

ENRIQUE TOVA LLOPIS

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA EFECTIVIDAD DE LAS ZANJAS COMO
MEDIDA DE ATENUACIÓN DE VIBRACIONES PRODUCIDAS POR
TRÁFICO FERROVIARIO

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA EFECTIVIDAD DE LAS ZANJAS
COMO MEDIDA DE ATENUACIÓN DE VIBRACIONES
PRODUCIDAS POR TRÁFICO FERROVIARIO

ENRIQUE TOVA LLOPIS



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

PROYECTO FINAL DE CARRERA PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
INGENIERO INDUSTRIAL POR LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA

DIRIGIDO POR

PEDRO GALVÍN BARRERA Y ANTONIO ROMERO ORDÓÑEZ

Enrique Tova Llopis: *Estudio numérico de la efectividad de las zanjas como medida de atenuación de vibraciones producidas por tráfico ferroviario*. Proyecto de Fin de Carrera para la obtención del título de Ingeniero Industrial por la Universidad de Sevilla. .

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

Directores del Proyecto: Pedro Galvín Barrera y Antonio Romero Ordóñez.

Sevilla, Mayo 2014.

A mis padres y hermanos, por su paciencia y cariño

A mis tutores, por su ayuda y orientación

A W.P., por su apoyo en todo momento

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras	ix
i INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	1
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1 El ferrocarril y el fenómeno vibratorio	3
1.2 Estado del conocimiento y requerimientos actuales	4
1.3 Objetivos y contribuciones originales de este proyecto fin de carrera	7
1.4 Organización y estructura del texto	8
ii ANÁLISIS NUMÉRICO DEL PROBLEMA DE PROPAGACIÓN DE ONDAS EN EL SUELO	11
2 ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA	13
2.1 Presentación de la herramienta utilizada: SSIFIB0	13
2.1.1 Modelo numérico	14
2.1.2 Herramienta SSIFIB0	22
2.2 Validación numérica del modelo propuesto	23
2.2.1 Propagación de ondas en un semiespacio elástico	24
2.2.2 Propagación de ondas en un semiespacio elástico con zanja abierta.	25
2.2.3 Conclusiones	27
3 MITIGACIÓN DE LAS VIBRACIONES MEDIANTE EL USO DE ZANJAS	29
3.1 Presentación de la geometría utilizada.	30
3.2 Zanjas vacías para mitigación de vibraciones producidas por fuerzas de tipo escalón	32
3.2.1 Estudio del efecto de la distancia de aplicación de la carga.	32
3.2.2 Estudio del efecto de la distancia de medición de las vibraciones.	34
3.2.3 Estudio del efecto de la profundidad de la zanja utilizada.	35
3.3 Zanjas vacías para mitigación de vibraciones producidas por fuerzas impulsivas . .	37
3.3.1 Análisis del contenido frecuencial de la respuesta	38

3.3.2	Estudio del efecto del punto de aplicación de la carga y del punto de observación de las vibraciones	40
3.3.3	Estudio del efecto de la profundidad de la zanja utilizada.	41
3.4	Zanjas rellenas para mitigación de vibraciones causadas por fuerzas impulsivas . .	42
3.4.1	Estudio del material de relleno de zanjas	45
3.4.2	Estudio de zanjas rellenas mediante un cajón de hormigón.	52
iii	CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	59
4	CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	61
4.1	Conclusiones	61
4.2	Desarrollos futuros.	62
	Apéndices	65
A	RESOLUCIÓN DE UN PROBLEMA MEF UTILIZANDO LA HERRAMIENTA SSIFIBO	67
A.1	Preprocesado mediante ANSYS	67
A.2	Solver mediante SSIFIBO en MATLAB	68
B	RESOLUCIÓN DE UN PROBLEMA MEC UTILIZANDO LA HERRAMIENTA ssifibo	71
B.1	Preparación de los datos	71
B.2	Llamada a la herramienta SSIFIBO	77
C	RESOLUCIÓN DE UN PROBLEMA MEC CON PUNTOS INTERIORES DEL DOMINIO UTILIZANDO LA HERRAMIENTA SSIFIBO	79
C.1	Preparación de los datos	79
D	RESOLUCIÓN DE UN PROBLEMA MEC-MEF UTILIZANDO LA HERRAMIENTA SSIFIBO	81
D.1	Preparación de los datos	81
D.2	Llamada a la herramienta SSIFIBO	85
	Bibliografía	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Comparación de resultados numéricos con resultados analíticos de Pekeris	25
Figura 2.2	Representación gráfica del problema del semiespacio elástico con zanja	26
Figura 2.3	Comparación de resultados numéricos con resultados obtenidos por Hubert con los obtenidos con el método utilizado en este proyecto . . .	26
Figura 3.1	Geometría usada para una zanja abierta.	30
Figura 3.2	Gráfica ilustrativa de los parámetros estudiados.	31
Figura 3.3	Factor de reducción frente a distancia de observación en función de la distancia de aplicación de una carga escalón.	33
Figura 3.4	Explicación del desarrollo sobre la importancia de d_a frente a b_o	34
Figura 3.5	Ángulo entre el punto de aplicación de la fuerza y el borde de la zanja.	36
Figura 3.6	Factor de reducción frente a distancia de observación en función de la profundidad de zanja para una carga escalón.	37
Figura 3.7	Movilidad para distintos valores de la distancia de aplicación y observación de la zanja en función la profundidad de la misma	39
Figura 3.8	Evolución del factor de reducción con la distancia de observación. . . .	41
Figura 3.9	Relación del factor de amortiguamiento con el punto de aplicación de la carga para unas condiciones dadas.	42
Figura 3.10	Movilidad para distintos valores de profundidad de zanja.	43
Figura 3.11	Evolución del factor de reducción con la profundidad de zanja.	44
Figura 3.12	Comparación de desplazamientos verticales con zanja vacía y llena. . .	45
Figura 3.13	Comparación de desplazamientos verticales con zanja vacía y llena (zoom).	46
Figura 3.14	Representación de los desplazamientos en distintos pasos de tiempo del suelo sin zanja	47
Figura 3.15	Representación de los desplazamientos en distintos pasos de tiempo del suelo con zanja vacía	48

Figura 3.16	Representación de los desplazamientos en distintos pasos de tiempo del suelo con zanja rellena de material blando	49
Figura 3.17	Representación de los desplazamientos en distintos pasos de tiempo del dominio sin zanja	50
Figura 3.18	Representación de los desplazamientos en distintos pasos de tiempo del dominio con zanja vacía	51
Figura 3.19	Representación de los desplazamientos en distintos pasos de tiempo del dominio con zanja rellena de un material blando	52
Figura 3.20	Factor de reducción en función del contenido frecuencial de la carga para zanjas rellenas.	53
Figura 3.21	Comparación de desplazamientos verticales con zanja vacía, llena y llena con un cajón de hormigón.	54
Figura 3.22	Comparación de desplazamientos verticales con zanja vacía llena y llena con un cajón (zoom).	54
Figura 3.23	Representación de los desplazamientos en distintos pasos de tiempo del suelo con zanja rellena con un cajón de hormigón	55
Figura 3.24	Representación de los desplazamientos en distintos pasos de tiempo del dominio con zanja rellena con un cajón de hormigón	56
Figura 3.25	Factor de reducción en función del contenido frecuencial de la carga para una zanja rellena con un cajón de hormión.	57

ACRÓNIMOS

La forma plural se construirá añadiendo una s al final del acrónimo.

LAV	Línea de Alta Velocidad
MEC	Método de los Elementos de Contorno
MEF	Método de los Elementos Finitos
SSI	Interacción Suelo-Estructura
TAV	Tren de Alta Velocidad

Parte I

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 EL FERROCARRIL Y EL FENÓMENO VIBRATORIO

Las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario suponen una fuente de contaminación ambiental derivada del malestar que producen en las personas y de los efectos adversos en edificaciones e instalaciones. El fenómeno vibratorio que se origina durante el paso de los trenes está relacionado, principalmente, con la velocidad de circulación y con las propiedades dinámicas del suelo y, además, con las condiciones de explotación de las líneas férreas. Los efectos generados por el paso de trenes de alta velocidad son de mayor importancia que los producidos por los trenes convencionales, especialmente si la velocidad de circulación es próxima o superior a una de las velocidades de propagación de las ondas en el suelo [24]. En la última década, se han realizado un número considerable de investigaciones en el ámbito ferroviario en este sentido. Se han llevado a cabo investigaciones de carácter experimental, analítico y numérico que han permitido comprender y analizar las vibraciones que se producen. Todos estos trabajos han posibilitado incrementar la velocidad de circulación de los trenes, aumentar la calidad de los trazados y disminuir el impacto socio-ambiental de las líneas. Actualmente, gracias a los numerosos trabajos presentados, se conoce mejor el fenómeno vibratorio asociado al tráfico ferroviario.

Las vibraciones se propagan por el suelo generando un campo de ondas incidentes que provoca efectos perjudiciales en las edificaciones cercanas a la vía. Este hecho se conoce como la inmisión de las vibraciones. El grado de afección depende tanto de la velocidad de circulación, de las características del tren y de la tipología de la vía, como de las propiedades del terreno y las características de la estructura. Si se tiene en cuenta que el límite de percepción humana de las vibraciones (2 mm/s) puede superarse en algunas condiciones de operación, el tráfico ferroviario expone a las personas a vibraciones mecánicas que pueden interferir en el bienestar, causar sensaciones de malestar e irritación, influir en las aptitudes del comportamiento humano y presentar un riesgo para la seguridad y la salud. Asimismo, la propagación

de las vibraciones a través del suelo puede producir daños o mal funcionamiento en el equipamiento de las edificaciones e instalaciones cercanas a la vía. Por último, la exposición de las edificaciones anexas a la vía a altos niveles de vibración y a un elevado número de ciclos puede constituir un riesgo para la integridad de la estructura.

Por estas razones las vibraciones causadas por el tráfico ferroviario se han convertido en uno de los aspectos de mayor importancia en la planificación de nuevas Línea de Alta Velocidades (LAVs) o en la modificación de las existentes. Los administradores de las infraestructuras ferroviarias requieren la evaluación de los niveles de vibración en las líneas y en las edificaciones cercanas a la traza cuando se modifican las características dinámicas de la vía, del material rodante o de las condiciones de operación de la línea.

1.2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO Y REQUERIMIENTOS ACTUALES

La aparición del Tren de Alta Velocidad (TAV), el incremento de las velocidades de operación y el creciente número de LAVs han propiciado la publicación de un número importante de estudios en el ámbito ferroviario. Desde mediados de la década de los noventa, algunos investigadores han estudiado las vibraciones originadas durante el paso de los trenes empleando diferentes modelos numéricos basados en las formulaciones del Método de los Elementos de Contorno (MEC) y del Método de los Elementos Finitos (MEF). Se han realizado estudios sobre los parámetros más relevantes en la emisión de las vibraciones relacionados con el comportamiento dinámico de los trenes, las irregularidades de las ruedas y de los carriles, el contacto entre la rueda y el carril, y la tipología de la vía. Asimismo, se han estudiado los parámetros más influyentes en la propagación de las vibraciones por el suelo, especialmente la estratificación, las inclusiones y las discontinuidades del terreno, además de la relación entre las propiedades dinámicas del suelo y la velocidad de circulación. Respecto a la inmisión de las vibraciones, los estudios realizados se han orientado a la afección de las edificaciones anexas a las vías teniendo en cuenta la tipología de la cimentación y de la estructura, y a la evaluación y mitigación de las vibraciones.

Estos resultados han posibilitado evaluar las vibraciones generadas por el tráfico ferroviario así como el desarrollo de distintos métodos de mitigación de las mismas, mejorar la calidad de los trazados, incrementar la velocidad de circulación y reducir las molestias que originan el paso de los trenes mediante el desarrollo de métodos de reducción de las vibraciones. Se

han estudiado los parámetros más importantes en la emisión, propagación e inmisión de las vibraciones. Esto a permitido el desarrollo de una serie de métodos destinados a intervenir cada uno de estos mecanismos con la intención de mitigar los efectos de estas vibraciones.

Los métodos basados en la mitigación en la emisión de las ondas son los que están más extendido en España. Además son los que recomiendan los organismos de regulación en diversos países como el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias en España (ADIF) o la Société Nationale des Chemins de Fer Français en Francia (SNCF). Entre estos métodos está la instalación de mantas de material viscoelástico debajo del balasto. Este tipo de métodos tienen el problema de que solo son aplicables en caso de instalación de vías nuevas.

Hay también métodos que buscan la mitigación en la propagación de las ondas por el suelo. Estos métodos están basados en el uso de barreras que modifiquen la velocidad de propagación de las ondas a través del terreno. Destaca el uso de zanjas situadas entre la fuente de las ondas y aquello que se pretende aislar [1, 14, 23, 26, 38]. Este método está siendo actualmente utilizado en distintos lugares como método efectivo de mitigación de vibraciones de origen ferroviario. Ejemplo de esto es el uso de una zanja de 6.5m de profundidad a lo largo de 50m en Gnarp (Suecia) para aislar edificios residenciales de una vía de tren o una zanja similar 95m en Estocolmo (Suecia) [14]. Uno de los beneficios de este método es la posibilidad de instalarlo en líneas ferroviarias existentes.

Existen por último métodos en los que se actúa sobre la inmisión de las ondas para conseguir reducciones en las vibraciones que afectan las cimentaciones de estructuras cercanas a las vías. Existen diversos métodos de estas características, aunque principalmente se trata de un aislamiento de las cimentaciones. La principal limitación de este método es que solo es viable para edificaciones de nueva construcción, y en principio tiene poco sentido realizar una construcción nueva cerca de unas vías de tren.

Este proyecto de fin de carrera se ha centrado en el uso de zanjas como método de mitigación siendo este un método que aún está en fase de estudio y del que todavía se desconocen muchos aspectos. De hecho el estudio de este método apenas tiene 20 años.

En el 2002 Shrivastava et al. estudiaron en detalle los parámetros geométricos de los que dependen las zanjas con la intención de determinar unos valores óptimos adimensionales, de manera que se puedan generalizar a distintos casos. [38]. Usaron un modelo numérico 3D haciendo uso del MEF, enmarcado en el dominio temporal. Los resultados pusieron de manifiesto que los valores óptimos de mitigación que se alcanzaban para una fuerza impulsiva vertical

se daban para una profundidad de zanja de $1.19\lambda_R$ y para una longitud de $1.78\lambda_R$, donde se define λ_R como la longitud de onda de las ondas de Rayleigh bajo estudio. También se manifiesta la poca importancia que toma la longitud de la zanja cuando se aleja mucho el punto de aplicación de la zanja este parámetro pierde importancia tendiendo los desplazamientos a valores constantes.

Algunos autores por otro lado, han optado por enfocar este problema desde el punto de vista del dominio frecuencial. En esta línea hay autores que han estudiado el fenómeno de propagación de ondas en el suelo y en la vía originadas por el paso de TAVs. Klein et al. hicieron simulaciones de una zanja de $2.5m$ de profundidad y una anchura de $0.3m$ y sus resultados les llevaron a la conclusión de que para una distancia de aplicación de la carga entre $3\lambda_R$ y $12\lambda_R$ no hay grandes variaciones en la mitigación. Además, determinaron que el parámetro más determinante en la efectividad de una zanja es la profundidad de la misma, resultando la zanja inefectiva para valores inferiores a $0.4\lambda_R$. El efecto de las ondas de Rayleigh resulta más importante en el rango de frecuencia de 4 a 50Hz [1]. Esto implica que para ondas de Rayleigh a altas frecuencias requiere de zanjas de profundidades entre 5 y 10m para conseguir aislamientos aceptables. Zhai et al.[41] estudiaron el comportamiento dinámico del balasto midiendo las vibraciones provocadas por el tráfico ferroviario y mostraron que la respuesta del balasto está caracterizada por una frecuencia de excitación que varía entre 80 y 110Hz. Esto da una idea de las frecuencias de excitación que producen las vibraciones y por tanto, de las frecuencias que la zanja tendrá que ser capaz de mitigar.

A la hora de la realización física de las zanjas se ha hecho evidente la inviabilidad del uso de zanjas abiertas por razones constructivas y de mantenimiento. Se ha optado por zanjas que posteriormente serán rellenadas. En este sentido existen diversos estudios sobre el tipo de material óptimo de relleno de las mismas. En esta dirección se encaminaron una serie de estudios llevados a cabo en 2004 por Adam et al. en los que usando modelos 2D se estudia el aislamiento de un edificio para las vibraciones producidas por el paso de un tren a 20m de distancia [1]. En ellos se llega a la conclusión de que materiales de relleno más blandos que el terreno son la mejor opción para rellenar las zanjas. Esta solución sin embargo produce inestabilidades laterales en la zanja y en el material de relleno, además de producir un deterioro del material blando utilizado para el relleno de la zanja. Una de las soluciones a las que se ha llegado es el uso de pantallas rígidas, por ejemplo de hormigón, entre los bordes de la zanja y

el relleno de la misma [14]. Esto permite solventar el problema de las inestabilidades laterales manteniendo en cambio la discontinuidad buscada para conseguir la mitigación.

Sigue siendo necesario realizar un mayor número de estudios que permitan alcanzar conclusiones determinantes así como estudios sobre el grado de influencia de cada uno de los parámetros que permitan un mejor diseño tanto de la geometría de las zanjas como de su posición respecto a los puntos de excitación y observación de las vibraciones en el terreno.

1.3 OBJETIVOS Y CONTRIBUCIONES ORIGINALES DE ESTE PROYECTO FIN DE CARRERA

En este proyecto fin de carrera se ha tratado de estudiar la influencia de los distintos parámetros de la ejecución de una zanja que pueden estar sujetos a diseño sobre la eficacia de la misma para mitigar vibraciones. Para ello se han utilizado cargas puntuales que no se desplazan con el tiempo. Si bien es cierto que esto no permite modelizar el comportamiento del tráfico ferroviario si permite conocer el comportamiento de la transmisión de las vibraciones en el suelo y su comportamiento frente al uso de zanjas. Este sería el paso previo al uso de modelizaciones que permitan simular el comportamiento de un tren en marcha [27].

Los parámetros que se han sometido a estudio son la distancia de la fuente de la excitación a la zanja (d_a), la distancia de la zanja al punto de observación de los desplazamientos verticales en el suelo (b_o) y la profundidad de la zanja (h_z). Se ha decidido no estudiar el efecto de la anchura de la zanja dado que en resultados presentados por Shrivastava et al. [38] y Adam et al.[1] se demuestra que el efecto de este parámetro sobre la capacidad de mitigación es despreciable. El método utilizado para llevar a cabo el análisis numérico es el método desarrollado por Galvín y Romero, que se puede aplicar en un paquete de funciones de Matlab denominado SSIFIB0 [16], y que se comentará con detalle en el capítulo 2 de este proyecto fin de carrera.

Los elementos de este trabajo comprenden los siguientes aspectos:

- Realización de simulaciones mediante la herramienta SSIFIB0 en las que se aplica una carga escalón en un punto del suelo bajo estudio. Cada una de las simulaciones varía de las demás en distancia del punto de aplicación de la carga y/o en la profundidad de la zanja utilizada. En este primer punto cabe destacar que todas las zanjas están vacías. Uso posterior de los resultados para elaboración de gráficas que permitan extraer

conclusiones sobre los parámetros de mayor importancia en el fenómeno de mitigación de vibraciones mediante el uso de zanjas.

- Realización de simulaciones mediante la herramienta SSIFIB0 para una zanja rellena con distintos materiales y la carga aplicada siempre en el mismo punto. Uso posterior de los resultados para extraer conclusiones sobre la importancia del tipo de material de relleno utilizado.
- Realización de simulaciones mediante la herramienta SSIFIB0 para el caso de zanjas rellenas con una estructura prefabricada de tipo cajón. Estudio posterior de resultados y comparación con los extraídos de los dos casos anteriores.

1.4 ORGANIZACIÓN Y ESTRUCTURA DEL TEXTO

La estructura del texto pretende mostrar de forma ordenada los análisis paramétricos que se han ido realizando, así como los resultados que se van dando lugar de forma lógica a los siguientes análisis. El texto se encuentra estructurado en un conjunto de partes diferenciadas.

La primera parte, *Introducción y objetivos de la investigación* contiene el primer capítulo homónimo y que conforma la primera parte de este proyecto fin de carrera. Aquí se hace una introducción al tema bajo estudio y se presentan los objetivos de la investigación.

La segunda parte, titulada *Análisis numérico del problema de propagación de ondas en el suelo*, forma el bloque general del proyecto, dedicado a la investigación numérica de los parámetros determinantes en el diseño de las zanjas. Los capítulos recogidos en esta parte son:

- *Capítulo 2: Análisis numérico de los efectos de la interacción suelo - estructura.* Se resume el modelo numérico SSIFIB0 basado en las formulaciones tridimensionales del MEC y del MEF. En este capítulo se presentan diferentes ejemplos numéricos en los que se valida numéricamente el modelo propuesto.
- *Capítulo 3: Mitigación de las vibraciones mediante el uso de zanjas.* Se realizan diferentes simulaciones en las que se estudian los efectos de los diferentes parámetros susceptibles de diseño. Se hace uso del modelo numérico previamente validado y se comparan los resultados con resultados obtenidos por otros autores.

La tercera, titulada *Conclusiones y desarrollos futuros*, está formada por un solo capítulo de igual nombre. Consiste en un resumen de las conclusiones a las que se ha llegado a lo largo de este proyecto fin de carrera, así como un planteamiento de posibles líneas de investigación que continúen el trabajo aquí realizado.

Se incluyen al final del proyecto una serie de apéndices en los que se muestran y explican códigos modelo para la resolución de diferentes tipos de problemas haciendo uso de la herramienta SSIFIB0. Estos apéndices son los siguientes:

- *Apéndice A: Resolución de un problema MEF utilizando la herramienta SSIFIB0.*
- *Apéndice B: Resolución de un problema MEC utilizando la herramienta SSIFIB0.*
- *Apéndice C: Resolución de un problema MEC con puntos interiores del dominio utilizando la herramienta SSIFIB0.*
- *Apéndice B: Resolución de un problema MEC-MEF utilizando la herramienta SSIFIB0.*

Parte II

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL PROBLEMA DE PROPAGACIÓN DE ONDAS EN EL SUELO

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario en la vía, en el suelo y en las estructuras cercanas a la traza involucran mecanismos complejos de emisión, propagación y transmisión de ondas. La Interacción Suelo-Estructura (SSI) define, por una parte, la forma en la que se transmite la carga desde la vía al suelo, y por otra parte, la afección de las estructuras causada por el campo generado de ondas incidentes. Este análisis requiere estudiar un problema de propagación de ondas en un medio semi-infinito desde las zonas de generación de las vibraciones hasta los puntos de afección.

Los modelos numéricos basados en las formulaciones del MEC y del MEF permiten estudiar con rigor los problemas de SSI. El método de los elementos de contorno [9] está especialmente indicado para el análisis de la propagación de ondas en el suelo al considerar el carácter semi-infinito de éste y al satisfacer implícitamente la condición de radiación de Sommerfeld [11]. Por otra parte, el método de los elementos finitos resulta muy útil para describir el comportamiento dinámico de las estructuras y permite tener en cuenta efectos no lineales. Estos modelos se han utilizado para, además de estudiar las vibraciones producidas por el paso de trenes [3, 28, 37], obtener la rigidez dinámica de cimentaciones [8, 21], estudiar la influencia de la SSI en presas [6, 12, 30] y estudiar cimentaciones pilotadas [4, 13, 22, 33]. En este capítulo se resume el modelo tridimensional MEC-MEF utilizado en SSIFIB0.

2.1 PRESENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA UTILIZADA: ssifibo

Como se ha comentado en la introducción de este proyecto fin de carrera, SSIFIB0 es un paquete de funciones implementado en MATLAB basado en un modelo acoplado MEC-MEF formulado en el dominio del tiempo. El modelo numérico es adecuado para estudiar problemas dinámicos de interacción suelo-estructura. El MEC permite representar fuentes de excitaciones sísmicas describiendo tanto la onda incidente en el terreno como la onda dispersiva por el

mismo. El acoplamiento entre MEC-MEF es realizado mediante un acoplamiento directo. Una vez resuelto el problema de interacción, la solución en cualquier punto interno del terreno puede ser calculado.

2.1.1 *Modelo numérico*

SSIFIB0 está basado en un modelo tridimensional MEC-MEF formulado en el dominio del tiempo. El análisis SSI es realizado mediante la descomposición del dominio en dos subdominios representados por el MEC y el MEF. El comportamiento del suelo es representado por el MEC, mientras que el comportamiento del material de relleno de la zanja es representado mediante el MEF.

El MEC se basa en un método de resolución de distintos pasos de tiempo para obtener la variación temporal de los desplazamientos y de las tracciones desconcidos. Para las tracciones se usa una función temporal constante, mientras que para los desplazamientos se emplea una interpolación lineal. La solución fundamental para desplazamientos y tracciones se evalúa analíticamente, usándose un elemento cuadrático rectangular de nueve nodos para la discretización espacial del terreno. En la referencia [15] se pueden ver las expresiones explícitas de la solución fundamental para desplazamientos y tracciones causadas por una carga escalón puntual en un espacio elástico tridimensional completo. Para asegurar la estabilidad temporal se usa una aproximación basada en la combinación lineal de ecuaciones para varios pasos de tiempo para avanzar un solo paso de tiempo. La eficiencia del método se mejora usando el método de truncamiento presentado en la referencia [35]. Una vez resueltas las incógnitas del contorno la onda radiada se calcula en cualquier punto interior del dominio mediante la representación integral de la identidad Somigliana.

El acoplamiento entre las ecuaciones del MEC y del MEF se lleva a cabo imponiendo condiciones de equilibrio y compatibilidad en la interfase entre el suelo y la estructura. Ambos sistemas de ecuaciones se incluyen en un sistema de ecuaciones global, junto con las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad.

2.1.1.1 Formulación del método de los elementos de contorno en el dominio del tiempo

En esta sección se presenta brevemente la formulación del método de los elementos de contorno en el dominio del tiempo¹ utilizada por la herramienta SSIFIBO.

La representación integral de los desplazamientos u en un punto i del contorno de un dominio elástico, en el instante de tiempo t , en ausencia de fuerzas volumen y con condiciones iniciales nulas, puede expresarse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} c_{lk}^i u_k^i(\mathbf{x}^i, t) = & \int_0^{t^+} \int_{\Gamma} u_{lk}^*(\mathbf{x}, t - \tau; \mathbf{x}^i) p_k(\mathbf{x}, \tau) d\Gamma(\mathbf{x}) d\tau \\ & - \int_0^{t^+} \int_{\Gamma} p_{lk}^*(\mathbf{x}, t - \tau; \mathbf{x}^i) u_k(\mathbf{x}, \tau) d\Gamma(\mathbf{x}) d\tau \end{aligned} \quad (2.1)$$

donde las variables u_k y p_k representan la componente k de los desplazamientos y de las tracciones, respectivamente; u_{lk}^* y p_{lk}^* son los tensores de la solución fundamental de desplazamientos y tracciones en un punto $\mathbf{x}$ producidos por una carga impulsiva aplicada en el punto $\mathbf{x}^i$ en la dirección l ; y c_{lk}^i es el término libre que depende de la geometría del contorno en el punto i [29]. Los desplazamientos y las tracciones en el contorno se aproximan por los valores nodales u_k^{mj} y p_k^{mj} en cada instante de tiempo m mediante las funciones de interpolación espacial ϕ^j y ψ^j , y de interpolación temporal η^m y μ^m .

Una vez aproximadas las variables en el contorno, la Ec. (2.1) se escribe de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} c_{lk}^i u_k^{mi} = & \sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^Q \left[\left\{ \int_{\Gamma_j} \int_{\Delta t_m} u_{lk}^* \mu^m d\tau \psi^j d\Gamma \right\} p_k^{mj} \right. \\ & \left. - \left\{ \int_{\Gamma_j} \int_{\Delta t_m} p_{lk}^* \eta^m d\tau \phi^j d\Gamma \right\} u_k^{mj} \right] \end{aligned} \quad (2.2)$$

donde Q es el número de nodos y Γ_j son los elementos a los que pertenece el nodo j . Sustituyendo las integrales temporales de los términos de la solución fundamental $u_{lk}^* \mu^m$ y $p_{lk}^* \eta^m$ para cada paso de tiempo por U_{lk}^{nm} y P_{lk}^{nm} en la Ec. (2.2), se obtiene:

$$c_{lk}^i u_k^{mi} = \sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^Q \left[\left\{ \int_{\Gamma_j} U_{lk}^{nm} \psi^j d\Gamma \right\} p_k^{mj} - \left\{ \int_{\Gamma_j} P_{lk}^{nm} \phi^j d\Gamma \right\} u_k^{mj} \right] \quad (2.3)$$

y en una forma más compacta:

¹ La formulación completa del método puede encontrarse en la referencia [9].

$$c_{lk}^i u_k^{ni} = \sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^Q \left[G_{lk}^{nmij} p_k^{mj} - \hat{H}_{lk}^{nmij} u_k^{mj} \right] \quad (2.4)$$

Finalmente, incluyendo el término independiente c_{lk}^i en el sistema matricial, los desplazamientos y las tracciones para el punto i en el paso de tiempo n están dados por la siguiente expresión:

$$\sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^Q H_{lk}^{nmij} u_k^{mj} = \sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^Q G_{lk}^{nmij} p_k^{mj} \quad (2.5)$$

El sistema de ecuaciones puede reescribirse para todos los nodos del contorno en dicho instante de tiempo como:

$$\mathbf{H}^{nn} \mathbf{u}^n = \mathbf{G}^{nn} \mathbf{p}^n + \sum_{m=1}^{n-1} (\mathbf{G}^{nm} \mathbf{p}^m - \mathbf{H}^{nm} \mathbf{u}^m) \quad (2.6)$$

En este proyecto de fin de carrera se utiliza la solución fundamental del espacio completo [11], discretizando la superficie libre del suelo más allá de la zona de interés para evitar efectos espurios relacionados con la difracción de ondas en el contorno [9, 15]. Las integrales temporales que aparecen en la Ec. (2.2) se evalúan analíticamente en el intervalo de tiempo Δt_m sin mucha dificultad [15], utilizando funciones de interpolación lineales η^m para los desplazamientos y constantes μ^m para las tracciones en el contorno [9]. La integración espacial se lleva a cabo mediante la subdivisión de los elementos en coordenadas naturales e integrando en las partes que se encuentran bajo el efecto de las ondas de acuerdo a la condición de causalidad de cada término de la solución fundamental. En este proyecto se utilizan elementos cuadráticos cuadriláteros de nueve nodos para realizar la discretización espacial.

La estabilidad de la formulación del MEC en el dominio del tiempo se encuentra condicionada por la discretización espacial y temporal, y por las propiedades dinámicas del medio. SSIFIB0 hace uso de una técnica propuesta por Marrero y Domínguez [29] orientada a la mejora de la estabilidad del método que se basa en la combinación lineal de las ecuaciones de diferentes pasos de tiempo para resolver uno determinado. Utilizando esta técnica la Ec. 2.6 puede reescribirse como:

$$\begin{aligned}
\left\{ 4\mathbf{H}^{nm} + \mathbf{H}^{(n+1)n} \right\} \mathbf{u}^n &= \left\{ 4\mathbf{G}^{nm} + \mathbf{G}^{(n+1)n} \right\} \mathbf{p}^n + \mathbf{H}^{nm} \mathbf{u}^{(n-1)} \\
- \mathbf{G}^{nm} \mathbf{p}^{(n-1)} &+ \sum_{m=1}^{n-1} \left\{ \left(\mathbf{G}^{(n+1)m} + 2\mathbf{G}^{nm} + \mathbf{G}^{(n-1)m} \right) \mathbf{p}^m \right. \\
&\left. - \left(\mathbf{H}^{(n+1)m} + 2\mathbf{H}^{nm} + \mathbf{H}^{(n-1)m} \right) \mathbf{u}^m \right\}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Para reducir el coste computacional de la evaluación de la Ec. (2.7) la herramienta SSIFIBO extiende la formulación presentada por Soares y Mansur para el caso bidimensional [39] al análisis de problemas tridimensionales. Esta técnica de truncamiento se basa en la idea de que las matrices del MEC no dependen del valor de n y m , sino de la diferencia $(n - m)$ y, por tanto, pueden aproximarse mediante una serie de matrices de interpolación $\mathbf{H}_j$ y $\mathbf{G}_j$ a partir del instante de tiempo $t_L = L\Delta t$. Los núcleos U_{lk}^{nm} y P_{lk}^{nm} contienen términos asociados a la velocidad de propagación de las ondas P y S. Estos términos sólo son diferentes de cero en las partes del elemento que están excitadas por las ondas provenientes del punto donde se coloca la carga durante el intervalo de tiempo $[n - m]\Delta t \geq t \geq [n - (m + 1)]\Delta t$, es decir, la parte del elemento que se encuentra entre dos superficies esféricas de radios $r_m = c[n - m]\Delta t$ y $r_{m+1} = c[n - (m + 1)]\Delta t$; siendo $c = c_p$ o $c = c_s$, dependiendo del término de la solución fundamental. Por tanto, los núcleos temporales U_{lk}^{nm} y P_{lk}^{nm} son nulos aproximadamente para los instantes de tiempo superiores a $t_N = N\Delta t = r_{max}/c$, donde r_{max} es la distancia máxima entre el punto de colocación y el elemento de integración, y c es la velocidad mínima de propagación de las ondas. De esta forma, la Ec. (2.7) se reescribe introduciendo las mejoras de estabilidad y eficiencia del método²:

$$\begin{aligned}
\left\{ 4\mathbf{H}^1 + \mathbf{H}^2 \right\} \mathbf{u}^n &= \left\{ 4\mathbf{G}^1 + \mathbf{G}^2 \right\} \mathbf{p}^n - \left(\mathbf{G}^1 \mathbf{p}^{(n-1)} - \mathbf{H}^1 \mathbf{u}^{(n-1)} \right) \\
&+ \sum_{m=1}^{L-1} \left\{ \mathbf{G}^m \left(\mathbf{p}^{n-m+2} + 2\mathbf{p}^{n-m+1} + \mathbf{p}^{n-m} \right) \right. \\
&\left. - \mathbf{H}^m \left(\mathbf{u}^{n-m-2} + 2\mathbf{u}^{n-m+1} + \mathbf{u}^{n-m} \right) \right\} \\
&+ \sum_{m=L}^{n-1} \left\{ \sum_{j=1}^k [\mathbf{G}_j I(m, j)] \left(\mathbf{p}^{n-m+2} + 2\mathbf{p}^{n-m+1} + \mathbf{p}^{n-m} \right) \right. \\
&\left. - \sum_{j=1}^k [\mathbf{H}_j I(m, j)] \left(\mathbf{u}^{n-m-2} + 2\mathbf{u}^{n-m+1} + \mathbf{u}^{n-m} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

² Para reducir el número de operaciones resulta ventajoso extraer del sumatorio las matrices $\mathbf{H}_j$ y $\mathbf{G}_j$.

donde el superíndice de las matrices expresa la relación $(n - m + 1)$. Los coeficientes de interpolación $I(m, j)$ en el instante de tiempo t_j^I se calculan, o bien empleando polinomios de Chebyshev-Lagrange (Ec. (2.9)), o bien funciones de interpolación multi-lineales (Ec. (2.10)):

$$I(m, j) = \prod_{i=1, i \neq j}^k \frac{t_m - t_i^I}{t_j^I - t_i^I} \quad (2.9)$$

$$I(m, j) = \frac{t_{j+1}^I - t_m}{t_{j+1}^I - t_j^I} \quad t_m \in [t_j^I, t_{j+1}^I] \quad (2.10)$$

donde $t_m = m\Delta t$ es el tiempo en el que se obtienen las matrices mediante la interpolación. Los instantes t_j^I en los que se computan las matrices $\mathbf{H}_j$ y $\mathbf{G}_j$, están determinados por las siguientes relaciones para realizar la interpolación con polinomios de Chebyshev-Lagrange y con funciones multi-lineales, respectivamente:

$$t_j^I = \frac{1}{2} \left[(t_N - t_L) \cos \left(\frac{2j-1}{2k} \pi \right) + (t_N + t_L) \right] \quad j = 1, \dots, k \quad (2.11)$$

$$t_j^I = t_L + (t_N - t_L) \left(\frac{j-1}{k-1} \right)^{k^p} \quad j = 1, \dots, k \quad (2.12)$$

La resolución de la Ec. (2.8) en el paso de tiempo n se lleva a cabo reorganizando las columnas de las matrices $\mathbf{H}^1$ y $\mathbf{G}^1$ teniendo en cuenta las condiciones de contorno. De esta forma, se obtiene una matriz $\mathbf{A}^n$ que contiene las columnas asociadas a los grados de libertad en los que son desconocidos los desplazamientos o las tracciones nodales. Análogamente, se obtiene una matriz $\mathbf{B}^n$ formada por las columnas de $\mathbf{H}^1$ y $\mathbf{G}^1$ que multiplican a los términos de los vectores $\mathbf{u}^n$ y $\mathbf{p}^n$ conocidos por las condiciones de contorno. La Ec. (2.8) en el paso de tiempo de tiempo n puede reescribirse como:

$$\mathbf{A}^n \mathbf{x}^n = \mathbf{B}^n \mathbf{y}^n + \mathbf{q}^{n-1} \quad (2.13)$$

donde $\mathbf{x}^n$ son las incógnitas del problema, $\mathbf{y}^n$ son los valores conocidos de las condiciones de contorno y $\mathbf{q}^{n-1}$ es la influencia de los pasos de tiempo anteriores.

Por otra parte, en este proyecto de fin de carrera se utiliza la formulación viscoelastodinámica presentada por Galvín y Domínguez [15] para representar la disipación de energía que se produce en el suelo. Esta formulación se basa en el procedimiento simplificado propuesto por Jin et al. [20] para problemas bidimensionales, en los que la respuesta está dominada por una frecuencia característica. De esta forma se define un factor de amortiguamiento $d_b = \xi/T$ que

considera el amortiguamiento viscoso del suelo (ξ) y el periodo característico de la respuesta del sistema (T). La implementación en la formulación del MEC en el dominio del tiempo consiste en reescribir la Ec. (2.6) como:

$$\mathbf{H}^{nm}\mathbf{u}^n = \mathbf{G}^{nn}\mathbf{p}^n + \sum_{m=1}^{n-1} (\mathbf{G}^{nm}\mathbf{p}^m - \mathbf{H}^{nm}\mathbf{u}^m) e^{-2\pi d_b(n-m)\Delta t} \quad (2.14)$$

Comparando las Ecs. (2.6) y (2.14), se observa que las matrices $\mathbf{H}^{nm}$ y $\mathbf{G}^{nm}$ no se modifican, por lo que la implementación en la formulación aproximada del MEC (Ec. (2.8)) es sencilla y no se incrementa significativamente el coste computacional.

2.1.1.2 Formulación del método de los elementos finitos en el dominio del tiempo

La ecuación de equilibrio del MEF en el dominio del tiempo para un sistema estructural se expresa de la siguiente forma [42]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}^n + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}^n + \mathbf{K}\mathbf{u}^n = \mathbf{f}^n \quad (2.15)$$

donde $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ y $\mathbf{K}$ son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema, respectivamente, los vectores $\mathbf{u}^n$, $\dot{\mathbf{u}}^n$ y $\ddot{\mathbf{u}}^n$ representan los desplazamientos, las velocidades y las aceleraciones nodales, respectivamente, y $\mathbf{f}^n$ son las fuerzas externas aplicadas, en el paso de tiempo n .

La resolución temporal de la Ec. (2.15) puede realizarse empleando el algoritmo de Newmark GN22³ [32, 42] basado en la expansión en diferencias finitas de los desplazamientos y de las velocidades en el intervalo de tiempo Δt y en el paso de tiempo n :

$$\dot{\mathbf{u}}^n = \dot{\mathbf{u}}^{n-1} + [(1 - \delta)\ddot{\mathbf{u}}^{n-1} + \delta\ddot{\mathbf{u}}^n]\Delta t \quad (2.16)$$

$$\mathbf{u}^n = \mathbf{u}^{n-1} + \dot{\mathbf{u}}^{n-1}\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{\mathbf{u}}^{n-1} + \alpha\ddot{\mathbf{u}}^n \right] \Delta t^2 \quad (2.17)$$

donde α y δ son los parámetros de integración del método de Newmark⁴.

Las Ecs. (2.16) y (2.17) se reescriben de la siguiente forma:

$$\ddot{\mathbf{u}}^n = a_0(\mathbf{u}^n - \mathbf{u}^{n-1}) - a_2 \dot{\mathbf{u}}^{n-1} - a_3 \ddot{\mathbf{u}}^{n-1} \quad (2.18)$$

$$\dot{\mathbf{u}}^n = \dot{\mathbf{u}}^{n-1} + a_6 \ddot{\mathbf{u}}^{n-1} + a_7 \ddot{\mathbf{u}}^n \quad (2.19)$$

³ Algoritmo de Newmark generalizado de grado 2 y orden 2.

⁴ Los valores $\alpha = 0.25$ y $\delta = 0.5$ satisfacen la regla del trapecio ($\delta^2 = \alpha$) y el algoritmo de integración resulta incondicionalmente estable [42].

definiendo los siguientes parámetros:

$$a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} \quad (2.20)$$

$$a_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t} \quad (2.21)$$

$$a_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t} \quad (2.22)$$

$$a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1 \quad (2.23)$$

$$a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1 \quad (2.24)$$

$$a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right) \quad (2.25)$$

$$a_6 = \Delta t(1 - \delta) \quad (2.26)$$

$$a_7 = \delta \Delta t \quad (2.27)$$

Introduciendo las Ecs. (2.18) y (2.19) en la Ec. (2.15) se obtiene la siguiente expresión para calcular los desplazamientos en el paso de tiempo n :

$$\begin{aligned} (a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{C} + \mathbf{K}) \mathbf{u}^n &= \mathbf{f}^n + \mathbf{M}(a_0 \mathbf{u}^{n-1} + a_2 \dot{\mathbf{u}}^{n-1} + a_3 \ddot{\mathbf{u}}^{n-1}) \\ &+ \mathbf{C}(a_1 \mathbf{u}^{n-1} + a_4 \dot{\mathbf{u}}^{n-1} + a_5 \ddot{\mathbf{u}}^{n-1}) \end{aligned} \quad (2.28)$$

La Ec. (2.28) se expresa de una forma más compacta definiendo la matriz de rigidez dinámica $\mathbf{D} = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{C} + \mathbf{K}$ y agrupando la influencia de los pasos anteriores en el término independiente $\mathbf{f}^{n-1}$:

$$\mathbf{D} \mathbf{u}^n = \mathbf{f}^n + \mathbf{f}^{n-1} \quad (2.29)$$

Una vez se obtienen los desplazamientos $\mathbf{u}^n$, las Ecs. (2.18) y (2.19) permiten calcular las aceleraciones $\ddot{\mathbf{u}}^n$ y las velocidades $\dot{\mathbf{u}}^n$, respectivamente.

2.1.1.3 Formulación acoplada MEC-MEF

Una vez comentadas las formulaciones del MEC y del MEF, en esta sección se muestra el algoritmo de acoplamiento MEC-MEF. El método que se muestra es conocido como el método de acoplamiento directo.

Si se realiza una subdivisión del dominio Ω en dos subdominios Ω_f y Ω_b discretizados mediante elementos finitos y de contorno, respectivamente, la Ec. (2.6) puede reescribirse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{cc}^{nn} & \mathbf{H}_{cb}^{nn} \\ \mathbf{H}_{bc}^{nn} & \mathbf{H}_{bb}^{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_c^n \\ \mathbf{u}_b^n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{cc}^{nn} & \mathbf{G}_{cb}^{nn} \\ \mathbf{G}_{bc}^{nn} & \mathbf{G}_{bb}^{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_c^n \\ \mathbf{p}_b^n \end{bmatrix} + \\
\sum_{m=1}^{n-1} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{cc}^{nm} & \mathbf{G}_{cb}^{nm} \\ \mathbf{G}_{bc}^{nm} & \mathbf{G}_{bb}^{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_c^m \\ \mathbf{p}_b^m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{cc}^{nm} & \mathbf{H}_{cb}^{nm} \\ \mathbf{H}_{bc}^{nm} & \mathbf{H}_{bb}^{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_c^m \\ \mathbf{u}_b^m \end{bmatrix} \right)
\end{aligned} \quad (2.30)$$

donde el subíndice c hace referencia a los nodos del dominio asociados a la interfase entre los dos subdominios y el subíndice b al resto de nodos de Ω_b . Análogamente, la Ec. (2.29) se reescribe como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}_{cc}^n & \mathbf{D}_{cf}^n \\ \mathbf{D}_{fc}^n & \mathbf{D}_{ff}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_c^n \\ \mathbf{u}_f^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_c^n \\ \mathbf{f}_f^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f}_c^{n-1} \\ \mathbf{f}_f^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

donde el subíndice f hace referencia a los nodos de Ω_f que no pertenecen a la interfase MEC-MEF.

El acoplamiento MEC-MEF se realiza estableciendo las condiciones de equilibrio de fuerzas y de compatibilidad de desplazamientos en la interfase entre ambos subdominios. De este modo, se obtiene el siguiente sistema global de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{cc}^{nn} & \mathbf{H}_{cb}^{nn} & -\hat{\mathbf{G}}_{cc}^{nn} & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_{bc}^{nn} & \mathbf{H}_{bb}^{nn} & -\hat{\mathbf{G}}_{bc}^{nn} & \mathbf{0} \\ \mathbf{D}_{cc}^n & \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{D}_{cf}^n \\ \mathbf{D}_{fc}^n & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{D}_{ff}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_c^n \\ \mathbf{u}_b^n \\ \mathbf{f}_c^n \\ \mathbf{u}_f^n \end{bmatrix} &= \\
\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{G}}_{cb}^{nn} \mathbf{f}_b^n \\ \hat{\mathbf{G}}_{bb}^{nn} \mathbf{f}_b^n \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_f^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^{n-1} \left(\hat{\mathbf{G}}_{cc}^{nm} \mathbf{f}_c^m + \hat{\mathbf{G}}_{cb}^{nm} \mathbf{f}_b^m - \mathbf{H}_{cc}^{nm} \mathbf{u}_c^m - \mathbf{H}_{cb}^{nm} \mathbf{u}_b^m \right) \\ \sum_{m=1}^{n-1} \left(\hat{\mathbf{G}}_{bc}^{nm} \mathbf{f}_c^m + \hat{\mathbf{G}}_{bb}^{nm} \mathbf{f}_b^m - \mathbf{H}_{bc}^{nm} \mathbf{u}_c^m - \mathbf{H}_{bb}^{nm} \mathbf{u}_b^m \right) \\ \mathbf{f}_c^{n-1} \\ \mathbf{f}_f^{n-1} \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (2.32)$$

donde $\hat{\mathbf{G}} = \mathbf{G}\mathbf{L}^{-1}$ y $\mathbf{L}$ es la matriz de transformación de tracciones nodales ($\mathbf{p}$) a fuerzas nodales ($\mathbf{f}$):

$$\mathbf{f} = \left[\sum_{a=1}^A \int_{\Gamma} \mathbf{N}_a^T \mathbf{N}_a d\Gamma \right] \mathbf{p} = \mathbf{L} \mathbf{p} \quad (2.33)$$

En la Ec. (2.33), N_a son las funciones de forma y el sumatorio se extiende al conjunto de los elementos A que contiene un mismo nodo del contorno.

La Ec. (2.32) describe el comportamiento dinámico del dominio Ω , donde las incógnitas en los nodos de la interfase son los desplazamientos y las fuerzas nodales; y en el resto de nodos depende de las condiciones de contorno del problema.

2.1.2 Herramienta SSIFIB0

SSIFIB0 es un paquete de funciones implementadas en MATLAB. La herramienta contiene un paquete completo de sub-rutinas para el MEC en el dominio del tiempo, incluyendo la solución computacional de la matriz de influencia de los elementos de contorno y la resolución mediante un procedimiento de incrementos temporales del problema. El módulo de MEF no incluye preprocesador, en su lugar una entrada para ANSYS permite exportar directamente el modelo de la estructura. En el apéndice A se puede encontrar una explicación detallada del funcionamiento de esta entrada, así como un ejemplo del código usado para llamar dichas entradas y usar los resultados para resolver un problema.

El código fuente se estructura en tres partes. En primer lugar se calculan las matrices de los elementos de contorno para todos los pasos de tiempo y la matriz dinámica de rigidez para el MEF. A continuación se comprueba la conectividad nodal de la interfase suelo-estructura y se monta el sistema de ecuaciones. Por último se evalúa la solución para todos los pasos de tiempo.

Los elementos del MEC se subdividen. La integración espacial está calculada únicamente las partes de los elementos que se ven afectadas por las ondas de la solución fundamental, de acuerdo con la condición de causalidad de cada término de la solución fundamental. La integración de la subdivisión en elementos se realiza mediante el método de cuadratura de Gauss usando cuatro puntos de integración cuando los puntos de aplicación no pertenece a la subdivisión. Si el punto de aplicación pertenece a la subdivisión elemental aparece una singularidad en la solución fundamental. En este caso se puede evitar la singularidad mediante una nueva sub-división. Un procedimiento alternativo sería probar con una cuadratura adaptada en MATLAB usando una doble integral sobre la región plana en la que se encuentra la singularidad. El comando quad2 de MATLAB permite resolver este tipo de problemas con una integración numérica sobre la región designada. En cualquier caso, el afinamiento necesario

en la asignación de la región para conseguir un resultado con suficiente exactitud conlleva un coste computacional demasiado elevado.

La matriz de rigidez dinámica de elementos finitos es calculada usando un esquema de integración temporal implícito GN22 de Newmark sin mayor complicación.

La solución para todos los pasos de tiempo es calculada a partir del sistema global de ecuaciones MEC-MEF. Previamente se calcula la factorización LU del sistema dado que la matriz del sistema global permanece invariable para todos los pasos de tiempo. La factorización del sistema y la solución temporal son extraídas usando la librería SuperLU. Esta librería permite reducir el esfuerzo computacional debido a los comandos de MATLAB `linsolve` o `mldivide` para la resolución de sistemas lineales de ecuaciones. Se han tomado en cuenta muchas mejoras para realización del modelo numérico. Los algoritmos del MEC y del MEF requieren una gran cantidad de recursos computacionales (tanto almacenamiento en memoria como CPU). El paquete se aprovecha de la computación paralela haciendo uso de procesadores multicore y de clusters a través de Parallel Computing toolbox. La carga de trabajo relacionada con el cómputo de las matrices MEC y la influencia del paso de tiempo previo se distribuye entre los procesadores disponibles. Actualmente el número máximo de procesos paralelos para un cluster local son 12. Además, mediante MATLAB Coder se ha generado códigos en C/C++ para algunas sub-rutinas del MEC para mejorar la capacidad de la herramienta.

Las comodidades de la implementación en MATLAB se usan tanto en el ámbito académico como en el ingenieril. El software MATLAB se emplea de forma habitual en la mayoría de las escuelas de ingeniería tanto por estudiantes como por investigadores. la modulabilidad del paquete hace posible la implementación simple y eficiente de nuevas mejoras.

2.2 VALIDACIÓN NUMÉRICA DEL MODELO PROPUESTO

En esta sección se hace uso de algunos problemas cuya solución es conocida, gracias a los cuales se ha podido validar numéricamente el modelo utilizado. Se resolverán dos problemas distintos y se compararán los resultados obtenidos con los que se obtiene de otros modelos usados previamente por por otros autores.

2.2.1 Propagación de ondas en un semiespacio elástico

El problema de propagación de ondas en la superficie de un semiespacio elástico es un problema cuya solución es bastante conocida. La solución analítica de este problema cuando la fuente de la excitación es una carga del tipo $p(t) = p_0 H(t)$, donde $H(t)$ es la función de Heaviside, fue estudiada por Pekeris [34] en 1955. Los resultados obtenidos de esos estudios han servido de validación para nuevos métodos de cálculos a autores posteriores [18].

La geometría utilizada para este problema consiste en una sección de terreno de $20 \times 20m$. La malla utilizada para discretizar la geometría usa elementos cuadrados de $1 \times 1m$ de nueve nodos. Se han estudiado varios casos de los que se han decidido representar solo dos, mostrando los demás soluciones similares. Cada uno de los casos que se han decidido incluir en la figura 2.1 corresponde a distintas distancias entre el punto de aplicación y el de observación.

Las propiedades del semiespacio utilizado son: $c_p = 500m/s$, $c_s = 250m/s$, $\rho = 1800kg/m^3$ y $\nu = 1/3$. En el instante $t_0 = 0$ se aplica una carga puntual cuya evolución en el tiempo sigue la función escalón. En cuanto al paso de tiempo, se han empleado 300 pasos de tiempo con dos valores distintos para comparar también los resultados entre ellos, siendo uno de los empleados $\Delta t = 210^{-3}s$ y el otro $\Delta t = 310^{-3}s$. Por último decir que en este ejemplo $p_0 = -1N$.

Dado que en este problema solo se estudia el suelo y no existe interacción con estructura alguna, es un problema en el que SSIFIB0 solo hace uso del MEC. En el apéndice B se expone un ejemplo de código para resolver este tipo de problemas, así como los comentarios apropiados para la comprensión del mismo.

Los resultados se han comparado con los obtenidos por Pekeris en la figura 2.1. Como se puede apreciar, Los resultados numéricos son bastante aproximados a los analíticos de Pekeris. En el caso numérico sin embargo se puede observar un pequeño adelanto de las ondas S así como un valor inferior de los desplazamientos en el permanente. Esto puede ser debido al hecho de que, mientras Pekeris resuelve el problema para una carga puntual, en la simulación realizada la carga se aplica en un nodo perteneciente a un elemento cuadrado. Además se da el hecho de que el nodo está compartido por más de un elemento. Esto implica que en realidad la carga no es puntual sino que está repartida por una superficie (la de los elementos) de acuerdo a las funciones de forma. Por este motivo, se consideran suficientemente exactos los resultados obtenidos. Se pueden obtener resultados más exactos conforme aumenta la

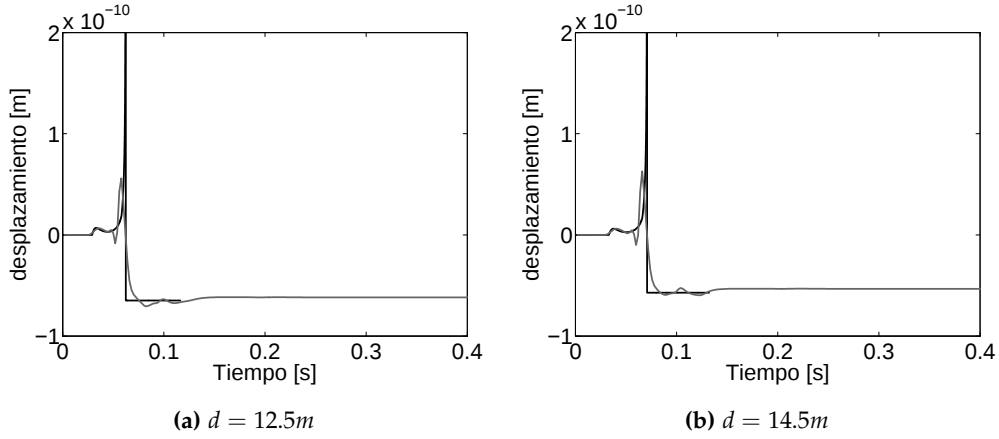


Figura 2.1: Componente vertical del desplazamiento de un punto situado a una distancia d del punto de aplicación de una carga $p(t) = pH(t)$: solución analítica propuesta por Pekeris (línea negra continua), solución mediante el paquete de MATLAB SSIFIB0 (línea gris continua).

distancia del punto de observación a la fuente de la excitación, pero supondría un mayor coste computacional debido al aumento del tamaño de la geometría.

2.2.2 Propagación de ondas en un semiespacio elástico con zanja abierta.

En este ejemplo numérico se estudia la propagación de ondas producidas por una carga de tipo escalón de valor $p = 1000N$ en un semiespacio elástico que contiene una zanja a mitad del mismo. Este caso fue estudiado por Hubert et al. [18] en el 2001.

El modelo utilizado consiste en una zanja de $4m$ de profundidad y $2m$ de ancho. La zona de terreno discretizada abarca $22 \times 12m$, teniendo el modelo simetría a lo largo del eje x , de modo que la zona realmente calculada abarcaría $22 \times 24m$. Las propiedades del semiespacio son: $c_p = 400m/s$, $c_s = 200m/s$, $\rho = 1700kg/m$ y $\nu = 1/3$. En el instante $t = 0s$ se aplica una carga escalón en el punto S, y se estudia el desplazamiento del punto R situado al otro lado de la zanja como se ve en la figura 2.2. El valor del paso de tiempo empleado en el análisis es igual a $\Delta t = 0.0025s$.

El punto S se encuentra situado en el eje x (eje de simetría de la zona discretizada) a $1m$ de distancia del borde de la zanja. De igual manera, el punto R se encuentra sobre el mismo eje y situado a una distancia de $1m$ del borde contrario de la zanja.

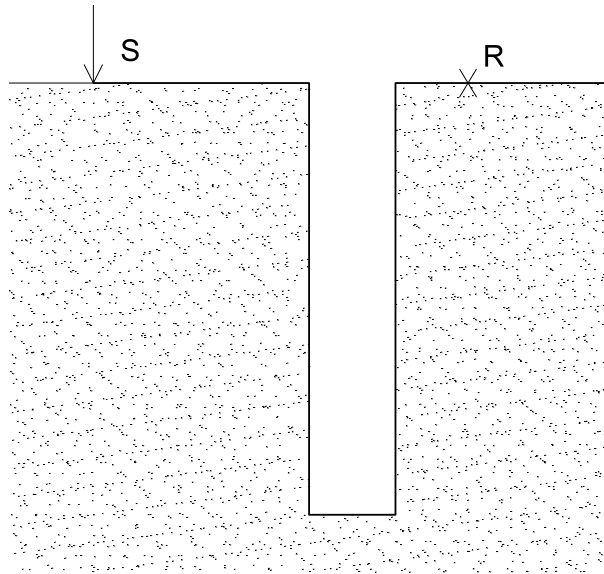


Figura 2.2: Representación gráfica del problema del semiespacio elástico con zanja.

En la figura 2.3 se puede observar el desplazamiento del punto R. El resultado obtenido se ha comparado con el presentado por Hubert et al. [18] computado con otro modelo MEC. Los resultados son bastante similares entre ellos, pudiendo deberse las diferencias en el tipo de elementos utilizado por cada uno de los métodos. En el caso de este proyecto de fin de carrera, los elementos usados son cuadrados de 9 nodos, con funciones de forma cuadráticas, mientras que aquellos usados por Hubert son elementos con funciones de forma constantes y sin subdivisiones.

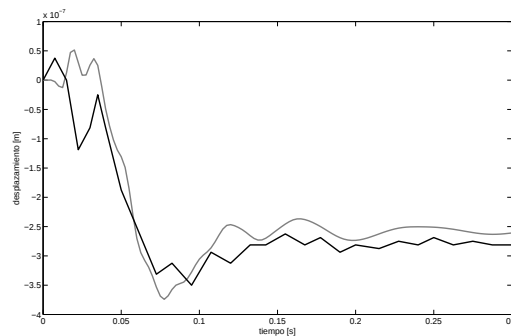


Figura 2.3: Componente vertical del desplazamiento del punto R: solución Obtenida por Hubert (línea negra continua), solución mediante el paquete de MATLAB SSIFIB0 (línea gris continua).

2.2.3 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado el método desarrollado por Galvín y Romero recogido en el paquete de MATLAB SSIFIB0 [16]. Se han resuelto dos problemas cuyas soluciones son conocidas y se han comparado los resultados con ellas.

En primer lugar se ha resuelto el problema del cálculo de los desplazamientos de un semiespacio infinito excitado por una carga puntual de evolución temporal tipo escalón. Esta solución se ha comparado con la solución analítica obtenida por Pekeris [34]. A continuación se ha resuelto el problema de la propagación de ondas en un semiespacio infinito en presencia de una zanja. En este caso los resultados se han comparado con los resultados obtenidos por Hubert para el mismo problema [18].

Los resultados obtenidos de estas comparaciones han permitido validar el método utilizado para el propósito de este proyecto fin de carrera. En el siguiente capítulo se hace pues, uso de la herramienta SSIFIB0 para la resolución de una serie de simulaciones que servirán para llevar a cabo el objetivo del proyecto.

MITIGACIÓN DE LAS VIBRACIONES MEDIANTE EL USO DE ZANJAS.

Las vibraciones inducidas en el suelo por el tráfico ferroviario se propagan a través del suelo hasta alcanzar las estructuras próximas a la vía, y pueden causar malestar a los residentes o mal funcionamiento de los instrumentos localizados en su interior. Las vibraciones pueden ser controladas modificando las características dinámicas de los vehículos, reduciendo las irregularidades de ruedas y carriles, apoyando el carril sobre sistemas de sujeción diseñados a tal efecto, y usando elementos tales como el balastro o la placa [17, 31, 40]. Entre otros investigadores Ahmad y Al-Hussaini [2], Beskos et al. [7] y Emad y Manolis [10] han estudiado el efecto de la instalación de zanjás a corta distancia de la vía sobre el nivel de vibraciones introducido por el tráfico ferroviario. Laghrouche y Houedec [25] y Sheng et al. [36] han evaluado el efecto de la instalación de zanjás a corta distancia de la vía sobre el nivel de las vibraciones inducidas por el tráfico ferroviario, y Laghrouche y Le Houedec, Sheng et al. y Takemiya han evaluado la influencia de la inserción de placas rígidas bajo la vía.

En este proyecto se evalúa el efecto de zanjás en la reducción del nivel de las vibraciones ocasionadas por el paso de TAV. La amortiguación producida por las zanjás se debe a dos fenómenos relacionados con el hecho de que las ondas de las vibraciones requieren de un medio físico para propagarse. Al no existir medio de propagación en la zanja, parte de las ondas se ven reflejadas al llegar al borde de la zanja y el resto de las ondas se ven obligadas a bordear la zanja por debajo para poder pasar, aumentando así su recorrido con la consiguiente dispersión y amortiguación de la onda en el terreno.

El parámetro que se usará para evaluar la efectividad de las zanjás es el factor de reducción (en adelante A_r) que se define como $A_r = \frac{u_z}{u_{z0}}$, donde u_z es el desplazamiento del punto de observación en el eje z tras haber abierto la zanja y u_{z0} el desplazamiento original del mismo punto en el eje z, es decir, antes de haber abierto la zanja. Por tanto, la zanja producirá una disminución de los desplazamientos verticales del suelo siempre que $A_r < 1$, aumentándose la mitigación de las vibraciones conforme menor es A_r .

3.1 PRESENTACIÓN DE LA GEOMETRÍA UTILIZADA.

Para llevar a cabo el análisis numérico de este proyecto fin de carrera, se ha hecho uso de una modelización de una sección de terreno de $20 \times 20m$ en el que se abre una zanja de $2m$ de ancho y $20m$ de largo en el centro del modelo. En La figura 3.1 se puede apreciar un ejemplo de geometría usada en el proceso de desarrollo de este proyecto fin de carrera. Las propiedades del suelo utilizado son: $c_p = 500m/s$, $c_s = 250m/s$, $\rho = 1800kg/m^3$ y $\nu = 1/3$.

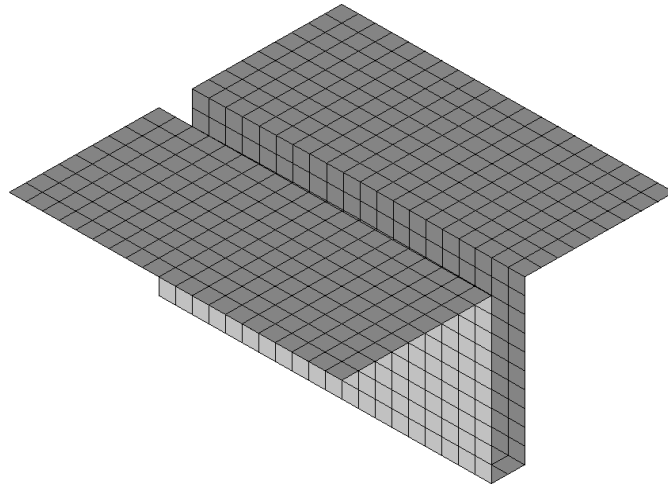


Figura 3.1: Geometría utilizada para el estudio de los problemas con una zanja abierta.

Para el mallado de la geometría, se han usado elementos de contorno cuadrados de $1 \times 1m$ de nueve nodos, encontrándose estos en cada uno de los vértices del cuadrado, el centro de cada arista y el centro de la cara.

En las simulaciones que se llevarán a cabo se aplicará una carga en un punto p , que se definirá para cada una de las simulaciones, a un lado de la zanja y se medirá en un punto s , que se definirá igualmente para cada una de las simulaciones y que se encontrará en el lado contrario a la zanja.

Los parámetros que se variarán durante el proceso de estudio serán la distancia entre el borde de la zanja y el punto de aplicación (d_a), la distancia entre el otro borde de la zanja y el punto de observación (b_o) y la profundidad de la zanja (h_z). En la figura 3.2 se muestra gráficamente el significado de cada uno de los parámetros.

En lo que respecta al rango de variación de la profundidad de la zanja, h_z se variará entre 2 y $10m$ con incrementos de $1m$. El límite inferior toma este valor porque se ha considerado que

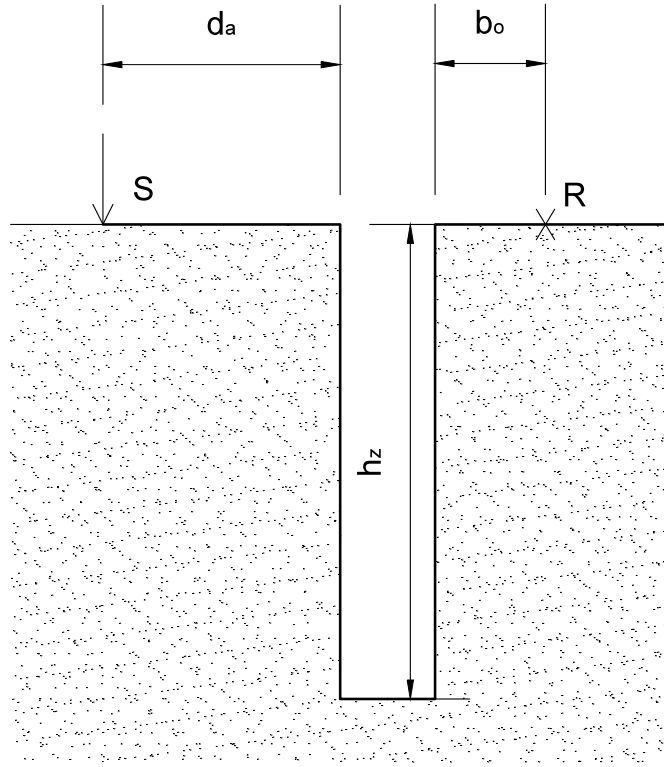


Figura 3.2: Gráfica ilustrativa de los parámetros utilizados para llevar a cabo el objetivo de este proyecto fin e carrera.

una zanja inferior a $2m$ no es un obstáculo suficientemente importante como para tenerlo en cuenta. Por otra parte, se define la longitud de onda de las ondas de Rayleigh como:

$$\lambda_R = \frac{c_s}{f} \quad (3.1)$$

Donde c_s es la velocidad de las ondas de Rayleigh, que en el caso de este proyecto toma el valor de $c_s = 232.8m/s$ y f es la frecuencia de las ondas de Rayleigh. De la ecuación 3.1 se puede observar que a menor f mayor tendrá que ser la zanja utilizada. Dado que la situación más crítica será precisamente la que requiera de una zanja mayor se tomará un valor pequeño para la frecuencia dentro del rango característico de las ondas de Rayleigh. La mayoría de los autores utilizan una frecuencia mínima de $f = 20Hz$ [14, 23, 26, 38]. Tomando un valor de frecuencia inferior como por ejemplo $f = 15Hz$ se obtiene una $\lambda_R \simeq 15m$ y un valor mínimo de profundidad para que la zanja sea efectiva de $h_z \simeq 6m$. El límite superior se ha tomado teniendo en cuenta que para valores inferiores a $0.4\lambda_R$ una zanja resulta inefectiva [38], por lo que $6m$ es la profundidad mínima para conseguir mitigaciones efectivas. Por otro lado, se ha

considerado como valor de profundidad máxima $10m$ porque se ha considerado poco práctica una zanja de mayor profundidad dado el trabajo que supone su construcción.

3.2 ZANJAS VACÍAS PARA MITIGACIÓN DE VIBRACIONES PRODUCIDAS POR FUERZAS DE TIPO ESCALÓN

En esta sección del capítulo se estudia el efecto que produce la construcción de una zanja vacía como medio para aislar una zona del terreno de las vibraciones introducidas por la aparición de una carga puntual $p(t)$ que sigue un comportamiento del tipo escalón.

3.2.1 Estudio del efecto de la distancia de aplicación de la carga.

En este apartado se plantea la posibilidad de que el factor de reducción (A_r) dependa de la distancia entre el punto de aplicación de la carga y el borde de la zanja (d_a). Esto tiene su razón de ser en que al ir haciendo mayor la distancia cabe esperar que la presencia de un obstáculo como puede ser la zanja se acabe haciendo despreciable. Además también es en principio previsible un aumento de la disipación de las ondas antes de llegar a la zanja. Es por tanto razonable cuestionarse la importancia del parámetro d_a .

Con este objetivo se han realizado una serie de simulaciones en las que se calculan los desplazamientos de todos los puntos de la superficie del semiespacio bajo estudio cuando se aplica una carga escalón que toma el valor $p = -1N$ en el instante $t = 0$ y se mantiene con ese valor durante 300 pasos de tiempo siendo el valor de cada paso de tiempo $\Delta t = 2 \cdot 10^{-3}s$. En cada una de las simulaciones se ha variado el valor de d_a , tomando esta los valores 1, 3, 5 y $7m$.

En la figura 3.3 se representan distintas gráficas donde se puede ver la evolución del factor de reducción A_r para una en función del punto de observación de la carga. Se representan tres gráficas distintas, cada una de ellas para un valor de profundidad de zanja distinta (h_z).

Lo primero que es interesante señalar es la presencia de un máximo de la función A_r después del cual parece que todas las curvas para distintas distancias del punto de aplicación (d_a) tienden a una misma recta que disminuye con una pendiente relativamente baja. Este máximo se desplaza hacia puntos de observación de las vibraciones más alejados de la zanja a medida que se acerca a la misma el punto de aplicación de la carga. Se puede observar además, que

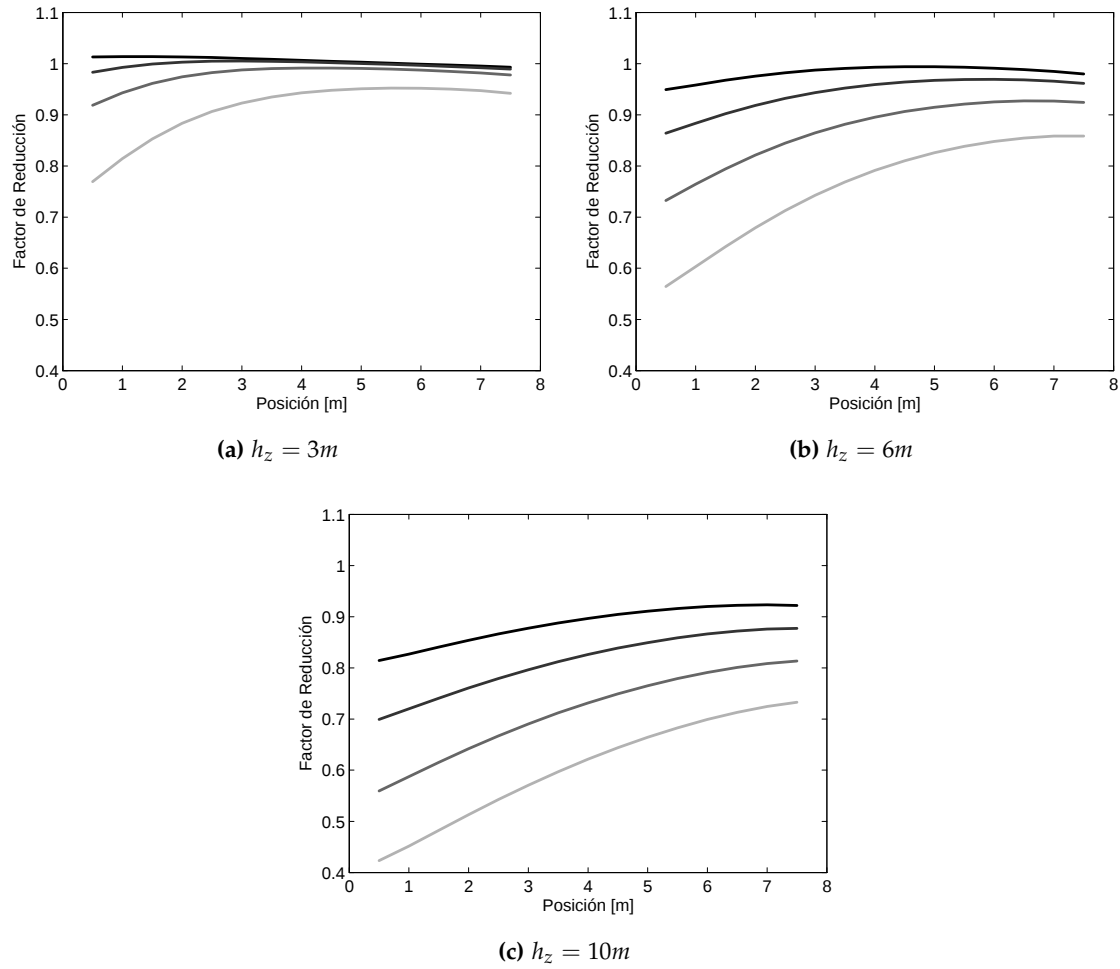


Figura 3.3: A_r para una carga escalón de $1N$ en régimen permanente frente a la distancia de la zanja para distintas d_a : componente vertical (z). Se representa $d_a = 7m$, $d_a = 5m$, $d_a = 3m$ y $d_a = 1m$ Siendo la línea negra para el punto de aplicación más alejado y aclarándose a medida que la carga se acerca a la zanja.

las mitigaciones aumentan (A_r disminuye) a medida que se disminuye d_a alcanzándose reducciones del 20 % cuando $d_a = 1m$ para una profundidad de zanja tan pequeña como $3m$. Para valores mayores de h_z y valores bajos de d_a parece que el máximo de la función A_r se alcanza entorno a 0.7, lo que supone una mitigación del 30 %.

Cabe destacar también que en la figura 3.3 se observa como el factor de reducción varía en función no sólo de la distancia del punto de aplicación a la zanja (d_a), sino que también lo hace en función de la distancia del punto de observación (b_o) y de la profundidad de la misma (h_z). Queda por tanto patente que el factor de reducción de las vibraciones no sólo depende del punto de aplicación de la carga, sino que $A_r = A_r(d_a, b_o, h_z)$. Por ello se procede a realizar

un análisis igual que el llevado a cabo en este apartado, pero para cada uno de los otros dos parámetros.

3.2.2 Estudio del efecto de la distancia de medición de las vibraciones.

Haciendo uso de la figura del apartado anterior (figura 3.3) se puede hacer un análisis sobre el efecto que tiene la variación de b_o sobre la mitigación de las vibraciones.

Se puede apreciar que, al igual que sucedía con d_a , los valores de A_r disminuyen a medida que lo hace el valor de b_o . Para valores bajos de b_o y valores intermedios de h_z , como puede ser el ejemplo de $h_z = 6m$, en puntos muy próximos a la zanja se consiguen reducciones de entre el 40 y el 20 % siempre que d_a sea también bajo.

Se ve por tanto que no tiene sentido estudiar como afecta d_a o b_o sin tener en cuenta el valor que tiene el otro parámetro. Se decide por ello estudiar cuál de los dos parámetros tiene un mayor efecto sobre el factor de reducción a fin de buscar cual es preferible fijar primero por tener mayor peso. Si se fija un punto de aplicación de la carga d_a^* , que correspondería a una de las curvas representadas, y se aplica un incremento $\delta = 2m$ en el valor de b_o se tiene $A_r(b_o + \delta) - A_r(b_o) = \Delta A_{rb}$. Por otro lado, si se fija un punto de observación b_o^* igual al d_a^* anterior y se aplica el mismo incremento $\delta = 2m$, lo que significaría pasar a la curva inmediatamente superior, se tiene $A_r(d_a + \delta) - A_r(d_a) = \Delta A_{rd}$. Se puede observar una aclaración gráfica del razonamiento anterior en la figura 3.4.

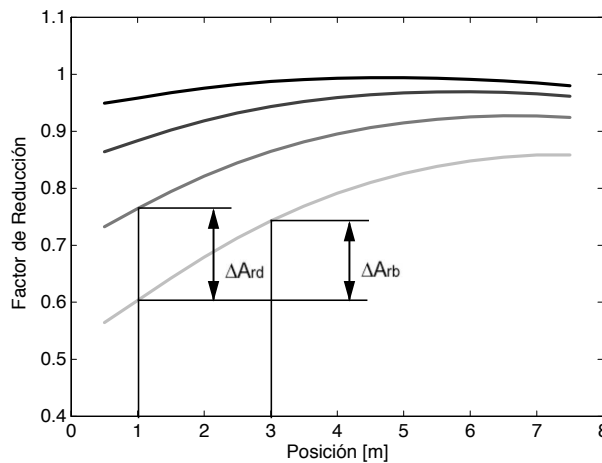


Figura 3.4: Explicación de la importancia de d_a frente a la importancia de b_o sobre el factor de reducción (A_r).

Estudiando la relación $\frac{A_{rb}}{A_{rd}}$ se obtiene que $\frac{A_{rb}}{A_{rd}} < 1$, salvo en situaciones alejadas de la zanja, donde las curvas de las distintas d_a han alcanzado su máximo y ya se han solapado. Esto físicamente quiere decir que antes de que se alcance el máximo de A_r tiene más interés alejar de la zanja el punto de aplicación que el punto que se busca aislar dado que el factor de reducción es más sensible a los cambios de este parámetro.

3.2.3 Estudio del efecto de la profundidad de la zanja utilizada.

Vistas las dependencia de la mitigación con d_a y b_o , se procede a cuestionarse qué sucede cuando lo que cambia es la geometría de la zanja, más concretamente su profundidad. Con este objetivo se representan distintas gráficas en las cuales se puede ver la evolución de A_r frente a b_o , pero en esta ocasión las distintas curvas hacen referencia a las distintas profundidades de zanja estudiadas (figura 3.6).

Se pueden observar curvas muy similares a las de la figura 3.3, en las que A_r aumenta a medida que crece b_o y que también presentan un máximo después del cual las distintas curvas tienden a una asíntota con pendiente ligeramente negativa. En este caso el máximo de las curvas se desplaza hacia la derecha con el aumento de la profundidad de la zanja, así como con el aumento de la proximidad del punto de aplicación, como ya hicieran las de la figura 3.3.

Esto se puede comprobar también con el siguiente análisis. Si definimos como α el ángulo formado entre la pared de la zanja y la línea recta que lo une con el punto de aplicación de la carga como se puede ver en la figura 3.5, el valor de A_r disminuye con la disminución de α . Sin embargo, este efecto no depende puramente de dicho ángulo, dado que para distintos valores de profundidad de zanja, los mismos valores de α tienen resultados distintos.

Un ejemplo de ello es que para el caso de $h_z = 10m$ y $d_a = 7m$, los valores obtenidos son $\alpha = 35$ y $A_r \simeq 0.87$. Por otro lado, para el caso de $h_z = 10m$ (misma profundidad de zanja) y $d_a = 5m$, los valores obtenidos son $\alpha \simeq 26$ y $A_r \simeq 0.80$; ambos casos para una $b_o = 0.5m$. Con lo que se demuestra que efectivamente, una α menor (un punto más cercano a la zanja) implica una disminución en el valor de A_r , lo que es lo mismo que decir una mejora en la mitigación. En cambio para $h_z = 2m$ y $d_a = 1m$, los valores obtenidos son $\alpha \simeq 26$ y $A_r \simeq 0.87$. Es decir, que para el mismo valor de α se ha obtenido un valor superior del factor de reducción. De aquí se puede concluir que se consigue un mayor efecto de reducción cuanto mayor es la

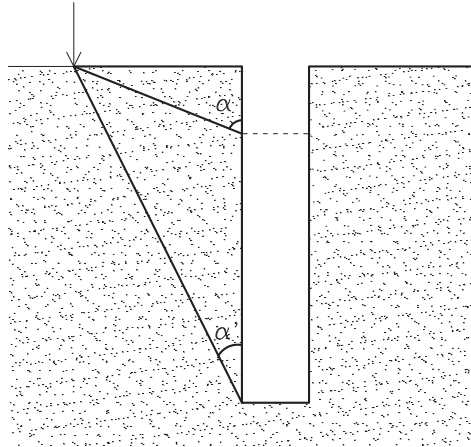


Figura 3.5: Ángulo entre el punto de aplicación de la fuerza y el borde de la zanja para dos profundidades distintas.

profundidad de la zanja. Sin embargo, la mejora es cada vez menor a medida que se aumenta la profundidad. Esto último se puede observar de forma cualitativa analizando las gráficas de la figura 3.6.

En lo que respecta a la importancia de este parámetro de diseño frente a d_a y b_o , se realiza un análisis como el que se usó en el apartado anterior. Se elige un punto de observación que será el mismo durante todo el análisis. Si se fija un punto de aplicación de la carga d_a^* , que correspondería a una de las gráficas representadas, y se aplica un incremento $\delta = 2m$ en el valor de h_z se tiene $A_r(h_z + \delta) - A_r(h_z) = \Delta A_{rh}$. Por otro lado, si se fija una profundidad de zanja h_z^* y se aplica el mismo incremento $\delta = 2m$ se tiene $A_r(d_a + \delta) - A_r(d_a) = \Delta A_{rd}$.

Estudiando la relación $\frac{\Delta A_{rh}}{\Delta A_{rd}}$ se obtiene:

- si $h_z < 6m \rightarrow \frac{A_{rh}}{A_{rd}} > 1$
- si $h_z > 6m$ entonces:
 - si el valor b_o implica que la función A_r haya superado el máximo $\frac{\Delta A_{rh}}{\Delta A_{rd}} > 1$
 - si el valor b_o implica que la función A_r no haya aún superado el máximo $\frac{\Delta A_{rh}}{\Delta A_{rd}} < 1$

Este resultado lo que muestra es que para valores de profundidad de zanja inferiores a $6m$, la mitigación de las vibraciones aumenta más rápido con la profundidad de la zanja que con cualquiera de los otros dos parámetros estudiados. Una vez alcanzado el valor de profundidad e zanja $h_z = 6m$ es más interesante variar el punto de aplicación de la carga dado que aunque

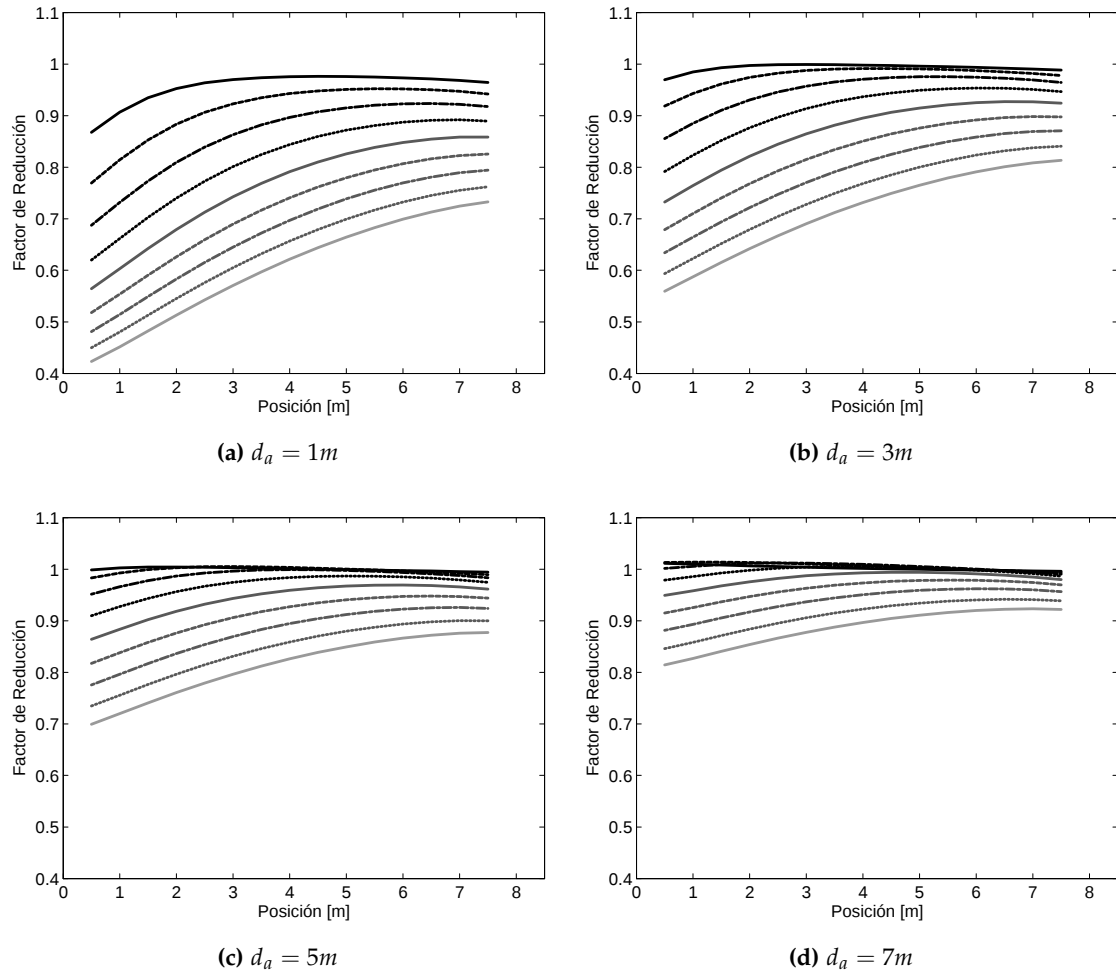


Figura 3.6: A_r para una carga escalón de $1N$ en régimen permanente frente a la distancia de la zanja para distintas h_z : componente vertical (z). Se representa $h_z = 2m$ en línea negra continua, $h_z = 3m$ en línea negra a trazos, $h_z = 4m$ en línea negra a trazos y puntos, $h_z = 5m$ en línea negra a puntos, $h_z = 6m$ en línea gris oscuro continua, $h_z = 7m$ en línea gris oscuro a trazos, $h_z = 8m$ en línea gris oscuro a trazos y puntos, $h_z = 9m$ en línea gris oscuro a puntos y $h_z = 10m$ en línea gris claro continua.

continua aumentando la efectividad con el aumento de la profundidad, lo hace de manera más lenta siendo cada vez más parecidos los valores a medida que la zanja se hace más profunda.

3.3 ESTUDIO DEL USO DE ZANJAS VACÍAS INFINITAS EN LA MITIGACIÓN DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR UNA CARGA IMPULSIVA

Como ya se dijo en la introducción, las cargas que induce el paso de un tren en el suelo tienen carácter dinámico. Se hace por tanto necesario realizar estudios en los que se tenga

en cuenta la importancia de la frecuencia a la que se excita el suelo, dado que tendrá una gran importancia en la efectividad de la zanja y en los valores de aislamientos alcanzados lo próxima que esta se encuentre de alguna de las frecuencias características del suelo. Con esta intención se realizan simulaciones en las que se aplica una carga puntual $p(t) = p\delta(t)$ donde δ es la función de Dirac, que toma los valores:

- $\delta(t) = 1$ si $t = 0$
- $\delta(t) = 0$ si $t \neq 0$

3.3.1 *Análisis del contenido frecuencial de la respuesta*

La primera pregunta natural es cuáles son las frecuencias para las que se consiguen peores mitigaciones y que por tanto serán las más críticas. Se calcula para ello las movilidades del suelo en función de los puntos de aplicación de la carga y de observación de las vibraciones. Todas las simulaciones se realizarán para una profundidad de zanja igual a $6m$, valor intermedio para los casos estudiados en este proyecto y que además corresponde como se ha visto previamente al mínimo valor que debe tener la profundidad de la zanja para que sea efectiva. Los resultados de estas simulaciones se encuentran recogidos en la figura 3.7. Moviéndose en vertical por las distintas gráficas de la figura 3.7 se tiene fijado d_a y se varía b_o , mientras que si el movimiento se realiza en horizontal se ha fijado b_o y variado d_a . Se ha decidido representar únicamente las frecuencias hasta un valor de $110Hz$, algo superior a los $80Hz$ que establecen las normas de edificación [19].

Viendo las respuestas lo primero que se observa es como el uso de la zanja produce una notable reducción de la movilidad para la mayoría de las frecuencias. Tan solo se produce un aumento de la movilidad, que implicaría un aumento de las vibraciones en lugar de una atenuación, en algunos casos de frecuencias del entorno de los $10Hz$. Otro resultado llamativo es el hecho de que las mayores respuestas en el caso sin zanja se dan precisamente en el entorno de los $80Hz$ máximos que permite la norma. Por último, cabe destacar que las máximas mitigaciones se dan para frecuencias entre los 30 y los $50Hz$, valores que se encuentran entorno al centro del intervalo de frecuencias de excitación que permite la norma, por lo que se conseguirían resultados óptimos con este tipo de aislamiento. Se decide considerar las frecuencias de $25Hz$ y $65Hz$ por ser las más interesantes con presencia de zanjas puesto que resultan má-

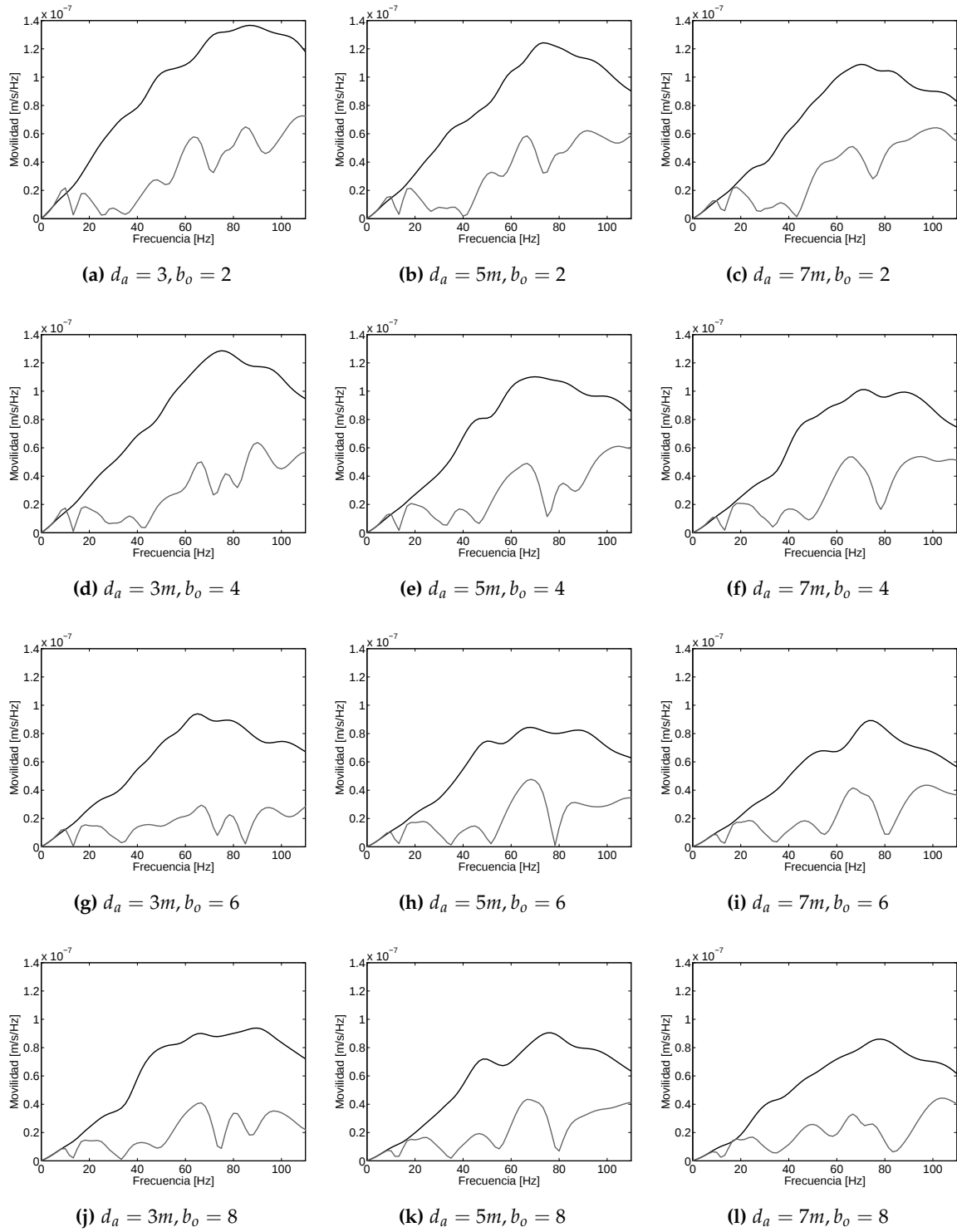


Figura 3.7: Movilidad para una carga de 1N en régimen permanente: componente vertical (z). Se representa para el caso de una zanja con profundidad $h_z = 6m$ (línea negra gris) frente al caso sin zanja (línea continua negra) para distintas combinaciones de d_a y de b_o

ximos locales en la función de la movilidad; y 85Hz por ser la frecuencia aproximada donde se encuentran los valores máximos en el caso sin zanja. 85Hz se encuentra además dentro del margen de entre 80 y 110Hz en el que se encuentran las frecuencias de excitación introducidas por el tráfico ferroviario en el balasto [41].

3.3.2 Estudio del efecto del punto de aplicación de la carga y del punto de observación de las vibraciones

Como ya se hiciera en la sección anterior se pretende estudiar el efecto que tiene la distancia que separa la zanja del punto donde se aplica la carga. Para ello se representa en la figura 3.8 la evolución del factor de reducción frente a la posición del punto de observación para distintos casos de d_a a cada una de las frecuencias que se han decidido estudiar en el punto anterior de esta sección. Observando los resultados se puede comprobar que para los casos de frecuencias iguales a 65Hz , y 85Hz los valores del factor de reducción tienen una tendencia negativa, de modo que se reduce a medida que aumenta la distancia b_o . Esto ocurre de manera más constante en el casos de 85Hz . En cambio para el caso de 65Hz llama la atención una fuerte reducción en los primeros metros después de la zanja, suavizándose esta tendencia posteriormente.

Resulta difícil estudiar el efecto que tiene sobre la mitigación de los desplazamientos verticales el punto de aplicación de la carga, dado que se obtienen unos resultados con bastante dispersión respecto de cualquier curva de aproximación, y lo único que se pueden obtener son tendencias que más o menos son iguales para todos los casos.

Sin embargo, para el caso de baja frecuencia $f = 25\text{Hz}$ sí se han obtenidos curvas muy claras que permiten extraer datos de forma más clara. Se puede observar una primera tendencia en la que el factor de reducción disminuiría hasta que alcanzan un mínimo. A partir de dicho mínimo comienzan a crecer de forma más suave a medida que se aleja el punto de observación de la zanja (aumenta b_o) hasta un máximo tras el cuál parece intuirse un nuevo descenso de los valores de A_r . Este máximo se desplaza hacia valores mayores del punto de observación a medida que se aproxima el punto de aplicación a la zanja. Además, se puede ver como el valor que alcanza A_r aumenta a medida que se aumenta d_a hasta alcanzar un valor que parece constante en 0.7 . De hecho, representando la evolución de A_r frente a d_a (figura 3.9) se puede comprobar que aumenta con una relación de $\frac{A_r}{d_a} = 0.125$.

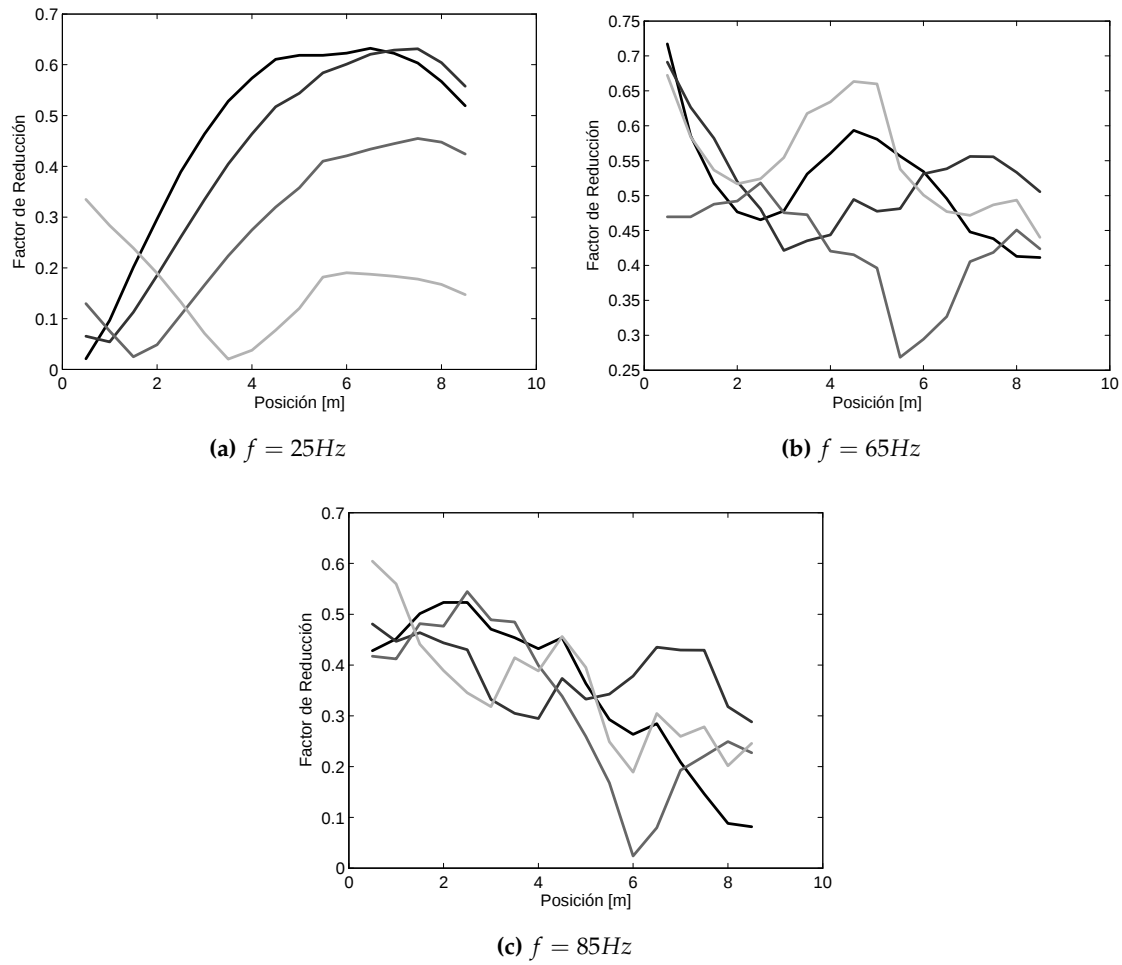


Figura 3.8: A_r para una carga impulso frente a b_o para una profundidad de zanja $h_z = 6\text{m}$: componente vertical (z). Se representa $d_a = 7\text{m}$, $d_a = 5\text{m}$, $d_a = 3\text{m}$ y $d_a = 1\text{m}$ Siendo la línea negra para el punto de aplicación más alejado y aclarándose a medida que la carga se acerca a la zanja.

3.3.3 Estudio del efecto de la profundidad de la zanja utilizada.

Del mismo modo que se hizo una selección de las frecuencias más interesantes de estudiar para comprobar la importancia de d_a y b_o se presentan en la figura 3.10 distintas gráficas para hacer lo mismo en el caso de que lo que varíe sea la profundidad de la zanja utilizada. Igual que en el caso anterior se opta por estudiar las frecuencias 25Hz , 65Hz y 85Hz .

Para una distancia fija tanto de d_a como de b_o se representan en cada una de las gráficas de la figura 3.10 la evolución de A_r cuando se va variando h_z entre los valores para los que se han realizado simulaciones.

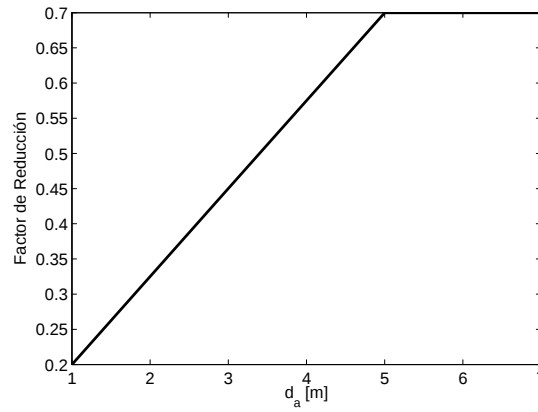


Figura 3.9: Evolución de A_r para una carga impulso frente a d_a para una profundidad de zanja $h_z = 6m$ y una frecuencia de $25Hz$.

Ahora, para cada una de las frecuencias que se han decidido estudiar se representa en una gráfica, para los mismos valores de d_a y de b_o que en la figura 3.10, como evoluciona el valor de A_r a medida que se va aumentando la profundidad de la zanja. Estas gráficas quedan recogidas en la figura 3.11.

Como ya pasara con el punto de aplicación de la carga y con el punto de observación, no parece que de los resultados se puedan sacar conclusiones claras. Quizás, para el caso de bajas frecuencias ($25Hz$) se puede observar como la efectividad aumenta bruscamente para zanjas poco profundas hasta alcanzar los $4m$. Por lo demás solo se observan fluctuaciones que requerirían de un estudio más detallado y de nuevas simulaciones para poder extraer conclusiones válidas.

3.4 ESTUDIO DEL USO DE ZANJAS RELLENAS INFINITAS EN LA MITIGACIÓN DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR UNA CARGA IMPULSIVA

Hasta ahora se han realizado simulaciones en las que se usaban zanjas vacías para mitigar las vibraciones producidas por una fuerza y así aislar una parte de un semiespacio. Estos estudios responden al caso ideal en el que se produce una interrupción total del medio de transmisión de las ondas en el suelo. Esto sin embargo produce problemas de inestabilidad cuando se pretende realizar este sistema en la realidad. Aparte, surge la necesidad de aislar la zanja en la superficie para evitar que personas puedan caer en ellas de forma accidental.

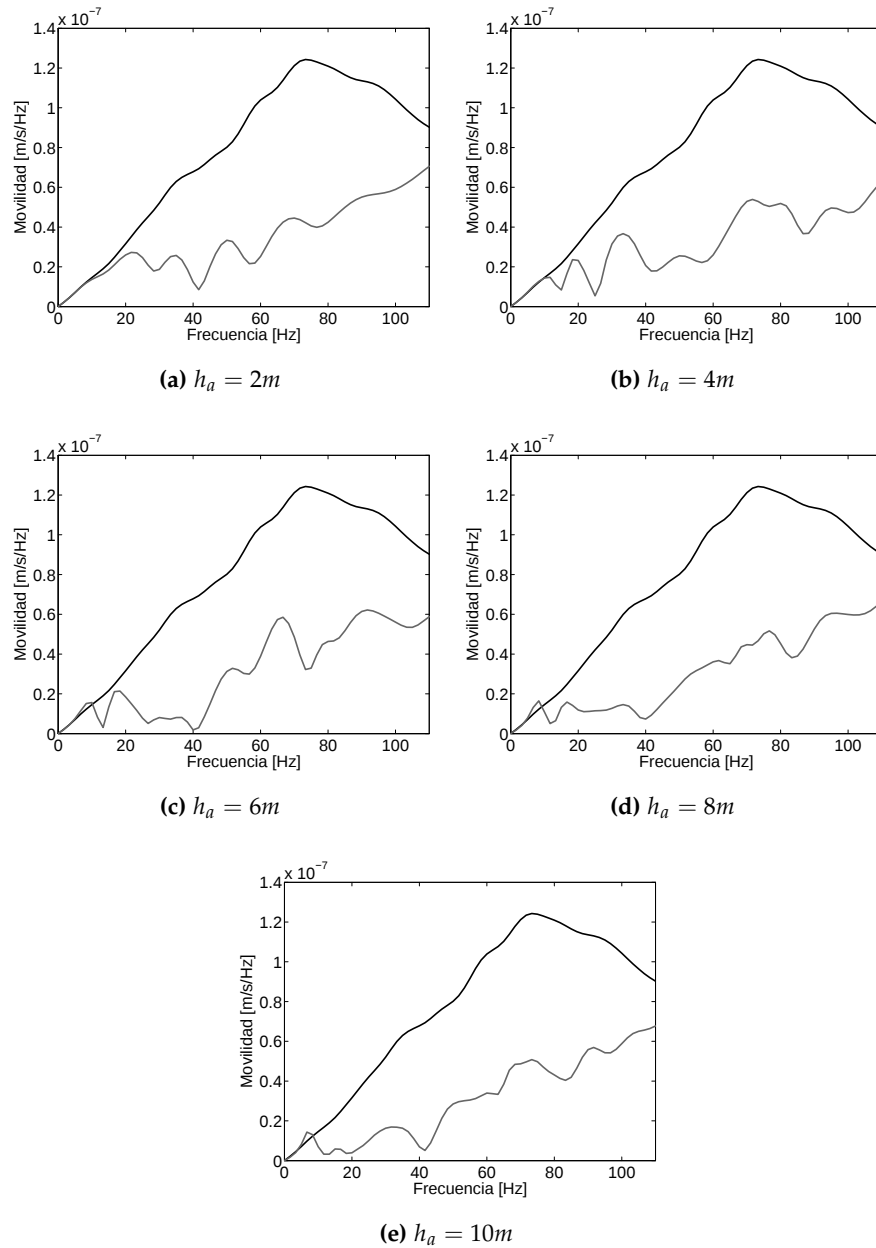


Figura 3.10: Movilidad para una carga impulso de $1N$: componente vertical (z). Para una $b_o = 2m$ y una $d_a = 5$ para distintas h_z . Se representan los valores de A_r en el caso sin zanja (linea negra continua) y en el caso con zanja (linea gris continua)

Por estos motivos en la realidad se ha decidido estudiar el uso de zanjas rellenas de un material distinto al terreno que supongan un obstáculo a la transmisión de las ondas por tener estas una velocidad de transmisión de las mismas distinta en cada uno de los materiales.

Siguiendo esta linea se han realizado un par de simulaciones para la geometría presentada con anterioridad, pero en este caso solo se ha utilizado una zanja de $10m$ de profundidad y

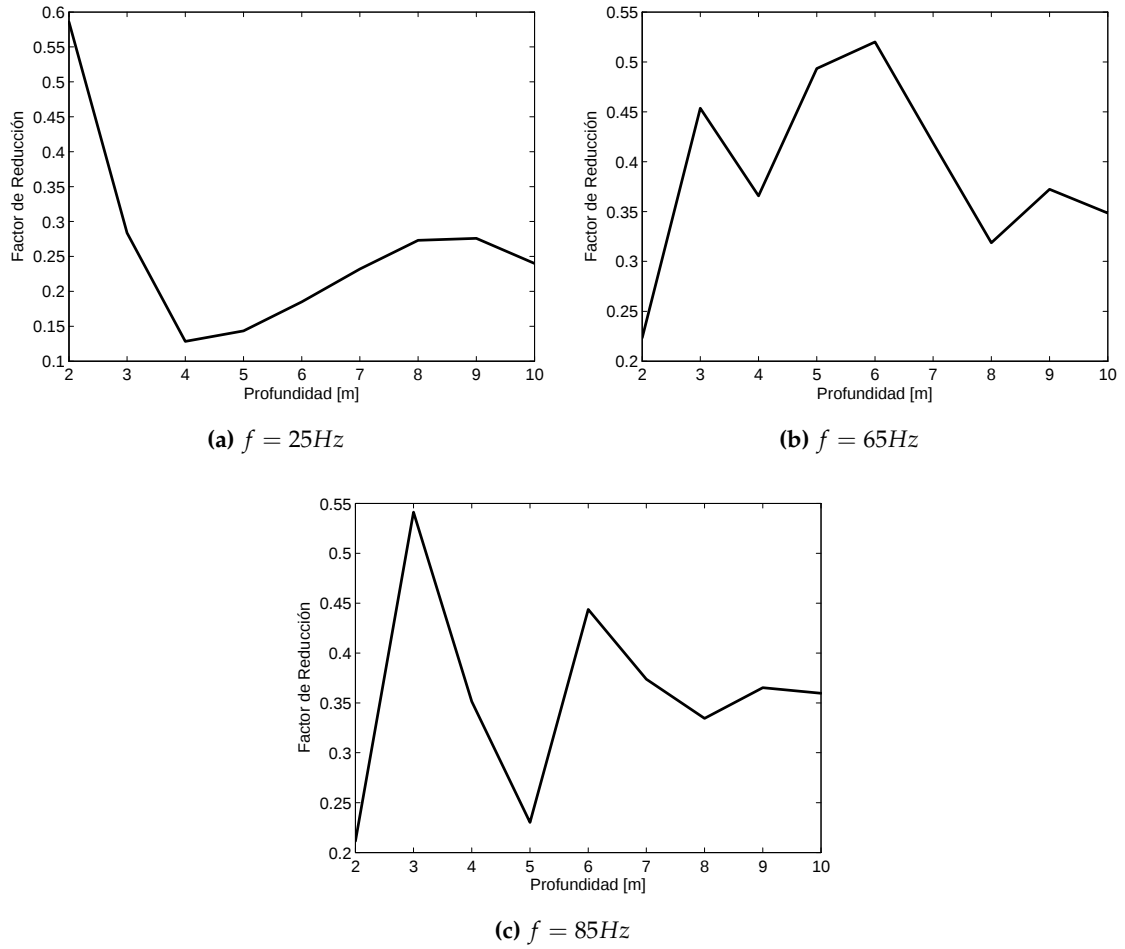


Figura 3.11: A_r para una carga impulso frente a h_z : componente vertical (z).

solo se han estudiado los resultados en un punto de observación ($b_o = 6m$) y para un único punto de aplicación de la carga ($d_a = 5m$). El motivo es que lo único que se pretende es conocer como afecta el hecho de que la zanja se encuentre vacía o no. La influencia de los otros parámetros ya se han estudiado en las secciones previas de este capítulo y no resultaría de interés volver a realizar esos estudios con zanjas rellenas.

La modelización del relleno se ha realizado mediante el MEF siendo necesario el uso del método de acoplamiento MEC-MEF explicado anteriormente para la resolución del problema. Se han usado elementos tipo solid de 8 nodos por elemento y de arista igual a $0.5m$.

3.4.1 Estudio del material de relleno de zanjas

En esta sección se ha optado por rellenar la zanja completamente con dos materiales distintos. En primer lugar se ha usado un material (al que en adelante se referirá como material 1) cuyas propiedades son: $E = 0.26\text{MPa}$, $\nu = 1/3$ y $\rho = 100\text{kg}/\text{m}^3$. Este material ya ha sido usado en otros estudios [16]. La velocidad de las ondas S viene dada por la siguiente expresión:

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (3.2)$$

Haciendo uso de la ecuación 3.2 resulta que para este material se obtiene una $C_s = 31.225\text{m}/\text{s}$; velocidad muy inferior a la que poseen las ondas en el terreno utilizado, que es $C_s = 250\text{m}/\text{s}$. A continuación se ha decidido usar otro material (en adelante material 2) con las siguientes características: $E = 3\text{MPa}$, $\nu = 1/3$ y $\rho = 100\text{kg}/\text{m}^3$ y que posee haciendo uso de la ecuación 3.2 una $C_s = 106.066\text{m}/\text{s}$.

Se comienza enfrentando en una gráfica (figura 3.12) el comportamiento temporal del punto de observación, situado a 6m de la zanja, frente a una carga de tipo escalón de 1N . En esta gráfica se han incluido tanto los resultados de la zanja vacía (caso ideal) como los dos casos de la zanja rellena.

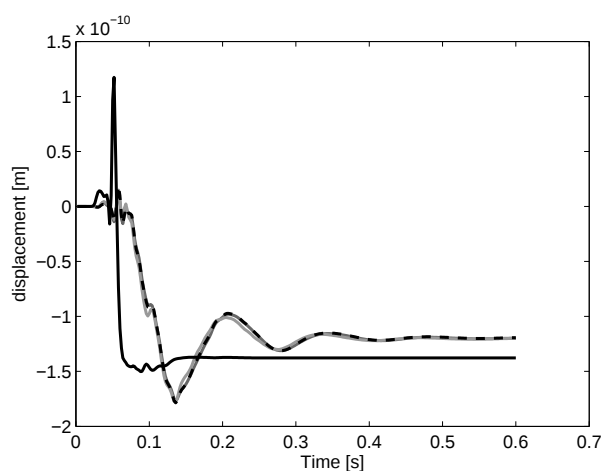


Figura 3.12: Desplazamiento vertical de un punto situado a 6m del borde de la zanja ($b_o = 6\text{m}$) frente a una carga escalón de valor unidad aplicada a una distancia del borde contrario de la zanja igual a 5m ($d_a = 5$). Se representan los resultados sin zanja (línea negra), rellena con el material 1 (línea gris oscura) y rellena con el material 2 (línea gris clara) y con zanja vacía (línea negra discontinua).

Se puede ver en la figura 3.12 como no se aprecian grandes diferencias entre la zanja rellena y la zanja vacía, siendo por tanto una buena solución el rellenar la zanja de material. De todos modos, si se amplía la figura 3.12 en la zona de régimen permanente (figura 3.13) se puede ver que la zanja rellena de material implica en cualquier caso una disminución de la eficiencia respecto del caso vacío. Resulta interesante comprobar que se confirman los resultados con los que predijeron anteriormente otros autores [1, 14] de que rellenos más blandos suponen una mejor mitigación de la que suponen rellenos más rígidos.

Dado que los métodos de propagación de las ondas son análogos en el caso de los dos rellenos, pues parte de las ondas los atravesarán, parte los bordearán y parte se verán reflejadas, la causa de esta mejora en el comportamiento del material blando frente al duro está relacionada con la velocidad muy inferior de la propagación de las ondas en dicho medio que produce por tanto una mayor discontinuidad en el medio.

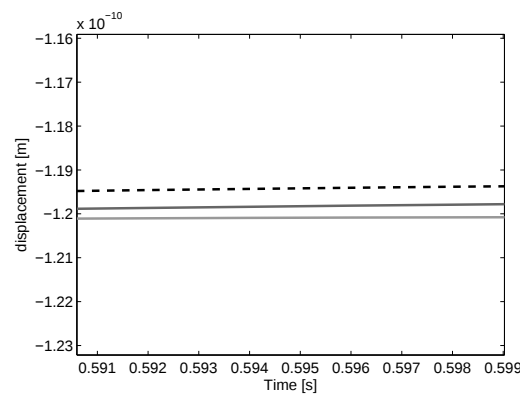


Figura 3.13: Zoom sobre la figura 3.12. Se representan los resultados sin zanja (línea negra), rellena con el material 1 (línea gris oscura) y rellena con el material 2 (línea gris clara) y con zanja vacía (línea negra discontinua).

Para ver que sucede en el resto de los puntos se han representado para distintos instantes de tiempo los desplazamientos verticales de la geometría estudiada en toda la superficie del terreno (figuras 3.14, 3.15 y 3.16) y en puntos interiores del dominio (figuras 3.17, 3.18 y 3.19). Esto se ha realizado tanto para la situación original sin zanja como para los casos con zanja vacía y con el material 1.

Analizando estas gráficas quedan patentes muchas de las conclusiones que se han ido alcanzando a lo largo del proyecto. Se puede empezar comentando que se ve claramente la evolución del frente de onda en cada una de las representaciones. Esta evolución muestra como en el caso del uso de zanja el frente de onda se hace más débil, alcanzándose valores de

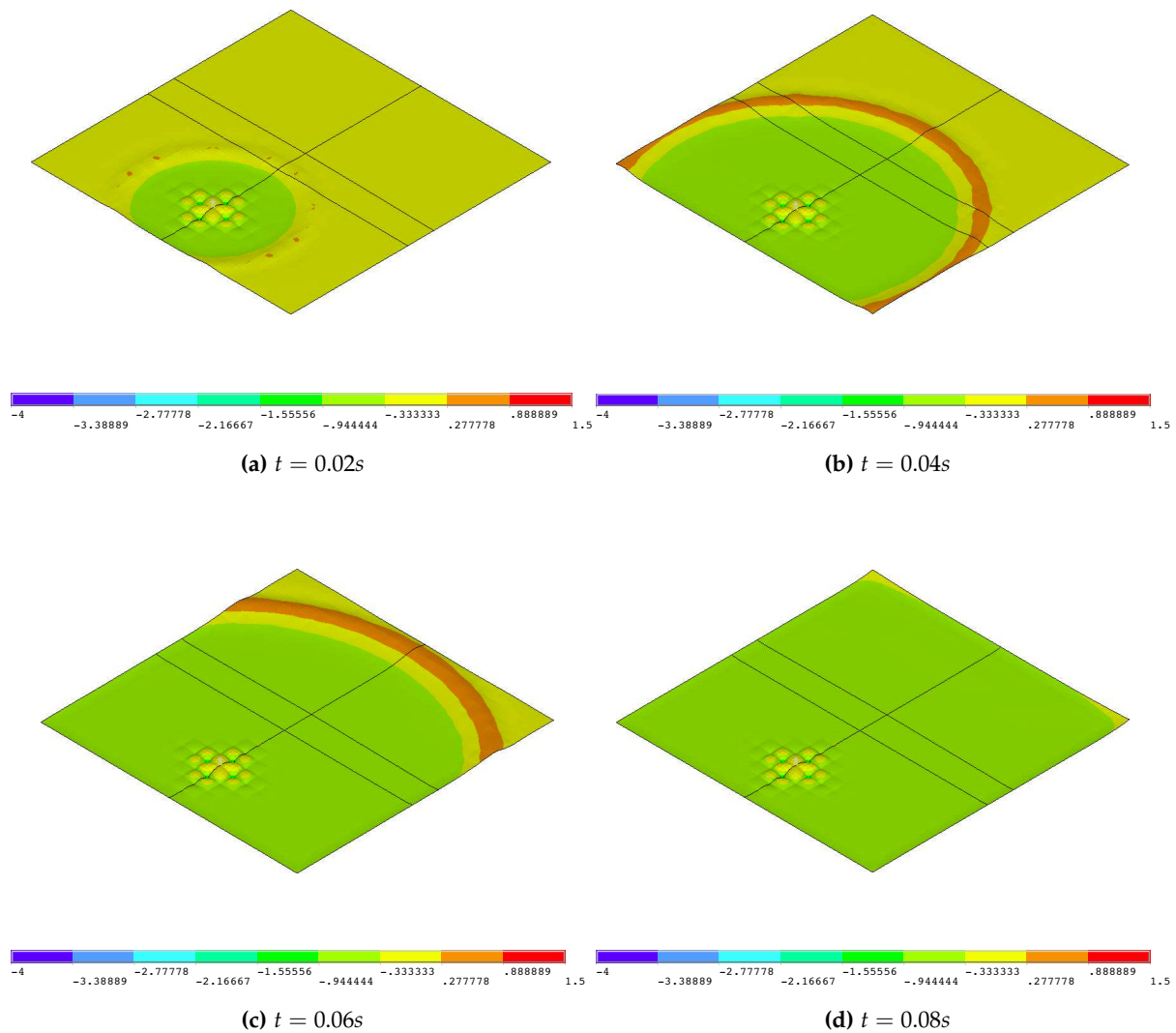


Figura 3.14: Desplazamientos verticales del suelo en distintos pasos de tiempo sin zanja.

los desplazamientos más pequeños de los que se pueden observar en el caso de no usar zanja. También muestran como efectivamente la zanja vacía proporciona unas vibraciones menores de las que se alcanzan en el caso de usar una zanja rellena.

Se observa un detalle muy interesante, y es que en el caso de usar zanjas se distinguen mucho más claramente los tres frentes de onda relacionado con los tres tipos de ondas involucrados en estos fenómenos. Es decir, se distingue como aparece un primer frente de onda debido a las ondas P , como le sigue un segundo frente de onda debido a las ondas S y como aparece un último frente de ondas de mayor importancia producido por las ondas de Rayleigh.

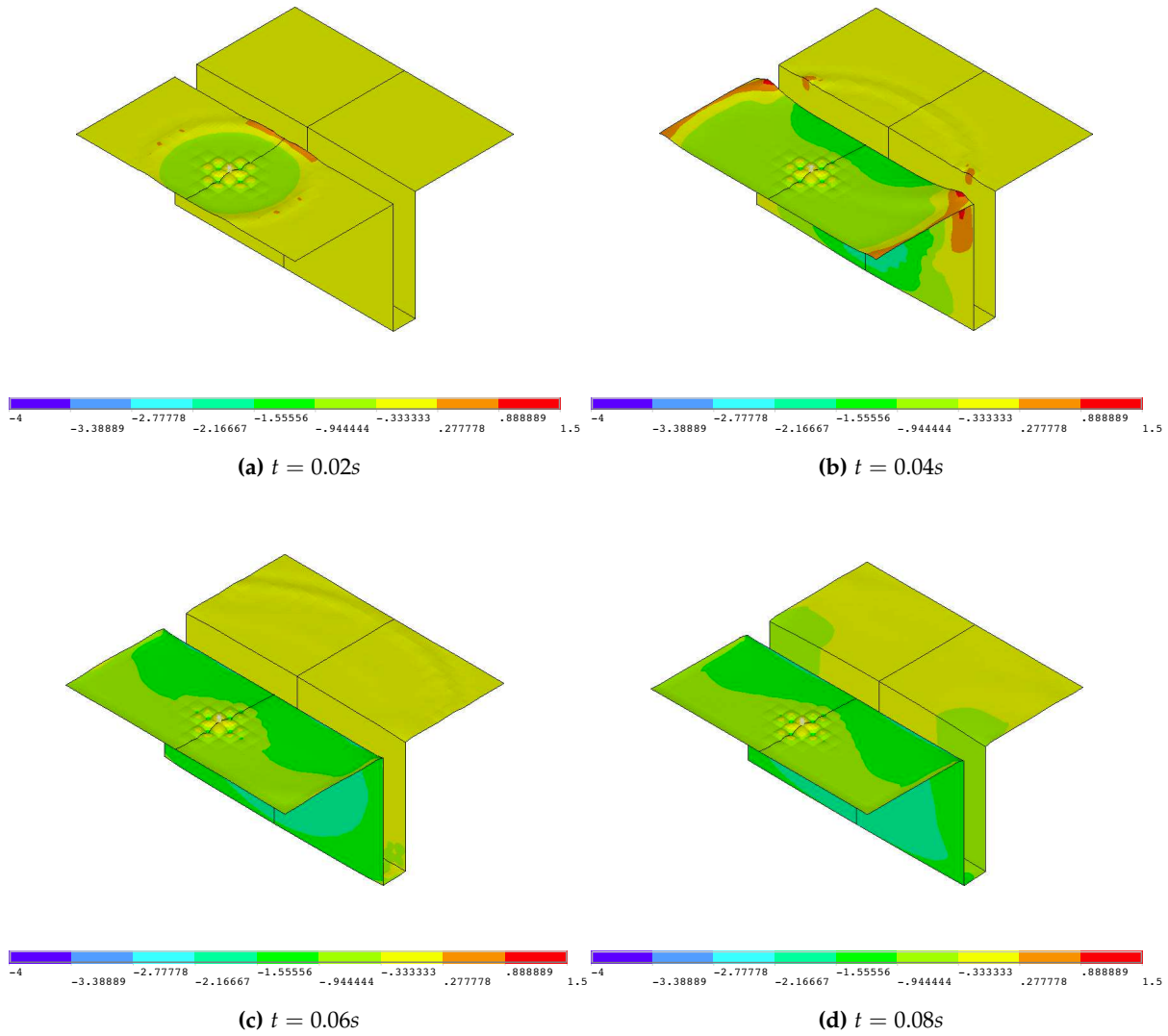


Figura 3.15: Desplazamientos verticales del suelo en distintos pasos de tiempo con zanja vacía.

Mirando en las figuras 3.17, 3.18 y 3.19 se puede tener una idea de lo que sucede en el interior del dominio bajo estudio. Se vuelven a confirmar la reducción de los desplazamientos en la superficie con el uso de la zanja vacía. Se hace evidente también como con la zanja vacía las ondas se ven obligadas a pasar por debajo de la zanja para poder continuar. En cambio se puede apreciar una discontinuidad en el relleno de la zanja, pero queda patente como las vibraciones atraviesan la zanja rellena. En cuanto a los frentes de onda, se puede comprobar como la discontinuidad producida por el material de relleno produce un aumento en la separación de los distintos frentes de onda.

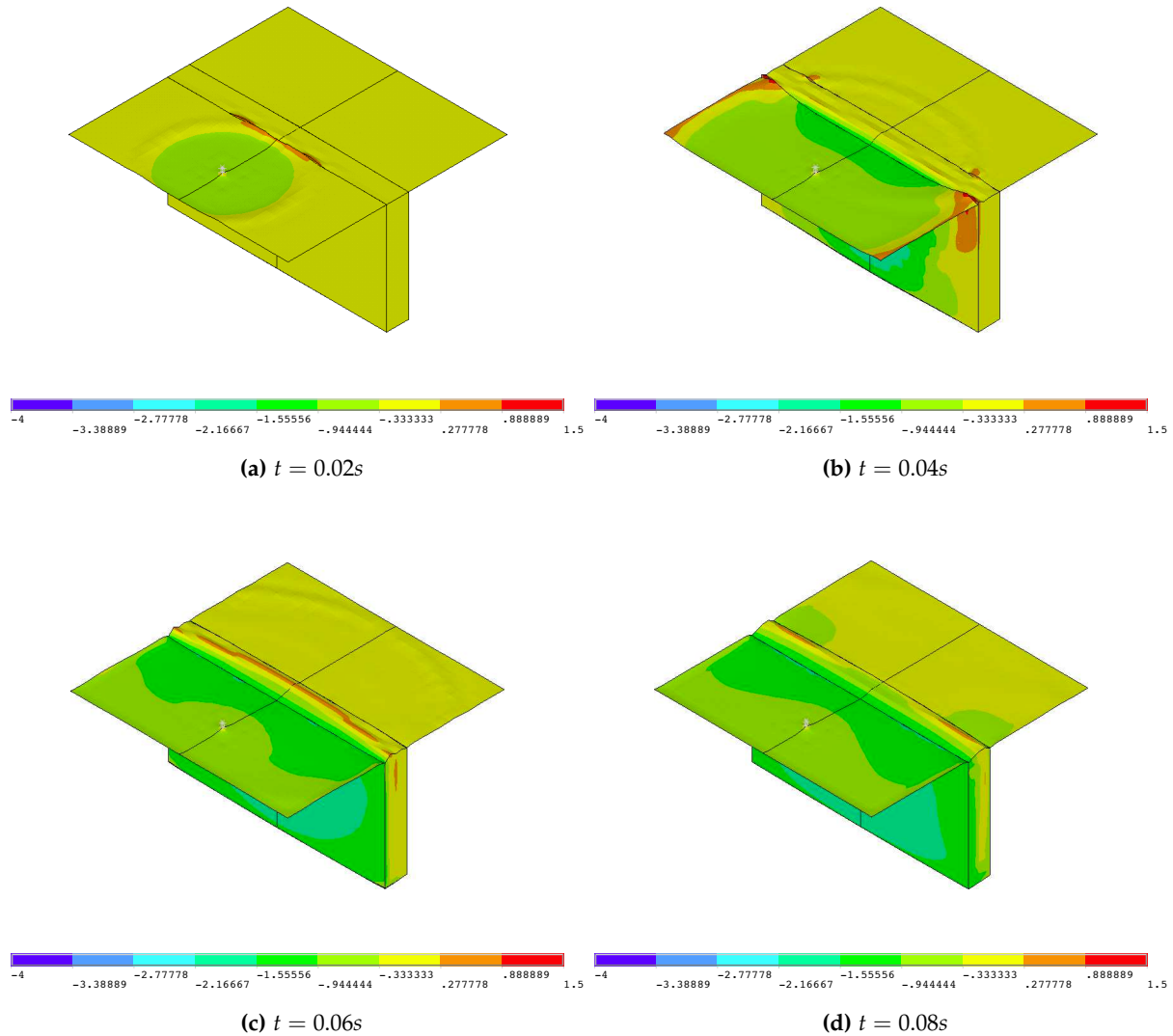


Figura 3.16: Desplazamientos verticales del suelo en distintos pasos de tiempo con zanja rellena del material 1.

Si se mira la figura 3.18.b se distingue como hay un frente de onda en la parte inferior tras la zanja a una cierta profundidad. Esto hace pensar que las ondas P , que se producen a profundidades mayores que las ondas de Rayleigh, tienen una parte que hace su aparición en la superficie a mayor distancia. En cambio otra parte de estas ondas sí bordearía la zanja dando lugar al primer frente de onda observado en la superficie. También hay que hacer mención a los resultados que se obtienen muy cerca del punto de aplicación de la carga. Estos resultados podrían hacerse mucho más exactos y presentar una evolución uniforme mejorando el mallado.

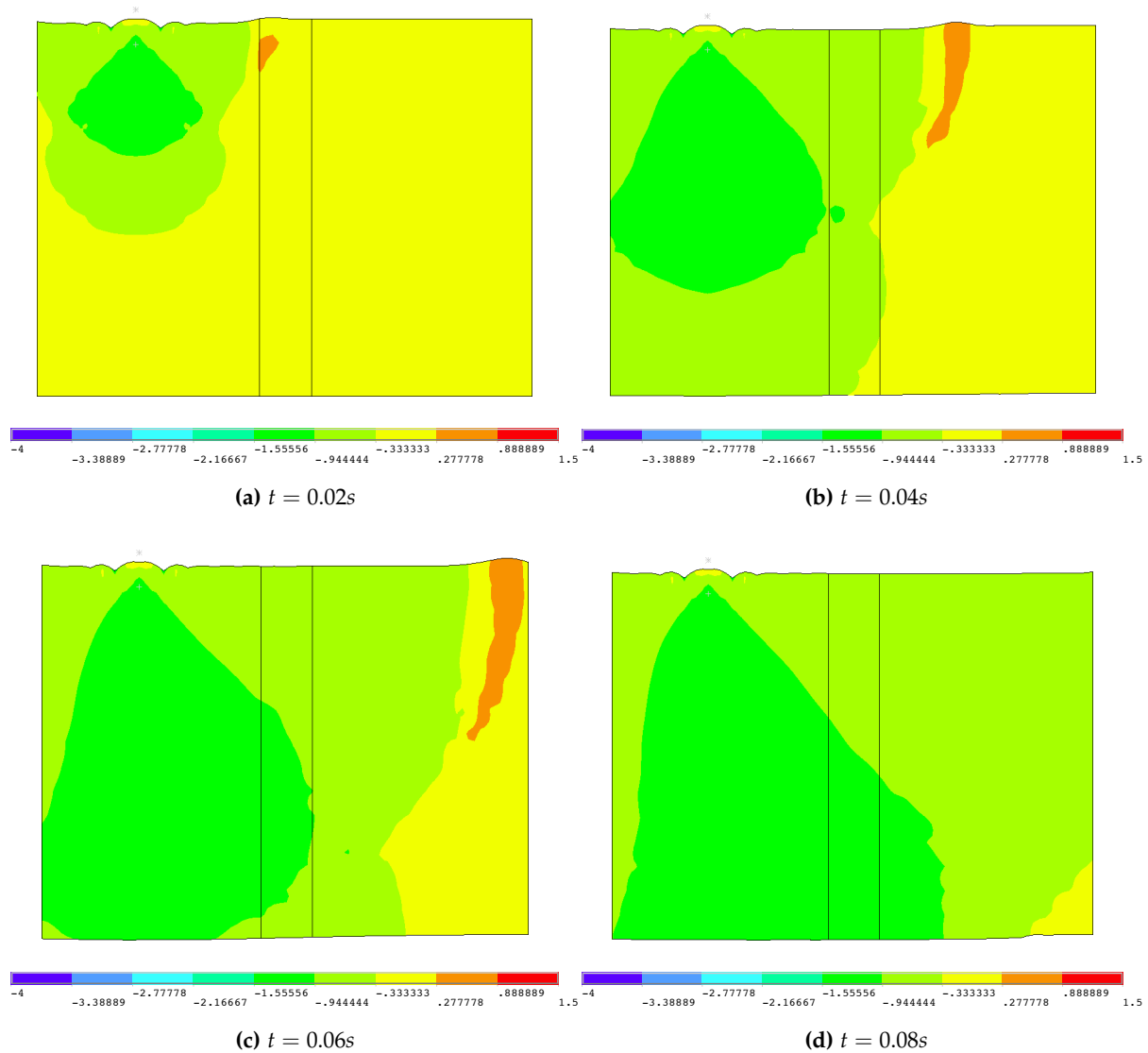


Figura 3.17: Desplazamientos verticales del dominio en distintos pasos de tiempo sin zanja.

Se continua en esta sección realizando un estudio sobre el efecto de usar zanjas rellenas en la mitigación del contenido frecuencial de la carga. Para ello se representa en una gráfica (figura 3.20) el factor de reducción conseguido con la zanja frente a cada una de las frecuencias excitadas por una carga unitaria puntual de tipo impulso. Se ha tomado la decisión de representar únicamente hasta una frecuencia de $110Hz$. Esta decisión viene motivada por el hecho de que la mayoría de normativas de vibraciones en edificios limita la frecuencia a $80Hz$, habiéndose elegido un límite algo superior.

Lo primero que se observa es un aumento de las vibraciones a frecuencias del entorno de los $10Hz$. Posteriormente se produce una disminución importante de los desplazamientos pa-

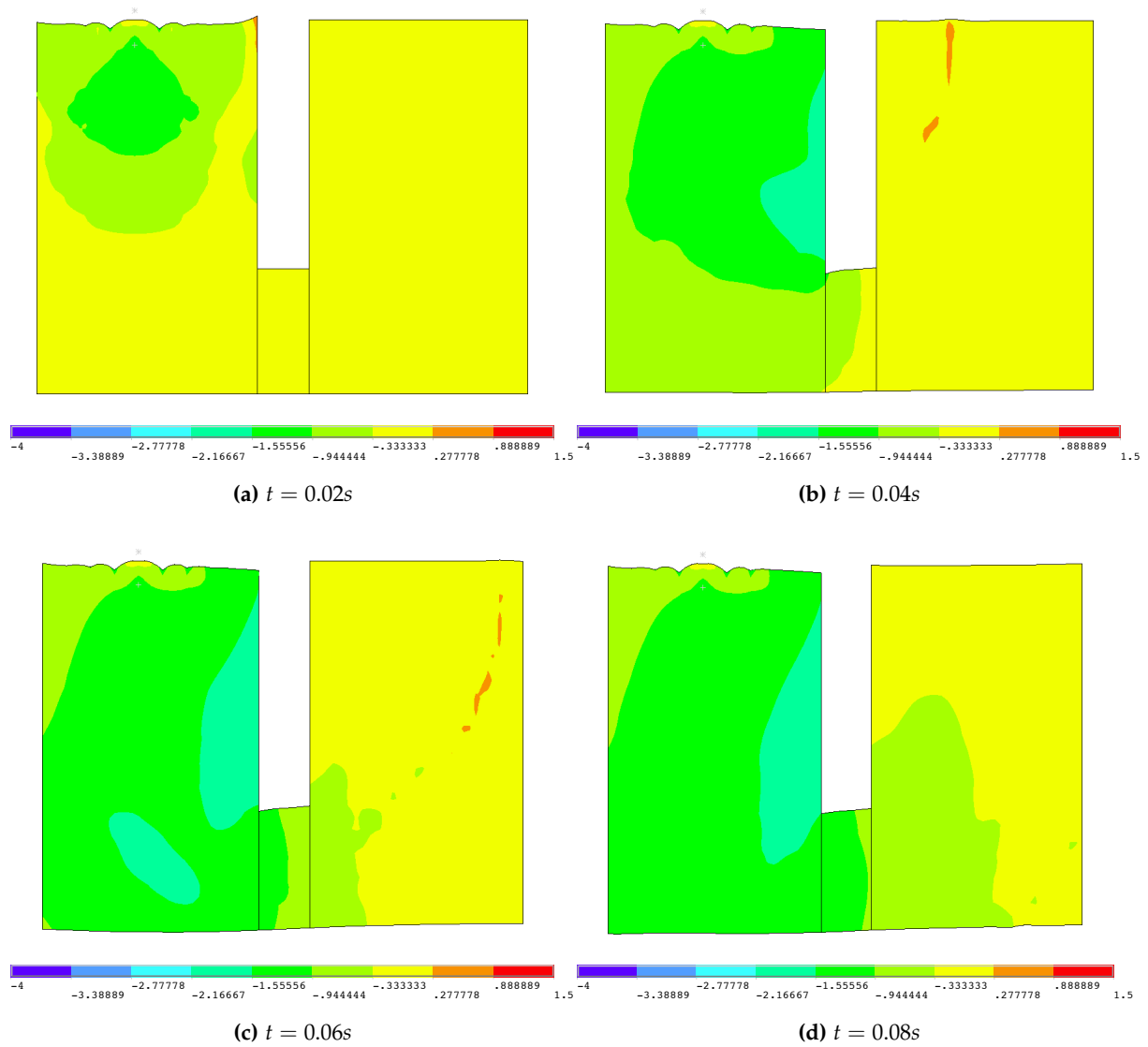


Figura 3.18: Desplazamientos verticales del dominio en distintos pasos de tiempo con zanja vacía.

ra el resto de las frecuencias. Esto es debido a que a medida que se aumenta la frecuencia, la profundidad a la que llegan las ondas superficiales (Rayleigh) disminuye [14]. Cabe destacar la similitud entre el uso de zanjas rellenas o vacías en cuanto a los resultados. Un motivo de las discrepancias entre las gráficas es que por la zanja rellena se pueden transmitir parte de las ondas. Además, ciertas frecuencias pueden excitar en mayor medida un relleno u otro.

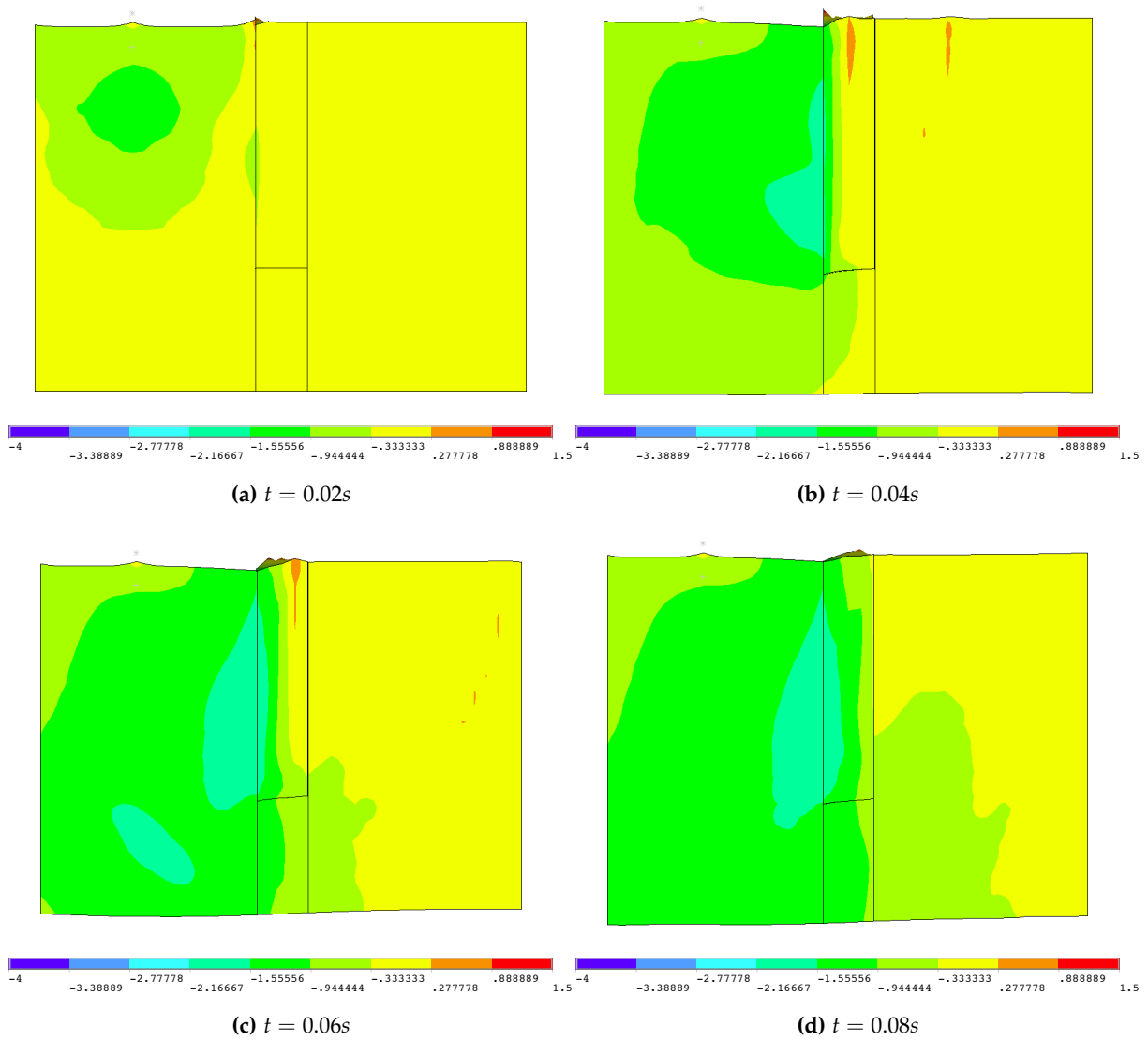


Figura 3.19: Desplazamientos verticales del dominio en distintos pasos de tiempo con zanja rellena del material 1.

3.4.2 Estudio de zanjas rellenas mediante un cajón de hormigón.

Durante el desarrollo del proyecto surgió la duda razonable sobre la posibilidad y efectividad de usar un cajón como método de relleno de la zanja. Esta opción aparece motivada por el hecho de que, dado que lo ideal es tener la zanja vacía para eliminar cualquier medio físico de propagación de las ondas y ante la imposibilidad de usar zanjas vacías, pareció razonable el uso de un cajón que solventara ambos. Algo similar ha sido utilizado por François et al. [14] que empleó pantallas de hormigón para solucionar el problema de inestabilidad presentado por el uso de rellenos blandos.

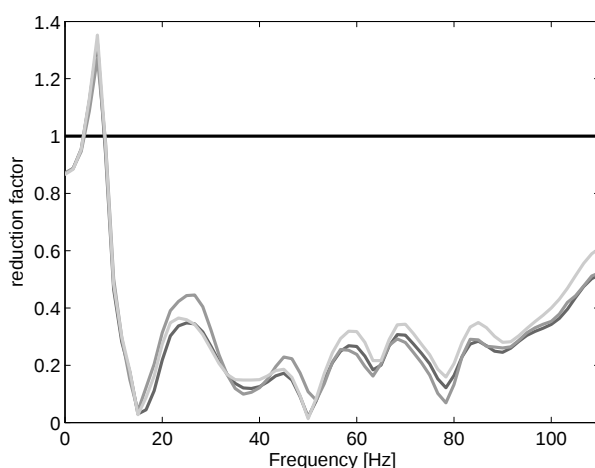


Figura 3.20: Factor de reducción en función de la frecuencia excitada de un punto con $b_o = 6m$ producida por a una carga impulso de valor unidad aplicada a $d_a = 5$. Se representan los resultados sin zanja (línea negra), rellena con el material 1 (línea gris oscura), rellena con el material 2 (línea gris) y con la zanja vacía (línea gris clara).

Con este objetivo se plantea un relleno con forma de cajón de hormigón con un espesor de paredes de $0.1m$. Para su modelado se han empleado elementos tipo shell de 4 nodos, cuadrados y de arista $0.5m$.

Lo primero que se comprueba es que sea mejor o no que el uso de rellenos como los estudiados en la sección anterior. Para ello se representa en la figura 3.21 la evolución temporal de un punto situado a una distancia de la zanja $b_o = 6m$ cuando se aplica una fuerza escalón unitaria a una distancia de la zanja $d_a = 5m$.

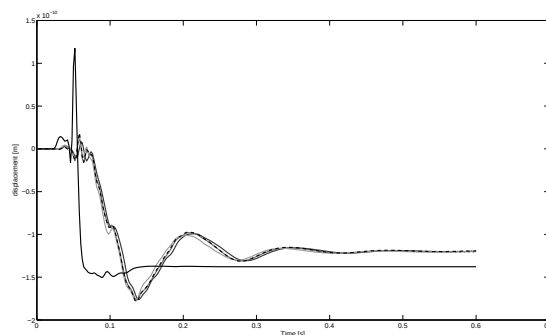


Figura 3.21: Desplazamiento vertical de un punto con $b_o = 6m$ frente a una carga escalón de valor unidad aplicada a $d_a = 5$. Se representan los resultados para una zanja vacía (línea negra), rellena con un cajón de hormigón (línea gris oscura), rellena con el material 1 (línea gris) y rellena con el material 2 (línea gris clara).

Se observa que en general no presenta un comportamiento demasiado diferente al de los casos ya estudiados. Se puede realizar un zoom (figura 3.22) sobre la parte del régimen permanente como se hizo en el apartado anterior para poder estudiar mejor como de efectivo o no es respecto de los otros casos.

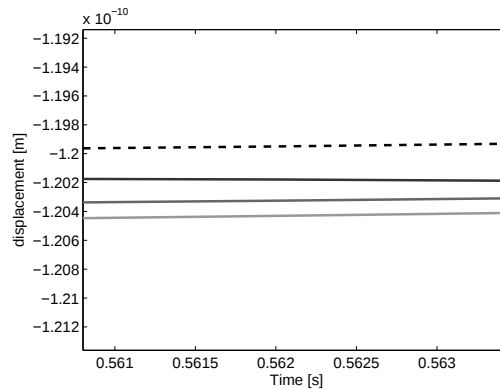


Figura 3.22: Zoom sobre la figura 3.12. Se representan los resultados sin zanja (línea negra), rellena con un cajón de hormigón (línea gris oscura), rellena con el material 1 (línea gris) y rellena con el material 2 (línea gris clara) y con zanja vacía (línea negra discontinua).

La figura 3.22 pone de manifiesto que la efectividad del cajón es superior a la de rellenar la zanja completamente de material. Esto es debido a que las ondas no son capaces de atravesar el cajón. Sin embargo es comprensible que su efectividad siga siendo inferior a la de la zanja vacía, dado que el cajón se verá excitado por las ondas y por tanto será una fuente de vibraciones al otro lado de la zanja. De todos modos, al podersele suponer un comportamiento como sólido rígido mitigará y absorberá gran parte de las ondas que lleguen a él.

De la misma manera que se presentaron los resultados de los desplazamientos verticales en toda la geometría para los casos sin zanja, con zanja vacía y con zanja rellena (figuras 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19) en el apartado anterior se presentan ahora los equivalentes para el caso del uso del cajón (figuras 3.23 y 3.24).

Los resultados obtenidos en estas gráficas confirman que el uso de un cajón es la solución más efectiva para rellenar la zanja. Los desplazamientos obtenidos son muy parecidos a los que se obtienen en las dos primeras figuras del caso de la zanja abierta. Se puede observar como el frente de onda que presenta este caso es más débil que el que presenta el caso con el relleno de material 1. Además es interesante resaltar que en el cajón no se aprecian vibraciones. Es decir, no solo no se transmiten vibraciones por el interior del cajón, sino que tampoco

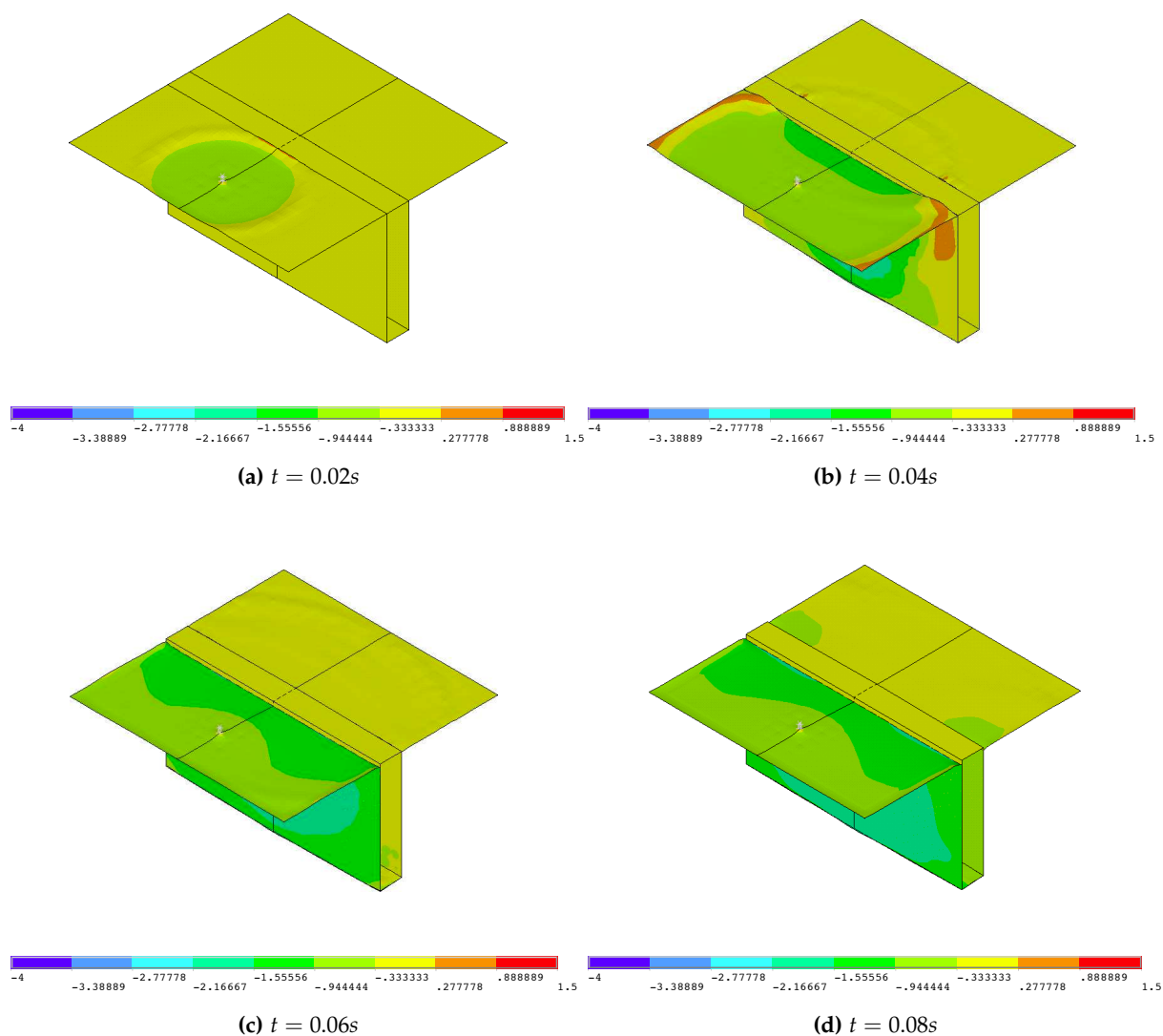


Figura 3.23: Desplazamientos verticales del suelo en distintos pasos de tiempo con zanja rellena con un cajón de hormigón.

lo hacen por las paredes que lo forman. Se comporta por tanto como un sólido rígido que interactúa con el terreno absorbiendo las vibraciones que le llegan y actuando como fuente de nuevas vibraciones en el otro lado de la zanja. Es esto último lo que hace que, aun siendo mejor que los otros rellenos, esta solución siga sin ser igual de efectiva que el caso de la zanja vacía.

Siguiendo con el estudio del uso de un cajón para rellenar la zanja se presenta una nueva gráfica (figura 3.25) en la que se puede comparar la amortiguación del cajón frente a la que produce la zanja vacía en función de la frecuencia de excitación de la carga.

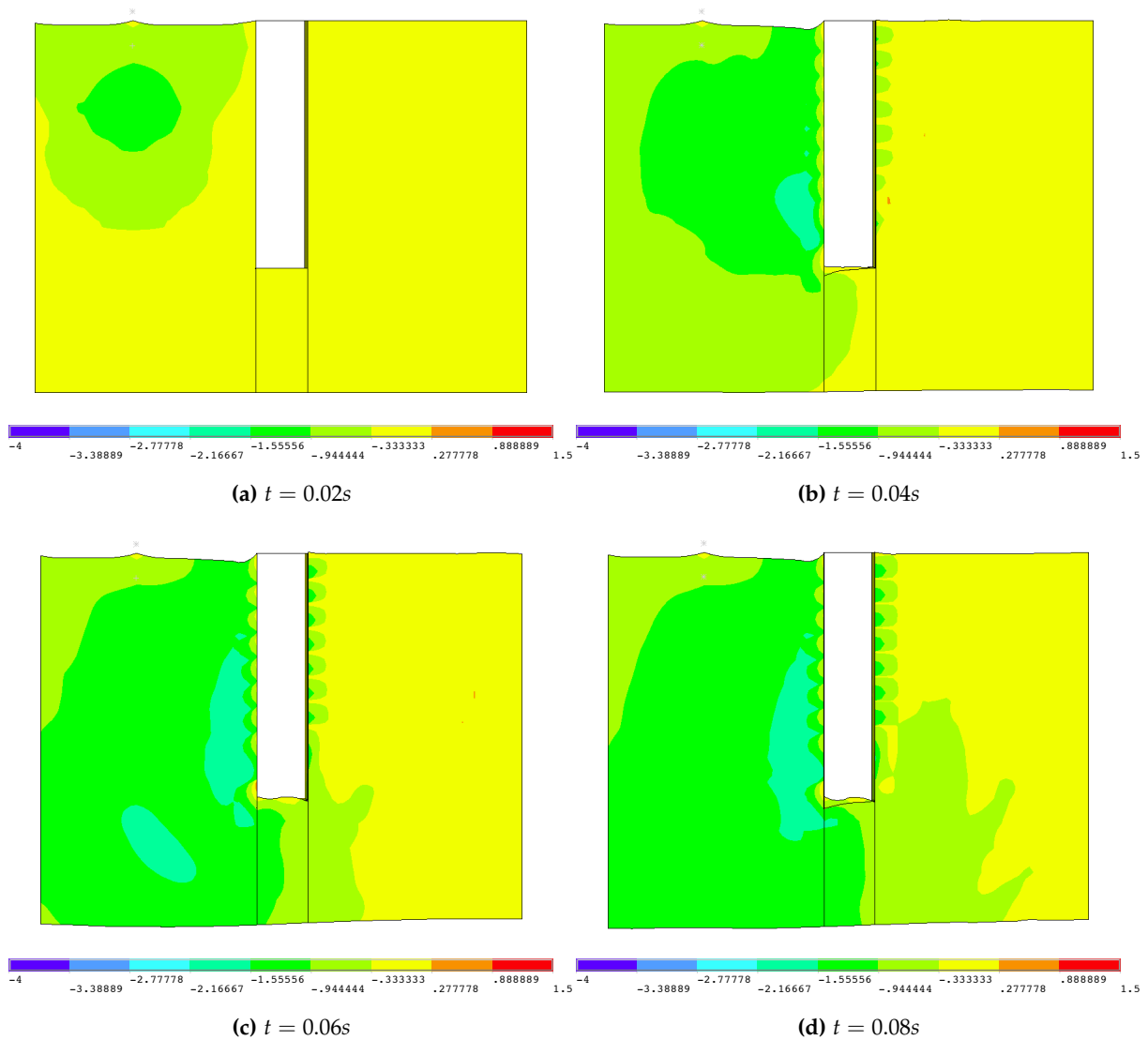


Figura 3.24: Desplazamientos verticales del dominio en distintos pasos de tiempo con zanja rellena con un cajón de hormigón.

Los resultados muestran un comportamiento cualitativo parecido al que producían los otros rellenos, es decir, misma amplificación de los desplazamientos a bajas frecuencias debido a la cercanía a una frecuencia característica del sistema, y misma reducción progresiva a medida que se va aumentando la frecuencia. Sin embargo, es interesante destacar que en este caso a medida que aumenta la frecuencia, la diferencia entre el caso con zanja y el caso sin zanja crece. Se produce de hecho un amortiguamiento para altas frecuencias mayor con la zanja rellena mediante un cajón de hormigón que con la zanja vacía. Esto sucede como consecuencia de la interacción suelo-estructura. L. Auersch et al. [5] realizaron unos estudios en los que

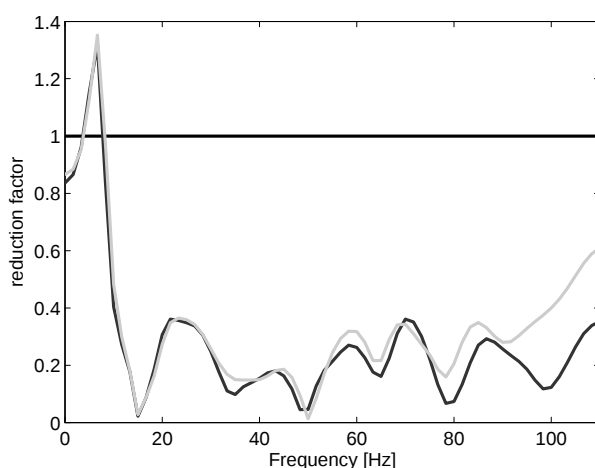


Figura 3.25: Factor de reducción en función de la frecuencia excitada de un punto con $b_o = 6m$ producida por a una carga impulso de valor unidad aplicada a $d_a = 5$. Se representan los resultados sin zanja (línea negra), rellena con un cajón de hormigón (línea gris oscura) y con la zanja vacía (línea gris clara).

se concluye que el aumento de rigidez de la cimentación usada en una estructura produce disminuciones en la amplitud de las respuestas del sistema a medida que la frecuencia se aleja de la frecuencia de resonancia de la estructura (en este caso el cajón). Como ya se comentó previamente, el cajón se comporta en el lado de la zanja donde se pretende conseguir el aislamiento como una fuente de vibraciones. Esta reducción de la amplitud conseguida por la alta rigidez del cajón permite conseguir comportamientos mejores a altas frecuencias que los que se consiguen sin relleno. Además, como se ha comentado previamente, las ondas superficiales tienden a alcanzar profundidades menores a medida que aumenta la frecuencia. Para profundidades muy bajas de las ondas, la excitación que estas producen en el cajón debido a la interacción suelo-estructura (entendido este como una estructura) para frecuencias lejanas a las frecuencias naturales del cajón es muy baja. Si se tiene en cuenta además que el cajón absorbe vibraciones se entiende que amortigüe mejor que la zanja vacía, ya que la zanja vacía no las puede absorber, de modo que, las que no son reflejadas la bordean. El hecho de que la bordeen en lugar de absorberlas produce que un mayor número de ondas lleguen al otro lado de la zanja produciéndose una amortiguación inferior.

Parte III

CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

4.1 CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto fin de carrera se han estudiado distintos casos con el objetivo de establecer cómo y cuánto influye la elección de ciertos parámetros en el diseño de zanjas como método de mitigación de vibraciones causadas por tráfico ferroviario. Para ello se han realizado una serie de estudios numéricos haciendo uso de la herramienta para MATLAB SSIFIB0.

En primer lugar se han realizado una serie de estudios enmarcados en el dominio temporal para una fuerza de evolución escalón. Estos estudios han mostrado que la mitigación obtenida es tanto mayor a medida que la zanja se encuentra más cerca de la fuente de las vibraciones o más cerca del punto que se desea aislar. Entre estos dos parámetros se ha hecho evidente también que tiene un mayor peso la distancia de la fuente. También se ha estudiado, siempre para el mismo tipo de fuerza y también enmarcado en el dominio temporal el efecto que tiene la profundidad de la zanja utilizada.

Se demuestra en este proyecto que la profundidad es un parámetro relevante para conseguir los objetivos deseados. Tanto es así que hasta alcanzar un valor de $6m$ de profundidad se consiguen grandes mejoras para cada metro en que se aumente la profundidad. Una vez alcanzado este valor las mejoras se hacen menos evidentes a medida que se aumenta la profundidad de la zanja.

En segundo lugar se ha estudiado como la zanja amortigua el contenido frecuencial de la carga. Se ha comprobado como salvo para frecuencias muy bajas (menores de $20Hz$) la zanja produce una importante mitigación de las vibraciones haciéndose más importante esto en el rango de los 50 a los $70Hz$. Se ha pretendido además realizar, para distintas frecuencias, estudios sobre la importancia de los parámetros en los que se ha centrado el proyecto (distancia de la zanja a la fuente d_a , distancia de la zanja al punto que se quiere aislar b_o y profundidad de zanja h_z). En este sentido los resultados no han sido clarificadores. Las dispersiones que

se han obtenido han sido demasiado grandes como para considerar el poder extraer alguna conclusión de las soluciones que daban las simulaciones.

Por último se han realizado una serie de estudios destinados a afrontar el problema real de las zanjas, es decir, aquel en el que la zanja no está vacía. Realizando cálculos numéricos en este sentido se ha llegado a la conclusión de que el uso de rellenos no afecta en gran medida y que los resultados que se obtienen son muy similares a los que se consiguen con el caso ideal de la zanja vacía. Esto implica que el uso de rellenos es una buena solución al problema de inestabilidad de la zanja. Se ha llegado también a la conclusión de que el uso de materiales de relleno blandos ofrecen un comportamiento mejor que el ofrecido por materiales rígidos debido a que suponen una mayor discontinuidad en la propagación de las ondas.

Sin embargo, el uso de materiales blandos a largo plazo puede seguir sufriendo problemas de inestabilidad, así como producirse el deterioro del mismo. En este proyecto se ha planteado una opción parecida a la planteada por François et al. para solventar este problema [14]. François planteó la posibilidad de usar pantallas de hormigón que dieran rigidez a la zanja. En este proyecto se ha planteado el uso de cajones de hormigón. Esto a permitido no solo garantizar la estabilidad de la zanja aportándole la rigidez de la que carecen los rellenos blandos, sino que además, a diferencia de la opción que planteaba François, garantiza una discontinuidad total en la propagación de las ondas al encontrarse el cajón hueco en su interior. Los resultados obtenidos han demostrado que son una solución más eficiente que el uso de rellenos y además plantean la ventaja de que se pueden producir en serie con la reducción de costes que supone el uso de piezas prefabricadas.

4.2 DESARROLLOS FUTUROS.

Este proyecto se ha encontrado con limitaciones por motivos de coste computacional. El uso de una solución fundamental de un espacio completo infinito ha obligado la representación no solo de la zanja, sino también de la sección de terreno que se quiere estudiar. Esto ha obligado al uso de un alto número de elementos lo que ha supuesto un alto coste computacional que ha obligado a limitar el tamaño del terreno estudiado. Sería por tanto interesante realizar estudios en los que se compruebe qué sucede cuando la carga se aplica a mayores distancias de la zanja, así como los resultados de medir a distancias de la zanja también mayores. Esto se puede realizar haciendo uso de una solución fundamental de un semiespacio infinito como la que

plantean Galvín y Romero [16]. Esto permite representar exclusivamente la zanja, pudiendo conocerse la tensión y los desplazamientos en cualquier punto del terreno sin necesidad de representarlo.

En cuanto a los resultados obtenidos de las mitigaciones de ciertas frecuencias del contenido frecuencial de una carga tipo impulso, los resultados obtenidos no han permitido más que observar tendencias, teniendo los resultados una gran dispersión. No se ha podido por tanto estudiar el efecto que tienen los parámetros bajo estudio en este proyecto (distancia de aplicación de la carga, distancia del punto de observación a la zanja y profundidad de la zanja). Quizás un estudio con más puntos de observación ayudaría a disminuir dicha dispersión.

Queda por supuesto como propuesta de desarrollos futuros el estudio del comportamiento de la zanja frente a una carga que se desplaza con el tiempo, siendo este el paso siguiente para realizar estudios sobre la efectividad de la zanja frente a tráfico ferroviario.

Por último, en lo que a los rellenos de la zanja se refiere, sería interesante continuar con estudios sobre el uso de rellenos con cajones prefabricados de hormigón. Se podría plantear además una comparación entre este método y el planteado por otros autores de usar paneles rígidos que contengan un material de relleno blando entre ellos.

APÉNDICES

RESOLUCIÓN DE UN PROBLEMA MEF UTILIZANDO LA HERRAMIENTA SSIFIBO

A.1 PREPROCESADO MEDIANTE ANSYS

Se hace uso del módulo de preprocesado de ANSYS para realizar una discretización de un modelo geométrico del problema. A continuación se extraen del modelo en ANSYS las matrices de masa y de rigidez (en adelante M y K , respectivamente). Para ello se llama en ANSYS a la función `F2HB.mac` que crea las matrices M y K realizando un análisis modal del sistema y las escribe en formato `*.FULL`, que es el formato en el cual ANSYS escribe las matrices obtenidas del análisis modal. Es imprescindible no aplicar condiciones de contorno en el modelo cuando se ejecuta `F2HB.mac` para garantizar que se obtienen las matrices completas, sin que ANSYS elimine columnas de la matriz que multipliquen desplazamientos nulos. Una vez obtenidas las matrices M y K en formato `*.FULL` la función `F2HB.mac` ejecuta el comando de ANSYS `HBMAT`, que las lee y las reescribe en formato Harwell-Boeing (`*.matrix`).

Llegados a este punto se tienen las matrices `MASS.matrix` y `STIFF.matrix`, correspondientes a las matrices M y K del sistema. Mediante la ejecución de la función `HB2MAT.mac` se pueden reescribir estas dos matrices en formato `sparse`, que al guardar solo los valores de la matriz no nulos permite un importante ahorro de memoria y agiliza el proceso de cálculo.

Además de estas dos matrices, para poder ejecutar la aplicación `SSIFIBO` en el programa `MATLAB` para resolver un problema de MEF. son necesarias dos listas, también generadas por la función `F2HB.mac`. La primera de ellas tiene el nombre de `FNODE.lis` y recoge en forma de matriz cada uno de los nodos que forman la malla del modelo, así como las coordenadas del mismo, asignando a cada fila un nodo. De este modo, se tiene una matriz cuya primera columna recoge el número de los nodos, y en cada una de las tres columnas siguientes, las coordenadas x , y y z del nodo correspondiente. La segunda `FELEM.lis` recoge cada uno de los elementos de los que está compuesta la malla. Cada fila corresponde a un elemento. En la primera columna está especificado el número indicador del elemento, en la segunda el

número de nodos del que está compuesto y a continuación tantas columnas como nodos haya indicando en cada una de ellas el número correspondiente a ellos.

Un ejemplo de la llamada a las funciones F2HB.mac y HB2MAT.mac puede ser el que se expone a continuación:

```
NWRITE,FENODE,lis
EWRITE,FEELEM,lis
FINISH

F2HB, 'STIFF'
HB2MAT, 'STIFF'

F2HB, 'MASS'
HB2MAT, 'MASS'
```

Listing A.1: Ejemplo de llamada a las funciones F2HB.mac y HB2MAT.mac

A.2 SOLVER MEDIANTE SSIFIBO EN MATLAB

Una vez obtenidos estos datos se puede realizar el cálculo de la solución del problema en MATLAB. Lo primero que se hace es crear un archivo *.m (ejemplo.m). En este archivo se llama a la función ans2mat, implementada en SSIFIBO. Esta función, dándole como entrada los archivos generados en el preprocesado STIFF.txt, FENODE.lis, y FEELEM.lis devuelve la matriz K , y las matrices FENODE y FEELEM de manera que MATLAB pueda trabajar con ellas. De igual modo se puede generar la matriz M dándole como entrada MASS.txt en lugar de STIFF.txt a la función asn2mat. Una muestra del código para ello es el siguiente:

```
[K,FENODE,FEELEM] = ans2mat ('STIFF.txt','FENODE.lis','FEELEM.lis');
[M] = asn2mat ('MASS.txt','FENODE.lis','FEELEM.lis');
```

Listing A.2: Ejemplo de creación de las matrices de masa y rigidez en SSIFIBO

Lo siguiente que se hace es darle al programa las condiciones de contorno. Para ello se crean las matrices FENODE y FCVALUE que establecen las condiciones de contorno en desplazamientos (en adelante c.c.d.) y en fuerzas (en adelante c.c.f.) en el sistema. FENODE es una matriz que tendrá m filas y $n + 1$ columnas, siendo m el número de nodos sobre los que se quieren imponer c.c.d. y n el número de grados de libertad (en adelante g.d.l.) asociados a dicho nodo. La constitución de la matriz consiste en una primera columna con el número del nodo y el

resto de la fila se rellena con un 1 en la columna correspondiente a un g.d.l. impedido y un 0 en un g.d.l. libre. FCVALUE es una matriz con $g \times t$ filas y 3 columnas, donde g es el número de grados de libertad sobre los que se aplica una fuerza y t es el número de pasos de tiempo en los que se hace el estudio. La forma de rellenar esta matriz es introducir en la primera columna el número correspondiente al g.d.l. sobre el que se trabaja, en la siguiente el paso de tiempo al que se hace referencia en esa fila, y en la tercera el valor que toma la carga sobre ese g.d.l. en ese paso de tiempo.

Lo último que se hace en este archivo es ejecutar el comando save de MATLAB para guardar todas las matrices que se han generado en un archivo *.mat (ejemplo.mat). A continuación se muestra como sería el código utilizado para un ejemplo sencillo.

```
[ %FE BOUNDARY CONDITIONS
%FCNODE=[#NODE, UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ; ...; FOR ALL BOUNDARIES CONDITIONS DIFFERENT FROM FREE SURFACE];
%Ui,ROTi=1 VALUES ARE KNOWN DISPLACEMENTS
FCNODE=[];

%FE BOUNDARY CONDITION VALUES FCVALUE
%FCVALUE=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

FCVALUE=[];

FCVALUE= zeros(1024,3);
FCVALUE(:,1)=3*18;
FCVALUE(:,2)=1:1024;
FCVALUE(:,3)=1;

%SAVE AS JOB NAME
save 'ejemplo'
```

Listing A.3: Ejemplo de definición de condiciones de contorno para un problema MEF en SSIFIBO

A continuación se crea otro archivo *.m (runejemplo.m) en el que se llaman los datos almacenados en el archivo ejemplo.mat. Se definen el número de pasos de tiempo y el valor de los pasos de tiempo, así como los coeficientes α y β cuyas ecuaciones son:

$$\alpha = 2\zeta \frac{\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (\text{A.1})$$

$$\beta = 2\zeta \frac{1}{\omega_i + \omega_j} \quad (\text{A.2})$$

Donde $\omega - i$ es la frecuencia natural i del sistema. Con estos coeficientes se puede calcular el valor de la matriz de amortiguamiento mediante la expresión:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (\text{A.3})$$

Por último, se ejecuta la función SSIFIBO a la que se le da como entrada los coeficientes α y β , el número de pasos de tiempo, el valor de los pasos de tiempo y el archivo ejemplo.mat y devuelve el vector TIM que recoge cada uno de los pasos de tiempo estudiados, y las matrices FEACC, FEVEL y FEDISP, que recogen los valores de la aceleración, velocidad y desplazamiento de cada uno de los nodos, respectivamente.

Se expone a continuación un código estándar de lo que puede ser una llamada del archivo `runejemplo.m`.

```
%JOB TITLE
JOB='ejemplo.mat';

%TIME STEP OPTIONS
NSTEP=300; %Number of time steps
AT=1e-3; %Time interval [s]

%STRUCTURAL DAMPING (C=alpha*M+beta*K)
ALPHA=1.4214; % [s^-1]
BETA=1.8017e-4; % [s]

%CALL SSIFIBO
ssifibo(JOB, 'FEM', [], [], [], [], NSTEP, AT, ALPHA, BETA);
```

Listing A.4: Ejemplo de llamada a la función SSIFIBO

RESOLUCIÓN DE UN PROBLEMA MEC UTILIZANDO LA HERRAMIENTA SSIFIBO

B.1 PREPARACIÓN DE LOS DATOS

En este apéndice se procede a mostrar y explicar un código modelo usado para resolver un problema MEC. Lo primero que se debe hacer es definir la geometría y el mallado de la misma empleados.

Para ello, se definen dos matrices, BENODE y BEELEM. La primera matriz recoge en su primera columna el número con el que se nombra a cada uno de los nodos y en las tres columnas siguientes las coordenadas de nodo con el que comparte fila. La segunda matriz por su parte recoge los elementos empleados, teniendo en su primera columna el número con el que se ha identificado cada uno de los elementos y en las otras nueve columnas (recordar que se emplean elementos cuadrados de nueve nodos) cada uno de los nodos que pertenecen al elemento, siguiendo el orden mostrado en la figura .

En mi caso la geometría y el mallado han sido definidos con el programa GID exportándose luego cada una de las matrices en unos archivos *.txt. A estos archivos se les ha dado el nombre de S0ILELEM.txt y S0ILNODE.txt. Una vez definida la malla se procede a definir cada uno de los contornos mediante la matriz BOUNDEF, en la cuál se define en la primera columna el primer elemento del contorno. en la segunda columna el último, en la tercera el primer nodo del contorno y en la cuarta el último. Cada una de las filas que tenga la matriz BOUNDEF hará referencia a un contorno distinto.

Por último se procede a definir los distintos dominios. Para ello se define la matriz NCOND en la que se incluye en la primera columna el número con el que se define el dominio, en la segunda el número de contornos del que consta dicho dominio, y a continuación tantas columnas como dominios tenga, escribiéndose en cada una de las columnas el número que identifica a cada contorno y que coincide con el número de la columna que ocupa en la matriz BOUNDEF. A continuación se muestran dos trozos de código. El primero corresponde a

la definición de la malla en el caso de exportar las matrices con los nodos y los elementos; y el segundo a la definición de las matrices dentro del mismo programa.

```
%-----
%
%      BE MESH DEFINITION
%
%-----

load SOILELEM.txt;
load SOILNODE.txt;

%BE ELEMENT NODES
%BENODE=[#NODE, X, Y, Z; ...; FOR ALL NODES]

BENODE=SOILNODE;
BEELEM=SOILELEM;

%BONDARY DEFINITION
%BOUNDEF=[1ST ELEMENT, LAST ELEMENT, 1ST NODE, LAST NODE; ...; FOR ALL BOUNDARIES]

BOUNDEF=[1 size(INTELEM,1) 1 size(INTNODE,1)];

%DOMAIN DEFINITION: NCOND=[#DOMAIN, #BOUNDARIES, BOUNDARY IDs; ...; FOR ALL DOMAIN]
NCOND=[1      1      1];
```

Listing B.1: Definición del mallado MEC para el ejemplo de matrices exportadas.

```
%-----
%
%      BE MESH DEFINITION
%
%-----

%BE ELEMENT NODES
%BENODE=[#NODE, X, Y, Z; ...; FOR ALL NODES]

BENODE=[1      -0.25  -0.25  0;
        2  0      -0.25  0;
        3  0.25  -0.25  0;
        4  0.25   0      0;
        5  0.25   0.25  0;
        6  0      0.25  0;
        7 -0.25   0.25  0;
        8 -0.25   0      0;
        9  0      0      0];

%BE ELEMENTS DEFINITION
%BEELEM=[#ELEMENT, #NODES, N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9; ...; FOR ALL ELEMENTS]

BEELEM=[1      9      1  2  3  4  5  6  7  8  9];

%BONDARY DEFINITION
```

```
%BOUNDEF=[1ST ELEMENT, LAST ELEMENT, 1ST NODE, LAST NODE; ...; FOR ALL BOUNDARIES]

BOUNDEF=[1      1      1  9];

%DOMAIN DEFINITION: NCOND=[#DOMAIN, #BOUNDARIES, BOUNDARY IDs; ...; FOR ALL DOMAIN]
NCOND=[1      1      1];
```

Listing B.2: Definición del mallado MEC para el ejemplo de matrices definidas en el código.

Una vez definida la malla, los contornos y los dominios; se procede a definir las condiciones de contorno del problema. Para ello se hace uso de otras las matrices BCNODE y BCVALUE, en función de si las condiciones de contorno (en adelante c.c.d.) son en desplazamientos o en fuerzas aplicadas (en adelante c.c.f.) respectivamente. BCNODE es una matriz que tendrá m filas y $n + 1$ columnas, siendo m el número de nodos sobre los que se quieren imponer c.c.d. y n el número de grados de libertad (en adelante g.d.l.) asociados a dicho nodo. La constitución de la matriz consiste en una primera columna con el número del nodo y el resto de la fila se rellena con un 1 en la columna correspondiente a un g.d.l. impedido y un 0 en un g.d.l. libre. BCVALUE es una matriz con $g \times t$ filas y 3 columnas, donde g es el número de grados de libertad sobre los que se aplica una fuerza y t es el número de pasos de tiempo en los que se hace el estudio. La forma de rellenar esta matriz es introducir en la primera columna el número correspondiente al g.d.l. sobre el que se trabaja, en la siguiente el paso de tiempo al que se hace referencia en esa fila, y en la tercera el valor que toma la carga sobre ese g.d.l. en ese paso de tiempo. Se presentan a continuación la continuación de los códigos anteriormente mostrados. En esta parte se puede observar la definición de las condiciones de contorno.

Decir sin embargo, que para la definición de BCVALUE en el caso de la geometría exportada, debido al gran tamaño de la misma, se ha hecho uso de un archivo SPFC.m auxiliar que se realiza el relleno de los 300 pasos de tiempo empleados y cuyas entradas son:

- st - Número de pasos de tiempo empleados.
- vc - Valor que va a tomar la fuerza.
- I - Nodo sobre el que se va a aplicar la fuerza.
- n - G.d.l. excitado del nodo I .

```
%BOUNDARY CONDITIONS (DEFAULT CONDITION: FREE SURFACE, NODAL TRACTION VALUES ARE KNOWN)
%BCNODE=[#NODE, BCx, BCy, BCz; ...; FOR ALL BOUNDARIES CONDITIONS DIFFERENT FROM FREE SURFACE];
```

```

%BCi=0 VALUES ARE KNOWN DISPLACEMENTS
%BCi=2 THE BOUNDARY IS AN INTERFACE, U AND T ARE UNKNOWN

st=300;
vc=-1;
n=3;
I=find(node(:,2)>-2.4 & node(:,2)<-1.6 & node(:,3)==0 & node(:,4)==0);
BCVALUE=SPFC(I,st,vc,n);

%BOUNDARY CONDITION VALUES BCVALUE
%BCVALUE=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

BCNODE=[];

```

Listing B.3: Definición de c.c.d. y c.c.f. para el ejemplo de matrices exportadas.

```

%BOUNDARY CONDITIONS (DEFAULT CONDITION: FREE SURFACE, NODAL TRACTION VALUES ARE KNOWN)
%BCNODE=[#NODE, BCx, BCy, BCz; ... ; FOR ALL BOUNDARIES CONDITIONS DIFFERENT FROM FREE SURFACE];
%BCi=0 VALUES ARE KNOWN DISPLACEMENTS
%BCi=2 THE BOUNDARY IS AN INTERFACE, U AND T ARE UNKNOWN

BCNODE=[];
BCNODE= zeros(9,4);
BCNODE(:,1)=1:9;
BCNODE(:,2:4)=2;

%BOUNDARY CONDITION VALUES BCVALUE
%BCVALUE=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

BCNODE=[];

```

Listing B.4: Definición de c.c.d. y c.c.f. para el ejemplo de matrices exportadas.

Por último se define la matriz INCWF. La herramienta SSIFIB0 permite la resolución de problemas sísmicos modelizando el campo de ondas incidentes. La matriz INCWF contiene la información de dicho campo de onda. Dado que en este proyecto no se ha resuelto ningún problema de tipo sísmico esta matriz se define como una matriz vacía.

A continuación se guardan los resultados en un archivo *.mat. Los códigos completos quedarían de la siguiente forma.

```

%-----
%
%      BE MESH DEFINITION
%
%-----

load SOILELEM.txt;

```

```

load SOILNODE.txt;

% BE ELEMENT NODES
% BENODE=[#NODE, X, Y, Z; ...; FOR ALL NODES]

BENODE=SOILNODE;
BEELEM=SOILELEM;

% BOUNDARY DEFINITION
% BOUNDEF=[1ST ELEMENT, LAST ELEMENT, 1ST NODE, LAST NODE; ...; FOR ALL BOUNDARIES]

BOUNDEF=[1 size(INTELEM,1) 1 size(INTNODE,1)];

% DOMAIN DEFINITION: NCOND=[#DOMAIN, #BOUNDARIES, BOUNDARY IDs; ...; FOR ALL DOMAIN]

NCOND=[1      1      1];

% BOUNDARY CONDITION VALUES BCVALUE
% BCVALUE=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

st=300;
vc=-1;
n=3;
I=find(node(:,2)>-2.4 & node(:,2)<-1.6 & node(:,3)==0 & node(:,4)==0);
BCVALUE=SPFC(I,st,vc,n);

% BOUNDARY CONDITIONS (DEFAULT CONDITION: FREE SURFACE, NODAL TRACTION VALUES ARE KNOWN)
% BCNODE=[#NODE, BCx, BCy, BCz; ...; FOR ALL BOUNDARIES CONDITIONS DIFFERENT FROM FREE SURFACE];
% BCi=0 VALUES ARE KNOWN DISPLACEMENTS
% BCi=2 THE BOUNDARY IS AN INTERFACE, U AND T ARE UNKNOWN

BCNODE=[];

% INCIDENT WAVE FIELD
% INCWF=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

INCWF=[];

save 'ejemplo'

```

Listing B.5: Ejemplo de matrices exportadas.

```

%-----
%
%      BE MESH DEFINITION
%
%-----

% BE ELEMENT NODES
% BENODE=[#NODE, X, Y, Z; ...; FOR ALL NODES]

BENODE=[1      -0.25  -0.25  0;
        2      0      -0.25  0;

```

```

3  0.25  -0.25  0;
4  0.25   0     0;
5  0.25  0.25   0;
6  0      0.25   0;
7  -0.25  0.25   0;
8  -0.25  0     0;
9  0      0     0];

%BE ELEMENTS DEFINITION
%BEELEM=[#ELEMENT, #NODES, N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9; ...; FOR ALL ELEMENTS]

BEELEM=[1      9      1  2  3  4  5  6  7  8  9];

%BONDARY DEFINITION
%BOUNDEF=[1ST ELEMENT, LAST ELEMENT, 1ST NODE, LAST NODE; ...; FOR ALL BOUNDARIES]

BOUNDEF=[1      1      1  9];

%DOMAIN DEFINITION: NCOND=[#DOMAIN, #BOUNDARIES, BOUNDARY IDs; ...; FOR ALL DOMAIN]
NCOND=[1      1      1];

%BOUNDARY CONDITIONS (DEFAULT CONDITION: FREE SURFACE, NODAL TRACTION VALUES ARE KNOWN)
%BCNODE=[#NODE, BCx, BCy, BCz; ...; FOR ALL BOUNDARIES CONDITIONS DIFFERENT FROM FREE SURFACE];
%BCi=0 VALUES ARE KNOWN DISPLACEMENTS
%BCi=2 THE BOUNDARY IS AN INTERFACE, U AND T ARE UNKNOWN

BCNODE=[];
BCNODE= zeros(9,4);
BCNODE(:,1)=1:9;
BCNODE(:,2:4)=2;

%BOUNDARY CONDITION VALUES BCVALUE
%BCVALUE=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

BCNODE=[];

%INCIDENT WAVE FIELD
%INCWF=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

INCWF=[];

save 'ejemplo'
```

Listing B.6: Definición del mallado MEC para el ejemplo de matrices definidas en el código.

B.2 LLAMADA A LA HERRAMIENTA ssifibo

Una vez definida completamente la geometría y las condiciones de contorno se procede a llamar a la herramienta SSIFIB0. Para ello se prepara un archivo tipo *.m (runejemplo.m al que se le tienen que dar una serie de entradas para que el SSIFIB0 puede resolver el problema. Las entradas son:

- *JOB* - Archivo *.mat donde están guardados los resultados anteriores.
- *cp* - Velocidad de propagación de las ondas P.
- *cs* - Velocidad de propagación de las ondas S.
- *Ro* - Densidad del suelo.
- *NSTEP* - Número de pasos de tiempo.
- *AT* - Incremento del paso de tiempo.

SSIFIB0 devuelve el vector TIM que recoge cada uno de los pasos de tiempo estudiados, y las matrices T, U, que recogen los valores de la tensión y desplazamiento de cada uno de los nodos en cada uno de los pasos de tiempo respectivamente. Un ejemplo del código, que es igual para los dos casos explicados en la sección anterior, es el siguiente.

```
%JOB TITLE
JOB='sinzanja7';

%SOIL PROPERTIES
CP=[500];      %P-wave propagation velocity [m/s]
CS=[250];      %S-wave propagation velocity [m/s]
RO=[1800];     %Density [kg/m^3]
DAMP=[0];      %Damping

%TIME STEP OPTIONS
NSTEP=300;     %Number of time steps
AT=2e-03;     %Time interval [s]

%CALL SSIFIB0
ssifibo(JOB, 'BEM', CP, CS, RO, DAMP, NSTEP, AT, 'SIM', 1, 'ICODSIM', 1)
```

Listing B.7: Definición del mallado MEC para el ejemplo de matrices definidas en el código.

Por último, se ejecuta la función *ssifibo* a la que se le da como entrada los coeficientes α y β , el número de pasos de tiempo, el valor de los pasos de tiempo y el archivo ejemplo.mat y

devuelve el vector TIM que recoge cada uno de los pasos de tiempo estudiados, y las matrices FEACC, FEVEL y FEDISP, que recogen los valores de la aceleración, velocidad y desplazamiento de cada uno de los nodos, respectivamente.

RESOLUCIÓN DE UN PROBLEMA MEC CON PUNTOS INTERIORES DEL DOMINIO UTILIZANDO LA HERRAMIENTA SSIFIBO

C.1 PREPARACIÓN DE LOS DATOS

El objetivo de este apéndice es mostrar el procedimiento que se debe seguir si resulta de interés para el análisis el comportamiento de los puntos interiores del dominio. La preparación de los datos en principio es análoga a la que se mostró en el apéndice B. La única diferencia es que en este caso es necesario introducir una nueva matriz que se llamará `DOMPOINT`; en la que se enumeran los puntos interiores del dominio que se quieren incluir en el estudio y se les añade en cada una de las siguientes columnas las coordenadas.

Se ha utilizado como ejemplo el caso en el que la geometría ha sido definida en otro programa, exportándose los nodos en archivos `*.txt`. En este caso aparecen los archivos `DOMSONODE.txt` y `DOMINZANODE.txt` en los que vienen definidos los nodos y las coordenadas de los puntos internos bajo la parte del suelo sin zanja y bajo la parte con zanja respectivamente.

La parte nueva del código quedaría de la siguiente forma:

```
%INTERNAL DOMAIN POINT
%DOMPOINT=[#POINT, X, Y, Z; ...; FOR ALL INTERNAL POINTS]

load DOMINZANODE.txt;
load DOMSONODE.txt;

lenth=size(DOMINZANODE(:,1));
lenth2=size(DOMSONODE(:,1));

DOMPOINT=[];
DOMPOINT(:,1)=[1:1:lenth(1,1),lenth(1,1)+1:1:lenth(1,1)+lenth2(1,1)];
DOMPOINT(:,2)=[DOMINZANODE(:,2);DOMSONODE(:,2)];
DOMPOINT(:,3)=[DOMINZANODE(:,3);DOMSONODE(:,3)];
DOMPOINT(:,4)=[DOMINZANODE(:,4);DOMSONODE(:,4)];
\label{list1}
```

Listing C.1: Definición de los puntos internos bajo del dominio que se desean estudiar.

La llamada a la función SSIFIB0 queda igual que en el apéndice B.

RESOLUCIÓN DE UN PROBLEMA MEC-MEF UTILIZANDO LA HERRAMIENTA SSIFIBO

La intención de este apéndice es la de mostrar y explicar los pasos necesarios para la ejecución de un problema MEC-MEF. Es interesante remarcar la utilidad de este tipo de problemas, dado que con ellos se resuelven los problemas SSI, usando la formulación del MEC para modelar el comportamiento del terreno y la formulación del MEF para representar el comportamiento de las estructuras. En realidad no consiste más que en aunar lo mostrado en los apéndices A, B y C.

D.1 PREPARACIÓN DE LOS DATOS

En primer lugar se realiza un modelo de la estructura con la que interacciona el suelo. Este modelo se usa para extraer las matrices de masa y de rigidez M y K de la estructura en el programa ANSYS. En el apéndice A se muestra el modo de extraer ambas matrices en un formato que se pueda usar como entrada de SSIFIBO.

A continuación se definen la malla y las condiciones de contorno del suelo de la misma forma que se explicó en el apéndice B. Hay sin embargo una diferencia en este punto. A la hora de definir las condiciones de contorno, la matriz BCNODE, que en el caso anterior estaba vacía, debe rellenarse con los puntos en los que se produce una interacción entre nodos del MEC y los del MEF. Esto permite el acoplamiento de ambos problemas como ya se explicó en el segundo capítulo de este proyecto. La forma de rellenar esta matriz es indicando en la primera columna el número con el que se ha denominado el nodo común para ambos problemas y en la segunda un 2 para indicar que se conocen tanto los desplazamientos de ese nodo del MEF como las tensiones. El hecho de que sean conocidos es debido a que por condición de compatibilidad coinciden con los del MEC.

Se puede también calcular puntos interiores del dominio. Para ello basta incluir la definición de los puntos internos que se quieren estudiar. La forma de hacerlo está detallada en el apéndice C.

Un posible código de lo que se ha explicado hasta ahora sería:

```
%-----
%
%      BE MESH DEFINITION
%
%-----

load SOILELEM.txt;
load SOILNODE.txt;

% BE ELEMENT NODES
% BENODE=[#NODE, X, Y, Z; ...; FOR ALL NODES]

BENODE=SOILNODE;
BEELEM=SOILELEM;

% BONDARY DEFINITION
% BOUNDEF=[1ST ELEMENT, LAST ELEMENT, 1ST NODE, LAST NODE; ...; FOR ALL BOUNDARIES]

BOUNDEF=[1 size(INTELEM,1) 1 size(INTNODE,1)];

% DOMAIN DEFINITION: NCOND=[#DOMAIN, #BOUNDARIES, BOUNDARY IDs; ...; FOR ALL DOMAIN]

NCOND=[1      1      1];

% BOUNDARY CONDITION VALUES BCVALUE
% BCVALUE=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

st=300;
vc=-1;
n=3;
I=find(node(:,2)>-2.4 & node(:,2)<-1.6 & node(:,3)==0 & node(:,4)==0);
BCVALUE=SPFC(I,st,vc,n);

% BOUNDARY CONDITIONS (DEFAULT CONDITION: FREE SURFACE, NODAL TRACTION VALUES ARE KNOWN)
% BCNODE=[#NODE, BCx, BCy, BCz; ...; FOR ALL BOUNDARIES CONDITIONS DIFFERENT FROM FREE SURFACE];
% BCi=0 VALUES ARE KNOWN DISPLACEMENTS
% BCi=2 THE BOUNDARY IS AN INTERFACE, U AND T ARE UNKNOWN

BCNODE=zeros(945,4);
BCNODE(:,1)=1:945;
BCNODE(:,2)=2;
BCNODE(:,3)=2;
BCNODE(:,4)=2;

% INCIDENT WAVE FIELD
```

```

%INCWF=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

INCWF=[];

%INTERNAL DOMAIN POINT
%DOMPOINT=[#POINT, X, Y, Z; ...; FOR ALL INTERNAL POINTS]

load DOMINZANODE.txt;
load DOMSONODE.txt;

lenth=size(DOMINZANODE(:,1));
lenth2=size(DOMSONODE(:,1));

DOMPOINT=[];
DOMPOINT(:,1)=[1:1:lenth(1,1),lenth(1,1)+1:1:lenth(1,1)+lenth2(1,1)];
DOMPOINT(:,2)=[DOMINZANODE(:,2);DOMSONODE(:,2)];
DOMPOINT(:,3)=[DOMINZANODE(:,3);DOMSONODE(:,3)];
DOMPOINT(:,4)=[DOMINZANODE(:,4);DOMSONODE(:,4)];

```

Listing D.1: Ejemplo de definición de la malla de la geometría del suelo mediante MEC, puntos internos y condiciones de contorno.

Se introducen a continuación los datos de la estructura (los datos del MEF). El código para hacerlo es exactamente igual que el que se utilizó en el apéndice A, solo que en este caso, como en este ejemplo no se le aplica ninguna fuerza a la estructura, sino que esta viene excitada por las ondas del suelo, la matriz FCNODE estará vacía. El código completo queda como sigue.

```

%-----
%
%      BE MESH DEFINITION
%
%-----

load SOILELEM.txt;
load SOILNODE.txt;

%BE ELEMENT NODES
%BENODE=[#NODE, X, Y, Z; ...; FOR ALL NODES]

BENODE=SOILNODE;
BEELEM=SOILELEM;

%BONDARY DEFINITION
%BOUNDEF=[1ST ELEMENT, LAST ELEMENT, 1ST NODE, LAST NODE; ...; FOR ALL BOUNDARIES]

BOUNDEF=[1 size(INTELEM,1) 1 size(INTNODE,1)];

%DOMAIN DEFINITION: NCOND=[#DOMAIN, #BOUNDARIES, BOUNDARY IDs; ...; FOR ALL DOMAIN]

NCOND=[1      1      1];

```

```

%BOUNDARY CONDITION VALUES BCVALUE
%BCVALUE=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

st=300;
vc=-1;
n=3;
I=find(node(:,2)>-2.4 & node(:,2)<-1.6 & node(:,3)==0 & node(:,4)==0);
BCVALUE=SPFC(I,st,vc,n);

%BOUNDARY CONDITIONS (DEFAULT CONDITION: FREE SURFACE, NODAL TRACTION VALUES ARE KNOWN)
%BCNODE=[#NODE, BCx, BCy, BCz; ...; FOR ALL BOUNDARIES CONDITIONS DIFFERENT FROM FREE SURFACE];
%BCi=0 VALUES ARE KNOWN DISPLACEMENTS
%BCi=2 THE BOUNDARY IS AN INTERFACE, U AND T ARE UNKNOWN

BCNODE=zeros(945,4);
BCNODE(:,1)=1:945;
BCNODE(:,2)=2;
BCNODE(:,3)=2;
BCNODE(:,4)=2;

%INCIDENT WAVE FIELD
%INCWF=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

INCWF=[];

%INTERNAL DOMAIN POINT
%DOMPOINT=[#POINT, X, Y, Z; ...; FOR ALL INTERNAL POINTS]

load DOMINZANODE.txt;
load DOMSONODE.txt;

lenth=size(DOMINZANODE(:,1));
lenth2=size(DOMSONODE(:,1));

DOMPOINT=[];
DOMPOINT(:,1)=[1:lenth(1,1),lenth(1,1)+1:lenth(1,1)+lenth2(1,1)];
DOMPOINT(:,2)=[DOMINZANODE(:,2);DOMSONODE(:,2)];
DOMPOINT(:,3)=[DOMINZANODE(:,3);DOMSONODE(:,3)];
DOMPOINT(:,4)=[DOMINZANODE(:,4);DOMSONODE(:,4)];

%READ UPPER TRIANGULAR PART SAVED IN SPARSE FORMAT
[K,FENODE,FEELEM] = ans2mat ('STIFF.txt','FENODE.lis','FEELEM.lis');
[M] = ans2mat ('MASS.txt','FENODE.lis','FEELEM.lis');
C = spalloc(size(K,1),size(K,2),nnz(K));

%FE BOUNDARY CONDITIONS
%FCNODE=[#NODE, UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ; ...; FOR ALL BOUNDARIES CONDITIONS DIFFERENT FROM FREE SURFACE];
%Ui,ROTi=1 VALUES ARE KNOWN DISPLACEMENTS
FCNODE=[];

%FE BOUNDARY CONDITION VALUES FCVALUE
%FCVALUE=[#DOF, TIME STEP, VALUE; ... ; FOR ALL DOF AND TIME STEPS]

```

```
FCVALUE=[];

%%SAVE AS JOB NAME
save('ejemplo.mat')
```

Listing D.2: Ejemplo de definición de la malla de la geometría del suelo mediante MEC, puntos internos y condiciones de contorno.

D.2 LLAMADA A LA HERRAMIENTA ssifibo

Por último se explica cómo realizar la llamada a la herramienta. Los datos que que SSIFIB0 necesita, aparte de los que ya le damos al cargar el archivo `ejemplo.mat` son los mismos que para los problemas anteriores, debiendo únicamente modificar la entrada en la que se le dice a SSIFIB0 que el problema es un MEC o un MEF por uno MEC-MEF.

Un ejemplo de código de llamada del programa sería:

```
%JOB TITLE
JOB='ejemplo';

%SOIL PROPERTIES
CP=[500];      %P-wave propagation velocity [m/s]
CS=[250];      %S-wave propagation velocity [m/s]
RO=[1800];     %Density [kg/m^3]
DAMP=[0];      %Damping

%TIME STEP OPTIONS
NSTEP=300;     %Number of time steps
AT=2e-03;      %Time interval [s]

%STRUCTURAL DAMPING (C=alpha*M+beta*K)
ALPHA=0;       % [s^-1]
BETA=0;        % [s]

%CALL SSIFIB0
ssifibo(JOB, 'BEMFEM', CP, CS, RO, DAMP, NSTEP, AT, ALPHA, BETA, 'SIM', 1, 'ICODSIM', 1)
```

Listing D.3: Ejemplo de llamada a la función SSIFIB0

Los datos que se devuelven son FEACC, FEVEL, FEDISP; que corresponden a la aceleración, la velocidad y el desplazamiento respectivamente de cada uno de los nodos del MEF; T, U; correspondiente a las tensiones y a los desplazamientos en cada nodo del MEC; y TIM; vector en el que se recojen los instantes de tiempo. El formato en el que vienen las matrices de

tensiones, aceleraciones, velocidad y desplazamiento en MEC-MEF es el mismo que en MEC y MEF por separado. Es decir, vienen dados en forma de matriz, donde la primera columna contiene los distintos instantes de tiempo, y en las siguientes columnas vienen para cada instante de tiempo el valor en los ejes de coordenadas x , y y z por este mismo orden.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Adam and O. Von Estorff. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches. *Computers and Structures*, 83(1):11–24, 2005.
- [2] S. Ahmad and T.M. Al-Hussaini. Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches. *Journal of geotechnical engineering*, 117(1):67–88, 1991.
- [3] L. Auersch. The effect of critically moving loads on the vibrations of soft soils and isolated railway tracks. *Journal of Sound and Vibration*, 310(3):587–607, 2008.
- [4] L. Auersch. Wave propagation in the elastic half-space due to an interior load and its application to ground vibration problems and buildings on pile foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10):925–936, 2010.
- [5] L. Auersch, A. Romero, and P. Galvín. Building dynamic response due to incident wave field considering soil-structure interaction [respuesta dinámica de edificaciones producida por campos de ondas incidentes considerando la interacción suelo-estructura]. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, 2014.
- [6] J.J. Aznárez, O. Maeso, and J. Domínguez. BE analysis of bottom sediments in dynamic fluid-structure interaction problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 30(2):124–136, 2006.
- [7] D.E. Beskos, B. Dasgupta, and I.G. Vardoulakis. Vibration isolation using open or filled trenches - part 1 : 2-d homogeneous soil. *Computational Mechanics*, 1(1):43–63, 1986.
- [8] J. Domínguez. Response of embedded rectangular foundations to travelling waves. Technical report, Departament of Civil Engineering, R78–24, Cambridge, Massachusetts, USA, 1978.
- [9] J. Domínguez. *Boundary elements in dynamics*. Computational Mechanics Publications and Elsevier Applied Science, Southampton, 1993.

- [10] Kayumars Emad and George D. Manolis. Shallow trenches and propagation of surface waves. *Journal of Engineering Mechanics*, 111(2):279–282, 1985.
- [11] A.C. Eringen and E.S. Suhubi. *Elastodynamics, Volume 2, Linear theory*. Academic Press, New York, USA, 1975.
- [12] K.-L. Fok and A.K. Chopra. Frequency response functions for arch dams: hydrodynamic and foundation flexibility effects. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 14(5):769–795, 1986.
- [13] S. François, L. Pyl, H.R. Masoumi, and G. Degrande. The influence of dynamic soil–structure interaction on traffic induced vibrations in buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(27):655–674, 2007.
- [14] S. François, M. Schevenels, B. Thyssen, J. Borgions, and G. Degrande. Design and efficiency of a composite vibration isolating screen in soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 39:113–127, 2012.
- [15] P. Galvín and J. Domínguez. Analysis of ground motion due to moving surface loads induced by high-speed trains. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 31(11):931–941, 2007.
- [16] P. Galvín and A. Romero. A matlab toolbox for soil-structure interaction analysis with finite and boundary elements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 57:10–14, 2014.
- [17] B. Hemsworth. Reducing groundborne vibrations: state-of-the-art study. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3):703–709, 2000.
- [18] W. Hubert, K. Friedrich, G. Pflanz, and G. Schmid. Frequency- and time-domain bem analysis of rigid track on a half-space with vibration barriers. *Meccanica*, 36(4):421–436, 2001.
- [19] ISO 2631-2:1989: *Mechanical vibration and shock—Evaluation of human exposure to whole-body vibration—Part 2: Vibration in buildings (1–80 Hz)*. International Organization for Standardization, 2003.
- [20] F. Jin, O.A. Pekau, and C.H. Zhang. A 2-d time-domain boundary element method with damping. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 51(6):647–661, 2001.

- [21] D.L. Karabalis and D.E. Beskos. Dynamic response of 3-D rigid surface foundations by time domain boundary element method. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 12(1):73–93, 1984.
- [22] A.M. Kaynia and E. Kausel. Dynamics of piles and pile groups in layered soil media. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 10(8):386–401, 1991.
- [23] R. Klein, H. Antes, and D. Le Houédec. Efficient 3d modelling of vibration isolation by open trenches. *Computers and Structures*, 64(1-4):809–817, 1997.
- [24] V.V. Krylov. Generation of ground vibrations by superfast trains. *Applied Acoustics*, 44: 149–164, 1995.
- [25] Le Houedec D. Laghrouche O. Soil-railway interaction for active isolation of traffic vibrations. *Advances in Simulation and Interaction Techniques*.
- [26] K.L. Leung, I.G. Vardoulakis, D.E. Beskos, and J.L. Tassoulas. Vibration isolation by trenches in continuously nonhomogeneous soil by the bem. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 10(3):172–179, 1991.
- [27] G. Lombaert and G. Degrande. Ground-borne vibration due to static and dynamic axle loads of intercity and high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration*, 319(3-5):1036–1066, 2009.
- [28] G. Lombaert, G. Degrande, J. Kogut, and S. François. The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 297(3-5):512–535, 2006.
- [29] M. Marrero and J. Domínguez. Numerical behavior of time domain BEM for three-dimensional transient elastodynamic problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 27(1):39–48, 2003.
- [30] F. Medina, J. Domínguez, and J.L. Tassoulas. Response of dams to earthquakes including effects of sediments. *Journal of structural engineering New York, N.Y.*, 116(11):3108–3121, 1990.
- [31] J.T. Nelson. Recent developments in ground-borne noise and vibration control. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1):367–376, 1996.

- [32] N.M. Newmark. A method of computation for structural dynamics. *ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division*, 85(1):67–94, 1959.
- [33] L.A. Padrón, J.J. Aznárez, and O. Maeso. Dynamic structure-soil-structure interaction between nearby piled buildings under seismic excitation by BEM-FEM model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(6):1084–1096, 2009.
- [34] C.L. Pekeris. The seismic surface pulse. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 41:469–480, 1955.
- [35] A. Romero, P. Galvín, and J. Domínguez. 3d non-linear time domain fem-bem approach to soil-structure interaction problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 37(3):501–512, 2013.
- [36] X. Sheng, C.J.C. Jones, and D.J. Thompson. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods. *Journal of Sound and Vibration*, 293(3-5):575–586, 2006.
- [37] X. Sheng, D.J. Thompson, C.J.C. Jones, G. Xie, S.D. Iwnicki, P. Allen, and S.S. Hsu. Simulations of roughness initiation and growth on railway rails. *Journal of Sound and Vibration*, 293(3-5):819–829, 2006.
- [38] R.K. Shrivastava and N.S.V. Kameswara Rao. Response of soil media due to impulse loads and isolation using trenches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(8):695–702, 2002.
- [39] D. Soares Jr. and W.J. Mansur. Compression of time-generated matrices in two-dimensional time-domain elastodynamic BEM analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 61(8):1209–1218, 2004.
- [40] G.P. Wilson, H.J. Saurenman, and J.T. Nelson. Control of ground-borne noise and vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 87(2):339–350, 1983.
- [41] W.M. Zhai, K.Y. Wang, and J.H. Lin. Modelling and experiment of railway ballast vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 270(4-5):673–683, 2004.
- [42] O.C. Zienkiewicz. *The finite element method*. McGraw-Hill, third edition, 1986.