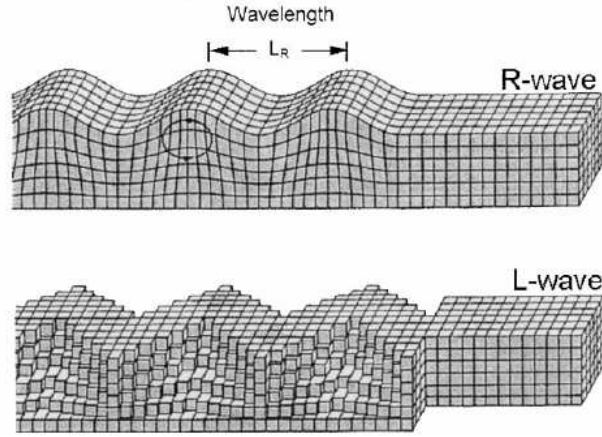


Figura 2.2: Tipos de ondas superficiales propagándose: ondas de Rayleigh (arriba) y ondas de Love (abajo) [29]

suponer que los desplazamientos en la superficie son debidos fundamentalmente a las ondas de Rayleigh.

Cuando el vector de cargas de la ecuación 2.27 es igual a cero, los modos de vibración naturales de las ondas de Rayleigh coinciden con los desplazamientos. Las soluciones distintas de la trivial se obtienen si la matriz $\tilde{\mathbf{K}}_{PSV}$ es singular o si el determinante es cero:

$$\det \tilde{\mathbf{K}}_{PSV} = 0 \quad (2.29)$$

La ecuación 2.29 presenta infinitas soluciones y se resuelve mediante un problema de autovalores donde, para una frecuencia ω fijada, los autovalores representan las velocidades de las ondas de Rayleigh. Para cada frecuencia ω , la velocidad de fase de las ondas de Rayleigh C_R se calcula como $C_R = \omega/k_x$ donde (ω, k_x) es una solución de la ecuación 2.29. De todas las ondas dadas a la frecuencia ω , la que presente una velocidad de fase menor se corresponde con el modo fundamental. Generalmente, k es complejo y en el caso de propagaciones de ondas superficiales la parte real es bastante más grande que la parte imaginaria, por lo que en el cálculo sólo se emplea la parte real [30]. La parte imaginaria será utilizada en la sección 2.4.

Cuando un estrato más débil está cubierto por estratos más rígidos, los modos más altos de Rayleigh afectan a los desplazamientos en superficie y la curva de dispersión puede diferir bastante del modo fundamental de Rayleigh. En esos casos se realiza la comparación entre la curva de dispersión experimental y una curva de dispersión teórica efectiva donde se consideran los modos más altos.

La curva de dispersión teórica efectiva se calcula según [30] como:

$$C_R = \omega/k_R \quad (2.30)$$

donde k_R es el número de onda horizontal para el cual el módulo de la función de Green $\tilde{u}_{zz}^G(z' = 0, k_r, z = 0, \omega)$ alcanza su máximo absoluto. Esta aproximación es adecuada siempre y cuando un estrato más débil está cubierto por estratos más rígidos. Los tres suelos que se analizan en el presente trabajo no cumplen este requisito por lo que no hay que calcular la curva de dispersión teórica efectiva.

En el caso de un semiespacio homogéneo, la ecuación 2.29 se reduce y no presenta dependencia de la frecuencia, por lo que la onda no es dispersiva y únicamente presenta una velocidad de fase constante.

2.3.1. Curvas de dispersión para los tres suelos

Aplicando la ecuación 2.29 se obtienen las curvas de dispersión para los tres tipos de suelos presentados en la sección 2.1.

El perfil litológico 1 tiene la curva de dispersión presentada en la Figura 2.3(a). Para el rango de frecuencias $f = 0 - 100$ Hz se obtienen 6 modos de vibración cuando se analiza mediante el perfil estratificado. En cambio cuando se analiza suponiendo el semiespacio homogéneo con propiedades equivalentes sólo aparece un único modo de vibración con un valor de velocidad de fase de 247,76 m/s.

En el rango de frecuencias altas, la velocidad de fase de los modos tiende a ser la velocidad de fase de un semiespacio homogéneo con las mismas propiedades dinámicas que el estrato superficial. Sin embargo, en el rango de frecuencias bajas, la velocidad de fase tiende a ser la del semiespacio infinito que se encuentra subyacente al estrato primero. Esto se debe a que para longitudes de ondas más pequeñas la transmisión de energía se condensa en las capas superiores.

Al aumentar la rigidez, el número de modos desciende como se puede observar en la curva de dispersión del suelo 2, Figura 2.3(b), donde el número de modos ha descendido a 4. La velocidad de fase de las ondas cuando se supone un perfil con un semiespacio homogéneo es 412,95 m/s.

La velocidad de fase aumenta proporcionalmente con las propiedades dinámicas del suelo C_s y C_p . Parece intuitivo que la curva de dispersión del suelo 3 va a presentar una velocidad de fase aún mayor y que, además, el número de modos habrá descendido. La Figura 2.3(c) muestra únicamente tres modos de vibración y una velocidad de fase de 578,12 m/s.

2.4. Curvas de atenuación

En este apartado se va a analizar otro de los fenómenos que sufren las ondas superficiales de Rayleigh, la atenuación.

Cuando un frente de ondas se propaga por el interior del terreno, los desplazamientos medidos en dos puntos diferentes no tienen el mismo valor. Esto se debe a la atenuación geométrica debido al aumento de la distancia entre la fuente y el receptor. Este fenómeno es independiente de la frecuencia de las ondas y sólo depende de la distancia. No obstante, existe otro tipo de atenuación llamada atenuación por disipación mecánica debido al amortiguamiento del material que sí es dependiente de la frecuencia. La representación gráfica del coeficiente de atenuación en función de la frecuencia se denomina curva de atenuación.

La curva de atenuación teórica de las ondas de Rayleigh se determina mediante el

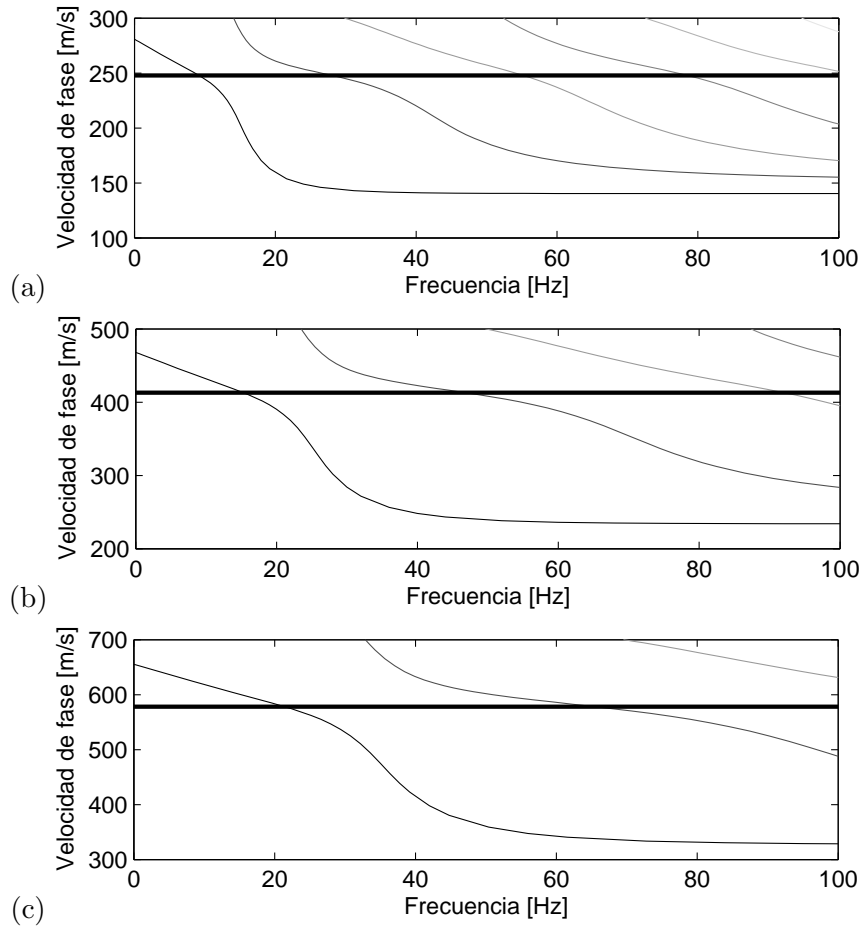


Figura 2.3: Curvas de dispersión para todos los modos y para semiespacio homogéneo (línea gruesa) del (a) suelo 1, (b) suelo 2 y (c) suelo 3.

método directo de la rigidez como:

$$A_R = -\text{Imag}(k_R) \quad (2.31)$$

2.4.1. Curvas de atenuación para los tres suelos

Aplicando la ecuación 2.31 se obtienen los coeficientes de atenuación en función de la frecuencia. En la Figura 2.4 se muestran las curvas de atenuación para los tres suelos.

En el rango de frecuencias altas la atenuación debido al amortiguamiento del material es mayor que para frecuencias bajas. Este hecho implica que las ondas con mayor frecuencia (o menor longitud de onda) se atenúan antes y alcanzan longitudes menores.

Si se comparan los tres suelos, se puede comprobar que a medida que se van aumentando las propiedades dinámicas, es decir, se supone un suelo más rígido, la atenuación de las ondas de Rayleigh va disminuyendo.

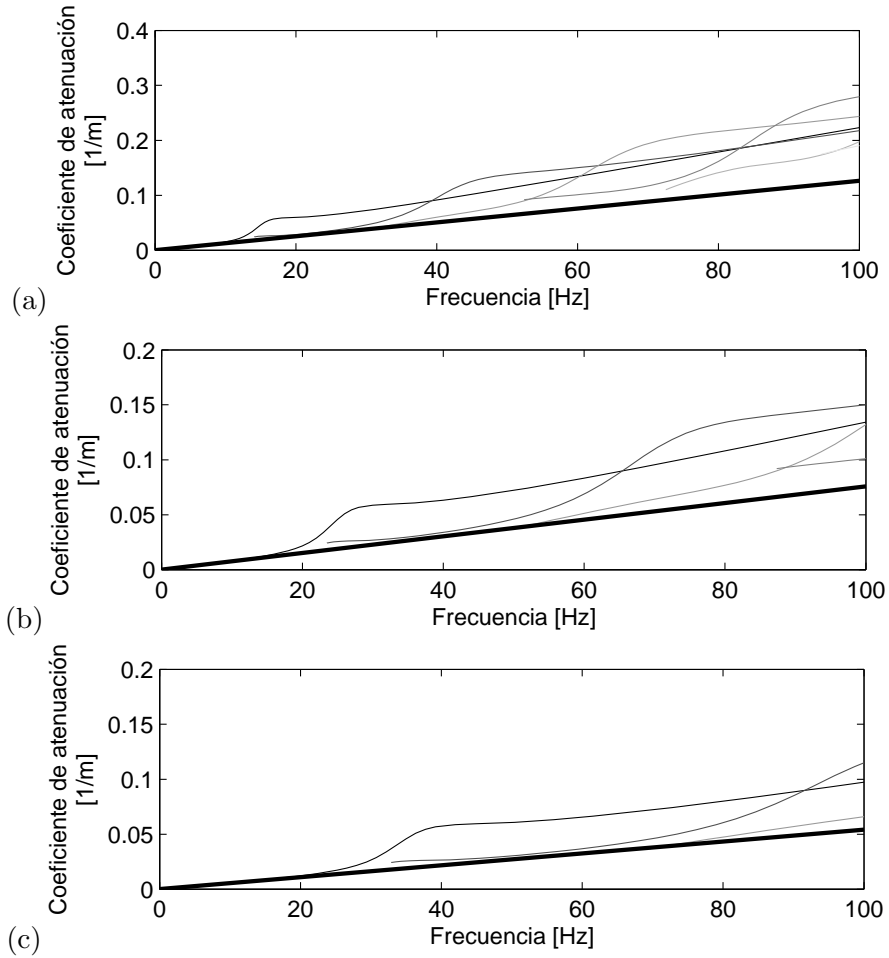


Figura 2.4: Curva de atenuación para todos los modos y para el semiespacio homogéneo (línea gruesa) del (a) suelo 1, (b) suelo 2 y (c) suelo 3.

2.5. Funciones de Green

Las funciones de Green representan la respuesta dinámica ante una carga unitaria y se calculan mediante el método directo de la rigidez en el dominio frecuencia-número de onda para posteriormente transformarlas al dominio frecuencia-espacio. Para realizar dicha transformación se usa la transformada inversa de Fourier.

La transformada inversa de Fourier se puede evaluar de manera eficiente mediante un algoritmo FFT (Fast Fourier Transform), aunque de cara a este trabajo la resolución de dicho algoritmo está basado en el método desarrollado por Talman [28], quien emplea variables logarítmicas en el algoritmo.

El tensor de Green en desplazamientos para el caso de estudio bidimensional se define como $\hat{u}_{ij}^G(x', z', x, z, \omega)$ donde se representan los desplazamientos $\hat{u}_j(x, z, \omega)$ en la posición (x, z) en la dirección \mathbf{e}_j debido a una carga armónica aplicada en la posición (x', z') en la dirección \mathbf{e}_i . Considerando únicamente variaciones de las propiedades y de la geometría en la dirección vertical se puede decir que la carga está aplicada en la posición $(0, z')$ y que por tanto, el tensor de Green en desplazamientos queda reducido a $\hat{u}_{ij}^G(z', x, z, \omega)$.

2.5.1. Solicitación en dirección x

En el caso de existir una sollicitación en la dirección x , la función de Green se denota como $\hat{u}_{xj}^G(z', x, z, \omega)$. La carga armónica en el dominio frecuencia-espacio viene dada por:

$$\hat{\mathbf{p}}(x, z, \omega) = \begin{Bmatrix} \delta(x)\delta(z - z') \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.32)$$

que transformado al dominio frecuencia-número de onda mediante una transformada de Fourier queda:

$$\tilde{\mathbf{p}}(k_x, z, \omega) = \begin{Bmatrix} \delta(z - z') \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

Los desplazamientos en las interfases de los elementos capa y el elemento semiespacio se calculan en el dominio frecuencia-número de onda mediante el método directo de la rigidez empleando las ecuaciones 2.27. Una vez conocidos los desplazamientos en las interfases se pueden conocer los desplazamientos en los elementos mediante las funciones de forma. Estos desplazamientos, por definición, son las funciones de Green en el dominio frecuencia-número de onda:

$$\tilde{\mathbf{u}}(k_x, z, \omega) = \begin{Bmatrix} \tilde{u}_{xx}^G(z', k_x, z, \omega) \\ 0 \\ \tilde{u}_{xz}^G(z', k_x, z, \omega) \end{Bmatrix} \quad (2.34)$$

De la ecuación 2.34 se pueden extraer dos observaciones. En primer lugar, se puede comprobar que debido al desacoplamiento de las ondas longitudinales y las ondas de corte, verticales y horizontales, la componente y del vector $\tilde{\mathbf{u}}$ es nula. En segundo lugar, hay que recordar que las funciones de Green obtenidas son las modificadas en el dominio frecuencia-número de onda. De acuerdo a la ecuación 2.21 se pueden obtener las funciones de Green no modificadas \tilde{u}_{xj}^G y mediante una transformada inversa de Fourier se calculan las funciones de Green en desplazamientos en el dominio frecuencia-espacio que vienen dadas por:

$$\hat{u}_{xx}^G = \mathcal{F}^{-1}[\tilde{u}_{xx}^G; x] \quad (2.35)$$

$$\hat{u}_{xy}^G = 0 \quad (2.36)$$

$$\hat{u}_{xz}^G = \mathcal{F}^{-1}[\tilde{u}_{xz}^G; x] \quad (2.37)$$

2.5.2. Solicitación en dirección y

Cuando la sollicitación se aplica en dirección y , el tensor de Green en términos de desplazamientos se denota como $\hat{u}_{yj}^G(z', x, z, \omega)$ y el vector de carga en el dominio frecuencia-número de onda:

$$\tilde{\mathbf{p}}(k_x, z, \omega) = \begin{Bmatrix} 0 \\ \delta(z - z') \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.38)$$

Los resultados en desplazamientos son, por definición, las funciones de Green en el dominio frecuencia-número de onda:

$$\tilde{\mathbf{u}}(k_x, z, \omega) = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \tilde{\mathbf{u}}_{yy}^G(z', k_x, z, \omega) \\ 0 \end{array} \right\} \quad (2.39)$$

En la ecuación 2.39 las componentes x y z son nulas debido, al igual que el caso anterior, al desacoplamiento de las ondas longitudinales y de corte, horizontales y verticales. Las funciones de Green obtenidas son las modificadas en el dominio frecuencia-número de onda. De acuerdo a la ecuación 2.21 se pueden obtener las funciones de Green no modificadas \tilde{u}_{yj}^G y mediante una transformada inversa de Fourier se calculan las funciones de Green en desplazamientos en el dominio frecuencia-espacio que vienen dadas por:

$$\hat{u}_{yx}^G = 0 \quad (2.40)$$

$$\hat{u}_{yy}^G = \mathcal{F}^{-1}[\tilde{u}_{yy}^G; x] \quad (2.41)$$

$$\hat{u}_{yz}^G = 0 \quad (2.42)$$

2.5.3. Solicitación en dirección z

En el caso de existir una sollicitación en la dirección z el proceso es análogo al caso de sollicitación en dirección x . La función de Green se denota como $\hat{u}_{zj}^G(z', x, z, \omega)$. Ahora en cambio, la carga armónica en el dominio frecuencia-número de onda viene dada por:

$$\tilde{\mathbf{p}}(x, z, \omega) = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ i\delta(z - z') \end{array} \right\} \quad (2.43)$$

Los resultados en desplazamientos son, por definición, las funciones de Green en el dominio frecuencia-número de onda:

$$\tilde{\mathbf{u}}(k_x, z, \omega) = \left\{ \begin{array}{c} \tilde{\mathbf{u}}_{zx}^G(z', k_x, z, \omega) \\ 0 \\ \tilde{\mathbf{u}}_{zz}^G(z', k_x, z, \omega) \end{array} \right\} \quad (2.44)$$

En la ecuación 2.44 las funciones de Green obtenidas son las modificadas en el dominio frecuencia-número de onda. De acuerdo a la ecuación 2.21 se pueden obtener las funciones de Green no modificadas \tilde{u}_{zj}^G y mediante una transformada inversa de Fourier se calculan las funciones de Green en desplazamientos en el dominio frecuencia-espacio que vienen dadas por:

$$\hat{u}_{zx}^G = \mathcal{F}^{-1}[\tilde{u}_{zx}^G; x] \quad (2.45)$$

$$\hat{u}_{xy}^G = 0 \quad (2.46)$$

$$\hat{u}_{zz}^G = \mathcal{F}^{-1}[\tilde{u}_{zz}^G; x] \quad (2.47)$$

2.5.4. Resultados numéricos

A continuación se van a calcular las funciones de Green en desplazamientos para el estudio bidimensional de los tres tipos de suelo.

Los resultados se extraerán en los puntos pertenecientes a una malla de observación definida, la cual debe ser lo suficientemente detallada y amplia de manera que las conclusiones extraídas tengan una base fundamentada. En base a ello se ha decidido disponer los puntos de observación comprendidos entre $x = 0$ m y $x = 100$ m en el sentido longitudinal y entre $z = 0$ m y $z = 30$ m en el sentido vertical (eje z positivo hacia el interior del terreno).

Solicitud en dirección z

La Figura 2.5 muestra el contenido en frecuencia de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ en cuatro localizaciones del receptor distintas y para las tres direcciones de la respuesta j para el suelo 1. La oscilación de la respuesta en función de la frecuencia se debe a la interferencia entre las ondas longitudinales P, las ondas S y las ondas superficiales de Rayleigh.

A medida que la distancia entre la fuente y el receptor aumenta, la respuesta disminuye debido tanto a la atenuación por disipación mecánica por el amortiguamiento como a la disipación geométrica.

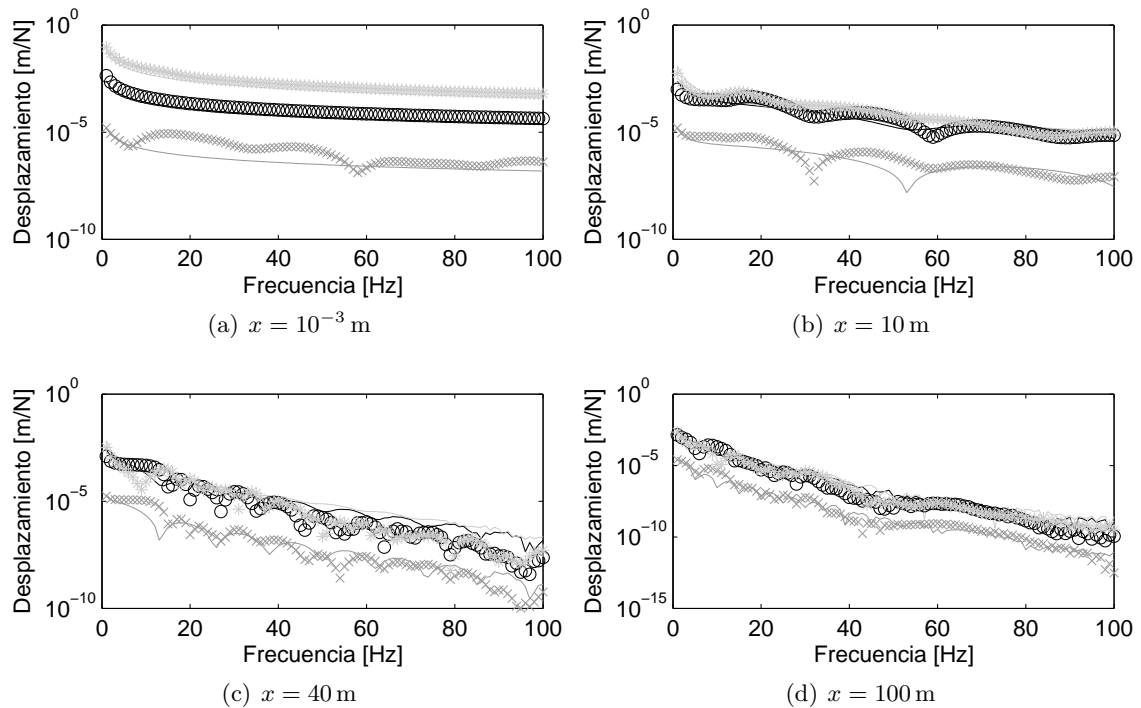


Figura 2.5: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

Como se vio anteriormente, la atenuación por disipación mecánica debido al amortiguamiento del material es dependiente de la frecuencia. Como resultado, se debería observar una mayor atenuación en el rango de frecuencias altas que, sin embargo, no se aprecia.

Considerar un suelo estratificado mediante un modelo con un semiespacio homogéneo conlleva que a pequeñas distancias de la fuente los resultados no se ajusten bien. Se puede

observar que para distancias de $x = 0,001$ m y $x = 10$ m, la respuesta en dirección y no presenta el mismo comportamiento ni las mismas magnitudes. En el caso teórico, la respuesta en dirección y debería ser nula para cualquier posición x ya que así lo indican las ecuaciones. Sin embargo no es así debido a un problema numérico ya que realmente no se está considerando el punto $y = 0$ sino $y = 0,001$. Si se analiza la respuesta en x en cualquier punto y , ésta también debe ser cero teóricamente pero ocurre el mismo problema numérico ya que se está considerando $x = 0,001$ en lugar de $x = 0$. En el caso de la respuesta en direcciones x y z sí se corresponden con el modelo estratificado. En el caso de separaciones mayores, las tres respuestas mantienen una buena correspondencia entre los dos modelos, estratificado y homogéneo.

En la Figura 2.6 se muestra el contenido en frecuencia de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 donde las ideas anteriormente desarrolladas para el suelo 1 son totalmente extrapolables. Las diferencias entre los suelos eran únicamente los valores de las propiedades dinámicas C_s y C_p , manteniendo constante el factor de amortiguamiento por lo que los resultados deben ser análogos variando la magnitud de los desplazamientos, siendo menor en el suelo más rígido.

Las oscilaciones varían según el tipo de suelo. En el caso del suelo 2 se puede comprobar que los mínimos de la función se encuentran a frecuencias mayores (se aprecia mejor en $x = 10^{-3}$ m y en $x = 10$ m).

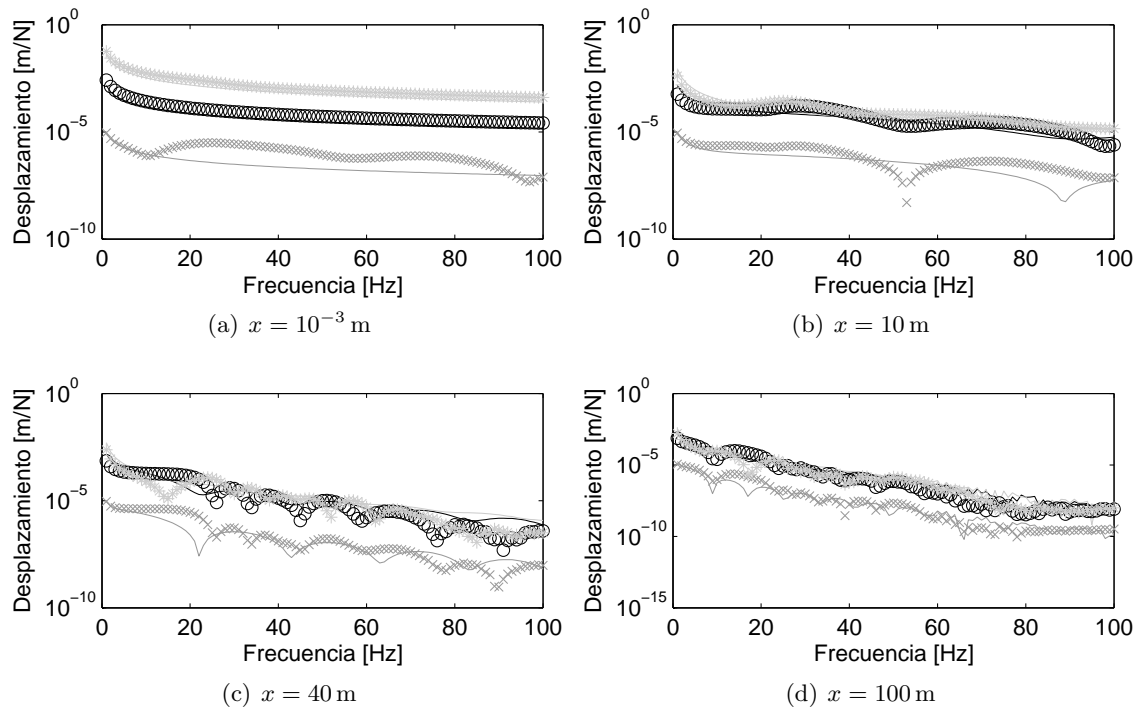


Figura 2.6: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

Si se analiza el suelo 3, donde las propiedades dinámicas son aun mayores, los resultados también muestran una tendencia parecida. En la Figura 2.7 se muestra el contenido en frecuencia de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3. Los mínimos de las funciones de Green comienzan a frecuencias aun mayores que en el suelo 2.

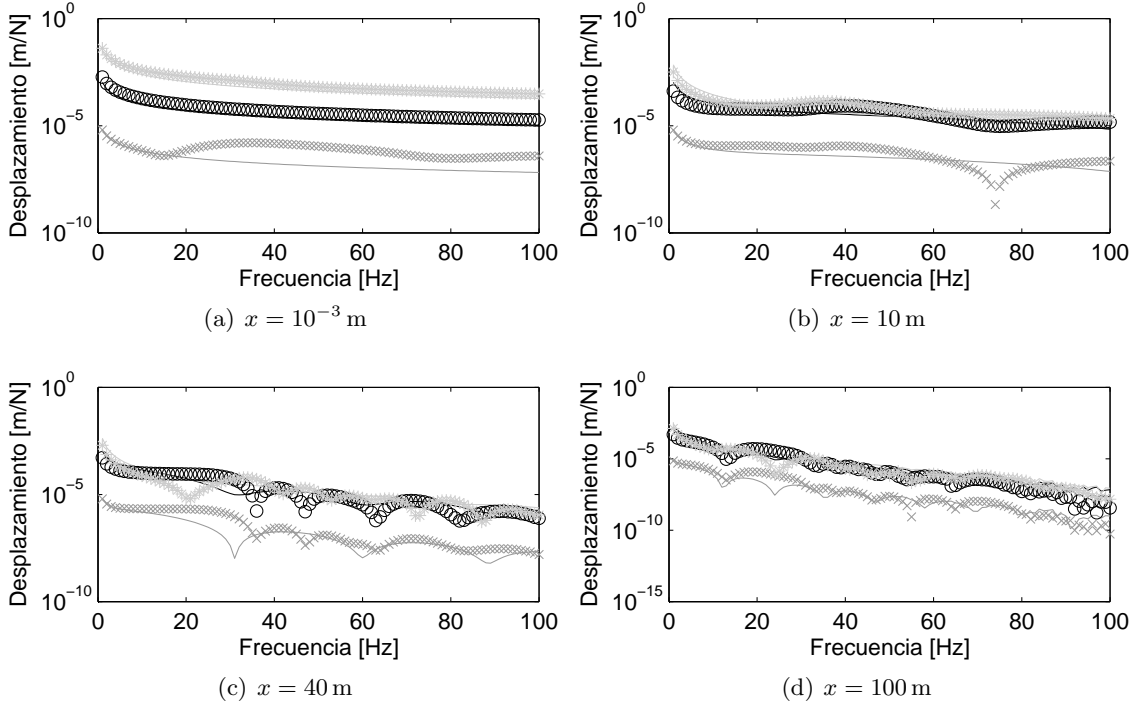


Figura 2.7: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

Si en lugar de aplicar la carga en superficie se aplica en el interior del terreno, los resultados que se obtienen en superficie varían. El estudio de una carga actuando en el interior del terreno podría asemejarse al de un ferrocarril circulando por el interior de un túnel. La profundidad a la que se encuentra el túnel es función de la orografía del terreno y de las propiedades del suelo o roca en el que se halle. Para realizar una primera aproximación se ha considerado que la carga actúa a 30 m de profundidad.

La Figura 2.8 muestra el contenido en frecuencia de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ en cuatro localizaciones del receptor distintas y para las tres direcciones de la respuesta j para el suelo 1. La oscilación es mayor en este caso que en el anterior. La atenuación por el amortiguamiento del material sí influye, pudiéndose observar una mayor atenuación para el rango de frecuencias altas. También se comprueba que la disipación geométrica repercute de manera que la respuesta disminuye cuando aumenta la distancia.

Recordando que el punto de aplicación de la carga se encuentra a 30 m de profundidad y que el receptor se encuentra en superficie, la distancia real es mayor que la que indica la coordenada x . Validando la idea de que a grandes distancias existe una clara correspondencia entre los dos modelos, se puede apreciar que en las cuatro localizaciones de los receptores las variaciones son mínimas, presentando el mismo comportamiento y la misma magnitud.

Del mismo modo se representan las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ en las Figuras 2.9 y 2.10 para los suelos 2 y 3 respectivamente.

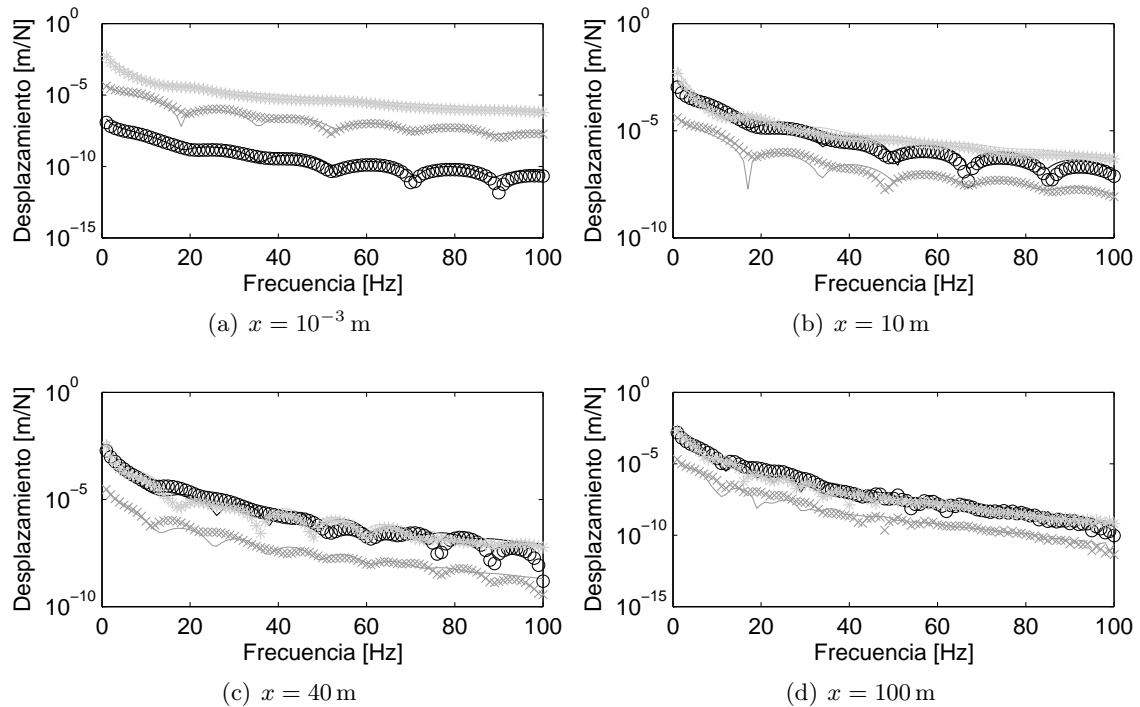


Figura 2.8: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

Solicitud en dirección x

Los resultados cuando la solicitud actúa en dirección x se muestran en el Apéndice A. Cuando la solicitud actúa en dirección x , la respuesta en dirección y no es nula como indican las ecuaciones, aunque sí son los valores más bajos en relación a la respuesta en x y z . Esto es debido a un problema numérico ya que realmente no se está considerando $y = 0$ porque en dicho punto el programa no encuentra solución y por tanto, hay que hacerlo en un punto cercano. En su lugar se ha tomado $y = 0,001$ y por eso la solución no es nula. También se produce una mayor atenuación en el rango de frecuencia altas y una disipación geométrica al aumentar la distancia entre la fuente y el receptor.

Al igual que ocurría cuando la solicitud actuaba en dirección z , la similitud entre los dos modelos del suelo es mayor cuanto mayor es la distancia entre la fuente y el receptor. Cuando ésta es pequeña, la respuesta en y difiere entre ambos modelos y, aunque la respuesta en x y z también difiere, lo hace en menor magnitud.

Solicitud en dirección y

Los resultados cuando la solicitud actúa en dirección y se muestran en el Apéndice A. El desacoplamiento de las ondas longitudinales y de corte verticales de las ondas de corte horizontales conllevaba que las componentes x y z de los desplazamientos cuando la solicitud actúa en dirección y fuesen nulas. Si se observan los resultados se puede apreciar que no son nulas aunque sí son inferiores que la respuesta en y . Al igual que en el

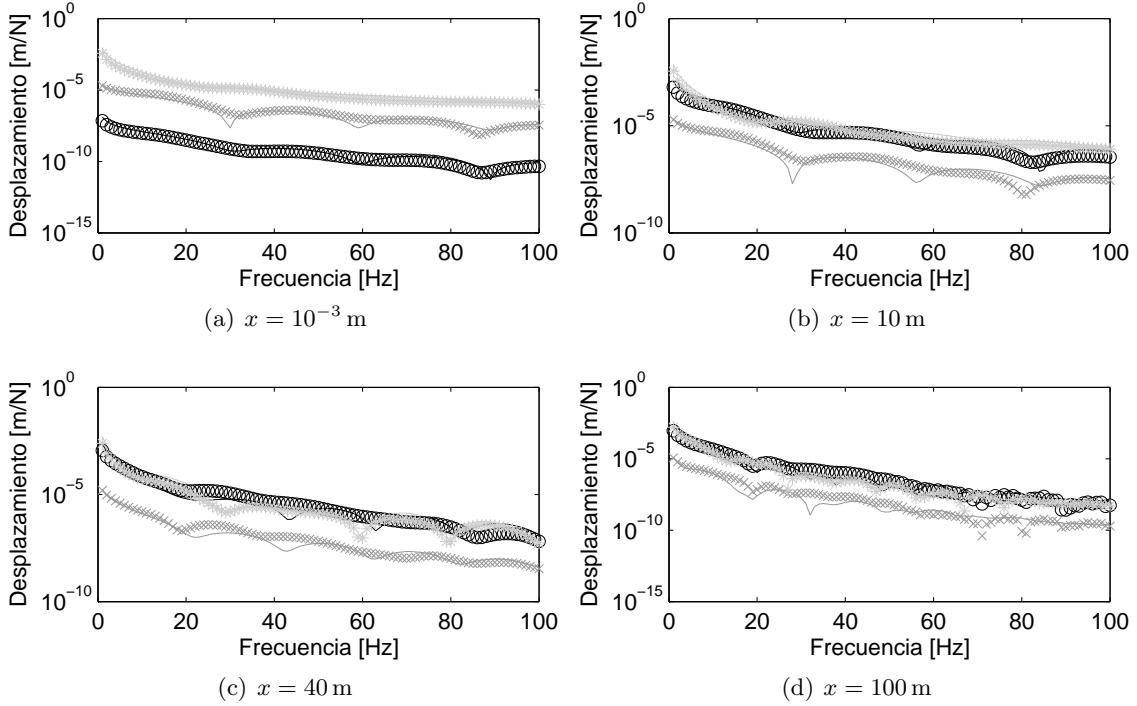


Figura 2.9: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

caso anterior, esto se debe a un problema numérico ya que se está considerando $x = 0,001$ en lugar de $x = 0$. La diferencia entre el modelo estratificado y el modelo homogéneo es muy inferior a cuando la sollicitación actúa en x o z . El comportamiento es similar tanto para grandes como pequeñas distancias, por lo que el parámetro $Vs30$ es válido para modelizar un suelo estratificado.

2.6. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado el método directo de la rigidez para propagaciones de ondas en medios estratificados horizontalmente, el cual ha sido aplicado para obtener las funciones de Green de un suelo estratificado y las curvas de dispersión y atenuación de los tres suelos presentados.

En primer lugar se introdujeron las ecuaciones elastodinámicas a las que aplicando una descomposición de Helmholtz al vector de desplazamientos se obtienen ecuaciones en derivadas parciales desacopladas para el movimiento longitudinal y para las ondas horizontal y verticalmente polarizadas. Dichas ecuaciones se transforman al dominio frecuencia-número de onda mediante una doble transformada directa de Fourier desde el tiempo t a la frecuencia angular ω y desde la coordenada horizontal x al número de onda horizontal k_x y se encuentra las tres soluciones en el dominio frecuencia-número de onda.

A continuación, los desplazamientos en el dominio frecuencia-número de onda se obtuvieron mediante una transformada directa de Fourier a partir de los desplazamientos

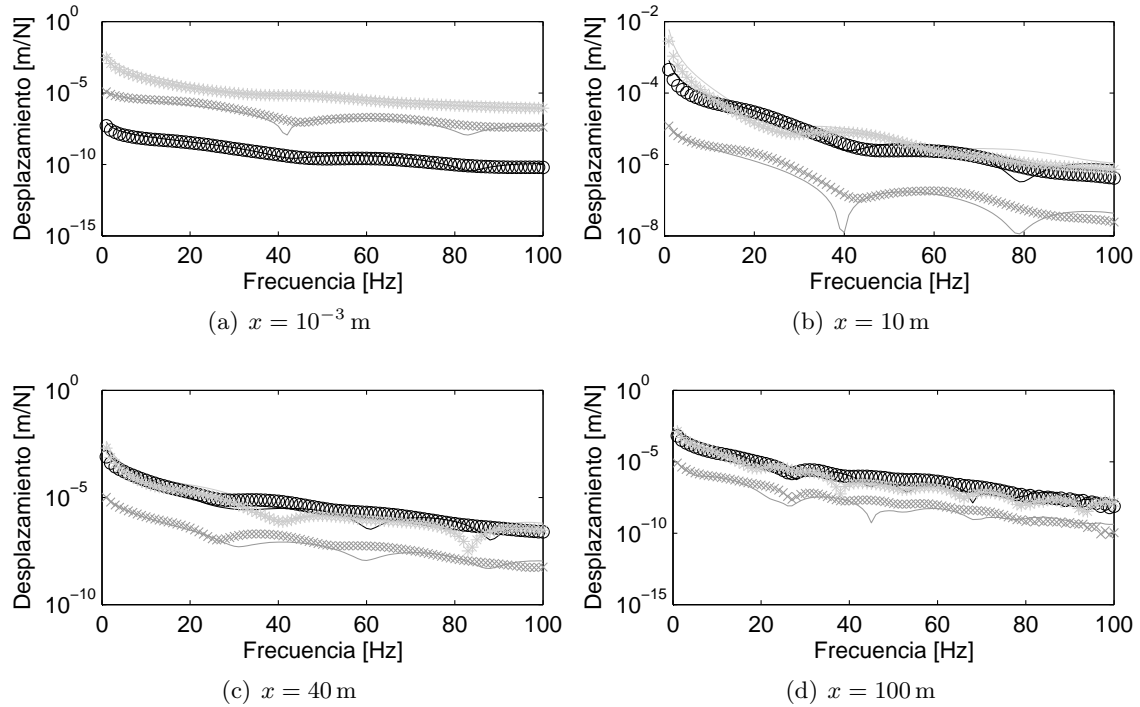


Figura 2.10: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{zj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = zz$ (gris claro).

en el dominio frecuencia-espacio. Las matrices de rigidez del elemento semiespacio y del elemento capa se obtuvieron por separado para ensamblarlas en la matriz de rigidez global.

En segundo lugar se han obtenido las curvas de dispersión y atenuación para los tres suelos. En suelos estratificados horizontalmente, se ha obtenido una curva de velocidad de fase de las ondas de Rayleigh frente a la frecuencia para cada uno de los modos de vibración. Cuando se analizan suelos más rígidos, los modos de vibración disminuyen. Por el contrario, se ha podido comprobar que en los suelos constituidos por un semiespacio homogéneo, únicamente existe un modo de vibración fundamental que se muestra independiente del valor de la frecuencia.

La atenuación de las ondas de Rayleigh disminuye con el aumento de la rigidez del suelo y aumenta con el contenido en frecuencia. Las ondas con mayores frecuencias se atenúan primero y su velocidad de propagación es inferior, por lo que afectan a una longitud menor.

Finalmente se han calculado las funciones de Green de los tres suelos. Estas funciones representan la respuesta dinámica del suelo debido a una carga unitaria. El cálculo se ha realizado en el dominio frecuencia-número de onda para seguidamente transformarlas al dominio frecuencia-espacio mediante una transformada inversa de Fourier. Las transformaciones se realizan mediante un algoritmo desarrollado por Talman en el que se emplean variables logarítmicas, que se muestra más eficiente para escalas de grandes longitudes en estudio.

En los tres suelos se aprecia una misma tendencia, la atenuación es mayor en el rango

de frecuencias altas y a medida que la distancia entre la fuente y el receptor aumenta, la respuesta disminuye debido tanto a la atenuación por disipación mecánica por el amortiguamiento como a la disipación geométrica.

El modelo estratificado y el modelo con semiespacio homogéneo presentan valores muy similares a distancias de separación altas, mientras que a distancias bajas existen más diferencias. Estas diferencias se manifiestan en mayor medida cuando la respuesta teórica debería ser nula, es decir, la respuesta en y para sollicitación en x y z y la respuesta en x y z cuando la sollicitación es en dirección y . Hay que resaltar que cuando la sollicitación actúa en dirección y , los valores de los dos modelos se ajustan mejor que para las otras dos direcciones, es decir, tanto para grandes como pequeñas separaciones, el parámetro V_{s30} es válido para la modelización de suelos estratificados.

Capítulo 3

Interacción suelo-estructura mediante el análisis modal espectral

Las estructuras pueden sufrir daños ante las vibraciones que se propagan en su entorno. Estas vibraciones están ocasionadas por distintos fenómenos como pueden ser los terremotos, tráfico ferroviario y rodado, maquinaria de construcción, etc. A la hora de realizar un análisis estructural de una construcción sometida a una carga armónica, es posible realizar un análisis en el dominio del tiempo. Sin embargo, no es posible tener los registros temporales en todas y cada una de las localizaciones. También, el análisis sísmico de estructuras no se puede efectuar en base a simplemente el valor de pico de las aceleraciones del terreno, ya que la respuesta depende del contenido en frecuencia del movimiento del terreno y de las propiedades dinámicas de la estructura.

Para solventar las dificultades anteriores, el método de respuesta espectral es la herramienta más popular para llevar a cabo análisis sísmicos. Entre las ventajas de este método se encuentra que únicamente implica el cálculo de los valores máximos de los desplazamientos en cada modo de vibración usando espectros de diseño que son la media de varios movimientos sísmicos.

Además, el análisis modal permite conocer el comportamiento de las estructuras de M grados de libertad a partir de M estructuras de un grado de libertad.

Por último, los espectros de respuesta de terremotos ocurridos en un mismo lugar presentan una forma similar, siendo diferente la amplitud que depende de la intensidad del terremoto. Esto permite conocer el espectro de respuesta para terremotos futuros a partir de ya conocidos, determinando su amplitud por un límite máximo de aceleración definido por una probabilidad de que sea superado en un intervalo de tiempo dado.

Debido a la simplicidad del cálculo mediante el método modal espectral en comparación con el análisis en el dominio del tiempo, en este capítulo se analizará la interacción del suelo con una estructura vertical mediante el método modal espectral. El capítulo, por tanto, se estructura como se indica a continuación.

En la sección 3.1 se realizará una introducción a la teoría que gobierna el análisis

modal espectral. En primer lugar se analizarán las ecuaciones para sistemas de un grado de libertad para luego hacer la generalización al caso de múltiples grados de libertad.

En la sección 3.2 se calculan los espectros en pseudo-aceleraciones para los tres perfiles litológicos estudiados. Para cada uno de ellos, se obtendrán los espectros cuando la carga actúa en superficie y para cada una de las tres direcciones independientemente. Los resultados se muestran para distintas distancias entre el punto de aplicación y la estructura.

En la sección 3.3 se realiza una descripción de la estructura. En este caso se ha tomado un aerogenerador eólico metálico de 70 m de altura.

Finalmente, en la sección 3.4, se muestran los resultados de las tensiones y los esfuerzos para los tres tipos de suelos respectivamente.

3.1. Introducción al análisis modal espectral

El espectro de respuesta de un terremoto es la representación de la respuesta máxima de los sistemas de un grado de libertad sometidos a la acción de dicho terremoto.

La ecuación del movimiento para un sistema de un grado de libertad ante un terremoto con aceleración $\ddot{x}_g(t)$ viene dada por:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (3.1)$$

donde m es la masa del sistema, c es el amortiguamiento y k es la rigidez.

Sustituyendo las expresiones:

$$\begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} \\ \xi &= \frac{c}{2m\omega_n} \\ \omega_d &= \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \end{aligned}$$

en la ecuación 3.1, ésta se puede escribir como:

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (3.2)$$

La solución del sistema de un grado de libertad se puede conocer empleando la integral de Duhamel. La respuesta temporal depende de las características del sistema (ω_n, ξ) :

$$x(t) = \frac{1}{\omega_d} \int_0^t -\ddot{x}_g e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \sin(\omega_d(t-\tau)) d\tau \quad (3.3)$$

Para unos valores concretos de (ω_n, ξ) se calcula la respuesta máxima del módulo de x :

$$|x|_{max} = |x|_{max}(\omega_n, \xi) \quad (3.4)$$

Repitiendo el cálculo para distintas estructuras de un grado de libertad se puede representar en una gráfica la curva de desplazamiento máximo frente a ω_n .

El desplazamiento espectral se define como:

$$S_d = |x|_{max} \quad (3.5)$$

que depende de las variables (ω_n, ξ) . La representación frente al período natural ($T = \frac{2\pi}{\omega_n}$) será el espectro de respuesta de desplazamientos.

Análogamente, la velocidad espectral, S_v y la aceleración espectral, S_a se definen como:

$$S_v = |\dot{x}(t)|_{max} \quad (3.6)$$

$$S_a = |\ddot{x}_a(t)|_{max} = |\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)|_{max} \quad (3.7)$$

La pseudo-velocidad espectral y la pseudo-aceleración espectral se definen como:

$$PSV = \omega_n S_d \quad (3.8)$$

$$PSA = \omega_n^2 S_d \quad (3.9)$$

los cuales tienen unidades de velocidad y aceleración respectivamente. El anteponer la palabra pseudo se debe a que el movimiento no es armónico. De ser así, PSV y PSA se corresponderían con los valores máximos de la velocidad y la aceleración, es decir, S_v y S_a .

En el caso de estructuras de N grados de libertad, la ecuación 3.1 se escribe como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{J}\ddot{x}_g \quad (3.10)$$

donde \mathbf{M} es la matriz de masas; \mathbf{K} es la matriz de rigidez y \mathbf{J} es el vector de influencia.

Si el espectro de respuesta representa la respuesta máxima de todos los posibles sistemas de un grado de libertad y cualquier sistema de N grados de libertad se puede descomponer en N sistemas de un grado de libertad, se podrá obtener la respuesta máxima de cualquier sistema de N grados de libertad.

Las frecuencias naturales de la estructura y los modos de vibración se obtienen mediante el siguiente problemas de autovalores:

$$[-\omega^2\mathbf{M} + \mathbf{K}]\mathbf{x} = 0 \quad (3.11)$$

La ecuación da N frecuencias y los correspondientes modos de vibración, donde N es el número de grados de libertad de la estructura.

La respuesta en coordenadas cartesianas se representa en términos de una superposición lineal de los modos (ϕ):

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N \phi_i \zeta_i = \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i \quad (3.12)$$

donde ζ_i son las coordenadas modales. Para conocer la respuesta máxima se adopta la regla de Rosenblueth:

$$|\mathbf{u}|_{max} = \sqrt{|\zeta_1|_{max}^2 \phi_1^2 + |\zeta_2|_{max}^2 \phi_2^2 + \dots + |\zeta_n|_{max}^2 \phi_n^2} \quad (3.13)$$

3.2. Espectros de pseudo-aceleraciones para los tres suelos

Los espectros de aceleraciones empleados para calcular las tensiones y los esfuerzos en la estructura son aquellos producidos por una carga unitaria aplicada en superficie debido a que en la mayoría de los casos, los trenes, vehículos o maquinaria de construcción, actúan en superficie. En la realidad, la fuerza que producen estos elementos es mayor y por ende, también los desplazamientos. No obstante calcular la respuesta ante una carga unitaria permite hacer un estudio cualitativo del comportamiento del suelo ante un frente de ondas propagándose en su interior. El análisis se realizará para la carga actuando en las tres direcciones independientemente y la respuesta se estudiará en la misma dirección en la que se haya aplicado la carga.

En las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran los espectros para los suelos 1, 2 y 3 respectivamente únicamente cuando la carga es aplicada en superficie ($z = 0$ m) y en la dirección z . Cada uno de los espectros se corresponde con una distancia, a lo largo de la dirección x , desde el punto de aplicación de la carga hasta la estructura. Aunque los espectros introducidos en el programa de cálculo son para la carga actuando en las tres direcciones, sólo se representan aquellos para carga vertical. Los otros espectros quedan recogidos en el Apéndice B.

La tendencia de los espectros de las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 son similares. Cuando la distancia entre el punto de aplicación de la carga y la estructura es muy baja, el modelo estratificado presenta aceleraciones más altas y cuando la distancia aumenta, el modelo con el semiespacio homogéneo es el que presenta aceleraciones mayores.

Esto se debe a que a distancias cortas, es en el estrato superior donde se condensa la transmisión de energía y las propiedades dinámicas de éste son más bajas que la del semiespacio homogéneo con propiedades equivalentes. Cuando la distancia es mayor, el estrato predominante es el semiespacio infinito que se encuentra por debajo del primer estrato y sus propiedades son mayores que las del semiespacio homogéneo, de ahí que las aceleraciones sean más bajas.

El cálculo del espectro de respuesta elástica se ha realizado con el paquete *Response Spectra* para Matlab del profesor George Papazafeiropoulos [35] que permite obtener el espectro de pseudo-aceleraciones, el espectro de pseudo-velocidades y los desplazamientos, velocidades y aceleraciones espectrales. Con objeto de asimilar el estudio al realizado en la normativa española NCSE-02, se ha decidido obtener el espectro en pseudo-aceleraciones.

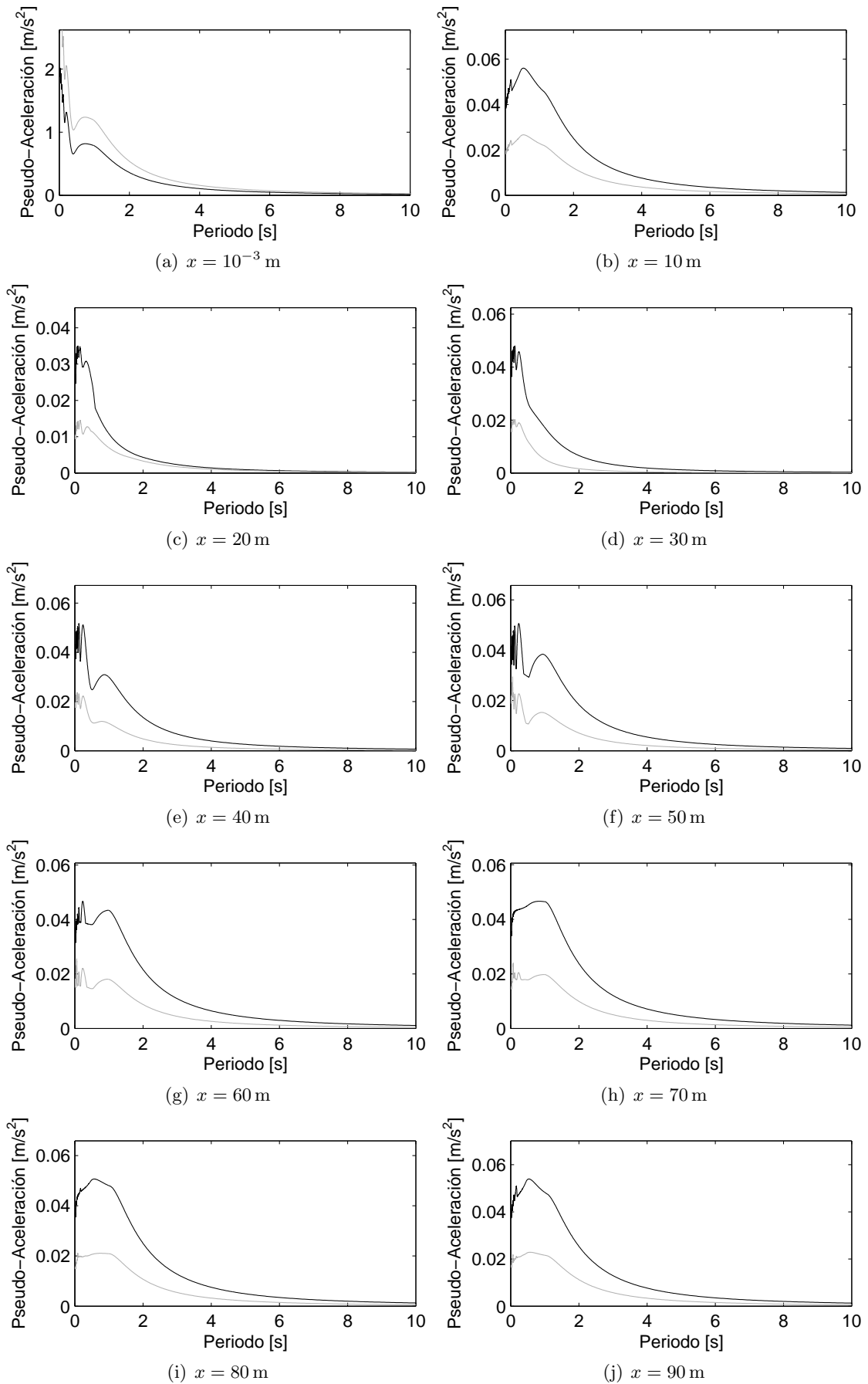


Figura 3.1: Espectro de pseudo-aceleraciones en superficie para el suelo 1. Suelo homogéneo (negro) y suelo estratificado (gris).

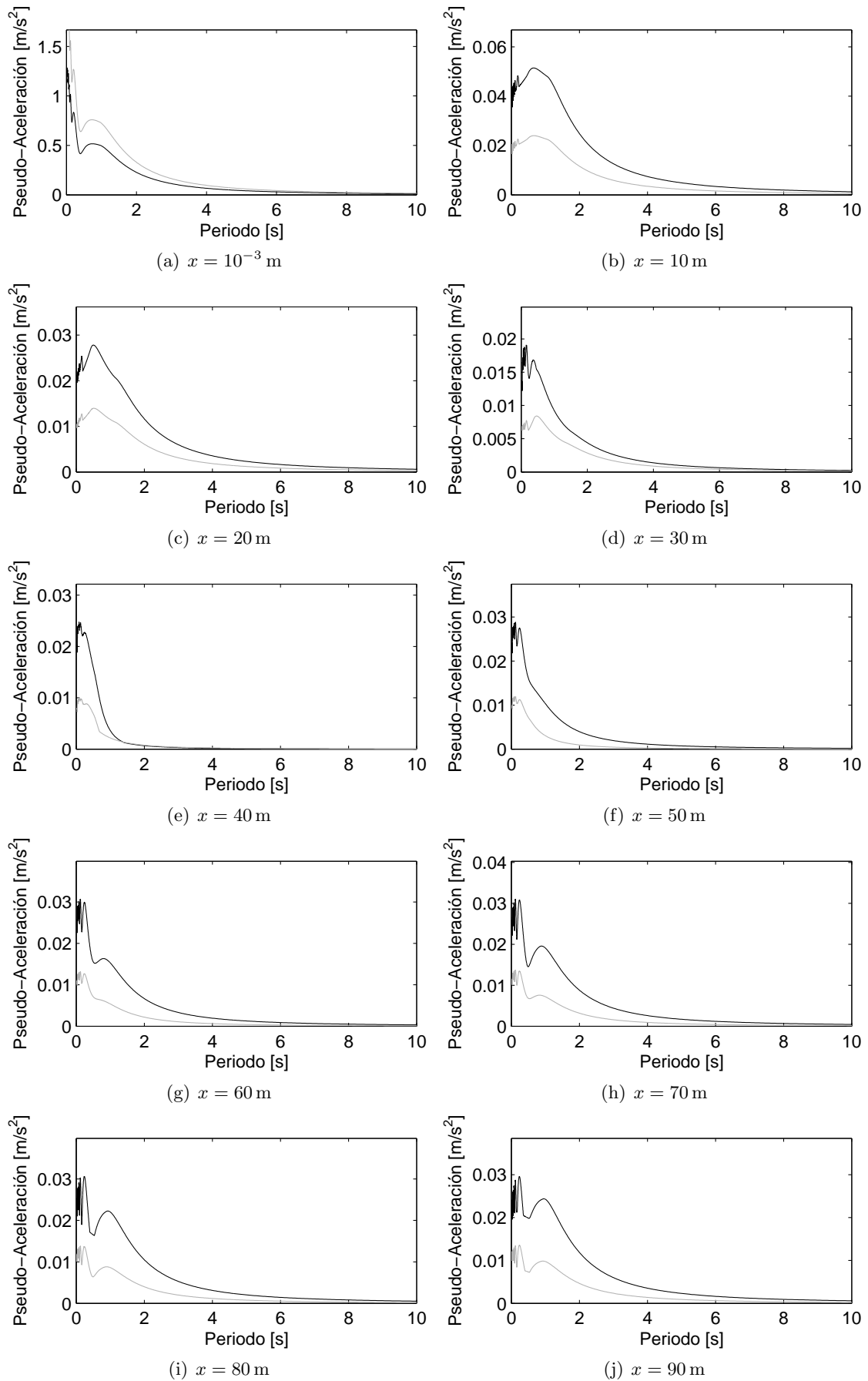


Figura 3.2: Espectro de pseudo-aceleraciones en superficie para el suelo 2. Suelo homogéneo (negro) y suelo estratificado (gris).

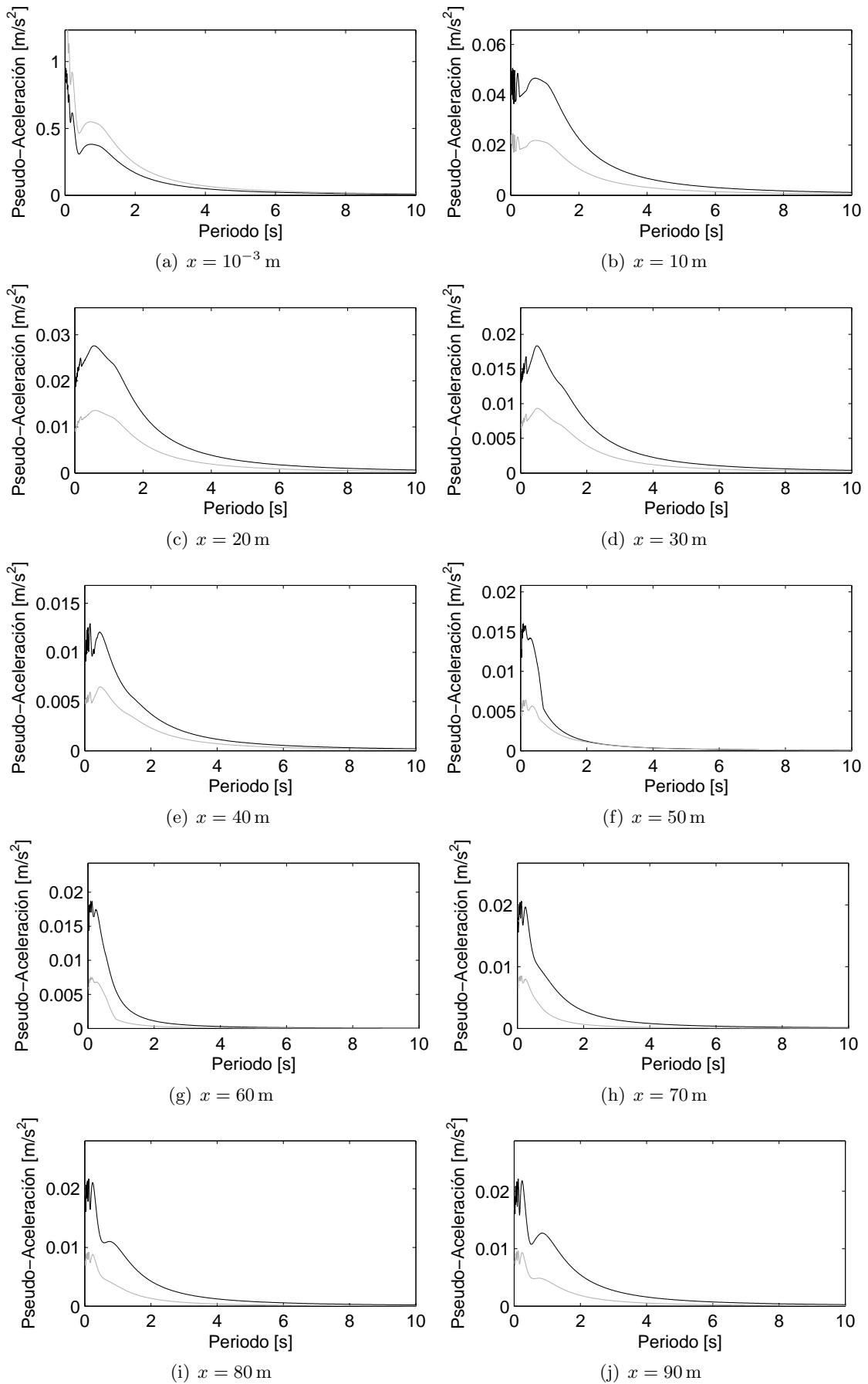


Figura 3.3: Espectro de pseudo-aceleraciones en superficie para el suelo 3. Suelo homogéneo (negro) y suelo estratificado (gris).

Cuando la sollicitación es en dirección x e y , las ideas anteriores son totalmente extrapolables debido al mismo fenómeno. A medida que la rigidez del suelo aumenta, las aceleraciones son menores. Debido a esto, se puede apreciar que el suelo 3 es el que presenta las aceleraciones más bajas. Se puede comprobar también, que para los 3 suelos, la sollicitación en dirección y es la que provoca aceleraciones mayores.

3.3. Descripción de la estructura

La estructura considerada es un aerogenerador eólico metálico tal y como el que se muestra en la Figura 3.4. La altura de la torre es de 70 m y la sección transversal consiste en un perfil circular hueco cuyas propiedades se indican en la Tabla 3.1. El material es acero con las propiedades de la Tabla 3.2.

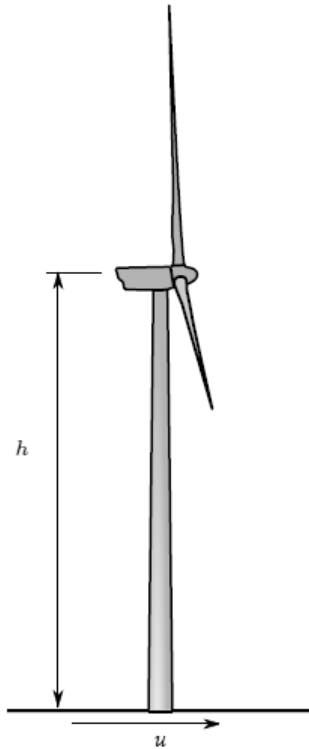


Figura 3.4: Geometría del aerogenerador. Adaptada de [32].

h [m]	R_i [m]	R_e [m]
70	2,425	2,50

Tabla 3.1: Propiedades geométricas de la torre.

Donde h es la altura de la torre y R_i y R_e son el radio interior y exterior de la sección transversal respectivamente.

E [GPa]	ν [-]	ρ [kg/m ³]
210	0,3	7850

Tabla 3.2: Propiedades del material del acero de la torre.

El modelo de la estructura se ha realizado con el programa ANSYS. Entre los distintos elementos que se sitúan sobre la torre se encuentran las palas, la góndola y el rotor. Estos elementos aportan una masa muy importante a la estructura y por ello debe ser considerada. Como simplificación, se ha supuesto que toda la masa que aportan los tres elementos se encuentra localizada en un punto situado en lo alto de la torre. La masa puntual que se ha incluido con un elemento MASS 21 es de $112 \cdot 10^3$ kg [32].

La torre se ha modelado con elementos finitos del tipo viga de Timoshenko BEAM 188 que, a diferencia de la viga de Euler-Bernoulli, considera la deformación por cortante. Para el mallado de la torre de la estructura, se han considerado elementos de 1 m de longitud. El aerogenerador se encuentra empotrado en la base a la cimentación, impidiéndose todos los desplazamientos y giros.

El amortiguamiento estructural se considera del 5% para todos los modos que contribuyen significativamente a la respuesta de la estructura.

Tras realizar un análisis modal a la estructura, se obtienen las frecuencias naturales que se observan en la Tabla 3.3. Los modos de vibración asociados a dichas frecuencias se representan en la Figura 3.5. Los modos de las Figuras 3.5 (a), (b), (d) y (f) son modos asociados a la flexión en el plano $x - z$. El modo 3.5 (c) es de torsión sobre el eje z y el modo 3.5 (e) es el longitudinal.

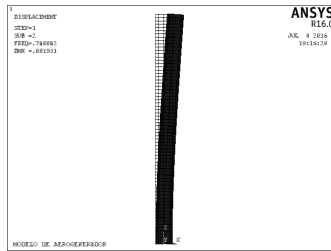
Modo	Frecuencia (Hz)
1	0.7800
2	5.1270
3	11.4561
4	14.0619
5	15.7508
6	26.1256

Tabla 3.3: Frecuencias naturales del aerogenerador.

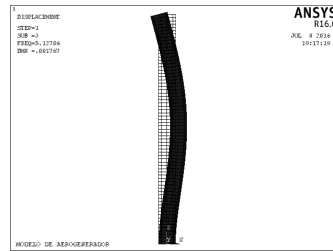
Para calcular las tensiones y los esfuerzos que se dan en la estructura debido a la propagación de ondas en el suelo que inciden en la base de la torre se aplican los espectros calculados en la sección 3.2. La respuesta estructural máxima se calcula mediante la suma de las contribuciones de cada modo. Existen varias técnicas de combinación disponibles: raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS), suma absoluta y combinación cuadrática completa (CQC). En el presente trabajo se ha empleado el método SRSS que se expresa según:

$$u_{max} = \sqrt{\sum_{i=1}^{nmodos} |u_{i,max}|^2} \quad (3.14)$$

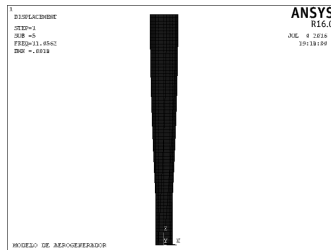
donde u_{max} es la respuesta máxima de la estructura, $u_{i,max}$ es la respuesta máxima del modo i y $nmodos$ es el número de modos considerados en el análisis.



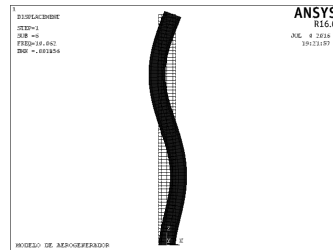
(a) Modo 1



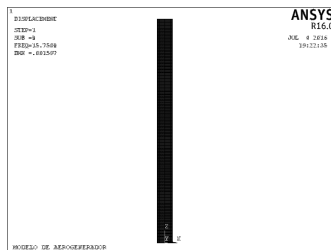
(b) Modo 2



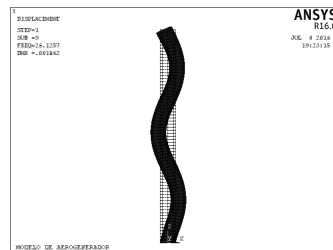
(c) Modo 3



(d) Modo 4



(e) Modo 5



(f) Modo 6

Figura 3.5: Modos de vibración fundamentales.

3.4. Resultados numéricos

Tras aplicar los espectros de las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 y los análogos cuando la carga actúa en dirección x e y en la estructura (pueden observarse en el Apéndice B), se obtienen los resultados que se exponen a continuación.

En primer lugar se han obtenido las tensiones máximas que aparecen en la base de la estructura cuando las ondas inciden en la misma. En las Tablas 3.4, 3.6 y 3.8 se muestran los valores de las tensiones máximas para el modelo estratificado del suelo 1, 2 y 3 respectivamente.

Análogamente, se incluyen en las Tablas 3.5, 3.7 y 3.9 los valores máximos de las tensiones para el modelo homogéneo del suelo 1, 2 y 3 respectivamente.

Estos valores se han obtenido cuando la sollicitación actúa en las tres direcciones (x, y, z) . También se han obtenido para distintas separaciones entre el punto de aplicación de la carga y la base de la estructura. Esta separación, d , se indica en la primera fila de dichas tablas.

Los valores obtenidos de las tensiones no pueden ser analizados desde un punto de vista cuantitativo ya que se producen para una carga de 1 N. Por ello, carece de sentido

analizar las posibles plastificaciones en cualquier punto de la estructura ya que con tal carga, no se van a producir. Los resultados muestran todo su interés desde un punto de vista cualitativo comparando los valores para el modelo estratificado y para el modelo homogéneo cuando la carga actúa en las tres direcciones.

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	1.5878	0.0291	0.0115	0.0068	0.0092	0.0105	0.0097	0.0086	0.0095	0.0085	0.0082
Y	2.2963	0.0244	0.0112	0.0149	0.0165	0.0170	0.0117	0.0289	0.0237	0.0210	0.0213
Z	1.4463	0.0111	0.0071	0.0101	0.0117	0.0132	0.0114	0.0103	0.0098	0.0112	0.0113

Tabla 3.4: Tensiones máximas en la estructura para el suelo 1: modelo estratificado [MPa].

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	0.9693	0.0379	0.0207	0.0125	0.0162	0.0185	0.0190	0.0183	0.0169	0.0160	0.0161
Y	1.4002	0.0421	0.0212	0.0296	0.0334	0.0329	0.0299	0.0286	0.0303	0.0319	0.0324
Z	0.9081	0.0233	0.0180	0.0234	0.0233	0.0207	0.0202	0.0220	0.0229	0.0232	0.0245

Tabla 3.5: Tensiones máximas en la estructura para el suelo 1: modelo homogéneo [MPa].

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	0.9917	0.0295	0.0103	0.0069	0.0052	0.0039	0.0042	0.0049	0.0053	0.0055	0.0055
Y	1.4371	0.0217	0.0109	0.0074	0.0064	0.0081	0.0090	0.0094	0.0095	0.0092	0.0092
Z	0.9009	0.0100	0.0059	0.0037	0.0052	0.0060	0.0063	0.0063	0.0061	0.0057	0.0053

Tabla 3.6: Tensiones máximas en la estructura para el suelo 2: modelo estratificado [MPa].

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	0.6146	0.0404	0.0192	0.0137	0.0102	0.0075	0.0086	0.0101	0.0109	0.0113	0.0114
Y	0.8896	0.0405	0.0219	0.0146	0.0141	0.0178	0.0196	0.0201	0.0199	0.0191	0.0180
Z	0.5779	0.0212	0.0118	0.0094	0.0127	0.0140	0.0143	0.0138	0.0128	0.0120	0.0121

Tabla 3.7: Tensiones máximas en la estructura para el suelo 2: modelo homogéneo [MPa].

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	0.7250	0.0269	0.0099	0.0064	0.0050	0.0041	0.0034	0.0028	0.0026	0.0030	0.0034
Y	1.0515	0.0226	0.0102	0.0072	0.0056	0.0043	0.0047	0.0056	0.0061	0.0064	0.0066
Z	0.6571	0.0105	0.0055	0.0039	0.0028	0.0032	0.0039	0.0043	0.0045	0.0045	0.0045

Tabla 3.8: Tensiones máximas en la estructura para el suelo 3: modelo estratificado [MPa].

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	0.4545	0.0385	0.0192	0.0130	0.0102	0.0083	0.0067	0.0054	0.0058	0.0067	0.0073
Y	0.6587	0.0419	0.0207	0.0148	0.0111	0.0085	0.0110	0.0127	0.0137	0.0142	0.0144
Z	0.4283	0.0215	0.0113	0.0079	0.0061	0.0083	0.0095	0.0100	0.0102	0.0101	0.0098

Tabla 3.9: Tensiones máximas en la estructura para el suelo 3: modelo homogéneo [MPa].

A la vista de los resultados obtenidos, puede apreciarse que el modelo homogéneo presenta valores inferiores a separaciones menores y superiores a separaciones mayores con

respecto al modelo estratificado. No obstante, resulta más claro observarlo en una gráfica distancia-tensiones de manera que se pueda establecer una comparación visual entre ambos resultados.

La Figura 3.6 representa el valor de las tensiones máximas frente a la distancia d entre el punto de aplicación de la carga y la base de la estructura para los suelos 1, 2 y 3.

Cuando la carga se aplica en dirección y , se producen las tensiones máximas para los dos modelos, lo cual tiene sentido dado que el espectro presentaba aceleraciones mayores para dicha dirección de sollicitación. En el caso de sollicitación en los otros dos ejes los resultados son inferiores aunque del mismo orden de magnitud que la anterior.

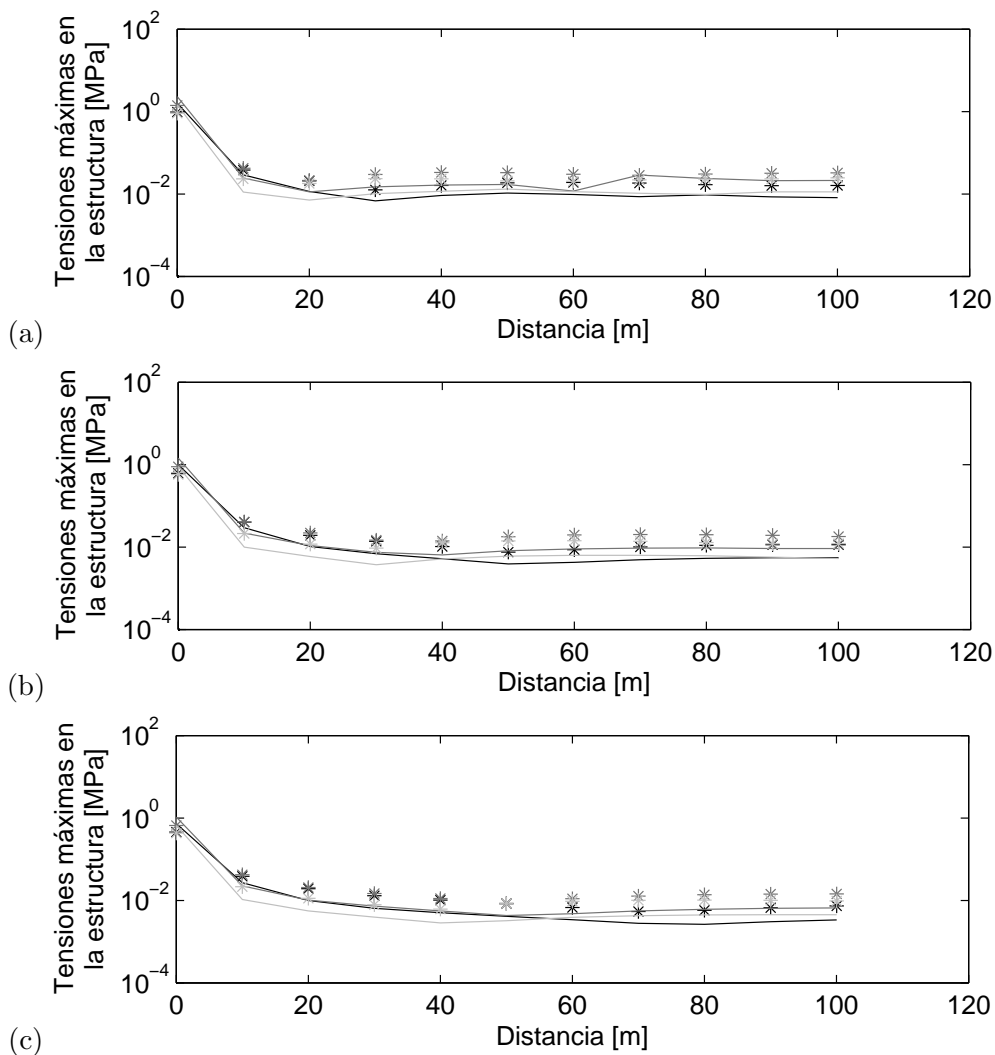


Figura 3.6: Tensiones máximas [MPa] en la estructura para una carga aplicada en dirección x (negro), dirección y (gris oscuro) y dirección z (gris claro). Comparación del modelo estratificado (línea sólida) y el modelo homogéneo (marcadores) del (a) suelo 1, (b) suelo 2 y (c) suelo 3.

En cuanto a las diferencias observadas entre el modelo estratificado y el modelo homogéneo, la tendencia es idéntica en los tres casos; cuando se estudia el perfil litológico mediante el modelo estratificado los resultados son más desfavorables cuando la distancia de separación es menor. Esto se debe a que las propiedades dinámicas del semiespacio homogéneo son mayores que las de la capa más superficial del perfil estratificado y esto

conlleva una mayor rigidez que disminuye los efectos sobre la estructura de las ondas propagadas. Cuando la distancia es mayor, el modelo estratificado presenta valores más bajos. Este hecho es debido a que al haber una mayor distancia de recorrido de las ondas, éstas llegan hasta el semiespacio infinito situado bajo el primer estrato que presenta propiedades dinámicas mayores que las del modelo del semiespacio homogéneo y por tanto, una mayor rigidez.

En segundo lugar, se han obtenido los esfuerzos más desfavorables, que al igual que las tensiones, aparecen en la base de la estructura cuando las ondas inciden en la misma. Los resultados de los cortantes en dirección x e y son despreciables frente al cortante en dirección z , correspondiente al axil de la estructura, por lo que no se van a considerar. Al estar aplicando una fuerza de 1 N los momentos en las tres direcciones presentan valores del orden de 10^{-9} MPa, por lo que tampoco van a ser considerados en el análisis. Esto implica que el único esfuerzo que se va a analizar es el cortante en dirección z , obtenido para las tres direcciones posibles de la sollicitación (x, y, z) y para diferentes distancias de separación d entre la fuente y la base de la estructura.

En las Tablas 3.10, 3.12 y 3.14 se incluyen los valores máximos de los axiles para el modelo estratificado del suelo 1, 2 y 3 respectivamente.

Análogamente, se incluyen en las Tablas 3.11, 3.13 y 3.15 los valores máximos de los axiles para el modelo homogéneo del suelo 1, 2 y 3 respectivamente.

Si anteriormente se hablaba de la carencia de sentido de analizar las posibilidades de plastificaciones, ahora ocurre lo mismo pero en términos de resistencia de la sección debido a que son los resultados para una carga de 1 N, la cual dista bastante de los valores reales que solicitan una estructura.

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	1841.1	33.8	13.4	7.9	10.7	12.1	11.3	10.0	11.0	9.8	9.5
Y	2662.6	28.3	13.0	17.2	19.2	19.8	13.6	33.5	27.5	24.4	24.7
Z	1677.1	12.8	8.3	11.8	13.5	15.3	13.2	12.0	11.3	13.0	13.1

Tabla 3.10: Cortante vertical, V_z , para el suelo 1: modelo estratificado [kN].

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	1123.9	44.0	24.0	14.5	18.7	21.5	22.0	21.2	19.5	18.5	18.7
Y	1623.6	48.8	24.6	34.4	38.7	38.1	34.7	33.2	35.2	36.9	37.6
Z	1053.0	27.0	20.8	27.1	27.0	24.0	23.5	25.6	26.5	26.9	28.4

Tabla 3.11: Cortante vertical, V_z , para el suelo 1: modelo homogéneo [kN].

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	1149.9	34.2	12.0	8.0	6.0	4.5	4.9	5.7	6.2	6.4	6.4
Y	1666.4	25.2	12.6	8.6	7.4	9.4	10.5	10.9	11.0	10.7	10.7
Z	1044.6	11.5	6.8	4.3	6.0	7.0	7.3	7.3	7.1	6.6	6.1

Tabla 3.12: Cortante vertical, V_z , para el suelo 2: modelo estratificado [kN].

El comportamiento de los cortantes máximos sigue la misma tendencia que las tensiones ya que puede observarse que el modelo homogéneo presentan valores inferiores a separaciones menores y superiores a separaciones mayores. Por otro lado, se comprueba que como cabía esperar la sollicitación en dirección y es la que provoca los resultados ma-

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	712.6	46.8	22.3	15.9	11.9	8.7	10.0	11.7	12.7	13.1	13.2
Y	1031.6	46.9	25.4	17.0	16.4	20.6	22.7	23.3	23.1	22.2	20.8
Z	670.1	24.6	13.7	10.9	14.7	16.3	16.5	16.0	14.9	13.9	14.1

Tabla 3.13: Cortante vertical, V_z , para el suelo 2: modelo homogéneo [kN].

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	840.7	31.2	11.5	7.5	5.8	4.8	3.9	3.2	3.0	3.5	3.9
Y	1219.2	26.2	11.8	8.4	6.5	5.0	5.5	6.5	7.1	7.5	7.7
Z	761.9	12.2	6.4	4.6	3.3	3.7	4.5	5.0	5.2	5.2	5.2

Tabla 3.14: Cortante vertical, V_z , para el suelo 3: modelo estratificado [kN].

yores para ambos modelos. Si se representan en una gráfica distancia-cortante se realiza una comparación más clara entre ambos resultados.

La Figura 3.7 representa el valor de los axiles máximos frente a la distancia d entre el punto de aplicación de la carga y la base de la estructura para los suelos 1, 2 y 3.

Las diferencias observadas entre el modelo estratificado y el modelo homogéneo son las mismas comentadas para el análisis de las tensiones. El modelo estratificado presenta resultados más desfavorables cuando la distancia de separación es menor, debido también a la diferencia entre las propiedades dinámicas del primer estrato y del semiespacio homogéneo. Cuando la distancia es mayor, el modelo estratificado presenta valores más bajos debido a la diferencia entre las propiedades dinámicas del semiespacio infinito situado debajo del primer estrato y del semiespacio homogéneo.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se ha ilustrado el método de la respuesta espectral para el análisis dinámico, basado en un espectro de respuesta que representa la respuesta máxima de cualquier sistema de un grado de libertad ante un terremoto dado. A pesar de las limitaciones que presenta, análisis lineal elástico y aproximado, es ampliamente utilizado hoy en día debido a que únicamente calcula los valores máximos para cada modo de vibración y simplifica computacionalmente el cálculo.

Los espectros en pseudo-aceleraciones se han obtenido para los tres tipos de suelos cuando la carga actúa en superficie en las tres direcciones independientes. Esta carga se encuentra a una distancia d de la cimentación de la estructura, la cual se ha ido variando para ver las implicaciones que conlleva aumentar la distancia.

d	0.01 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
X	527.0	44.6	22.3	15.0	11.8	9.6	7.8	6.2	6.7	7.7	8.5
Y	763.8	48.6	23.9	17.1	12.9	9.9	12.8	14.7	15.9	16.5	16.7
Z	496.6	24.9	13.1	9.1	7.1	9.6	10.9	11.6	11.8	11.7	11.3

Tabla 3.15: Cortante vertical, V_z , para el suelo 3: modelo homogéneo [kN].

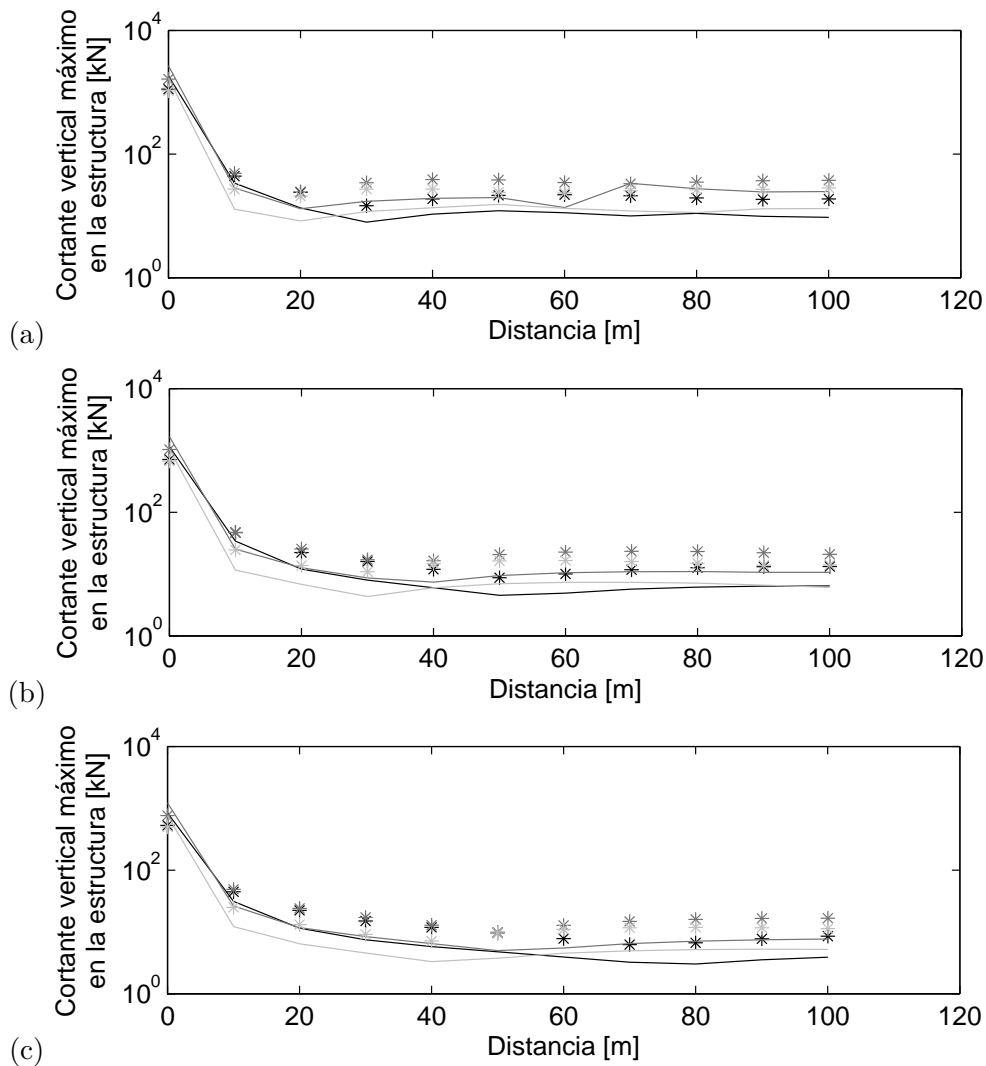


Figura 3.7: Cortante máximo [kN] en la estructura para una carga aplicada en dirección x (negro), dirección y (gris oscuro) y dirección z (gris claro). Comparación del modelo estratificado (línea sólida) y el modelo homogéneo (marcadores) del (a) suelo 1, (b) suelo 2 y (c) suelo 3.

Concretamente, la estructura considerada es un aerogenerador eólico metálico de 70 m de altura y empotrado en la base.

Los espectros se aplicaron al aerogenerador eólico mediante el programa ANSYS y se obtuvieron los resultados máximos en la base. Debido a que la carga es muy pequeña, los momentos son de un orden despreciable y no se han considerado. Igualmente, los cortantes en dirección x e y son despreciables frente al axil, por lo que finalmente se hallaron únicamente las tensiones y los axiles.

Tras analizar los resultados, se obtienen diversas conclusiones de interés. La primera de ellas es que el modelo homogéneo subestima los resultados cuando la distancia entre la fuente y la estructura es pequeña. Al contrario, cuando la distancia de separación es mayor, el modelo homogéneo sobrestima los resultados del modelo estratificado. Este fenómeno se debe a que el parámetro $Vs30$ es una velocidad media de las ondas de corte que, recordando que el primer estrato tiene una profundidad de 4 m y el semiespacio infinito de 26 m, tiene un valor más cercano al semiespacio que al primer estrato. Por ello, tanto los resultados de

tensiones como de cortante son mayores para el modelo estratificado a distancias pequeñas (hasta 10 m) y menores para distancias mayores, en relación al modelo homogéneo. Esta principal conclusión se explica en detalle en los siguientes párrafos.

Anteriormente se ilustraron los resultados con el eje vertical en escala logarítmica para apreciar mejor todos los valores. Sin embargo, para entender mejor el comportamiento, es aconsejable representar el eje vertical en escala decimal. La explicación es válida tanto para las tensiones como para los cortantes, por lo que únicamente se representará uno de ellos: el cortante. En la Figura 3.8 se representan los cortantes de los suelos 1, 2 y 3.

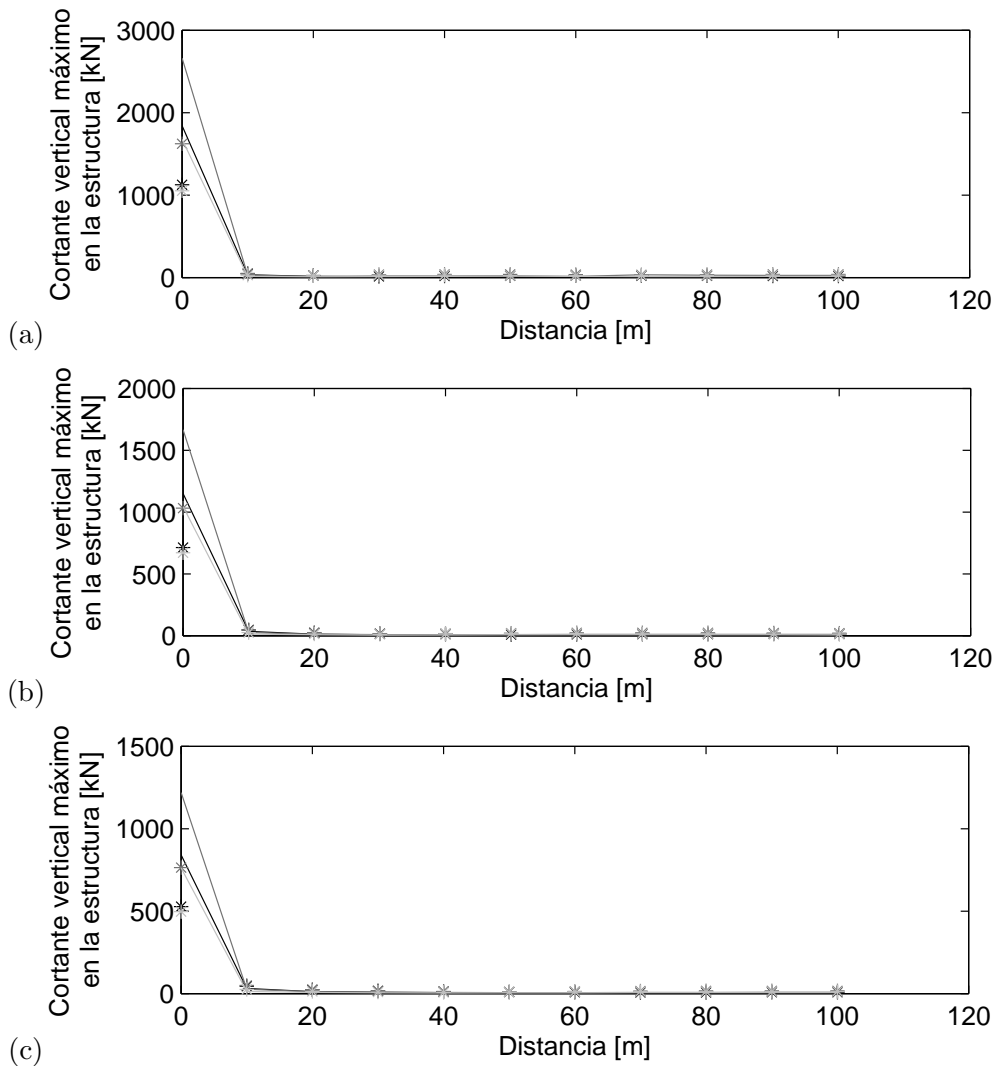


Figura 3.8: Cortante máximo [kN] en la estructura para una carga aplicada en dirección x (negro), dirección y (gris oscuro) y dirección z (gris claro). Comparación del modelo estratificado (línea sólida) y el modelo homogéneo (marcadores) con eje decimal del (a) suelo 1, (b) suelo 2 y (c) suelo 3.

Se puede comprobar que a distancias pequeñas la diferencia absoluta de los resultados de ambos modelos es mayor que a distancias grandes. Esto es debido a que las ondas con longitudes de ondas pequeñas (afectan sólo a distancias pequeñas) se propagan por el estrato superior y sus propiedades dinámicas son las que más influencia tienen sobre los efectos en la estructura. Al utilizar un modelo homogéneo, los resultados se subestiman porque se está considerando una media de las propiedades dinámicas sin tener en cuenta que para este caso, el primer estrato es predominante. El hecho de que el modelo homogéneo

subestime los resultados es debido a que las propiedades dinámicas del estrato superior son inferiores y por tanto, el modelo homogéneo es más rígido lo que provoca unos menores efectos sobre la estructura.

En cambio, las ondas con longitudes de ondas grandes (se propagan hasta distancias grandes) llegan al semiespacio y estarán contenidas en él casi totalmente y son las propiedades del semiespacio las que más influyen en el comportamiento de la estructura. En este sentido se comprueba que los resultados del modelo homogéneo se acercan más, como se ha dicho anteriormente, a los del modelo estratificado, ya que ahora el hecho de considerar una media de las propiedades dinámicas representa más adecuadamente el problema.

Por otra parte, y reiterando lo dicho anteriormente, en los tres suelos el parámetro V_{s30} es más cercano al valor de la velocidad de las ondas de corte del semiespacio del suelo estratificado que a la velocidad del primer estrato. Por ello, los resultados son más similares cuando la propagación de ondas está más influenciada por el semiespacio, es decir, longitudes de onda grandes. En cambio, cuando la longitud de onda es pequeña, el primer estrato es el más influyente y al existir una mayor diferencia entre los valores de las velocidades de las ondas de corte, los resultados difieren más.

Una segunda conclusión importante surge de observar como la disipación mecánica debido al amortiguamiento del material y la disipación geométrica es muy importante en el estudio realizado. Por ello se puede afirmar que a partir de una distancia de separación entre la fuente y la estructura, las tensiones y los esfuerzos se hacen despreciables.

Capítulo 4

Conclusiones

En el último siglo se han desarrollado la mayoría de los modelos de propagación de ondas en suelos. Comenzando por Lamb en 1903, quien estudió la propagación de vibraciones sobre la superficie de un semiespacio isótropo y elástico producidas por una carga impulsiva vertical.

Cuando se trata de un suelo estratificado horizontalmente, las soluciones se presentan en el dominio frecuencia-número de onda, en lugar del dominio del tiempo de los suelos homogéneos. El método directo de la rigidez desarrollado por Kausel y Roësset es uno de los más empleados ya que resuelve el problema para una fuente ubicada arbitrariamente en el semiespacio. Su doble integración en la frecuencia y en el número de onda hizo que el propio Kausel desarrollara el Thin Layer Method que permite obtener la solución en el dominio del tiempo.

El desarrollo de este trabajo ha consistido en modelizar un tipo de suelo mediante dos modelos diferentes, uno estratificado y otro como un semiespacio homogéneo con propiedades equivalentes mediante el método Vs30, que se define como la media de las velocidades de las ondas de corte en los 30 m más superficiales.

El parámetro Vs30 se obtiene a partir de las velocidades de las ondas de corte de los 30 m más superficiales. Para conocer dichas velocidades se pueden emplear varias técnicas. Una de las técnicas más utilizadas es el SASW (Spectral Analysis of Surface Wave) que permite calcular de manera no invasiva el perfil de las velocidades de las ondas de corte.

Para analizar la validez del método Vs30 se ha estructurado el trabajo en dos grandes capítulos. En el primero de ellos se calcula mediante el método directo de la rigidez las funciones de Green bidimensionales, la curva de dispersión y la curva de atenuación de las ondas de Rayleigh. En el segundo se obtienen las tensiones y los esfuerzos en una estructura mediante el análisis modal espectral y se comparan los resultados que ofrecen los dos modelos del suelo.

Cuando se han analizado los resultados de las funciones de Green para los dos modelos del suelo se han obtenidos resultados muy similares. Sin embargo, existen pequeñas diferencias a distancias pequeñas entre la fuente y el receptor. El modelo con el semiespacio homogéneo presenta menos oscilaciones debido a que al no haber estratos se producen menos interferencias entre las ondas. A distancias mayores, ambos modelos presentan los

mismos resultados. Cuando la sollicitación actuaba en dirección y , los valores de los dos modelos se ajustaban mejor que para las otras dos direcciones, tanto para grandes como pequeñas distancias, por lo que el parámetro $Vs30$ es válido para la modelización de suelos estratificados en esa dirección.

En cambio, los espectros de respuesta para los dos modelos sí se muestran bastante diferentes. A distancias grandes el modelo con el suelo homogéneo presenta valores de las pseudo-aceleraciones más altos debido a que al hacer la media de las velocidades de las ondas de corte, infravalora las propiedades dinámicas del semiespacio infinito que se encuentra debajo del primer estrato y a grandes distancias este semiespacio tiene más influencia sobre el comportamiento estructural. No obstante, cuando la distancia entre la fuente y el receptor es pequeña, las ondas se propagan por el estrato más superficial cuyas propiedades dinámicas, más bajas (menor rigidez) que las del modelo homogéneo, son las que más influyen en el comportamiento de la estructura y por ello se obtienen aceleraciones más bajas que en el modelo estratificado.

Naturalmente, las tensiones y los esfuerzos presentan un comportamiento análogo al de los espectros. Las variaciones a distancias de separación pequeña pueden llegar a ser del 40 %, lo que se considera demasiado alto para poder validar el método $Vs30$ en esos casos. Además, modelizar el suelo estratificado mediante el parámetro $Vs30$ no estaría del lado de la seguridad. A grandes distancias los resultados presentan una mayor similitud debido a que la influencia sobre la estructura se debe en gran medida a las propiedades dinámicas del semiespacio infinito cuyas propiedades dinámicas son muy parecidas a las del modelo homogéneo. No obstante, en este caso, el modelo homogéneo presenta valores más elevados de las aceleraciones por lo que estaría del lado de la seguridad modelizar el suelo mediante el método $Vs30$ aunque desde el punto de vista económico no es recomendable puesto que se diseñan las estructuras para unos esfuerzos y tensiones que son mayores de las reales y se estaría desaprovechando material.

Apéndice A

Funciones de Green para solicitud en dirección x e y

En la sección 2.5 se calcularon las funciones de Green para los tres tipos de suelos mediante el método directo de la rigidez. Los resultados cuando la solicitud actúa en dirección z se representaron, sin embargo en el caso de la dirección x e y no. A continuación, se muestran dichos resultados.

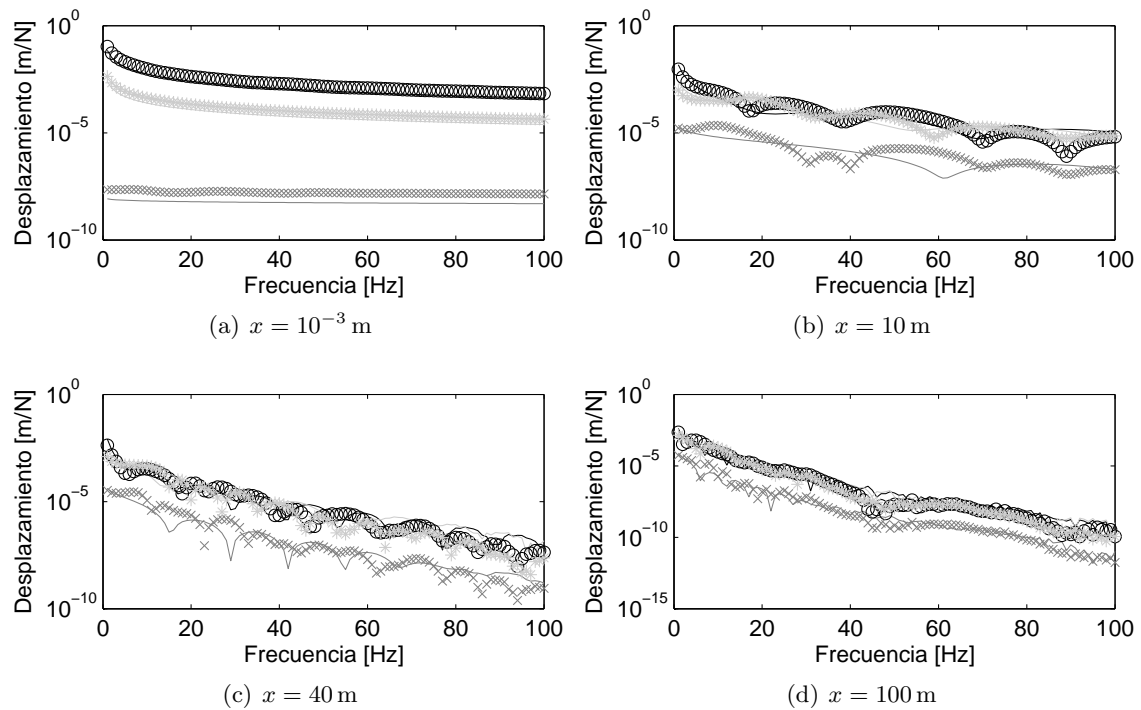


Figura A.1: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

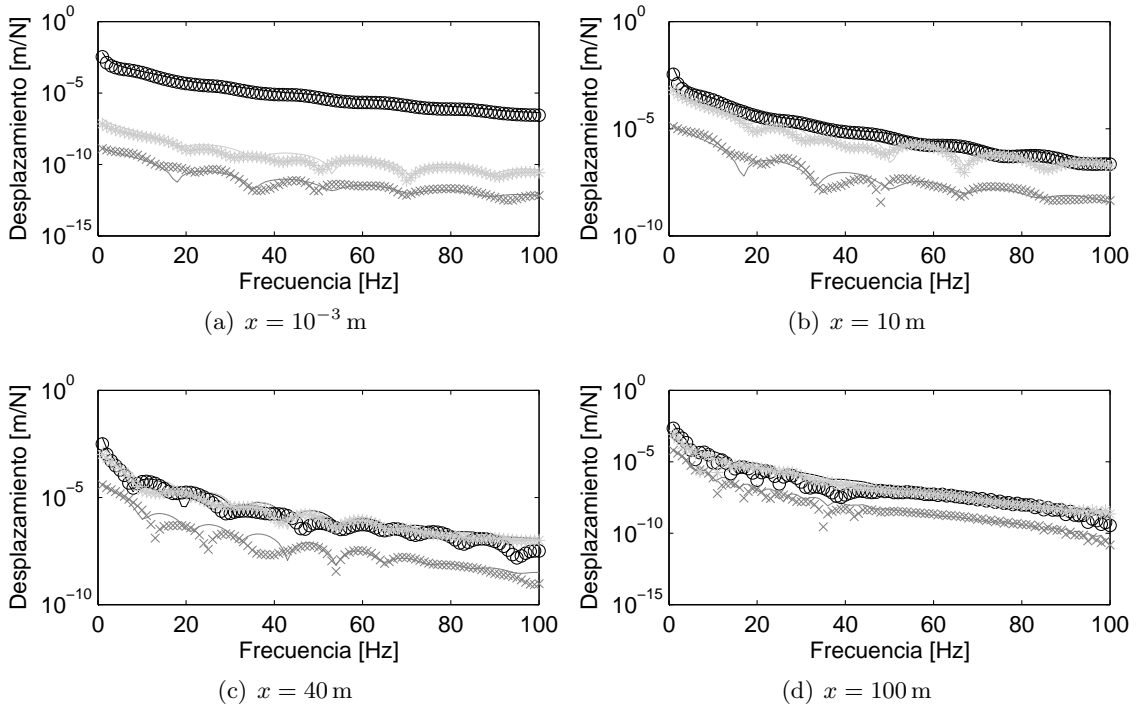


Figura A.2: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

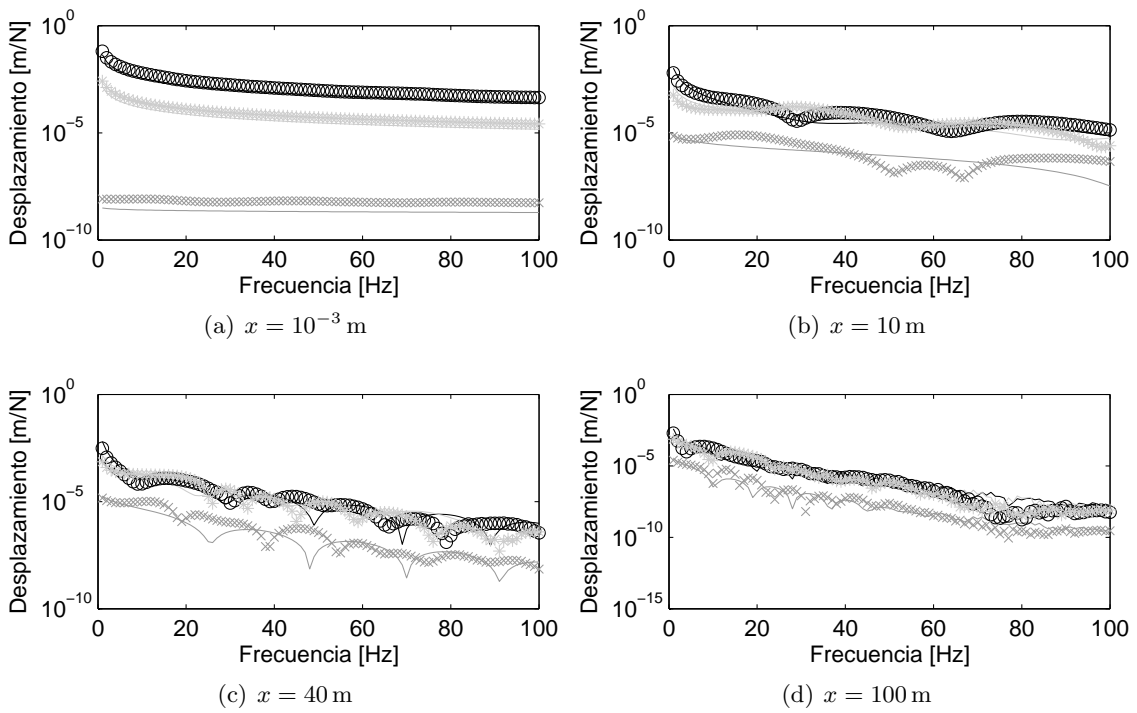


Figura A.3: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

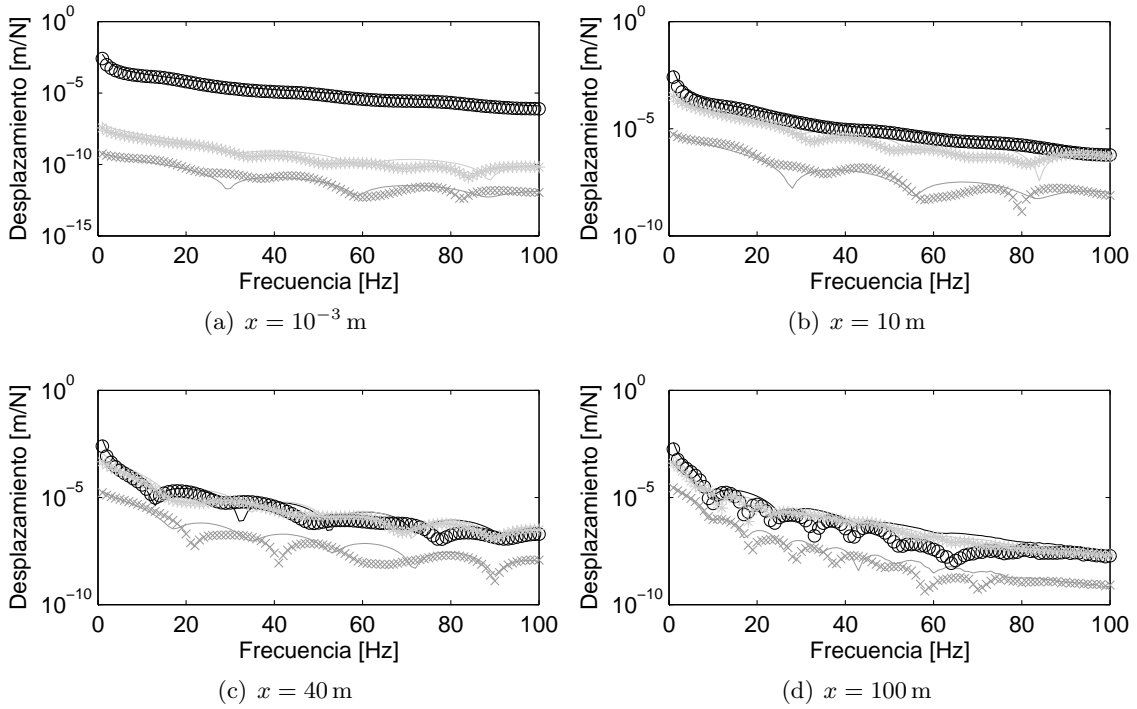


Figura A.4: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

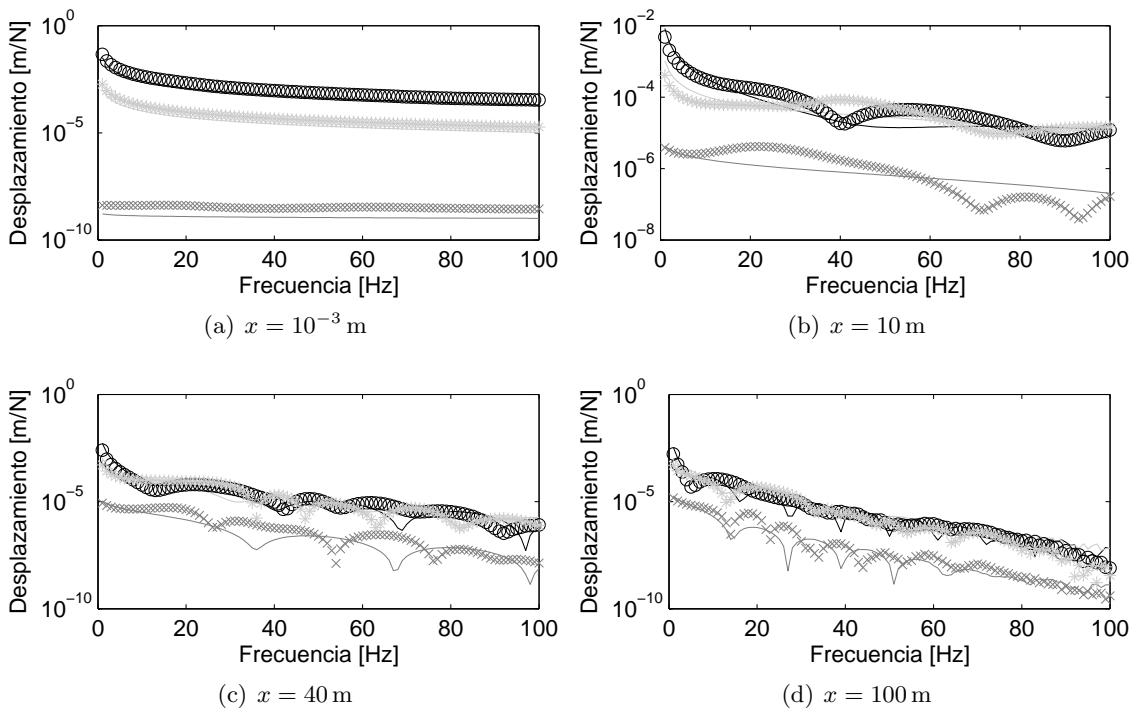


Figura A.5: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

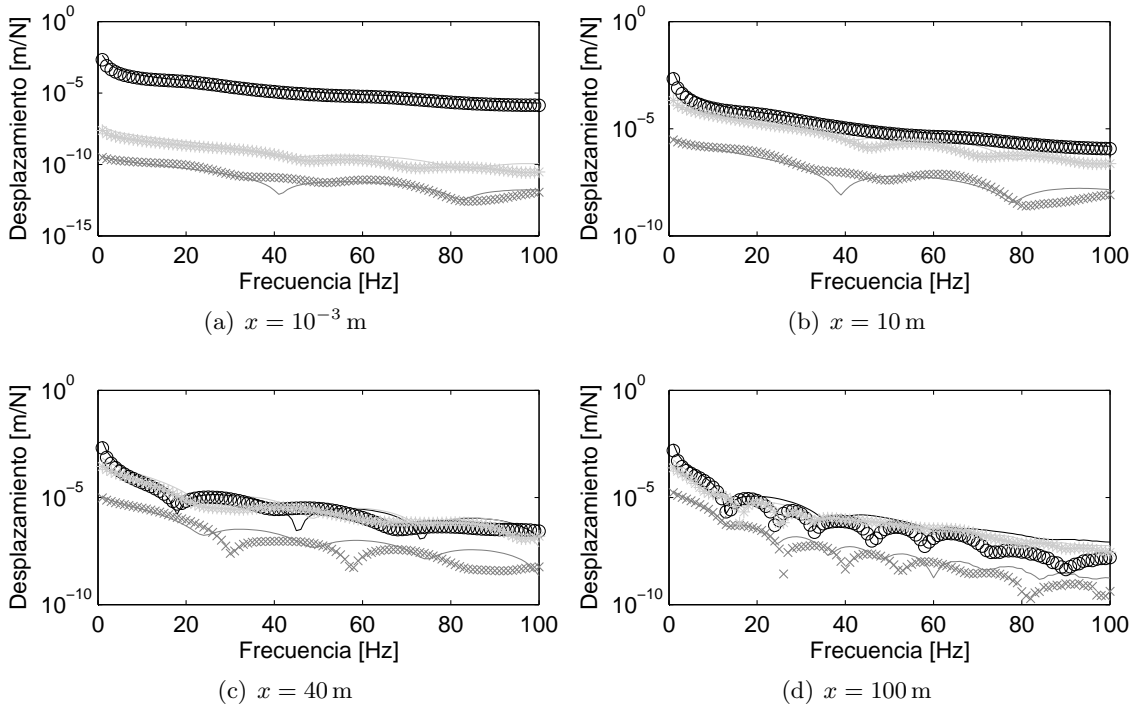


Figura A.6: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{xj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

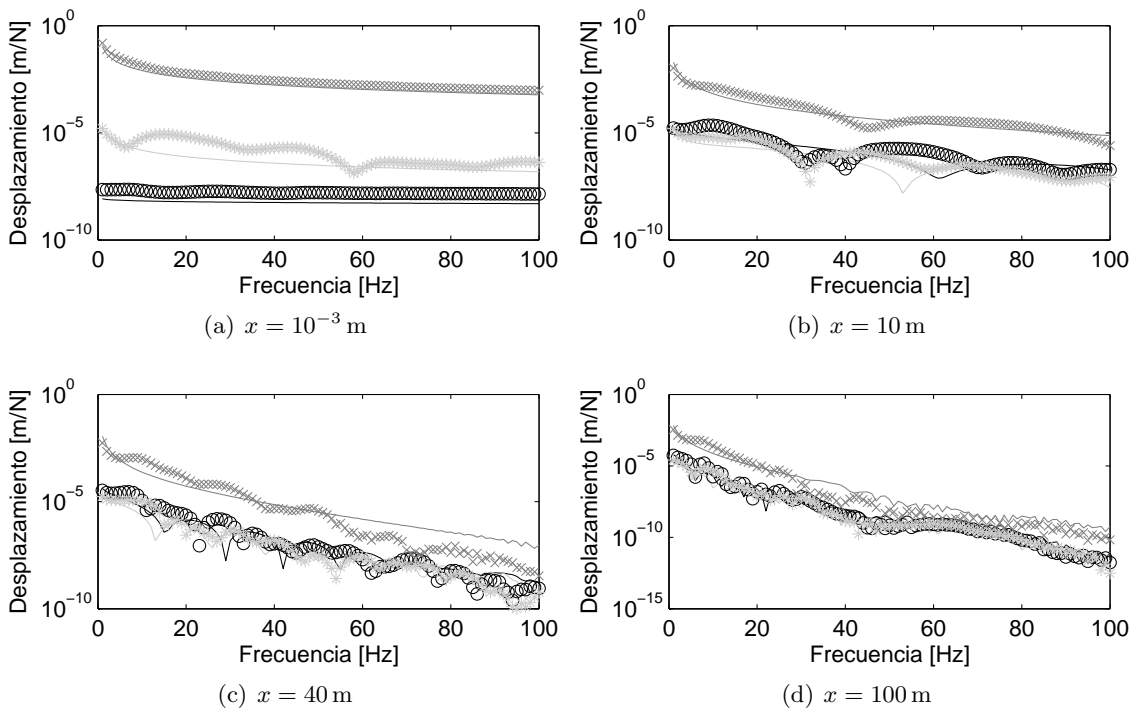


Figura A.7: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

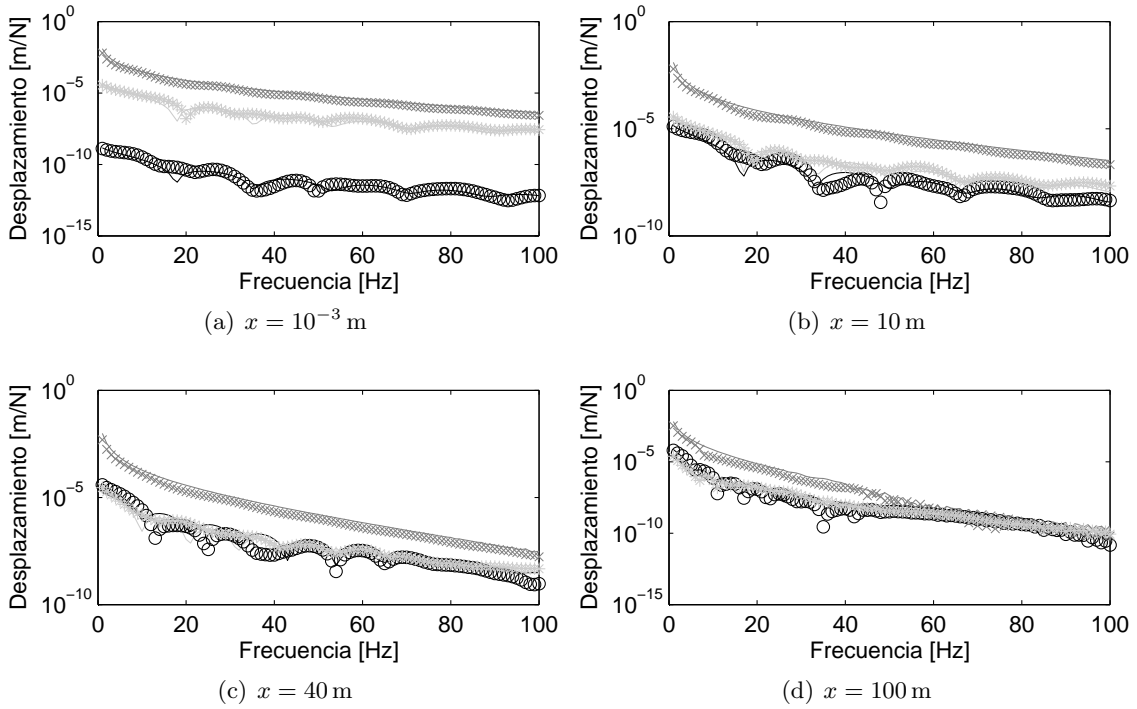


Figura A.8: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 1 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

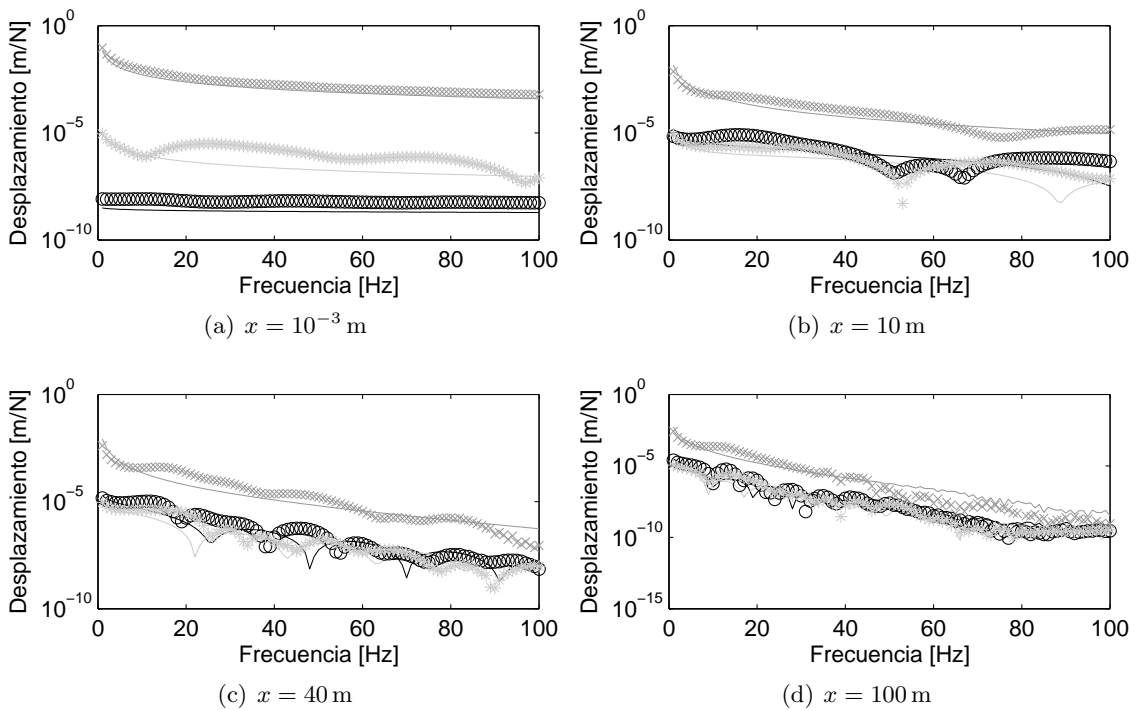


Figura A.9: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

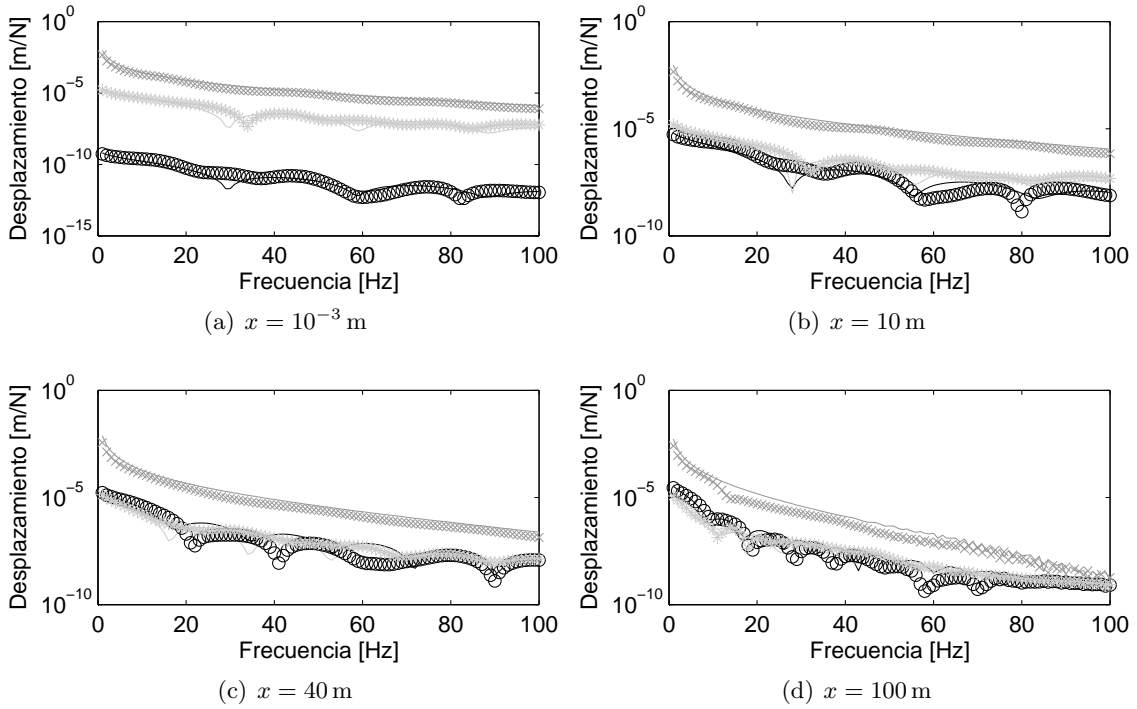


Figura A.10: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 2 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

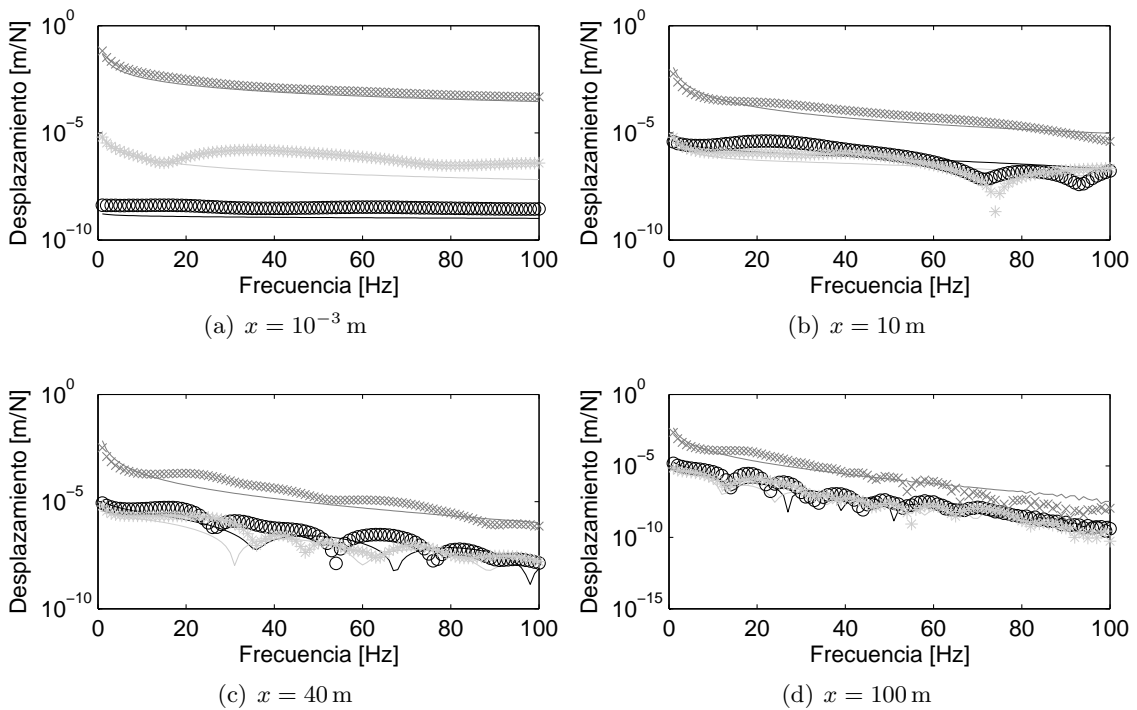


Figura A.11: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 0, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

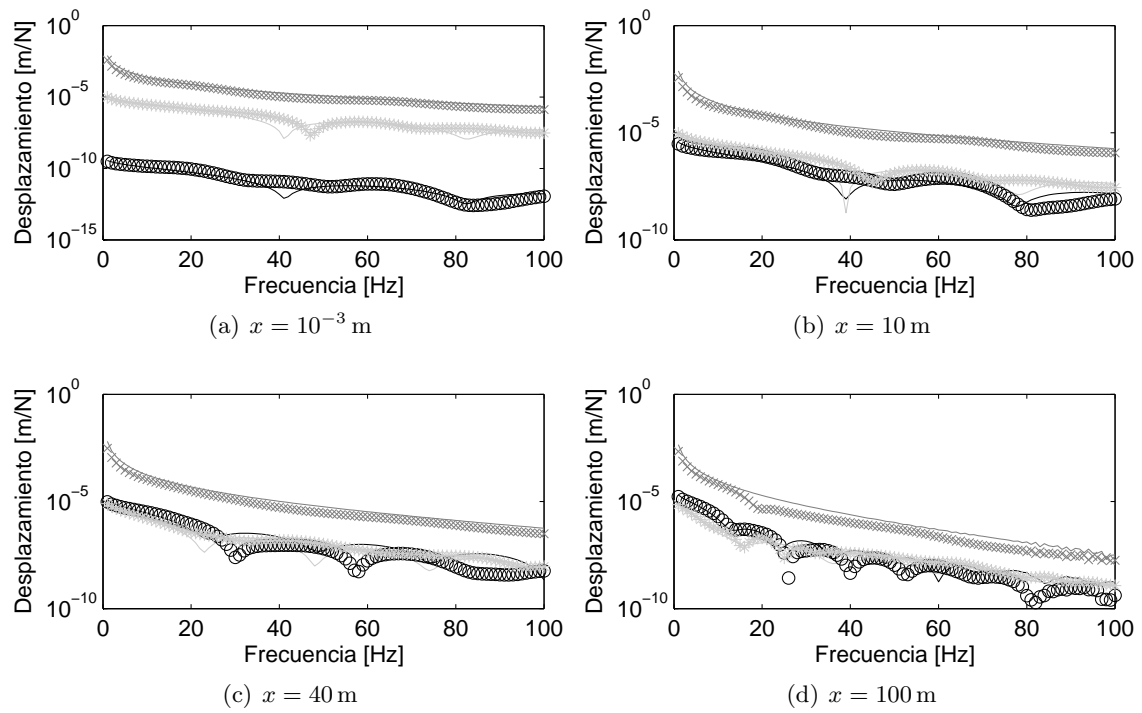


Figura A.12: Módulo de las funciones de Green $\hat{u}_{yj}^G(z' = 30, x, z = 0, \omega)$ del suelo 3 para suelo estratificado (marcadores) y suelo homogéneo (línea sólida) con $j = x$ (negro), $j = y$ (gris oscuro) y $j = z$ (gris claro).

Apéndice B

Espectros en pseudo-aceleraciones para sollicitación en dirección x e y

En la sección 3.2 se calcularon los espectros de respuesta en pseudo-aceleraciones para las tres direcciones de la carga cuando ésta actúa en superficie. Esos espectros fueron los que se emplearon para calcular las tensiones y los esfuerzos de la estructura en los tres tipos de suelo diferentes.

No obstante, sólo se representaron los espectros para la carga vertical. A continuación se muestran los espectros para la carga actuando en dirección x e y .

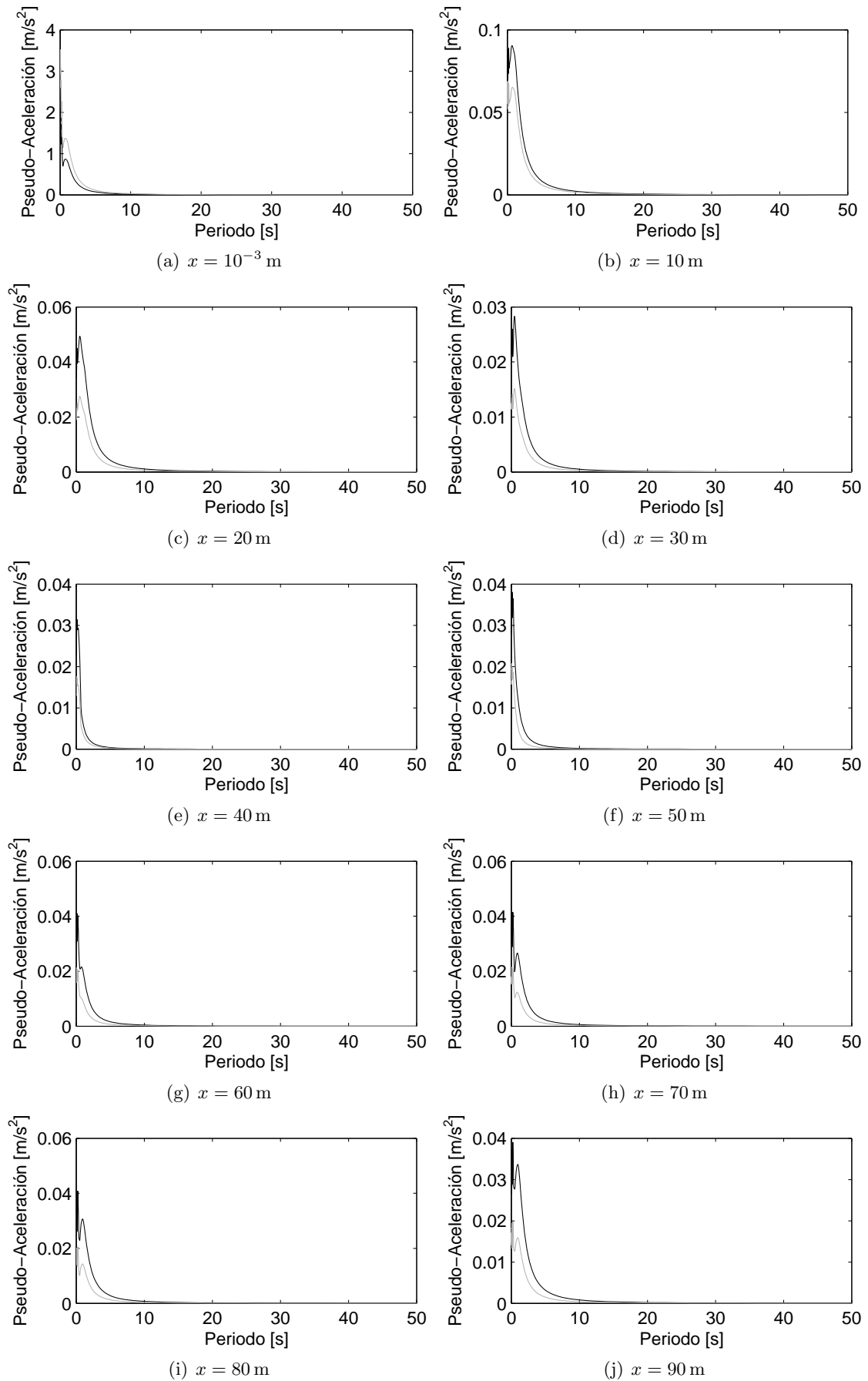


Figura B.1: Espectro de respuesta para carga actuando en dirección x en el suelo 1: (negro: homogéneo; gris: estratificado).

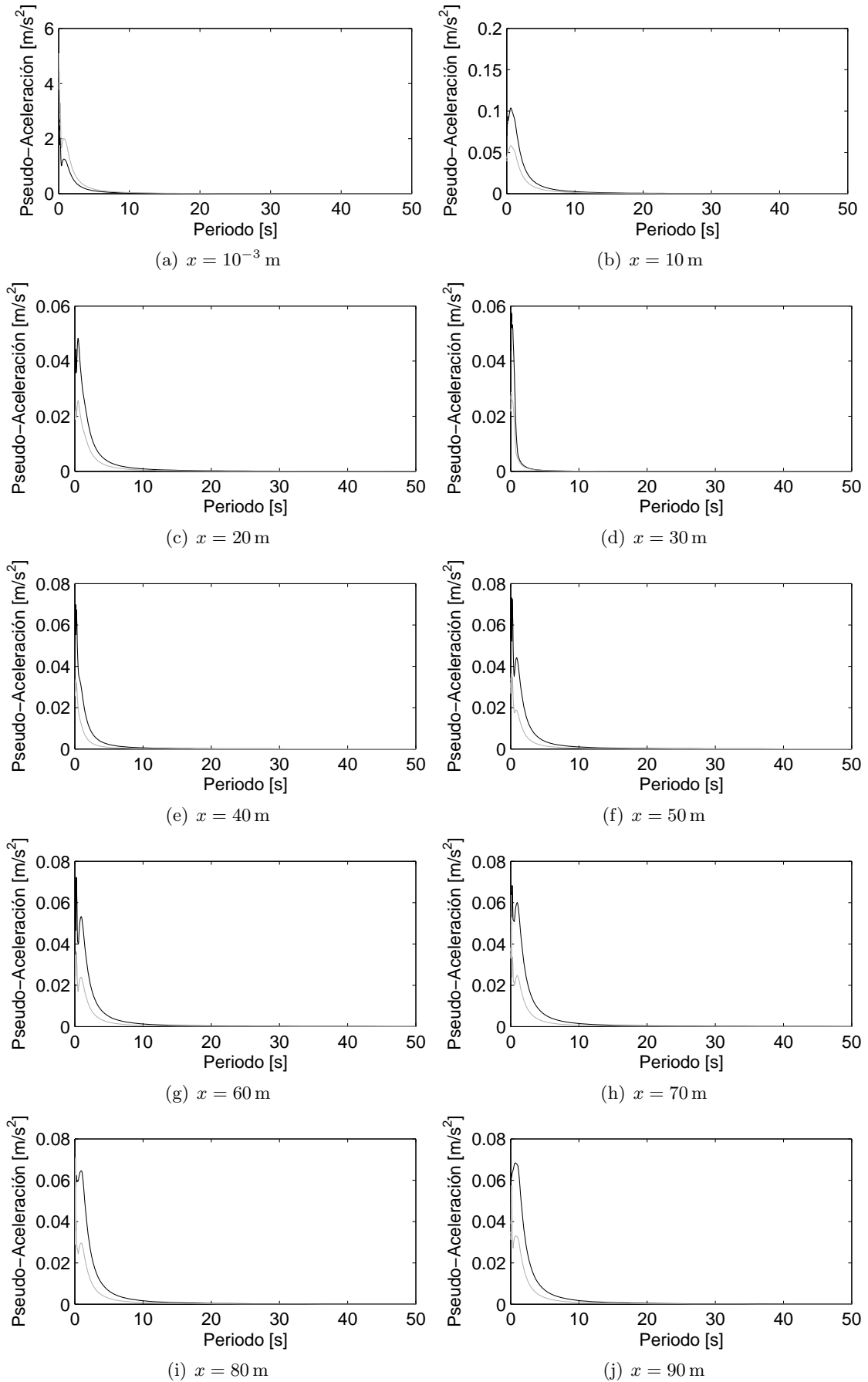


Figura B.2: Espectro de respuesta para carga actuando en dirección y en el suelo 1: (negro: homogéneo; gris: estratificado).

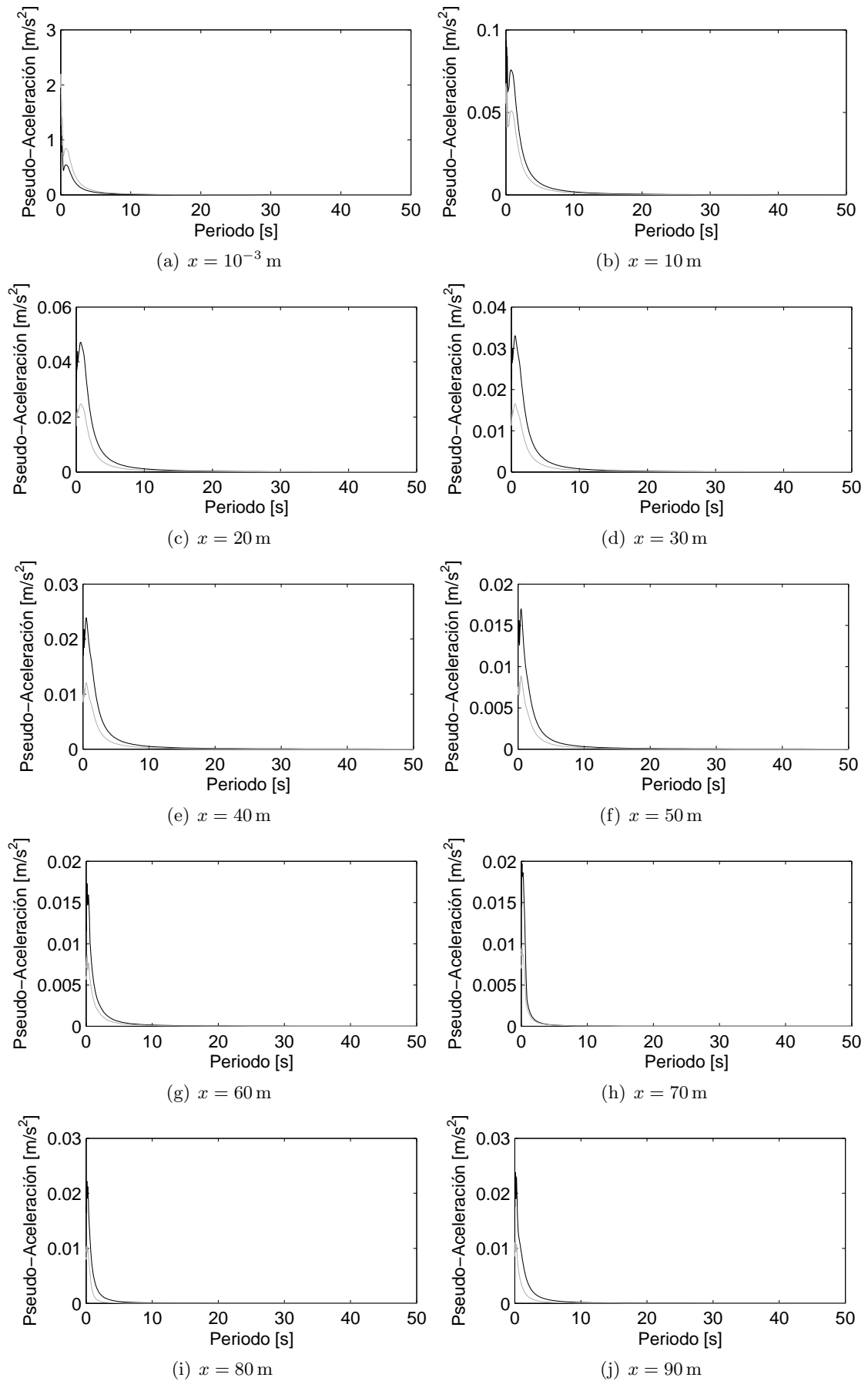


Figura B.3: Espectro de respuesta para carga actuando en dirección x en el suelo 2: (negro: homogéneo; gris: estratificado).

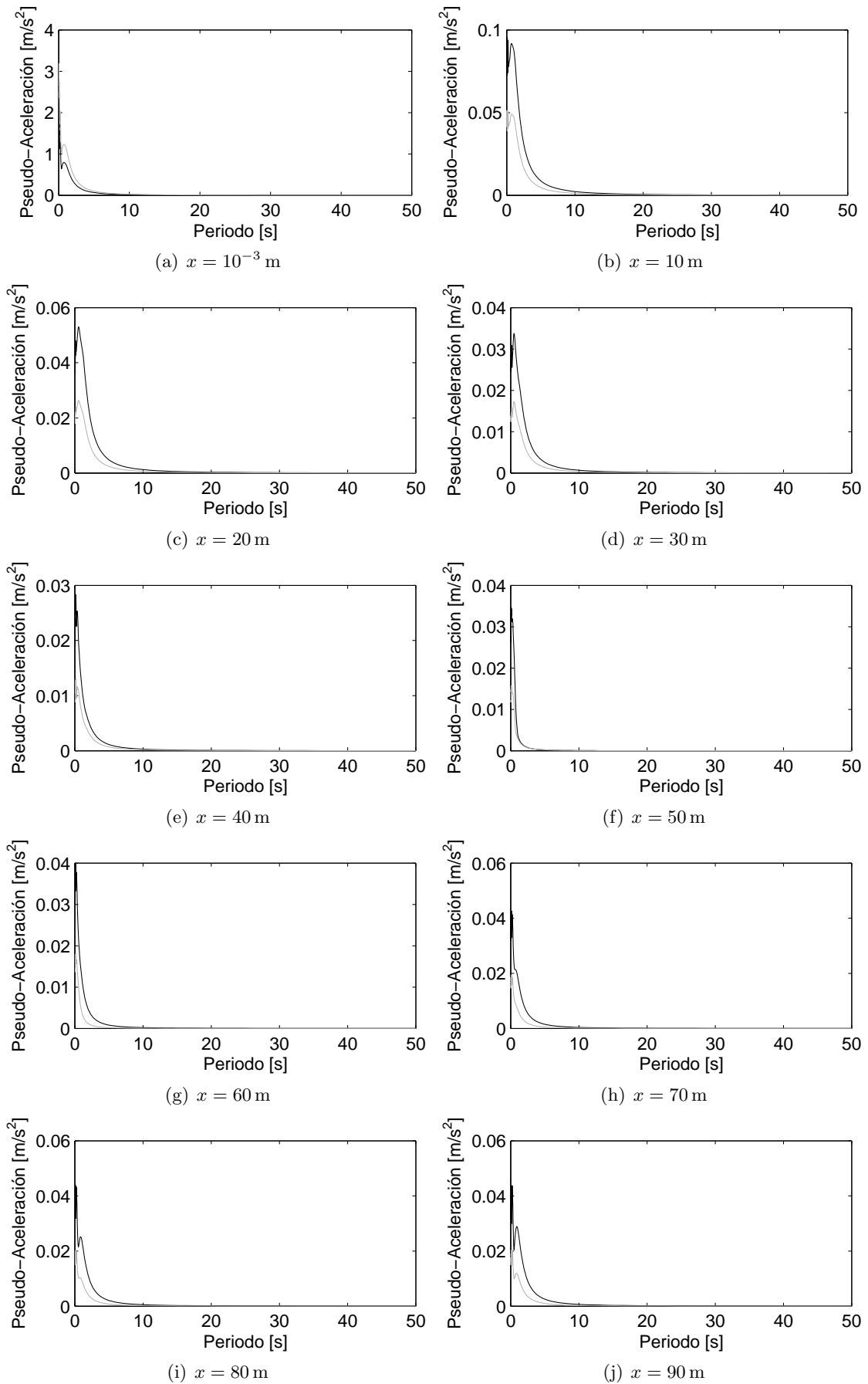


Figura B.4: Espectro de respuesta para carga actuando en dirección y en el suelo 2: (negro: homogéneo; gris: estratificado).

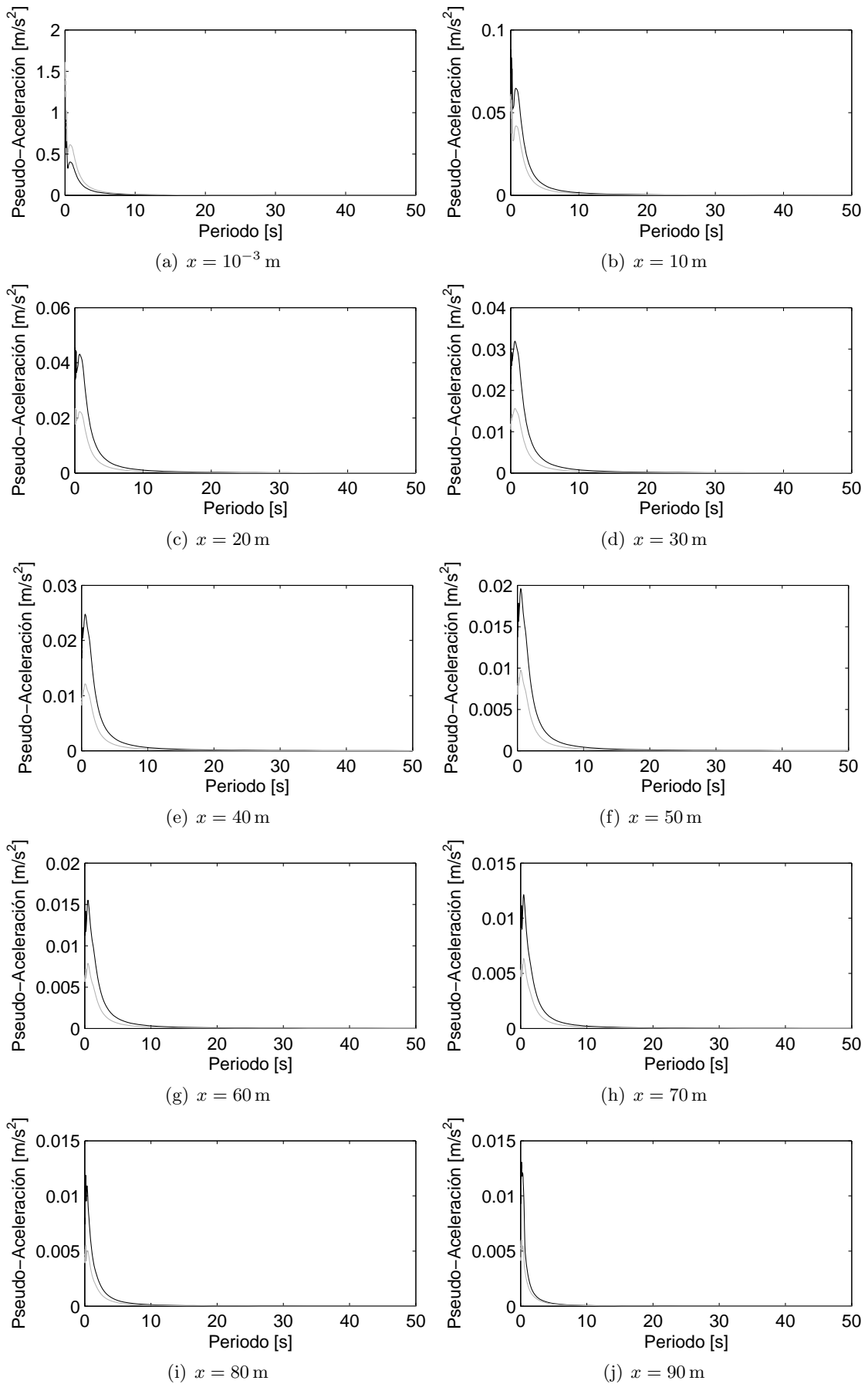


Figura B.5: Espectro de respuesta para carga actuando en dirección x en el suelo 3: (negro: homogéneo; gris: estratificado).

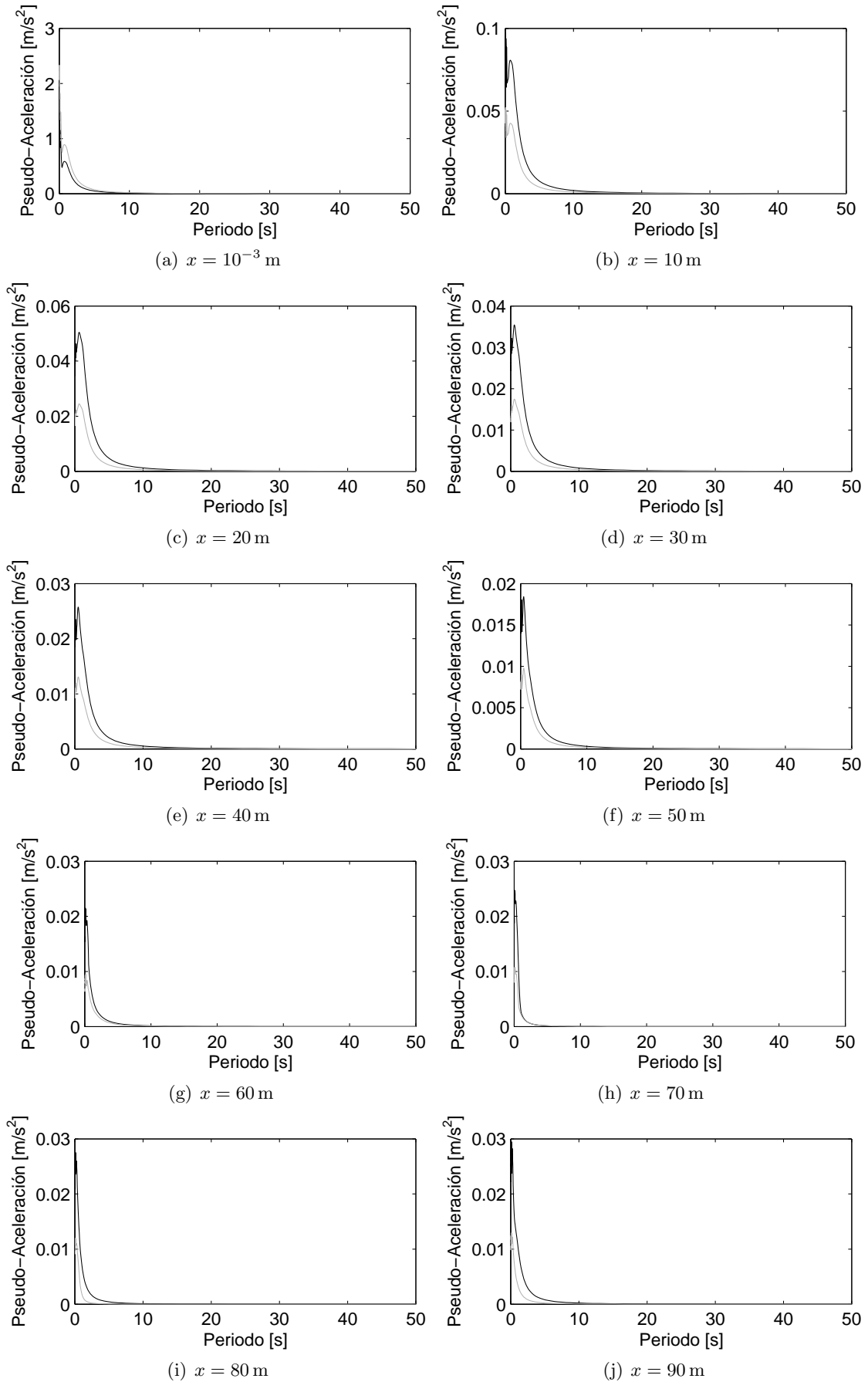


Figura B.6: Espectro de respuesta para carga actuando en dirección y en el suelo 3: (negro: homogéneo; gris: estratificado).

Bibliografía

- [1] Schmidt, V. *Determinación del parámetro VS30 usando los métodos FK y SPAC en la Bahía de Cádiz (Sur de España)*. Ingeniería 22, Vol. 1, p. 39-54, 2012.
- [2] Wair, B., DeJong, J., Shantz, Thomas. *Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles*. PEER Report, Pacific Earthquake Engineering Research Center Headquarters at University of California, 2012.
- [3] Nava, A. *Terremotos*. La ciencia para todos, 2002.
- [4] Adel, M. *Site-specific shear wave velocity investigation for geotechnical engineering applications using seismic refraction and 2D multi-channel analysis of surface waves*. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, Vol. 2, p. 88-101, 2013.
- [5] Kuo, C.H., Wen, K.L., Hsieh, H.H., Lin, C.M., Chang, T.M., Kuo, K.W. *Site classification and Vs30 estimation of free-field TSMIP stations using the logging data of EGDT*. Engineering Geology, p. 68-75, 2012.
- [6] Kuo, C.H., Cheng, D.S., Hsieh, H.H., Chang, T.M., Lin, C.M., Wen, K.L. *Comparison of three different methods in investigating shallow shear-wave velocity structures in Ilan, Taiwan*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 29, p. 133-143, 2009.
- [7] Humire, F., Sáez, E., Leyton, F. *Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro Vs30*. Instituto de la construcción, 2015.
- [8] Castellaro, S., Mulargia, F., Luigi, P. *Vs30: Proxy for Seismic Amplification*. Seismological Research Letters, Vol. 79, 2008.
- [9] Tsige, M., García, I. *Propuesta de clasificación geotécnica del Efecto Sitio de las formaciones geológicas de la Región de Murcia*. Geogaceta, Vol. 40, p. 39-42, 2006.
- [10] Ozcep, T., Ozcep, F., Ozel, O. *Vs30, site amplifications and some comparisons: The Adapazari case*. Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 63, p. 92-101, 2013.
- [11] Maugeri, M., Frenna, S.M., Spatola, P. *On Rayleigh waves propagation in layered soils*. Paper No.1840. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering.
- [12] Auersch, L. *Wave propagation in layered soils: theoretical solution in wavenumber domain and experimental results of hammer and railway traffic excitation*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 173, p. 233-264, 1994.
- [13] Kennett, B. *Seismic wave propagation in stratified media*. Australian National University.

-
- [14] Hisada, Y. *An efficient method for computing Green's functions for a layered Half-Space with Sources and Receivers at Close Depths (Part 2)*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 85, p. 1080-1093, 1995.
- [15] Schevenels, M., Lombaert, G., Degrande, G., Degrauwe, D., Schoors, B. *The Green's functions of a vertically inhomogeneous soil with a random dynamic shear modulus*. Probabilistic Engineering Mechanics, 2006.
- [16] Rix, G.J., Lai, C., Foti, S. *Simultaneous measurements of surface wave dispersion and attenuation curves*. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 24, p. 350-358, 2001.
- [17] Lu, L., Zhang, B. *Analysis of dispersion curves of Rayleigh waves in the frequency-wavenumber domain*. Can. Geotech, Vol. 41, p. 583-598, 2004.
- [18] Lamb, H. *On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Serie A, CCIII(1):1-42, 1904.
- [19] Chao, C. *Dynamical response of an elastic half-space to tangential surface loadings*. Journal of Applied Mechanics, Vol. 27, p. 559-567, 1960.
- [20] Bouchon, M. *A simple method to calculate Green's function for elastic layered media*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, p. 959-971, 1981.
- [21] Kausel, E., Roësset, J.M. *Stiffness matrices for layered soils*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, p. 1743-1761, 1981.
- [22] Pekeris, C.L. *The seismic surface pulse*. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 41, p. 469-480, 1955.
- [23] Kausel, E. *Thin Layer Method: Formulation in the time domain*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 37, p. 927-941, 1994.
- [24] Johnson, L.R. *Green's Function for Lamb's Problem*. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, Vol. 37, p. 99-131, 1974.
- [25] Aspel, R., Luco, E. *On the Green's function for a layered half-space (Part I)*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 73, p. 909-929, 1983.
- [26] Mooney, H.M. *Some numerical solutions for Lamb's problem*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 64, p. 473-491, 1974.
- [27] Schevenels, M. *The impact of uncertain dynamic soil characteristics on the prediction of ground vibrations*. Katholieke Universiteit Leuven, 2007.
- [28] Talman, J.D. *Numerical Fourier and Bessel transforms in logarithmic variables*. Journal of Computational Physics, Vol. 29, p. 35-48, 1978.
- [29] Athanasopoulos, G.A. *Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 19, p. 277-288, 2000.
- [30] Zomorodian, S.M. *Inversion of SASW dispersion curves based on maximum flexibility coefficients in the wavenumber domain*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 26, p. 735-752, 2006.

- [31] Nazarian, S., Stokoe, K.H. *In situ shear velocity from spectral analysis of surface waves*. Proc of 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.3, p. 31-38, 1984.
- [32] Galvín, P., Romero, A. Solís, M., Domínguez, J. *Dynamic characterization of wind turbine account for a monopile foundation and different soil conditions*. Structure and Infrastructure Engineering, 2016.
- [33] Domínguez, J. *Ampliación de teoría de estructuras* . Sección de Publicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.
- [34] Gupta, A. *Response Spectrum Method in Seismic Analysis and Design of Structures*. Blackwell Scientific Publications, 1990.
- [35] Mathworks. *Response Spectra - File Exchange - Matlab Central*. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/44835-response-spectra>