



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles

INGENIERÍA INDUSTRIAL

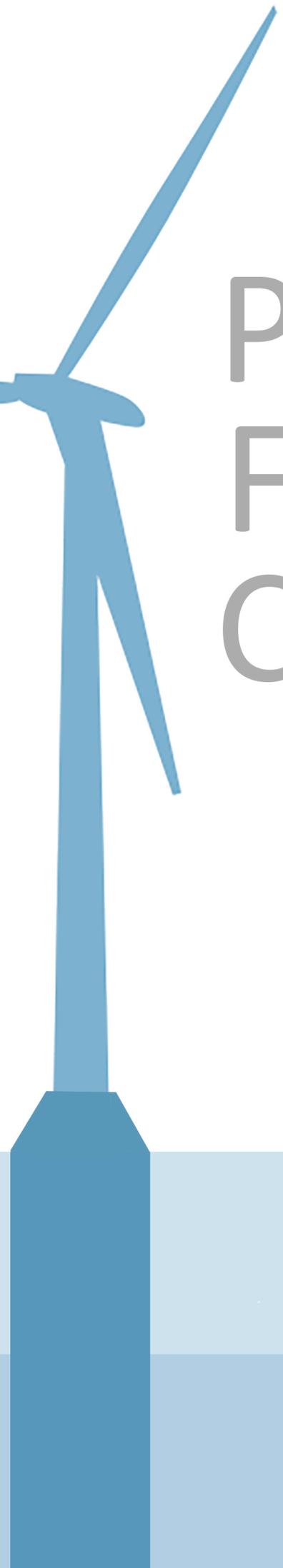
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA
ESTRATIGRAFÍA DEL TERRENO SOBRE LOS
MOMENTOS DE ORIGEN SÍSMICO EN
MONOPILOTES PARA AEROGENERADORES

AUTOR: JAVIER HERRERA GABÁS

TUTORES: DR. JUAN JOSÉ AZNÁREZ GONZÁLEZ
DR. LUIS ALBERTO PADRÓN HERNÁNDEZ

LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, JUNIO DE 2016

P
F
C



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA ESTRATIGRAFÍA DEL
TERRENO SOBRE LOS MOMENTOS DE ORIGEN SÍSMICO
EN MONOPILOTES PARA AEROGENERADORES

JAVIER HERRERA GABÁS

JUNIO 2016

A mi familia por su apoyo, por dárme todo y por levantarme y redirigirme las veces que tropecé y me desvié en este largo camino, que ya acaba, pero que es principio de otro en el que espero estén siempre conmigo.

A mis tutores, el Dr. Juan José Aznárez González y el Dr. Luis Alberto Padrón Hernández, por darme la oportunidad de trabajar a su lado, enseñarme tanto y mostrarme otra cara de la ingeniería, que viven ellos con tanta pasión. Y gracias por dejarme gastar, sin penalización, más 'tokens' de los que permite el reglamento para desarrollar el motor que impulsa este proyecto.

"I've seen things you people wouldn't believe. Attack ships on fire off the shoulder of Orion. I watched C-beams glitter in the dark near the Tannhäuser Gate. All those moments will be lost in time, like tears in rain. Time to die."

Nexus-6 replicant Roy Batty. Blade Runner (1982)

Capítulo 1	Introducción	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Estructura del documento.....	3
Capítulo 2	Metodología	5
2.1	Modelo tipo Winkler	8
2.1.1	Introducción	8
2.1.2	Solución de la ecuación analítica de una viga Euler-Bernoulli sometida a ondas SH de incidencia vertical y con un modelo Winkler para un suelo estratificado	8
2.1.3	Obtención de las impedancias.....	19
2.2	Campo incidente. Ondas SH	22
2.3	Obtención de los terremotos sintéticos.....	24
2.4	Implementación de la metodología	27
2.4.1	Introducción de datos	28
2.4.2	Cálculo de las FRFs y obtención de la envolvente.....	29
Capítulo 3	Resultados	33
3.1	Descripción del problema y casos de estudio	33
3.1.1	Pilotes	34
3.1.2	Suelos	35
3.1.3	Perfiles estratigráficos.....	36
3.2	Obtención de los acelerogramas que definen la excitación sísmica.....	41

3.3	Resultados	47
3.3.1	Envolventes de momentos	47
3.3.2	Estudio de la influencia del diámetro sobre la distribución de momentos.....	54
3.3.3	Estudio de la influencia de las condiciones de contorno en la punta del pilote ...	59
3.3.4	Evolución del momento máximo en la cabeza del pilote.....	63
3.3.6	Evolución del ratio entre el momento máximo bajo el primer estrato y el momento máximo en la cabeza	71
3.3.7	Evolución del ratio entre el momento máximo bajo el primer estrato y la media de momentos bajo el primer estrato	73
3.3.8	Propuesta de ajuste por mínimos cuadrados para la evolución de los momentos flectores máximos en la cabeza	76
3.3.9	Propuesta de ajuste por mínimos cuadrados para la evolución de los momentos flectores máximos bajo el primer estrato	78
Capítulo 4 Conclusiones		81
4.1	Revisión	81
4.2	Conclusiones.....	82
4.3	Comentarios finales.....	85
Referencias		89
Anexo de Resultados		93
A.1	Envolvente de momentos	93
A.2	Estudio de la influencia del diámetro sobre la distribución de momentos	125
A.3	Estudio de la influencia de las condiciones de contorno en la punta del pilote	137

1.1 Antecedentes

La capacidad instalada de generación de energía eléctrica a partir de energía eólica marina (offshore wind power) está creciendo de manera exponencial en los últimos años. Tanto es así, que la capacidad de producción conectada a red en Europa creció en 2015 nada menos que un 108% respecto a 2014. Es decir, sólo en 2015, la capacidad instalada se multiplicó por un factor superior a 2 respecto a lo existente el año anterior. En concreto, se añadieron 3019 MW de potencia mediante la instalación de 754 nuevos aerogeneradores marinos en 15 granjas diferentes conectadas a la red eléctrica Europea. En este sentido, resulta realmente impactante que, de los 3230 aerogeneradores marinos instalados en Europa a 31 de diciembre de 2015, sólo uno está instalado en España (un 0.03% del total). Además, en este instante, existen 6 proyectos en marcha de parques eólicos en Alemania, Holanda y Reino Unido, que contribuirán cerca de 2000 MW más a un crecimiento que se espera que continúe en los próximos años (EWEA [1]).

La práctica totalidad de los aerogeneradores marinos instalados en Europa están situados en lugares donde la profundidad permite cimentarlos directamente al lecho marino (frente a la alternativa de los aerogeneradores flotantes, de implantación aún anecdótica en el mundo). De hecho, la profundidad media del agua en los parques eólicos ejecutados o en ejecución durante el año 2015 fue de 27.1 m, con una distancia media a la costa de 43.3 km, aunque existen parques en funcionamiento en profundidades de hasta 50 m y distancias de 120 km de la costa más cercana. Así, en Europa, y a 31 de diciembre de 2015, el 80% de los aerogeneradores están instalados sobre monopilotes, el 9.1% sobre cimentaciones superficiales y el resto sobre estructuras de varios soportes, como grupos de tres cajones de succión (3.6%) o tres pilotes (1.7%) (EWEA [1]).

Con la expansión arriba comentada del número de parque eólicos marinos surge la necesidad de cimentar los aerogeneradores a mayores profundidades y/o en suelos de peores características portantes. Dadas las especiales características de las cargas derivadas a la cimentación por parte de los aerogeneradores marinos (grandes momentos a la altura del lecho marino con cargas horizontales significativas pero muy baja carga vertical), el uso de cimentaciones superficiales sólo es factible en ciertos casos (profundidades limitadas y/o lecho rocoso de muy buena capacidad portante). De resto, y tal y como se destacaba en el párrafo anterior, se hace necesario el uso de cimentaciones profundas, principalmente pilotes.

A este respecto, es importante tener en cuenta que el coste asociado a la cimentación representa, en general, una proporción muy importante de la inversión total requerida para

la puesta en marcha de parques eólicos marinos. En concreto, el diseño, construcción e instalación de, por ejemplo, un monopilote para cimentar un aerogenerador marino representa generalmente en torno al 15-20% del coste inicial total, pudiendo incluso alcanzar el 25-30% en algunos proyectos (Byrne y Houlsby [2], Musial y Ram [3]), teniendo además en cuenta que se estima que el coste de la cimentación crece de manera aproximadamente lineal con la profundidad (Musial y Ram [3]). Resulta por tanto evidente que la reducción del coste de ejecución de estas cimentaciones mediante la mejora de las soluciones propuestas durante las primeras fases del proyecto representaría un ingrediente importante a la hora de favorecer la implantación de nuevos parques eólicos marinos y mejorar la rentabilidad de esta tecnología al reducir su coste inicial y, al mismo tiempo, aumentar su vida útil.

Por otro lado, el análisis de la respuesta dinámica en general y sísmica en particular de cimentaciones para aerogeneradores, tanto terrestres como marinos, es un tema de interés para la industria y para las comunidades científica y técnica vinculadas a la temática. Así lo evidencian la gran cantidad de trabajos y artículos que se publican sobre el particular a lo largo de los últimos años.

Este Proyecto Fin de Carrera se integra en la línea de trabajo que llevan a cabo los miembros de la División de Mecánica de Medios Continuos y Estructuras del Instituto Universitario SIANI de la ULPGC en el campo de la Dinámica de Estructuras. En este sentido, dentro de este Grupo se han desarrollado modelos numéricos que han permitido estudiar problemas muy variados en relación con este tipo de cimentaciones. Estos modelos están basados en el Método de los Elementos de Contorno (MEC) y sus habilidades para abordar problemas dinámicos que implican a medios semi-infinitos (terreno). Su principal inconveniente es un coste computacional considerable. Esto los hace poco prácticos si se pretende llevar a cabo estudios paramétricos que permitan analizar la influencia de determinado efecto o propiedad y para los cuales se requiere obtener resultados en gran cantidad de configuraciones distintas.

Recientemente, el Grupo ha comenzado a desarrollar otros modelos diferentes, como los de tipo Winkler. Estos modelos, de menor complejidad matemática, han aportado resultados muy aceptables en una variedad importante de problemas y con una importante economía de recursos informáticos.

Con el uso de este tipo de modelos Winkler, en este PFC se pretende realizar el análisis de la influencia de la estratigrafía del terreno en la distribución de esfuerzos de origen sísmico en monopilotes de gran diámetro para aerogeneradores tanto terrestres como marinos.

Existen referencias en la bibliografía (ya recogidas en muchas normas sísmicas) que informan de un aumento considerable de los esfuerzos que se concentra en las secciones del pilote cercanas a las interfases entre estratos. El valor de estos máximos depende de las dimensiones del pilote y de la estratigrafía del terreno en sentido amplio (rigideces relativas entre estratos, potencia de estratos, etc.), pero los estudios existentes se centran principalmente en geometrías y propiedades propios de proyectos de edificación o infraestructuras (como puentes), mientras que la cantidad de información disponible para configuraciones relevantes a cimentaciones para aerogeneradores es bastante limitada.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera es la realización de un estudio amplio para el análisis de la influencia de la estratigrafía del terreno sobre los esfuerzos de origen sísmico (momentos cinemáticos) en monopilotes de gran diámetro para aerogeneradores. Para ello se hace uso de un modelo Winkler previo que se ha adaptado convenientemente.

Objetivos y tareas específicas a desarrollar:

1. Adaptación y puesta a punto de un modelo tipo Winkler para el estudio sísmico en el dominio del tiempo de pilotes enterrados. El problema que se abordará corresponde al caso de un pilote, asimilable a una viga, hincado en un terreno de estratigrafía general. En este tipo de modelos, el suelo se sustituye por resortes y amortiguadores repartidos a lo largo de la viga y sometidos en su base al campo incidente (onda de corte con incidencia vertical sobre el emplazamiento). La respuesta del modelo se obtiene de forma analítica en el dominio de la frecuencia. El análisis final en el dominio del tiempo se realizará para terremotos sintéticos compatibles con el tipo de suelo haciendo uso de la FFT.
2. Diseño de los casos a considerar. Dimensiones del pilote y características de la estratigrafía. Se pretende abarcar un amplio rango de situaciones posibles que permitan obtener y generalizar conclusiones.
3. Obtención de resultados (envolvente de valores máximos de los esfuerzos a lo largo del pilote). Estudio paramétrico y obtención de conclusiones prácticas.

1.3 Estructura del documento

Se presenta a continuación un resumen de los capítulos que componen este Proyecto Fin de Carrera, en el que se establece su estructura y contenido.

En el capítulo 2 se explica toda la metodología necesaria para la obtención y el análisis de las envolventes de momentos flectores máximos de origen sísmico en pilotes de acero cilíndricos huecos enterrados en distintos tipos de terrenos, resultados principales de este trabajo. Este capítulo está dividido en cuatro secciones principales. En la primera sección se desarrolla el modelo dinámico de tipo Winkler empleado para analizar la respuesta de la estructura cilíndrica enterrada. Se consideran los pilotes asimilables a una viga Euler-Bernoulli y se describe la obtención de la solución de la ecuación analítica para una viga de este tipo sometida a ondas SH de incidencia vertical para un suelo estratificado. También se explica la obtención de las impedancias que definen el modelo tipo Winkler, tanto para el fuste del pilote, según lo expuesto por Novak et al. [4], como para la base, siguiendo lo establecido por Bielak [5]. En la segunda sección de este capítulo se define el campo de ondas SH incidente verticalmente que actúa sobre las impedancias del terreno. La tercera sección se centra en la generación de los terremotos sintéticos que sirven de excitación a los casos que se estudian, siguiendo lo establecido en el Eurocódigo 8: Parte 1 [7]. Finalmente, en la cuarta sección se

describe la implementación de toda la metodología descrita en este capítulo en el programa de cálculo utilizado para la obtención de las envolventes de momentos flectores máximos, así como la estructura general de este programa y sus particularidades.

El capítulo 3 de resultados consta de tres secciones principales. En la primera se describen el problema y los casos de estudio. Inicialmente se definen las características y propiedades mecánicas de las cuatro configuraciones de pilote cilíndrico hueco estudiadas. A continuación, se establecen las propiedades de siete tipos de suelos de distintas durezas, que se combinan para conformar los diferentes perfiles estratigráficos en los que se entierran los pilotes y cubren un amplio rango de casos de estudio. Estos perfiles estratigráficos se clasifican en cinco tipos de terreno según lo dispuesto en el EC8-1 [7]. En la segunda sección de este capítulo se expone la terna de acelerogramas de cada espectro, que sirve de excitación al problema. En la tercera y última sección del capítulo se exponen los resultados obtenidos. En primer lugar, se presentan y analizan las envolventes de momentos del caso por defecto, con giro impedido y desplazamiento horizontal libre en la cabeza del pilote, y giro y desplazamiento horizontal libres en la punta. En segundo lugar, se expone un estudio de la influencia del diámetro sobre la distribución de momentos. En tercer lugar, se presenta un estudio de la influencia de las condiciones de contorno en la punta del pilote, enfrentando los dos casos extremos estudiados, la consideración en la base del pilote de una impedancia nula y la consideración de una impedancia correspondiente a un disco superficial. En los siguientes puntos del capítulo se presentan de forma gráfica, a modo de síntesis de todos los casos estudiados, diferentes valores de las envolventes, como el momento máximo en la cabeza del pilote o el momento máximo bajo el primer estrato. Se recogen también valores de ratios entre el momento máximo bajo el primer estrato y el momento máximo en la cabeza, y entre el momento bajo el primer estrato y la media de momentos bajo el primer estrato. Por último, se realiza una propuesta de ajuste por mínimos cuadrados tanto para los momentos máximos en la cabeza como para los momentos máximos bajo el primer estrato. Con esta propuesta se busca una función para cada configuración de pilote estudiada que recoja una aproximación de todos los resultados obtenidos y así poder interpolar para otros casos no estudiados.

Finalmente, en el capítulo 4 se presenta un resumen del proyecto y las conclusiones generales que se obtienen del análisis de los resultados.

En este capítulo se describe y desarrolla toda la metodología que se necesita para obtener y analizar las envolventes de momentos flectores máximos de origen sísmico en pilotes de acero cilíndricos huecos enterrados en diferentes tipos de terrenos, que es el objeto principal de este proyecto. Se denomina envolvente al diagrama que representa, para cada sección de la estructura, los valores máximos o mínimos de un esfuerzo; en este caso sólo interesa estudiar los valores máximos de los momentos flectores de origen sísmico. No obstante, aunque el objetivo es la obtención de las envolventes de momentos flectores máximos en el dominio del tiempo, se ha optado por realizar el análisis del modelo dinámico en el dominio de la frecuencia por su menor coste computacional principalmente.

Como hipótesis de partida se consideran los pilotes constituidos por un material homogéneo e isotrópico de comportamiento elástico y lineal. También el terreno, en todas las configuraciones que se estudian, se considera como un semiespacio de propiedades mecánicas homogéneas e isotrópicas y de comportamiento elástico y lineal.

En cuanto a las condiciones de contorno, se considera que la cabeza del pilote tiene el giro impedido, pero se le permiten los desplazamientos horizontales libremente. Sin embargo, en la punta del pilote, en el caso por defecto estudiado en el proyecto, se consideran libres tanto el giro como los desplazamientos horizontales. No obstante, con el objetivo de comparar resultados con el caso por defecto del proyecto, se estudia brevemente el caso en el que la punta del pilote tiene una cierta impedancia (combinación de resorte, que representa la rigidez del suelo, y amortiguador, que representa su amortiguamiento) que provoca un cierto momento flector.

Como excitación de los pilotes enterrados se pueden utilizar acelerogramas reales o sintéticos. Se ha optado por generar los acelerogramas de forma artificial. En la sección 2.3 del presente capítulo se define el procedimiento empleado para la generación de los acelerogramas sintéticos que sirven de excitación a los casos que se estudian. Estos terremotos artificiales están definidos en superficie libre en base a la aceleración que provocan en cada instante de tiempo $\ddot{u} = f(t)$. Debido a que el análisis se realiza en el dominio de la frecuencia, es preciso pasar estos acelerogramas a dicho dominio. Para ello se hace uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés), un algoritmo que permite calcular la Transformada Discreta de Fourier de una manera eficiente.

Aunque este problema podría resolverse de múltiples maneras, por ejemplo con modelos numéricos basados en el Método de los Elementos de Contorno (MEC) en combinación con el Método de los Elementos Finitos (MEF), se ha optado por un modelo tipo Winkler, de menor complejidad matemática y coste computacional, más adecuado para un

estudio paramétrico como el de este proyecto. Como se ha comentado con anterioridad se ha optado por obtener la respuesta del modelo de forma analítica en el dominio de la frecuencia, así que las Funciones de Respuesta en Frecuencia (FRFs de ahora en adelante) objetivo son las de momentos flectores con respecto a la amplitud del campo de aceleraciones incidente en superficie libre. Tras obtener las FRFs utilizando la metodología que se presenta en este capítulo, el siguiente paso es multiplicarlas por el acelerograma que se ha pasado previamente al dominio de la frecuencia empleando la FFT y que sirve de excitación. Con esta multiplicación se obtienen los momentos flectores en el dominio de la frecuencia en función de la profundidad z . Para obtener los momentos flectores buscados en el dominio del tiempo es necesario realizar la Transformada de Fourier Inversa (IFFT por sus siglas en inglés). Utilizando solamente la parte real de estos momentos flectores en el dominio del tiempo para cada profundidad z , obtenidos con la IFFT, se seleccionan los valores máximos de entre todos los valores de momentos obtenidos en cada instante temporal y en cada profundidad, para generar así las envolventes de momentos flectores buscadas.

En la figura 2.1 se observa de forma esquemática el procedimiento general seguido para la obtención de las envolventes de momentos flectores.

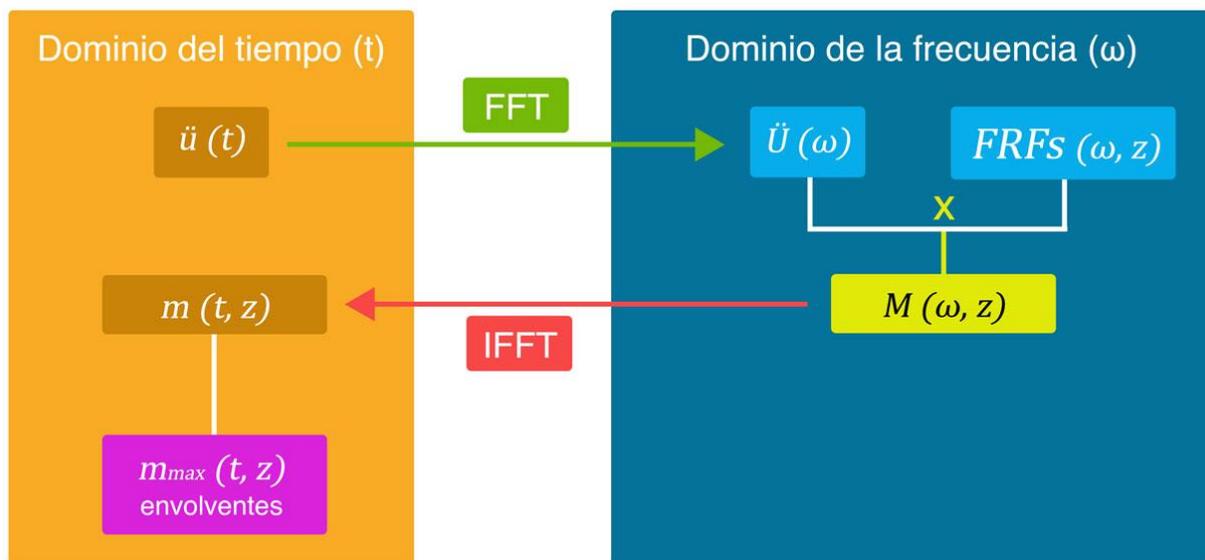


Figura 2.1: Esquema general de la metodología.

La metodología empleada en la obtención de las FRFs de los momentos flectores respecto a la amplitud del campo de aceleraciones incidente en superficie libre, se desarrolla principalmente en las secciones 2.1 y 2.2 de este capítulo. En los puntos 2.1.1 y 2.1.2, respectivamente, se introduce y se desarrolla el modelo dinámico de una viga Euler-Bernoulli en un suelo Winkler y la obtención de la solución de la ecuación analítica para un suelo estratificado, mientras en la sección 2.1.3 se explica la obtención de las impedancias tanto a lo largo del fuste del pilote, para lo que se emplean las expresiones desarrolladas por Novak et al. [4], como en la punta, que se obtienen según lo expuesto por Bielak [5], basado en los

cálculos de Verbic y Veletsos [6]. En la sección 2.2 se explica la obtención del campo de desplazamientos provocado por un campo de ondas SH que incide verticalmente en un semiespacio estratificado, que se utiliza como solución particular en el cálculo de la ecuación analítica de la viga Euler-Bernoulli que se desarrolla en la sección 2.1.2.

Como se comentó anteriormente, el punto 2.3 explica el procedimiento utilizado para la obtención de los terremotos sintéticos en superficie libre que sirven de excitación a los casos que se estudian.

Finalmente, en la sección 2.4 se describe el programa en FORTRAN con el que se han realizado todos los cálculos (creado en la División de Mecánica de Medios Continuos y Estructuras del Instituto Universitario SIANI de la UPGC, y adaptado por el autor de este proyecto) y en el que se implementa toda la metodología que se describe en el presente capítulo. Aquí se explicarán más detenidamente las particularidades que implica la aplicación de esta metodología y las consideraciones que se deben tener en cuenta para su correcto funcionamiento.

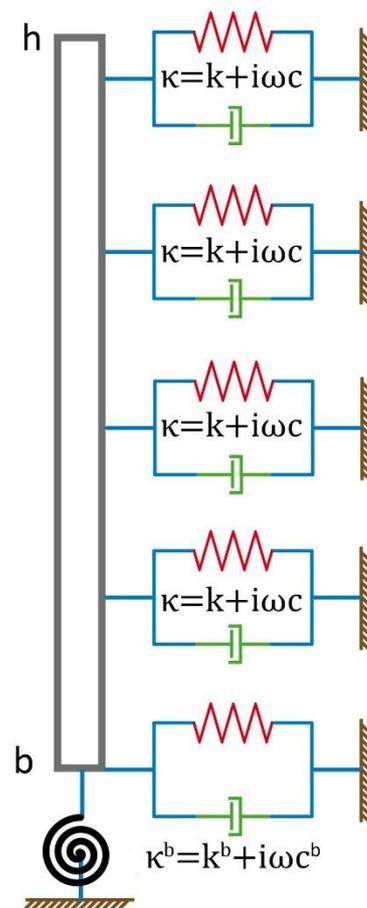


Figura 2.2: Esquema de un modelo tipo Winkler de una viga enterrada.

2.1 Modelo tipo Winkler

2.1.1 Introducción

En este apartado se explica un modelo dinámico, que se basa en el modelo tipo Winkler, para el análisis de la respuesta de una estructura cilíndrica enterrada. En este modelo, el terreno se considera una división de finas capas de diferentes propiedades de tal manera que cada una de ellas por separado está sujeta a un problema dinámico de deformación plana. Esto equivale a sustituir el suelo por una distribución continua de resortes, que representan la rigidez del suelo, y amortiguadores, que representan el amortiguamiento del suelo debido a la disipación de energía (ver figura 2.2). De esta representación surgen los denominados modelos dinámicos tipo Winkler para vigas (BDWF – Beams on Dynamics Winkler Foundation).

Seguidamente se desarrolla la solución de la ecuación analítica de una viga Euler-Bernoulli enterrada en un suelo basado en este modelo Winkler descrito.

2.1.2 Solución de la ecuación analítica de una viga Euler-Bernoulli sometida a ondas SH de incidencia vertical y con un modelo Winkler para un suelo estratificado

Se supone una estructura esbelta embebida en un semiespacio estratificado formado por n estratos de diferentes propiedades (Ver figura 2.3). Esta estructura se considera como una viga que cumple las hipótesis del modelo Euler-Bernoulli (teoría clásica de vigas). Este es un modelo estructural simplificado para describir el comportamiento a flexión de elementos con una dimensión mucho mayor que las otras (viga), de material elástico lineal, sometido a pequeñas deformaciones. De esta forma, únicamente se tienen en cuenta deformaciones por flexión y fuerzas de inercia transversales, por lo que, consecuentemente, las deformaciones por cortante y los efectos de inercia rotacional se desprecian. En este modelo también se asume que las secciones planas perpendiculares a la línea neutra, cuyos puntos sólo sufren desplazamiento transversal y giro, continúan siendo planas y perpendiculares a la línea neutra después de la deformación que resulta de la aplicación de las cargas.

La utilización del modelo Euler-Bernoulli es en contraposición al siguiente modelo en complejidad, el modelo de vigas de Timoshenko, cuyas principales diferencias con el primero son que en este sí se considera la deformación producida por el cortante y que las secciones transversales planas y perpendiculares a la línea neutra antes de la deformación, siguen permaneciendo planas pero no necesariamente perpendiculares al eje después de la deformación.

Siguiendo con el modelo Euler-Bernoulli, se puede escribir de forma genérica la ecuación estática de equilibrio transversal para una sección de la viga de longitud diferencial sometida a una carga transversal repartida como:

$$(V + dV) - V + q(z)dz = 0 \quad (2.1a)$$

$$\frac{dV}{dz} + q(z) = 0 \quad (2.1b)$$

Del equilibrio de momentos en dicha sección de longitud diferencial se obtiene que el cortante es:

$$V = -EI \frac{\partial^3 v}{\partial z^3} \quad (2.2)$$

donde v es el desplazamiento transversal, E es el módulo de elasticidad del material e I la inercia de la sección.

Sustituyendo (2.2) en (2.1b), la ecuación que define el equilibrio estático de un elemento diferencial de la viga es:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} = q(z) \quad (2.3)$$

Esta ecuación de equilibrio estático, sirve de base para introducir el cálculo de la solución analítica de una viga Euler-Bernoulli sometida a ondas SH de incidencia vertical y con un modelo Winkler para un suelo estratificado. Considerando ahora las fuerzas de inercia y las fuerzas producidas por la existencia de un campo de ondas incidente v_I que actúa sobre las impedancias κ_j del suelo, como fuerzas externas que actúan sobre la sección, puede escribirse la ecuación de equilibrio dinámico para una porción diferencial de pilote (asimilable a la viga Euler-Bernoulli descrita) en cada estrato j de la forma siguiente:

$$E_p I_p \frac{\partial^4 v^j}{\partial z^4} - \rho_p A_p \omega^2 v^j = \kappa_j (v_I^j - v^j) \quad (2.4)$$

donde E_p es el módulo de elasticidad del pilote, I_p es el momento de inercia del pilote, ρ_p es la densidad del pilote, A_p es la sección del pilote, v^j es el campo de desplazamientos en cada estrato j y se cumple que $v^j = v^j(\omega, z)$, v_I^j es el campo de ondas incidente para cada estrato j y donde $\kappa_j = k_x^j + i\omega c_x^j$. Estos valores de k_x^j y c_x^j dependen de la frecuencia ω . Además, requieren de un elaborado proceso de cálculo, por lo que se toman los desarrollados por Novak et al. [4], excepto para la base de la viga que se emplean los utilizados por Bielak en [5] que fueron calculados por Verbic y Veletsos [6]. El procedimiento seguido por ambos autores para el cálculo de estos parámetros se desarrolla en la sección 2.1.3 del presente capítulo.

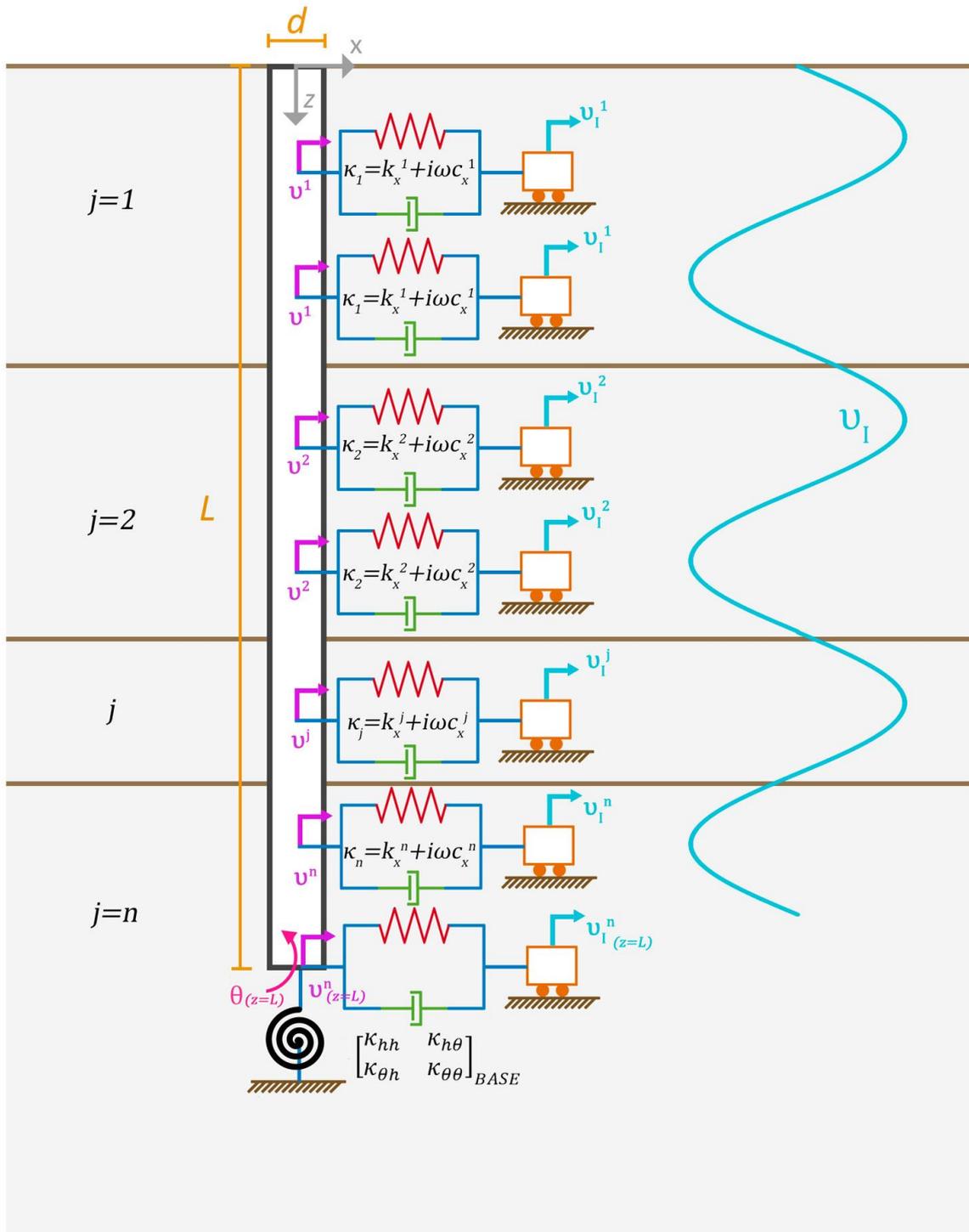


Figura 2.3: Esquema de un modelo tipo Winkler de una viga enterrada sometida a ondas SH de incidencia vertical en un semiespacio estratificado.

Reordenando (2.4) de tal forma que el término del lado derecho sea conocido, se obtiene:

$$E_p I_p \frac{\partial^4 v^j}{\partial z^4} + (\kappa_j - \rho_p A_p \omega^2) v^j = \kappa_j v_I^j \quad (2.5)$$

La solución de esta ecuación es del tipo $v^j = v_h^j + v_p^j$, donde v_h^j es la solución de la ecuación homogénea para cada estrato j , y v_p^j es cualquier solución particular que verifique la ecuación para cada estrato j .

2.1.2.1 Obtención de la solución homogénea

La solución homogénea es aquella que verifica la ecuación siguiente:

$$E_p I_p \frac{\partial^4 v^j}{\partial z^4} + (\kappa_j - \rho_p A_p \omega^2) v^j = 0 \quad (2.6)$$

que puede escribirse como:

$$\frac{\partial^4 v^j}{\partial z^4} + (\lambda^j)^4 v^j = 0 \quad (2.7)$$

donde:

$$(\lambda^j)^4 = \frac{\kappa_j - \rho_p A_p \omega^2}{E_p I_p} \quad (2.8)$$

ecuación que presenta una solución del tipo $v^j = e^{\alpha^j z}$, de tal forma que, sustituyendo esta solución y resolviendo la ecuación, se puede escribir la siguiente ecuación característica para cada estrato j :

$$(\alpha^j)^4 + (\lambda^j)^4 = 0 \quad (2.9)$$

de donde:

$$(\alpha^j)^4 = -\frac{\kappa_j - \rho_p A_p \omega^2}{E_p I_p} \quad (2.10)$$

$$\alpha^j = -\lambda^j = \left[-\frac{\kappa_j - \rho_p A_p \omega^2}{E_p I_p} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.11)$$

sabiendo que:

$$\kappa_j = k_x^j + i\omega c_x^j \quad (2.12)$$

queda entonces:

$$\alpha^j = -\lambda^j = \left[-\frac{(k_x^j + i\omega c_x^j) - \rho_p A_p \omega^2}{E_p I_p} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.13)$$

y reordenando:

$$\alpha^j = -\lambda^j = \left[\frac{(-k_x^j + \rho_p A_p \omega^2) - i\omega c_x^j}{E_p I_p} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.14)$$

y separando en parte real (A^j) y parte imaginaria (B^j):

$$\alpha^j = -\lambda^j = \left[\frac{(-k_x^j + \rho_p A_p \omega^2)}{E_p I_p} - i \frac{\omega c_x^j}{E_p I_p} \right]^{\frac{1}{4}} = (A^j + iB^j)^{\frac{1}{4}} \quad (2.15)$$

Escribiendo la solución compleja en la forma módulo-argumento:

$$(A^j + iB^j)^{\frac{1}{4}} = (mod^j \cdot e^{i\psi^j})^{\frac{1}{4}} = S^j \cdot e^{i\chi^j} \quad (2.16)$$

donde $mod^j = \sqrt{A^{j2} + B^{j2}}$ es el módulo y $\psi^j = \arctg \frac{B^j}{A^j}$ el argumento de la solución compleja. Por lo tanto:

$$mod^j \cdot e^{i\psi^j} = (S^j \cdot e^{i\chi^j})^4 = S^{j4} \cdot e^{i4\chi^j} \quad (2.17)$$

así:

$$mod^j = S^{j4} \rightarrow S^j = \sqrt[4]{mod^j} \quad (2.18)$$

$$\psi^j + 2k \cdot \pi = 4\chi_k^j \rightarrow \chi_k^j = \frac{\psi^j + 2k \cdot \pi}{4} \quad (2.19)$$

dando valores a k desde 0 hasta 3 para obtener las 4 soluciones complejas:

$$k = 0 \rightarrow \chi_0^j = \frac{\psi^j}{4} \rightarrow \alpha_1^j = \sqrt[4]{mod^j} \cdot e^{i\frac{\psi^j}{4}} \quad (2.20)$$

$$k = 1 \rightarrow \chi_1^j = \frac{\psi^j}{4} + \frac{\pi}{2} \rightarrow \alpha_2^j = \sqrt[4]{mod^j} \cdot e^{i(\frac{\psi^j}{4} + \frac{\pi}{2})} \quad (2.21)$$

$$k = 2 \rightarrow \chi_2^j = \frac{\psi^j}{4} + \pi \rightarrow \alpha_3^j = \sqrt[4]{mod^j} \cdot e^{i(\frac{\psi^j}{4} + \pi)} \quad (2.22)$$

$$k = 3 \rightarrow \chi_3^j = \frac{\psi^j}{4} + \frac{3}{2}\pi \rightarrow \alpha_4^j = \sqrt[4]{mod^j} \cdot e^{i(\frac{\psi^j}{4} + \frac{3}{2}\pi)} \quad (2.23)$$

Las 4 soluciones complejas de α pueden escribirse de la forma:

$$\alpha_b = \sqrt[4]{mod^j} \cdot e^{i\left(\frac{\psi^j}{4} + (b-1)\frac{\pi}{2}\right)} ; b = 1,2,3,4 \quad (2.24)$$

De esta manera se puede escribir la solución homogénea para cada estrato j :

$$v_h^j = D_1^j e^{\alpha_1^j z} + D_2^j e^{\alpha_2^j z} + D_3^j e^{\alpha_3^j z} + D_4^j e^{\alpha_4^j z} \quad (2.25)$$

donde D_b^j son las constantes que se obtendrán mediante las condiciones de contorno.

2.1.2.2 Obtención de la solución particular

El campo incidente para ondas de tipo SH (polarizadas horizontalmente) propagándose en dirección vertical en un semiespacio estratificado, con n estratos, tiene la siguiente expresión:

$$v_l^j(z) = A_j e^{-ik_j z} + B_j e^{ik_j z} \quad (2.26)$$

siendo k_j el número de onda de cada estrato j y z la profundidad. Sustituyendo (2.26) en (2.5) se tiene:

$$E_p I_p \frac{\partial^4 v^j}{\partial z^4} + (\kappa_j - \rho A \omega^2) v^j = \kappa_j (A_j e^{-ik_j z} + B_j e^{ik_j z}) \quad (2.27)$$

que puede reescribirse como:

$$E_p I_p \frac{\partial^4 v^j}{\partial z^4} + (\kappa_j - \rho A \omega^2) v^j = A_l^j \cdot e^{-ik_j z} + B_l^j \cdot e^{ik_j z} \quad (2.28)$$

donde $A_l^j = \kappa_j A_j$ y $B_l^j = \kappa_j B_j$. El cálculo de los valores A_j y B_j se desarrolla en la sección 2.2 donde se explica más detalladamente el campo de desplazamientos provocado por un campo de ondas SH que incide verticalmente sobre el terreno. Entonces, la solución particular en cada estrato j es del tipo:

$$v_p^j = D_5^j e^{-ik_j z} + D_6^j e^{ik_j z} \quad (2.29)$$

calculando:

$$\frac{\partial^4 v_p^j}{\partial z^4} = k_j^4 D_5^j e^{-ik_j z} + k_j^4 D_6^j e^{ik_j z} \quad (2.30)$$

y sustituyendo y reordenando en (2.27):

$$(E_p I_p k_j^4 + \kappa_j - \rho A \omega^2) (D_5^j e^{-ik_j z} + D_6^j e^{ik_j z}) = A_l^j \cdot e^{-ik_j z} + B_l^j \cdot e^{ik_j z} \quad (2.31)$$

de donde:

$$D_5^j = \frac{A_I^j}{E_p I_p k_j^4 + \kappa_j - \rho A \omega^2} \quad (2.32a)$$

$$D_6^j = \frac{B_I^j}{E_p I_p k_j^4 + \kappa_j - \rho A \omega^2} \quad (2.32b)$$

Como se indicó previamente, la solución de la ecuación (2.5) es del tipo $v^j = v_h^j + v_p^j$. Así, en cada estrato j puede escribirse :

$$v^j = D_1^j e^{\alpha_1^j z} + D_2^j e^{\alpha_2^j z} + D_3^j e^{\alpha_3^j z} + D_4^j e^{\alpha_4^j z} + D_5^j e^{-ik_j z} + D_6^j e^{ik_j z} \quad (2.33)$$

de donde D_1^j, D_2^j, D_3^j y D_4^j son incógnitas, que se obtendrán utilizando las condiciones de contorno del problema, tanto en los extremos de la viga como en las interfases entre los estratos donde se supone continuidad en las propiedades.

Así, para un caso general, como se observa en la figura 2.4, se tendrían las incógnitas para cada estrato j .

2.1.2.3 Condiciones de contorno y obtención de la solución

Se considera que la cabeza del pilote tiene desplazamiento horizontal libre y giro nulo. Así, las condiciones de contorno en la cabeza son giro nulo y cortante nulo. En la base, el giro y el desplazamiento horizontal están restringidos a través de una impedancia puntual definida, lo que provoca la aparición de un cortante y un momento con unos valores dependientes de esta impedancia puntual en la base.

En la superficie libre, que se corresponde con la cota de profundidad $z = 0$ y que pertenece al estrato 1, el giro y el cortante son nulos. Esto se traduce matemáticamente en:

$$\theta_{(z=0)} = \frac{\partial v^1}{\partial z} = 0 \quad (2.34a)$$

$$\frac{Q_{(z=0)}}{E_p I_p} = \bar{Q}_{(z=0)} = \frac{\partial^3 v^1}{\partial z^3} = 0 \quad (2.34b)$$

donde z es la cota de profundidad, θ es el giro en la cabeza, Q es el cortante y \bar{Q} es el cortante normalizado por el módulo de elasticidad y la inercia de la sección. En estas expresiones el superíndice indica la definición de la variable en el estrato superior.

Para la cota de profundidad $z = L$, perteneciente al estrato n , el desplazamiento y el giro están restringidos a través de una impedancia puntual definida. Matemáticamente puede expresarse con el siguiente sistema de ecuaciones escrito en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} -Q \\ -M \end{bmatrix}_{z=L} = \begin{bmatrix} \kappa_{hh} & \kappa_{h\theta} \\ \kappa_{\theta h} & \kappa_{\theta\theta} \end{bmatrix}_{BASE} \cdot \begin{bmatrix} v \\ \theta \end{bmatrix}_{z=L} \quad (2.35)$$

donde z es la cota de profundidad, M es el momento flector, Q es el cortante, L es la longitud de la viga, θ es el giro en la punta, $v - v_I$ es el campo de desplazamientos en la base y las κ_{hh} , $\kappa_{h\theta} = \kappa_{\theta h}$ y $\kappa_{\theta\theta}$ son las impedancias en la base. Además, en una cimentación de tipo superficial las impedancias cruzadas $\kappa_{h\theta} = \kappa_{\theta h} = 0$, es decir, se consideran nulas. El convenio de signos se observa en la figura 2.4.

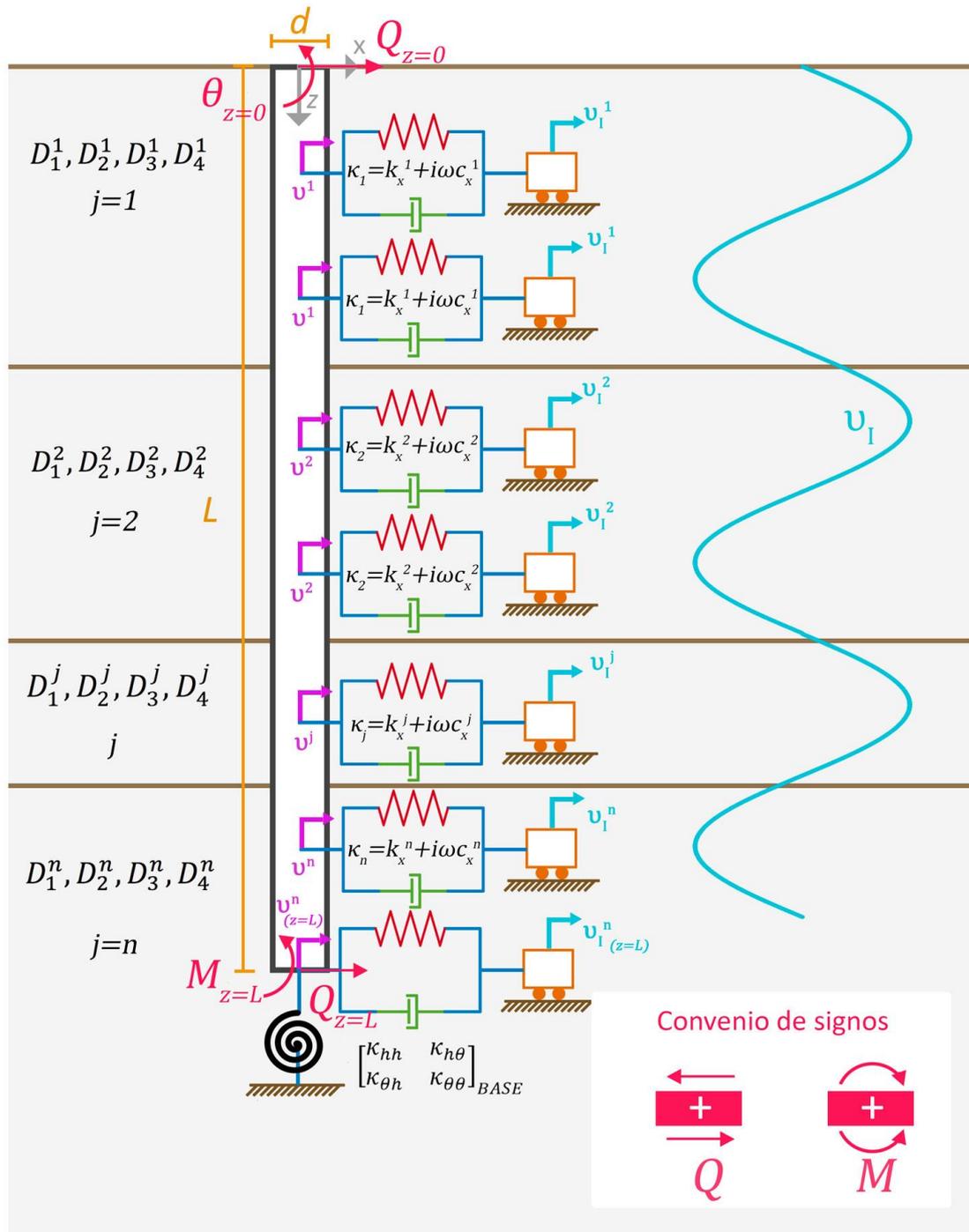


Figura 2.4: Incógnitas para cada estrato, condiciones de contorno y convenio de signos.

Resolviendo el sistema (2.35) queda:

$$Q_{(z=L)} = \kappa_{hh_{BASE}} \cdot (v_I - v)_{(z=L)} \quad (2.36a)$$

$$M_{(z=L)} = -\kappa_{\theta\theta_{BASE}} \cdot \theta_{(z=L)} \quad (2.36b)$$

De lo anterior sólo se tienen 4 ecuaciones, dos para cada extremo, que son dos ecuaciones útiles para hallar las incógnitas en el primer estrato, y otras dos ecuaciones útiles para el último estrato. Para obtener el resto de incógnitas se debe tener en cuenta que en las interfases entre estratos, donde la cota z de profundidad es la misma para el estrato j y para el estrato $j + 1$, los desplazamientos, giros, momentos y cortantes son continuos. Teniendo en cuenta que las propiedades de la viga son constantes, esto se expresa:

$$v^j = v^{j+1} \quad (2.37a)$$

$$\frac{\partial v^j}{\partial z} = \frac{\partial v^{j+1}}{\partial z} \quad (2.37b)$$

$$\frac{\partial^2 v^j}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 v^{j+1}}{\partial z^2} \quad (2.37c)$$

$$\frac{\partial^3 v^j}{\partial z^3} = \frac{\partial^3 v^{j+1}}{\partial z^3} \quad (2.37d)$$

El desarrollo de v^j está representado en la ecuación (2.33), y a continuación, se obtienen las derivadas primera, segunda y tercera del campo de desplazamientos para un estrato j , que serán análogos para el estrato $j + 1$ intercambiando los superíndices, y que igualándose como se apunta en las ecuaciones (2.37a), (2.37b), (2.37c) y (2.37d), conformarán las ecuaciones de interfase que permitirán el cálculo de las incógnitas buscadas. Estas ecuaciones representan, respectivamente, la continuidad de desplazamientos, giros, momentos normalizados por el módulo de elasticidad y la inercia de la sección, y cortantes normalizados por el módulo de elasticidad y la inercia de la sección, en las interfases entre estratos.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v^j}{\partial z} = & \alpha_1^j D_1^j e^{\alpha_1^j z} + \alpha_2^j D_2^j e^{\alpha_2^j z} + \alpha_3^j D_3^j e^{\alpha_3^j z} + \alpha_4^j D_4^j e^{\alpha_4^j z} + \\ & + ik_j (-D_5^j e^{-ik_j z} + D_6^j e^{ik_j z}) \end{aligned} \quad (2.38a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v^j}{\partial z^2} = & (\alpha_1^j)^2 D_1^j e^{\alpha_1^j z} + (\alpha_2^j)^2 D_2^j e^{\alpha_2^j z} + (\alpha_3^j)^2 D_3^j e^{\alpha_3^j z} + (\alpha_4^j)^2 D_4^j e^{\alpha_4^j z} - \\ & -(k_j)^2 (D_5^j e^{-ik_j z} + D_6^j e^{ik_j z}) \end{aligned} \quad (2.38b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 v^j}{\partial z^3} = & (\alpha_1^j)^3 D_1^j e^{\alpha_1^j z} + (\alpha_2^j)^3 D_2^j e^{\alpha_2^j z} + (\alpha_3^j)^3 D_3^j e^{\alpha_3^j z} + (\alpha_4^j)^3 D_4^j e^{\alpha_4^j z} + \\ & + i(k_j)^3 (D_5^j e^{-ik_j z} - D_6^j e^{ik_j z}) \end{aligned} \quad (2.38c)$$

Por lo tanto, en un caso de n estratos se tienen $4 \cdot n$ incógnitas. El número de interfases es de $n - 1$, de tal forma que se tienen $4 \cdot (n - 1)$ ecuaciones que se obtienen de (2.37a), (2.37b), (2.37c) y (2.37d) para cada interfase. Al haber 2 extremos con condiciones de contorno conocidas se tienen 2 ecuaciones para cada extremo, las ecuaciones (2.34a) y (2.34b) para el extremo superior y las ecuaciones (2.37a) y (2.37b) para la base o extremo inferior de la viga. Sumando las ecuaciones de las interfases y los extremos se tienen $4 \cdot n$ ecuaciones, por lo que resolviendo el sistema se pueden obtener las $4 \cdot n$ incógnitas buscadas D_1^j, D_2^j, D_3^j y D_4^j , y sustituyendo estos coeficientes junto a los calculados en (2.32a) y (2.32b), D_5^j y D_6^j , en la ecuación (2.33), se obtiene el campo de desplazamientos buscado.

Nótese que, para algunos casos particulares de los estudiados, el sistema de ecuaciones obtenido está muy mal condicionado. Esto provoca problemas numéricos, por lo que es necesario utilizar librerías de resolución del sistema de ecuaciones capaces de verificar la bondad de la solución obtenida.

El sistema de ecuaciones anteriormente descrito, aun en forma matricial, tendría una representación bastante compleja. Por ello, a modo de ejemplo, se explicará seguidamente la resolución del caso particular en el que el terreno está formado por un sólo estrato, en el que, aplicando únicamente las condiciones de contorno en los extremos, de las que se obtienen 4 ecuaciones, 2 por cada extremo, se pueden hallar las 4 incógnitas necesarias para la obtención del campo de desplazamientos.

Así, en este caso particular, se considera que en la superficie libre, que se corresponde con la cota de profundidad $z = 0$, se tienen giro y cortante nulos, como se indica en las ecuaciones (2.34a) y (2.34b). Por lo tanto, de las ecuaciones (2.38b) y (2.38c) igualadas a cero, se obtienen para el estrato 1, por ser este el caso particular de un único estrato, las ecuaciones:

$$\begin{aligned} (\alpha_1^1)D_1^1 + (\alpha_2^1)D_2^1 + (\alpha_3^1)D_3^1 + (\alpha_4^1)D_4^1 &= \\ &= ik_1(D_5^1 - D_6^1) \end{aligned} \quad (2.40a)$$

$$\begin{aligned} (\alpha_1^1)^3 D_1^1 + (\alpha_2^1)^3 D_2^1 + (\alpha_3^1)^3 D_3^1 + (\alpha_4^1)^3 D_4^1 &= \\ &= i(k_1)^3 (-D_5^1 + D_6^1) \end{aligned} \quad (2.40b)$$

En la base, que se corresponde con la cota de profundidad $z = L$, los valores del cortante y del momento flector son los que se obtiene de las ecuaciones (2.36a) y (2.36b), respectivamente. Así, de las ecuaciones (2.38b) y (2.38c) igualadas a estos valores, se obtienen para el estrato 1, por ser este el caso particular de un único estrato, las ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 (\alpha_1^1)^2 D_1^1 e^{\alpha_1^1 L} + (\alpha_2^1)^2 D_2^1 e^{\alpha_2^1 L} + (\alpha_3^1)^2 D_3^1 e^{\alpha_3^1 L} + (\alpha_4^1)^2 D_4^1 e^{\alpha_4^1 L} = \\
 = \bar{M}_{(z=L)} + (k_1)^2 (D_5^1 e^{-ik_1 L} + D_6^1 e^{ik_1 L})
 \end{aligned} \tag{2.40c}$$

$$\begin{aligned}
 (\alpha_1^1)^3 D_1^1 e^{\alpha_1^1 L} + (\alpha_2^1)^3 D_2^1 e^{\alpha_2^1 L} + (\alpha_3^1)^3 D_3^1 e^{\alpha_3^1 L} + (\alpha_4^1)^3 D_4^1 e^{\alpha_4^1 L} = \\
 = \bar{Q}_{(z=L)} + i(k_1)^3 (-D_5^1 e^{-ik_1 L} + D_6^1 e^{ik_1 L})
 \end{aligned} \tag{2.40d}$$

donde \bar{M} y \bar{Q} son, respectivamente, el momento y el cortante normalizados por el módulo de elasticidad y la inercia de la sección.

Esto forma un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas que puede escribirse matricialmente de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1^1 & \alpha_2^1 & \alpha_3^1 & \alpha_4^1 \\ (\alpha_1^1)^2 e^{\alpha_1^1 L} & (\alpha_2^1)^2 e^{\alpha_2^1 L} & (\alpha_3^1)^2 e^{\alpha_3^1 L} & (\alpha_4^1)^2 e^{\alpha_4^1 L} \\ (\alpha_1^1)^3 & (\alpha_2^1)^3 & (\alpha_3^1)^3 & (\alpha_4^1)^3 \\ (\alpha_1^1)^3 e^{\alpha_1^1 L} & (\alpha_2^1)^3 e^{\alpha_2^1 L} & (\alpha_3^1)^3 e^{\alpha_3^1 L} & (\alpha_4^1)^3 e^{\alpha_4^1 L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1^1 \\ D_2^1 \\ D_3^1 \\ D_4^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ik_1 (D_5^1 - D_6^1) \\ \bar{M}_{(z=L)} + (k_1)^2 (D_5^1 e^{-ik_1 L} + D_6^1 e^{ik_1 L}) \\ i(k_1)^3 (-D_5^1 + D_6^1) \\ \bar{Q}_{(z=L)} + i(k_1)^3 (-D_5^1 e^{-ik_1 L} + D_6^1 e^{ik_1 L}) \end{bmatrix} \tag{2.41}$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones se obtienen los coeficientes D_1^1 , D_2^1 , D_3^1 y D_4^1 . Sustituyendo en la ecuación (2.33) estos coeficientes junto a los coeficientes de valor ya conocido, D_5^1 y D_6^1 , obtenidos con las ecuaciones (2.32a) y (2.32b) se obtiene el campo de desplazamientos buscado para el caso particular de un terreno con un sólo estrato.

Finalmente, y volviendo al caso general para j estratos, como lo que realmente interesa es la obtención de la envolvente de momentos flectores en función de la profundidad, se calculan estos de la siguiente manera:

$$M(z) = \frac{\partial^2 v^j}{\partial z^2} E_p I_p \tag{2.42}$$

donde E_p es el módulo de elasticidad del pilote e I_p es su momento de inercia.

Desarrollando, para el caso general de j estratos, la expresión del momento flector en función de la profundidad z queda:

$$\begin{aligned}
 M(z) = [(\alpha_1^j)^2 D_1^j e^{\alpha_1^j z} + (\alpha_2^j)^2 D_2^j e^{\alpha_2^j z} + (\alpha_3^j)^2 D_3^j e^{\alpha_3^j z} + (\alpha_4^j)^2 D_4^j e^{\alpha_4^j z} - \\
 - (k_j)^2 (D_5^j e^{-ik_j z} + D_6^j e^{ik_j z})] \cdot E_p I_p
 \end{aligned} \tag{2.43}$$

2.1.3 Obtención de las impedancias

Como ya se ha comentado, el modelo tipo Winkler sustituye el suelo por una distribución continua de resortes y amortiguadores, cuya combinación constituye una impedancia. Estas impedancias son las que se describen en el punto 2.1.2 con la expresión $\kappa_j = k_x^j + i\omega c_x^j$, donde j indica el estrato. Los valores de k_x^j y c_x^j dependen de la frecuencia ω ; requieren de un elaborado proceso de cálculo y por eso se recurre a expresiones analíticas aproximadas. De esta forma, en esta sección se describen los métodos utilizados para la obtención de los valores de estas impedancias necesarias para definir el modelo. En el fuste del pilote se toman como impedancias κ_j las desarrolladas por Novak et al. [4], mientras para la base del pilote se emplean los valores utilizados por Bielak en [5] basados en los cálculos de Verbic y Veletsos [6].

2.1.3.1 Desarrollo de la rigidez compleja horizontal de Novak et al. [4]

A continuación, se describe el procedimiento empleado para la obtención de las impedancias κ_j a lo largo del fuste del pilote. Se supone un pilote de sección cilíndrica (que puede considerarse un disco rígido sin masa) embebido en un suelo homogéneo, isótropo y elástico-lineal, con coeficiente de Poisson ν_s y amortiguamiento histerético ξ_s . El pilote, de radio R , es sometido a una carga dinámica en la cabeza.

Se considera que el suelo trabaja en un estado plano de deformaciones y experimenta pequeños desplazamientos. Las ecuaciones de equilibrio, en coordenadas cilíndricas, de un medio que oscila armónicamente son según Novak et al. [4]

$$\eta^2 \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{\partial v}{\partial \theta} \right] - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\partial}{\partial r} (rv) - \frac{\partial u}{\partial \theta} \right] + \left(\frac{\omega}{c_s^*} \right)^2 u = 0 \quad (2.44a)$$

$$\eta^2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{\partial v}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (rv) - \frac{\partial u}{\partial \theta} \right] + \left(\frac{\omega}{c_s^*} \right)^2 v = 0 \quad (2.44b)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \left(\frac{\omega}{c_s^*} \right)^2 w = 0 \quad (2.44c)$$

Las ecuaciones (2.44a) y (2.44b) representan el equilibrio frente a oscilaciones laterales, mientras la ecuación (2.44c) representa el equilibrio en la dirección del eje vertical; ω es la frecuencia de vibración y c_s^* la velocidad de propagación de la onda de cortante que se expresa de forma compleja de la siguiente forma:

$$c_s^* = c_s \sqrt{1 + 2i\xi_s} \quad (2.45)$$

El parámetro η representa la relación entre la velocidad de propagación c_p de la onda volumétrica y la velocidad de propagación c_s de la onda de cortante. Esto se observa en la expresión siguiente:

$$\eta = \frac{c_p}{c_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu_s)}{1-2\nu_s}} \quad (2.46)$$

Para un problema con una carga dinámica horizontal en la cabeza del pilote, la rigidez dinámica κ_j , asociada a una unidad de longitud de cilindro, es la reacción dinámica del suelo por unidad de longitud de pilote debida a un desplazamiento unitario armónico del disco rígido. De acuerdo a Novak et al. [4], la rigidez dinámica viene dada por la siguiente expresión compleja:

$$\kappa_j = \pi G_s a_o^2 T \quad (2.47)$$

donde G_s es el módulo de rigidez transversal del suelo y T tiene la forma:

$$T = -\frac{4K_1(b_o^*)K_1(a_o^*) + a_o^*K_1(b_o^*)K_o(a_o^*) + b_o^*K_o(b_o^*)K_1(a_o^*)}{b_o^*K_o(b_o^*)K_1(a_o^*) + a_o^*K_1(b_o^*)K_o(a_o^*) + b_o^*a_o^*K_o(b_o^*)K_o(b_o^*)} \quad (2.48)$$

de tal forma que K_o y K_1 son funciones modificadas de Bessel de segundo tipo de argumento complejo, de orden cero y uno respectivamente, y además:

$$a_o^* = \frac{a_o i}{\sqrt{1+2i\xi_s}} ; \quad b_o^* = \frac{a_o i}{\eta\sqrt{1+2i\xi_s}} \quad (2.49)$$

donde a_o es la frecuencia adimensional:

$$a_o = \frac{\omega R}{c_s} \quad (2.50)$$

Sabiendo que la forma compleja del módulo de elasticidad transversal es

$$G_s^* = Re[G_s^*](1+2i\xi_s) \quad (2.51)$$

y sustituyendo la expresión de a_o^* (2.49) en la expresión (2.47) se obtiene:

$$\kappa_j = -\pi G_s^*(a_o^*)^2 T \quad (2.52)$$

Separando ahora las partes real e imaginaria de T , la ecuación (2.52) se puede reescribir como:

$$\kappa_j = k_x^j + i\omega c_x^j \quad (2.53)$$

2.1.3.2 Desarrollo de la función de impedancia de Verbic y Veletsos [6]

Puesto que los pilotes estudiados en este proyecto son huecos, la superficie de contacto pilote-suelo en la punta es pequeña, y además no es posible conocer cuáles serán las condiciones reales de contacto después de las operaciones de hincado del pilote. Por ello se consideran dos posibilidades extremas. Por un lado, se considera la punta del pilote totalmente libre (separada del suelo circundante) y, por tanto, de impedancias nulas. Por otro lado, se considera la punta del pilote restringida por una impedancia equivalente a la de un disco superficial. Para este segundo caso, se definen las impedancias en la punta del pilote

según lo expuesto por Bielak [5], basado en los cálculos de Verbic y Veletsos [6]. Estas impedancias en la base se utilizan como condiciones de contorno del modelo, tal y como se expone en el punto 2.1.2.3. Así, de forma análoga a (2.35) la relación entre las fuerzas y los desplazamientos en la punta del pilote puede expresarse como:

$$\begin{pmatrix} \frac{Q}{G_s^* R^2} \\ M \\ \frac{M}{G_s^* R^3} \end{pmatrix}_{z=L} = \begin{bmatrix} \kappa'_{hh} & \kappa'_{h\theta} \\ \kappa'_{h\theta} & \kappa'_{\theta\theta} \end{bmatrix}_{BASE} \begin{pmatrix} (v - v_I)/R \\ \theta \end{pmatrix}_{z=L} \quad (2.54)$$

donde Q es el cortante en la punta del pilote, M es el momento en la punta del pilote, R es el radio del disco superficial equivalente, $(v - v_I)$ es el campo de desplazamientos en la punta del pilote y θ es el giro. $[\kappa'_j]_{BASE}$ son las funciones de impedancias en la punta del pilote que se pretenden hallar, y vienen expresadas de la siguiente forma:

$$\kappa'_j(\omega) = \sigma_j [k'_j(\omega) + i a_o c'_j(\omega)], \quad j = hh, h\theta, \theta\theta \quad (2.55)$$

En esta expresión, σ_j representa la rigidez estática adimensional del pilote, k'_j mide el ratio entre la rigidez dinámica y sus valores estáticos, c'_j está relacionado con la energía radiada por el amortiguador al semiespacio elástico y a_o es la frecuencia adimensional descrita en (2.50). Las funciones k'_j y c'_j se pueden calcular a partir de resultados numéricos para ciertos valores de a_o y del coeficiente de Poisson ν_s . En el artículo Bielak [5] empleado para la obtención de los valores de impedancia en la punta el pilote, estos valores se calcularon a partir de las siguientes soluciones aproximadas:

$$k'_{hh} = 1 \quad ; \quad c'_{hh} = b_1 \quad (2.56a)$$

$$k'_{h\theta} = 0 \quad ; \quad c'_{h\theta} = 0 \quad (2.56b)$$

$$k'_{\theta\theta} = 1 - b_1 \frac{(b_2 a_o)^2}{1 + (b_2 a_o)^2} - b_3 a_o^2 \quad (2.56c)$$

$$c'_{\theta\theta} = b_1 b_2 \frac{(b_2 a_o)^2}{1 + (b_2 a_o)^2} \quad (2.56d)$$

Los coeficientes b_1 , b_2 y b_3 son funciones adimensionales que presentan diferentes valores de acuerdo con el coeficientes de Poisson ν_s , como se observa en tabla 2.1 extraída de Bielak [5].

Coficiente	$\nu_s = 0$	$\nu_s = 1/3$	$\nu_s = 0.45$	$\nu_s = 0.5$
b_1	0.525	0.5	0.45	0.4
b_2	0.8	0.8	0.8	0.8
b_3	0	0	0.023	0.027

Tabla 2.1: Valores de las funciones adimensionales de ν_s expuestos en Bielak [5].

Nótese aquí que existe una discrepancia entre las conclusiones de Bielak [5] y Verbic y Veletsos [6] en cuanto al valor que toma c'_{hh} , pues mientras el primero le da el valor del coeficiente b_1 , tal como se ha utilizado en el presente proyecto, los segundos otorgan el valor de un coeficiente al que denominan α_1 , que tiene un valor numérico ligeramente superior para los distintos coeficientes de Poisson ν_s . No obstante, esto no tiene un impacto relevante en los resultados obtenidos.

2.2 Campo incidente. Ondas SH

En la ecuación de equilibrio dinámico (2.4) se observa cómo intervienen las fuerzas producidas por la existencia de un campo de ondas incidente v_I que actúa sobre las impedancias κ_j del suelo. En esta sección se explica la obtención de este campo de ondas incidente para un terreno estratificado.

Se tiene un terreno con n estratos como el que se observa en la figura 2.5. El campo de desplazamientos en un estrato cualquiera j , provocado por un campo de ondas SH que incide verticalmente, es del tipo:

$$v_I^j(z) = A_j e^{-ik_j z} + B_j e^{ik_j z} \quad (2.57)$$

donde A_j y B_j son constantes propias de cada estrato y k_j es el número de onda de cada estrato, que viene definido por la expresión $k_j = \omega/c_s^j$, siendo c_s^j la velocidad de onda de corte en el estrato j .

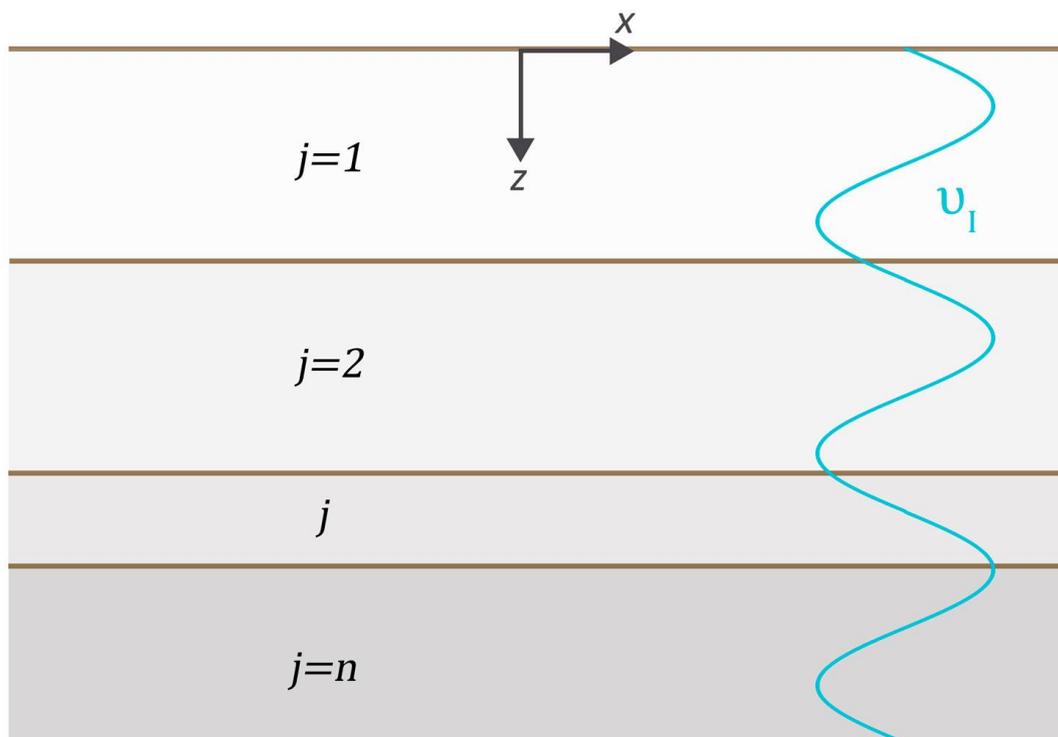


Figura 2.5: Terreno estratificado y campo de ondas SH incidente verticalmente.

Por otro lado, las tensiones tangenciales se obtienen utilizando la siguiente expresión:

$$\tau_{yz}(z) = G_s \frac{dv}{dz} \quad (2.58)$$

donde G_s es el módulo de rigidez transversal del suelo.

Así, para cada estrato j :

$$\tau_{yz}^j(z) = G_s^j i k_j [-A_j e^{-i k_j z} + B_j e^{i k_j z}] \quad (2.59)$$

En el estrato superior $j = 1$, que se toma como referencia, las condiciones de contorno en superficie libre son tensiones tangenciales nulas $\tau_{yz}^1(z = 0) = 0$ y desplazamiento unitario $v_I^1(z = 0) = 1$. De esta forma se tiene:

$$0 = -A_1 e^{-i k_1 z_1} + B_1 e^{i k_1 z_1} \quad (2.60)$$

$$1 = A_1 e^{-i k_1 z_1} + B_1 e^{i k_1 z_1}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (2.60) se obtienen A_1 y B_1 de tal forma que:

$$A_1 = \frac{1}{2} e^{-i k_1 z_1} \quad (2.61a)$$

$$B_1 = \frac{1}{2} e^{i k_1 z_1}$$

Teniendo en cuenta que $z_1 = 0$, se puede simplificar

$$A_1 = \frac{1}{2} \quad (2.61b)$$

$$B_1 = \frac{1}{2}$$

Por otro lado, en la interfase entre los estratos $j = 1$ y $j = 2$ se debe cumplir la continuidad de desplazamientos y tensiones, es decir, que en la cota superior del estrato 2, que es $z = z_2$ debe cumplirse que:

$$v_I^1(z_2) = v_I^2(z_2) \quad (2.62a)$$

$$\tau_{yz}^1(z_2) = \tau_{yz}^2(z_2) \quad (2.62b)$$

Utilizando (2.57) y (2.59)

$$A_1 e^{-i k_1 z_2} + B_1 e^{i k_1 z_2} = A_2 e^{-i k_2 z_2} + B_2 e^{i k_2 z_2} \quad (2.63a)$$

$$G_s^1 i k_1 [-A_1 e^{-i k_1 z_2} + B_1 e^{i k_1 z_2}] = G_s^2 i k_2 [-A_2 e^{-i k_2 z_2} + B_2 e^{i k_2 z_2}] \quad (2.63b)$$

Si se denomina:

$$R_2^1 = \frac{G_s^1 k_1}{G_s^2 k_2}$$

y si se resuelve el sistema de ecuaciones (2.63a) – (2.63b) se obtienen A_2 y B_2 .

$$A_2 = \frac{1}{2} e^{ik_2 z_2} [(1 + R_2^1) A_1 e^{-ik_1 z_2} + (1 - R_2^1) B_1 e^{ik_1 z_2}] \quad (2.64a)$$

$$B_2 = \frac{1}{2} e^{-ik_2 z_2} [(1 - R_2^1) A_1 e^{-ik_1 z_2} + (1 + R_2^1) B_1 e^{ik_1 z_2}] \quad (2.64b)$$

Generalizando este mismo procedimiento y realizándolo de forma secuencial a partir del estrato superior, de condiciones de contorno conocidas, se pueden obtener las constantes A_j y B_j de la ecuación (2.57), que determina el campo de desplazamientos en cualquier estrato de un terreno como el de la figura 2.6, de forma que:

$$A_j = \frac{1}{2} e^{ik_j z_j} [(1 + R_j^{j-1}) A_{j-1} e^{-ik_{j-1} z_j} + (1 - R_j^{j-1}) B_{j-1} e^{ik_{j-1} z_j}] \quad (2.65a)$$

$$B_j = \frac{1}{2} e^{-ik_j z_j} [(1 - R_j^{j-1}) A_{j-1} e^{-ik_{j-1} z_j} + (1 + R_j^{j-1}) B_{j-1} e^{ik_{j-1} z_j}] \quad (2.65b)$$

donde:

$$R_j^{j-1} = \frac{G_s^{j-1} k_{j-1}}{G_s^j k_j}$$

2.3 Obtención de los terremotos sintéticos

En este apartado se describe el proceso que se ha seguido para generar los terremotos sintéticos que servirán como excitación de los casos objeto de estudio de este proyecto. Para ello se seguirá lo establecido en el Eurocódigo 8: Parte 1 [7].

En la tabla 2.2 se presenta la clasificación de terrenos según el EC8-1 [7]. Para el caso de los homogéneos, de un sólo estrato, el tipo de terreno se puede determinar directamente a través de la velocidad de propagación de la onda tipo S a través del suelo (c_s) simplemente entrando en la tabla 2.2. En el caso de los terrenos estratificados, de dos o más estratos de características diferentes, el Eurocódigo propone una fórmula para calcular el valor medio de las velocidades de propagación de la onda tipo S a través del suelo para los estratos de los primeros 30 metros de profundidad. Este nuevo valor corregido es el que servirá para obtener el tipo de terreno según lo expuesto en la tabla 2.2.

Los casos de estudio del proyecto se han preparado de tal forma que se tienen terrenos tipo A, B, C, D y E, por lo que se cubren prácticamente todos los casos que propone el Eurocódigo. Así, para cada tipo de terreno, se obtienen los parámetros necesarios para definir completamente el espectro de respuesta máxima y, utilizando el software SIMQKE [8], que

genera terremotos artificiales compatibles con espectros de respuesta dados, se obtiene una terna de acelerogramas (respuesta temporal medida en aceleración) compatible con dichos espectros.

Tipo de terreno	Descripción del perfil estratigráfico	Parámetros		
		$c_{s,30}$ (m/s)	N_{STP} (golpes/30cm)	c_u (kPa)
A	Roca u otra formación geológica similar a una roca, que contiene como máximo 5 m de material más débil en la superficie.	> 800	-	-
B	Depósitos de arena muy densa, grava, o arcilla muy rígida, de al menos varias decenas de metros de espesor, que se caracteriza por un aumento gradual de las propiedades mecánicas con la profundidad.	360 - 800	> 50	> 250
C	Depósitos profundos de arena densa o muy densa, grava o arcilla dura, con un espesor de varias decenas a varios cientos de metros.	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Depósitos de suelo de baja a media cohesión (con o sin algunas capas cohesivas suaves), o suelos con predominancia de baja a rígida cohesión.	< 180	< 15	< 70
E	Un perfil estratigráfico que consiste en una capa superficial de sedimentos con valores de c_s de tipo C o D y un espesor que varía entre 5m y 20 m, sustentada con material más rígido de $c_s > 800$ m/s.	-	-	-
S_1	Depósitos consistentes o que contienen una capa de al menos 10 m de espesor, de arcillas blandas / limos con un alto índice de plasticidad ($IP > 40$) y alto contenido de agua.	< 100 (indicativo)	-	10 - 20
S_2	Depósitos de suelos licuables, de arcillas sensibles, o cualquier otro perfil estratigráfico no incluido en los tipos A - E o S_1 .	-	-	-

Tabla 2.2: Clasificación de terrenos según EC8-1 [7].

Para la obtención de los espectros de respuesta máxima de cada tipo de terreno se ha seguido lo dispuesto en el EC8-1 [7]. Así, para las componentes horizontales del sismo, el espectro de respuesta elástica $S_e(T)$ está definido por las siguientes expresiones:

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right] \quad (2.66a)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad (2.66b)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (2.66c)$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \quad (2.66d)$$

donde T es el período de vibración de un sistema lineal de un grado de libertad, a_g es la aceleración de diseño del terreno en un terreno tipo A, T_B es el límite inferior del tramo constante de la aceleración espectral, T_C es el límite superior del tramo constante de la aceleración espectral, T_D es el valor que define el comienzo del intervalo de desplazamiento constante del espectro de respuesta, S es el factor de suelo y η es el factor de corrección del amortiguamiento con un valor de referencia $\eta = 1$ para un amortiguamiento viscoso del 5%.

Los valores de los períodos T_B , T_C y T_D y el factor de suelo S que describen la forma del espectro de respuesta elástico dependen del tipo de terreno. Así, en la tabla 2.3 se recogen los valores de los parámetros que describen los espectros de respuesta elástica Tipo 1 según el EC8-1 [7] que se utilizan para obtener los acelerogramas. Además, en la figura 2.6 se representan gráficamente los espectros de respuesta elástica Tipo 1 descritos para los terrenos A a E con un 5% de amortiguamiento, donde el eje de ordenadas representa el espectro de respuesta elástica $S_e(T)$ normalizado por la aceleración de diseño a_g , y el eje de abscisas el período en segundos.

Tipo de Terreno	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1.0	0.15	0.4	2.0
B	1.2	0.15	0.5	2.0
C	1.15	0.20	0.6	2.0
D	1.35	0.20	0.6	2.0
E	1.4	0.15	0.5	2.0

Tabla 2.3: Valores de los parámetros que describen los espectros de respuesta elástica Tipo 1 según EC8-1 [7].

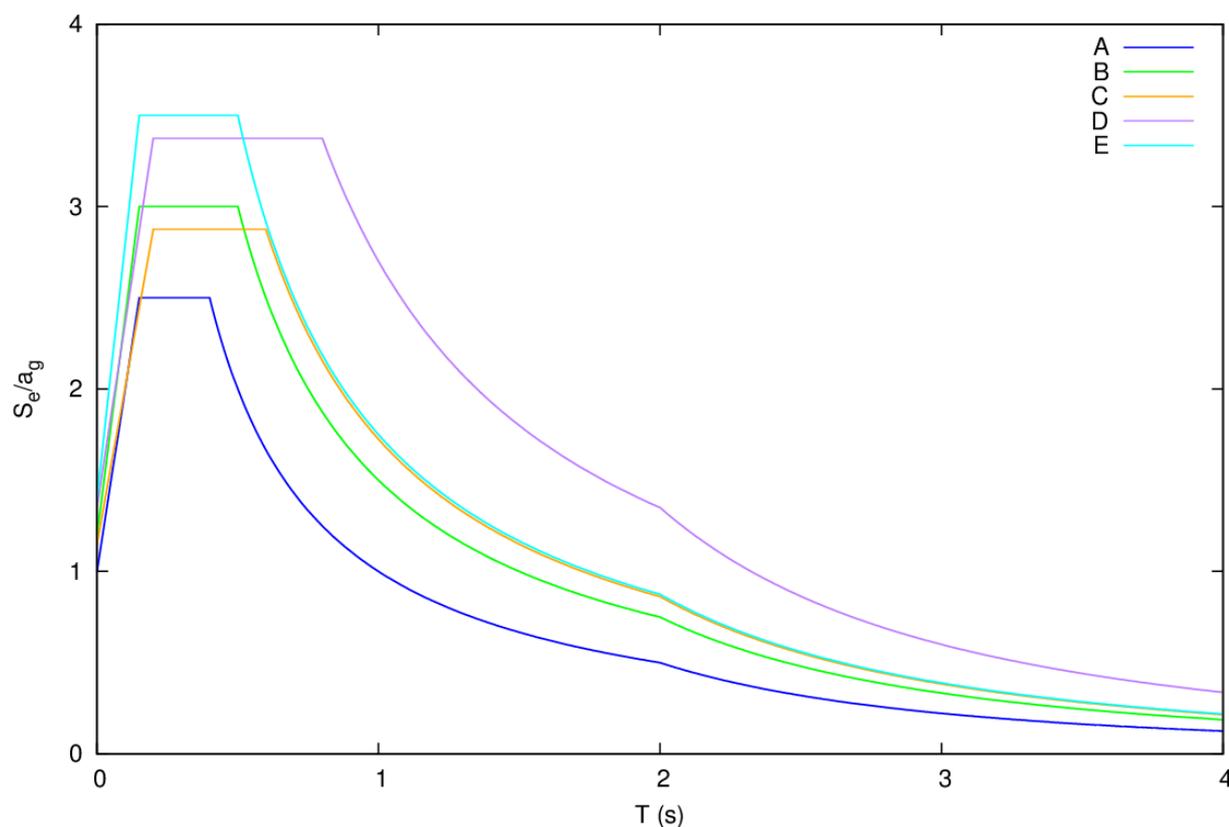


Figura 2.6: Espectros de respuesta elástica Tipo 1 para terrenos de tipo A-E con amortiguamiento al 5%.

La terna de acelerogramas utilizados para cada tipo de terreno se presentan gráficamente en las figuras 3.4 a 3.8 del capítulo 3 de resultados.

2.4 Implementación de la metodología

El programa utilizado para la obtención de las envolventes de máximos momentos flectores ha sido realizado en lenguaje programación FORTRAN 90 por la División de Mecánica de Medios Continuos y Estructuras del Instituto Universitario SIANI de la ULPGC, y adaptado por el autor de este proyecto.

A lo largo de esta sección se describe de forma general la estructura del programa de cálculo, haciendo especial hincapié en la forma en que se implementa la metodología ya descrita con anterioridad en este capítulo y desarrollando algunas de las particularidades de su aplicación.

En el punto 2.4.1 se explica la introducción de los datos, tanto del pilote y el suelo, como el acelerograma que sirve de excitación. En el punto 2.4.2 se desarrolla el cuerpo del programa donde está implementada la metodología principal descrita y donde se calculan las FRFs y se describe la obtención de la envolvente de máximos momentos flectores. Finalmente, mediante un diagrama se observa la estructura del programa de forma esquemática.

2.4.1 Introducción de datos

En el fichero de datos que alimenta al programa en FORTRAN se incluye inicialmente el número de puntos (que independientemente de la longitud del mismo, se ha decidido que sea de 201 puntos) para los que se obtienen los valores de las FRFs. Seguidamente se dispone el número de estratos en que se divide el terreno y las propiedades de cada estrato, que son el módulo elástico E_s , el coeficiente de Poisson ν_s , el coeficiente de amortiguamiento ξ_s , la densidad ρ_s , y las cotas inicial y final de cada estrato (la cota final del último estrato se corresponde con la longitud del pilote que se estudia). A continuación, se introducen las propiedades del pilote, que son el módulo elástico del material E_a , el diámetro exterior D_p , la densidad del material ρ_a , el coeficiente de amortiguamiento ξ_p y el coeficiente δ_p , que es la relación entre el diámetro interior y el diámetro exterior, y que sirve para corregir las propiedades mecánicas de un pilote macizo y adaptarlas para el pilote cilíndrico hueco que se estudia. El módulo elástico del pilote hueco E_p , y la densidad del pilote hueco ρ_p , se calculan con expresiones que relacionan el coeficiente δ_p con E_a y ρ_a , respectivamente. La longitud del pilote L_p no se introduce como dato, sino que se calcula restando a la cota final del último estrato la cota inicial del primer estrato. También el diferencial de profundidad dz , que sirve para definir cada uno de los puntos del pilote en los que se obtienen valores de momentos flectores, se calcula dividiendo la longitud del pilote antes obtenida entre el número de puntos menos uno. Finalmente, se introduce desde el fichero de datos el acelerograma sintético en superficie libre, obtenido tal como se indica en la sección 2.3, que tiene un valor de aceleración $\ddot{u}(t)$ para cada valor de tiempo hasta 20 segundos, con un incremento de tiempo $dt = 0.01$ segundos. Tanto las propiedades de los diferentes perfiles estratigráficos y los acelerogramas que les corresponden como excitación, como las configuraciones de pilote, para cada uno de los casos de estudio, están descritas convenientemente en el capítulo 3 del presente proyecto.

Como ya se ha comentado anteriormente, el problema se resuelve en el dominio de la frecuencia, principalmente por su menor coste computacional. Por este motivo es preciso pasar el acelerograma, que sirve de excitación, al dominio de la frecuencia, para lo que se utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Esta transformada es de tiempo discreto, y, aunque la señal de la excitación es aperiódica, esta es tratada como periódica por la FFT. Así, para poder aplicarla, permitir el amortiguamiento de la respuesta y que no influya su carácter periódico, se completa con ceros el vector de las aceleraciones hasta un número de registros N muy superior al número de registros de entrada del acelerograma y, además, se pasa al campo complejo. Hecho esto, se aplica la FFT para obtener el espectro en el dominio de la frecuencia. A continuación, se obtiene el incremento de frecuencias para construir el vector de frecuencias ω (rad/s), dividiendo el número π entre el diferencial de tiempo dt , y esto, a su vez, por la mitad del número de registros $N/2$, obteniendo un vector con $N/2 + 1$ valores de frecuencias. Esto se construye de esta manera porque no se conoce información de la señal más allá de la frecuencia de Nyquist, que se corresponde con la posición $N/2 + 1$ del vector que contiene la transformada de la excitación. Así, truncando la transformada de la señal en esta posición de la frecuencia de Nyquist se tiene el vector de aceleraciones en el dominio de la frecuencia en la forma adecuada para poder combinarlo posteriormente con las FRFs que se calculan en la sección siguiente 2.4.2.

2.4.2 Cálculo de las FRFs y obtención de la envolvente

Una vez introducidos todos los datos, tanto los del terreno como los del pilote, y el acelerograma en superficie libre que sirve de excitación pasado al dominio de la frecuencia, el siguiente paso es obtener las FRFs de momentos flectores. Esto se hace para cada uno de los puntos de profundidad del pilote y para todas las frecuencias del vector de frecuencias hasta la frecuencia de Nyquist, obtenido previamente. Es decir, primero se selecciona un punto, se calculan los momentos flectores para todas y cada una de las frecuencias y se selecciona el máximo flector de entre todos ellos, que será el valor que forme parte de la envolvente de máximos flectores objetivo, y así sucesivamente para cada punto del pilote.

En este paso se calculan algunas propiedades del terreno y el pilote que no se han introducido como datos. En el caso del terreno y para cada estrato j que lo conforma, se calcula el módulo de rigidez transversal G_s^{j*} , y la velocidad de propagación de las ondas tipo S a través del suelo c_s^{j*} , utilizando las expresiones (2.67a) y (2.67b), respectivamente. Nótese que se asume un modelo de amortiguamiento del material de tipo hysterético a través de unas constantes elásticas complejas del tipo:

$$G_s^{j*} = \text{Re} [G_s^{j*}] (1 + 2i\xi_s^j) \quad (2.67a)$$

$$c_s^{j*} = \left(\frac{G_s^{j*}}{\rho_s^j} \right)^2 \quad (2.67b)$$

donde ξ_s^j es el coeficiente de amortiguamiento del estrato j y ρ_s^j es la densidad del estrato j .

En el caso del pilote se obtiene el módulo de elasticidad $E_p^{\delta*}$, el momento de inercia I_p y el área A_p , utilizando respectivamente las expresiones (2.68a), (2.68b) y (2.68c).

$$E_p^{\delta*} = \text{Re}[E_p^{\delta*}] (1 + i 2\xi_p E_p^{\delta*}) \quad (2.68a)$$

$$I_p = \frac{1}{64} \pi (D_p)^4 \quad (2.68b)$$

$$A_p = \frac{1}{4} \pi (D_p)^2 \quad (2.68c)$$

donde ξ_p es el coeficiente de amortiguamiento del pilote y D_p es el diámetro exterior del pilote.

A continuación, implementando la metodología descrita en la sección 2.2 sobre el campo incidente, se obtienen las constantes A_j y B_j propias de cada estrato que se incorporan posteriormente en la obtención de la solución particular de la ecuación analítica de la viga Euler-Bernoulli.

Seguidamente, implementando la metodología descrita en la sección 2.1.3 para las impedancias, se obtienen las impedancias tanto a lo largo del fuste del pilote, según las

expresiones desarrolladas por Novak et al. [4], como, en su caso, en la punta, que se obtienen según lo expuesto por Bielak [5], basado en los cálculos de Verbic y Veletsos [6]. En el caso por defecto las impedancias en la base son nulas, por lo que es irrelevante su obtención, pero en el estudio donde se compara el caso por defecto con el caso en que la punta del pilote tiene cierta impedancia, sí se deben tener en cuenta.

Calculado esto, el siguiente paso es la implementación de la solución de la ecuación analítica de una viga Euler-Bernoulli sometida a ondas SH de incidencia vertical descrita en el punto 2.1.2. Se realiza paso a paso lo descrito en aquel punto del capítulo: primero se obtiene la solución homogénea de donde se sacan los coeficientes que son las incógnitas objetivo; luego se resuelve la ecuación utilizando la solución particular para obtener las dos constantes necesarias para la resolución del sistema; por último, se monta el sistema de ecuaciones en forma matricial y se resuelve obteniendo el valor de las incógnitas. Finalmente se obtienen las FRFs de momentos normalizados por el módulo de elasticidad y el módulo de inercia y por la amplitud del campo de desplazamientos incidente en superficie libre $v_{I(z=0)}$, en función de la profundidad y la frecuencia, que se observa en la expresión siguiente:

$$\frac{\frac{M(\omega, z)}{E_p^{\delta^*} \cdot I_p}}{v_{I(z=0)}} = \frac{\frac{\delta^2 v}{\delta z^2}}{v_{I(z=0)}}(\omega, z) \quad (2.69)$$

A continuación, las FRFs se ponen en forma de momento respecto a la amplitud del campo de desplazamientos incidente en superficie libre multiplicando por el módulo de elasticidad del pilote $E_p^{\delta^*}$ y por el momento de inercia del pilote I_p , tal como se ve en la expresión siguiente:

$$\frac{\frac{\delta^2 v}{\delta z^2}}{v_{I(z=0)}} \cdot E_p^{\delta^*} \cdot I_p = \frac{M}{v_{I(z=0)}}(\omega, z) \quad (2.70)$$

Ahora, para poder combinar las FRFs con el acelerograma de excitación ya pasado al dominio de la frecuencia, se deben poner las FRFs respecto a la amplitud del campo de aceleraciones incidente en superficie libre (en lugar del campo de desplazamientos). Para explicar esto, se define inicialmente el desplazamiento temporal $u(t)$ como el desplazamiento en función de la frecuencia $U(\omega)$ por una exponencial compleja que también depende de la frecuencia $e^{i\omega t}$, como se observa en la ecuación (2.71a). Esta expresión del desplazamiento se deriva con respecto al tiempo dos veces para obtener la aceleración $\ddot{u}(t)$, como se ve en la ecuación (2.71b). En la ecuación (2.71c) se observa el coeficiente por el que deben multiplicarse las FRFs de momentos flectores respecto a la amplitud del campo de desplazamientos incidente en superficie libre para que pasen a estar respecto a la amplitud del campo de aceleraciones incidente en superficie libre.

$$u(t) = U(\omega)e^{i\omega t} \quad (2.71a)$$

$$\ddot{u}(t) = \ddot{U}(\omega)e^{i\omega t} = -\omega^2 U(\omega)e^{i\omega t} \quad (2.71b)$$

$$\frac{U(\omega)}{\ddot{U}(\omega)} = -\frac{1}{\omega^2} \quad (2.71c)$$

Estas FRFs de momentos flectores respecto a la amplitud del campo de aceleraciones incidente en superficie libre tienen la expresión:

$$\frac{M}{\ddot{U}_{I(z=0)}}(\omega, z)$$

Ahora, estas FRFs ya pueden multiplicarse por el valor de la aceleración correspondiente en el dominio de la frecuencia $\ddot{U}(\omega)$ y así obtener las FRFs objetivo de momentos flectores $M(\omega, z)$.

Debido a las características del algoritmo IFFT utilizado, para obtener los momentos en el dominio del tiempo $m(t, z)$ primero se debe completar el vector complejo en el dominio de la frecuencia $M(\omega, z)$, con su conjugado a partir de la frecuencia de Nyquist (posición $N/2 + 1$) hasta el número de registros N . Aplicando ahora la IFFT se obtienen los momentos flectores en el dominio del tiempo para cada instante en un punto del pilote. Por último, de entre todos los momentos a una misma cota se selecciona el máximo valor (en valor absoluto), que se almacena para construir posteriormente la envolvente. Para obtenerlos en unidades del Sistema Internacional ($\text{kN} \cdot \text{m}$) estos valores de momento flector máximo se dividen entre 1000.

Repitiendo este proceso descrito para cada punto del pilote se obtiene el valor máximo del momento flector en cada uno de los puntos y puede construirse la envolvente de máximos momentos flectores, que es el objetivo principal del proyecto. Esto, además, se realiza para cada uno de los casos que se describen en el capítulo 3 de resultados del presente documento.

En la figura 2.7 se observa un esquema donde se describe de una manera gráfica el proceso que se sigue para la obtención de las envolventes implementando la metodología descrita en el capítulo.

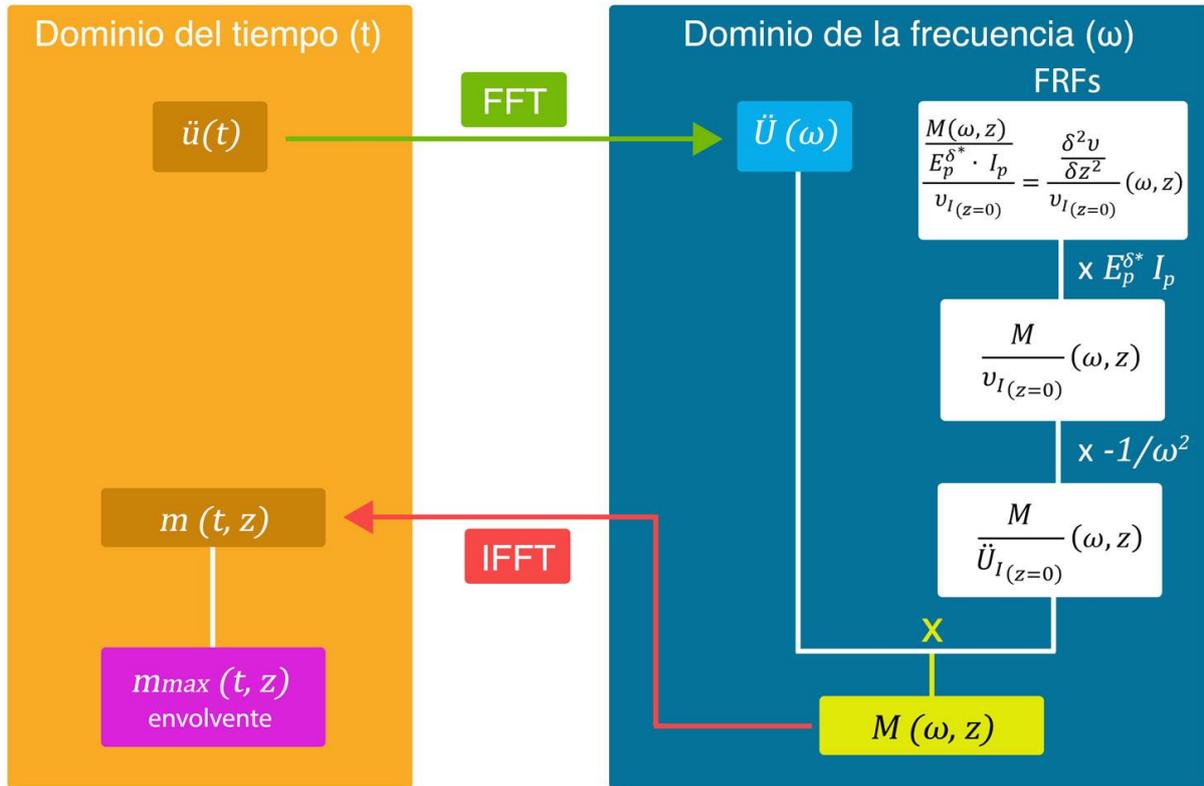


Figura 2.7: Esquema general de implementación de la metodología.

En este capítulo se recogen y analizan los resultados más representativos que se obtienen en los estudios realizados. En la sección 3.1 se describen el problema y todos los casos de estudio, que incluye las configuraciones y propiedades de los pilotes y los perfiles estratigráficos en los que estos están embebidos. En la sección 3.2 se explica la obtención de los acelerogramas sintéticos que definen la excitación sísmica del problema. Finalmente, en la sección 3.3 se presentan los resultados del problema, envolventes de momentos, de forma gráfica, y, de forma adicional, se realizan dos estudios: 1) la influencia del diámetro sobre la distribución de momentos; 2) la influencia de las condiciones de contorno en la punta del pilote. Estos dos estudios también son presentados en forma de gráfica de envolvente de momentos. A modo de síntesis de resultados se presentan, también gráficamente, una serie de agrupaciones de todos los casos estudiados (respecto a la velocidad de propagación de cada suelo y respecto del tipo de terreno según el EC8-1 [7]) de valores característicos de cada caso, como el momento máximo en la cabeza del pilote o el momento máximo por debajo de la primera interfase.

3.1 Descripción del problema y casos de estudio

El objetivo principal de este proyecto es el estudio de la influencia de la estratigrafía del terreno sobre los momentos de origen sísmico en monopilotes para aerogeneradores. Este objetivo se concretará a partir de la obtención de las envolventes de momentos flectores de pilotes circulares huecos enterrados en suelos estratificados sometidos a excitación sísmica compatible con espectros de respuesta específicos. Además, se considera que la cabeza del pilote tiene el giro impedido, pero se le permiten los desplazamientos horizontales libremente, mientras en la punta del pilote se consideran libres tanto el giro como los desplazamientos horizontales. Lo que se pretende es realizar un estudio paramétrico y para ello se estudian 4 configuraciones diferentes de pilote, con distintas longitudes y diámetros, enterrados en 28 perfiles estratigráficos diferentes y frente a 3 acelerogramas distintos del mismo espectro, que representan los movimientos sísmicos, para cada tipo de terreno. Así, el total de casos estudiados, que abarcan un amplio rango de configuraciones que permiten obtener y generalizar conclusiones, asciende a 336.

Las características geotécnicas de los terrenos donde pueden llegar a localizarse parques eólicos marinos pueden ser muy variables (Carswell et al. [9], Jung et al [10], Negro et al. [11], Randolph y Gourvenec [12]). Los suelos y perfiles seleccionados para este estudio no se corresponden con una localización específica, sino que se han seleccionado para barrer

un amplio rango de terrenos posibles. Del mismo modo, se recogerán también diámetros en los límites superior e inferior de los que llegan a dimensionarse para este tipo de pilotes.

3.1.1 Pilotes

Todos los pilotes son circulares huecos y fabricados en acero con las siguientes características mecánicas siguiendo lo especificado en el Eurocódigo 3: Parte 1-1 [13]: módulo de elasticidad $E_a = 210$ GPa, coeficiente de Poisson $\nu_a = 0.25$ y densidad $\rho_a = 7850$ kg/m³. El valor del amortiguamiento $\xi_a = 1\%$ se obtenido según lo dispuesto por Carswell et al. [9].

Se estudian 4 configuraciones de pilote circular hueco cuyas características se presentan en la Tabla 3.1, donde L_p es la longitud, D_p es el diámetro exterior, t_p es el espesor, L_p/D_p es la esbeltez, δ_p es la relación entre el diámetro interior y el diámetro exterior del pilote, E_p es el módulo de elasticidad corregido para pilote circular hueco y ρ_p es la densidad corregida para pilote circular hueco.

Pilote	L_p (m)	D_p (m)	t_p (mm)	$\frac{L_p}{D_p}$	δ_p	E_p (GPa)	ρ_p (Kg/m ³)
Configuración 1	10.5	3.5	41.37	3	0.97636	19.164	366.761
Configuración 2	24.5	3.5	41.37	7	0.97636	19.164	366.761
Configuración 3	18	6	66.37	3	0.97788	17.973	343.443
Configuración 4	42	6	66.37	7	0.97788	17.973	343.443

Tabla 3.1: Características de las configuraciones de pilote.

El espesor del pilote se obtiene según la recomendación del American Petroleum Institute (API) [14], que propone un valor cercano a:

$$t_p = 6.37 + \frac{D_p}{100} \text{ (mm)} \quad (3.1)$$

Las propiedades mecánicas corregidas para un pilote circular hueco, E_p y ρ_p , se han obtenido mediante las siguientes expresiones, implementadas directamente en el código del programa de cálculo utilizado en el proyecto:

$$E_p = E_a \cdot (1 - \delta_p^4) \quad (3.2a)$$

$$\rho_p = \rho_a \cdot (1 - \delta_p^2) \quad (3.2b)$$

En la figura 3.1 se observa una sección transversal y en planta de los pilotes con sus dimensiones principales.

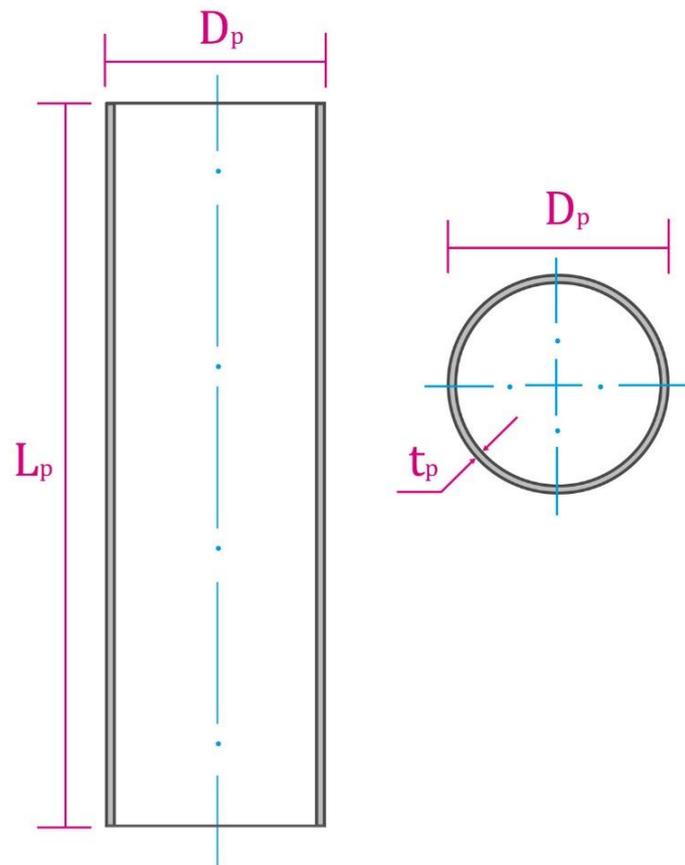


Figura 3.1: Vista de sección transversal y en planta de un pilote.

3.1.2 Suelos

En la Tabla 3.2 se presentan las características de los diferentes tipos de suelos que conforman los perfiles estratigráficos que se estudian en este proyecto, donde c_s (m/s) es la velocidad de propagación de las ondas tipo S a través del suelo, ρ_s (kg/m^3) es la densidad, G_s (GPa) es el módulo de rigidez del suelo, E_s (GPa) es el módulo de elasticidad del suelo, ξ_s es el amortiguamiento del suelo y ν_s es el coeficiente de Poisson.

Los valores de c_s y ρ_s son datos escogidos para representar un amplio rango de situaciones. El amortiguamiento ξ_s se ha fijado en un 5% para todos los suelos y el coeficiente de Poisson ν_s también se ha seleccionado igual para todos los suelos con un valor de 0.3.

Suelo	c_s (m/s)	ρ_s (Kg/m ³)	G_s (GPa)	E_s (GPa)	ξ_s	ν_s
S1	70	1650	8.08	21.02	5%	0.3
S2	100	1750	17.50	45.50	5%	0.3
S3	130	2000	33.80	87.88	5%	0.3
S4	160	2000	51.20	133.1	5%	0.3
S5	250	2000	125.0	325.0	5%	0.3
S6	400	2000	320.0	832.0	5%	0.3
S7	800	2500	1600.0	4160	5%	0.3

Tabla 3.2: Características de los suelos.

Para la obtención tanto del módulo de rigidez transversal G_s como del módulo de elasticidad E_s , se han utilizado las siguientes expresiones que emplean los parámetros anteriores:

$$G_s = (c_s)^2 \cdot \rho_s \quad (3.3a)$$

$$E_s = 2G_s \cdot (1 + \nu_s) \quad (3.3b)$$

3.1.3 Perfiles estratigráficos

Ahora se presentan los 28 perfiles estratigráficos estudiados y se obtiene el tipo de terreno que le corresponde a cada uno según el EC8-1 [7]. En función del tipo de terreno que resulte se excita con 3 acelerogramas distintos de cada espectro correspondiente (A, B, C, D o E), para cada una de las 4 configuraciones de pilote diferentes. A cada perfil estratigráfico se le ha asignado un código para facilitar su identificación a la hora de mostrar los resultados, formado por la letra P seguida de un número. Además, a aquellos que presentan la misma configuración de estratos y mantienen el primer estrato con las mismas propiedades, pero varían las propiedades del segundo estrato, se les ha añadido una letra para diferenciarlas dentro de la agrupación numérica. De esta forma se tiene un primer grupo de un sólo estrato (P1 - P4), luego un grupo más amplio de dos estratos en los que se mantiene fija la profundidad y propiedades del primer estrato y se cambian las propiedades del segundo estrato hasta pasar por todos los tipos de suelo propuestos (P5 - P8), y finalmente un grupo con 3 o más estratos (P9 - P12). Con esto se consigue tener una gran variedad de casos de estudio,

configuraciones con varios estratos de propiedades que abarcan un amplio rango y que permiten realizar el estudio paramétrico generalizado objetivo de este proyecto.

En la figura 3.2 se presentan de forma gráfica los 28 perfiles estratigráficos que se estudian.

En la tabla 2.2 (capítulo 2) se presenta la clasificación de terrenos según el EC8-1 [7].

Para los perfiles estratigráficos de un sólo estrato, basta con entrar en la tabla 2.2 para clasificarlo de forma directa. Así, los perfiles estratigráficos P1, P2, P3 y P4 se pueden clasificar directamente sin hacer ninguna corrección, que sí será necesaria hacer para el resto. Se ha de tener en cuenta que, lo que el EC8-1 [7] denomina $c_{s,30}$, es la c_s promedio para los primeros 30 metros de profundidad.

El resto de perfiles estratigráficos se compone de dos o más estratos y de varios tipos de suelos en diferentes combinaciones, así que el EC8-1 [7] propone la siguiente fórmula para hallar $c_{s,30}$:

$$c_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{h_i}{c_i}} \quad (3.4)$$

donde h_i es el espesor de cada estrato, c_i es la velocidad de propagación de cada estrato y N el número de estratos que componen cada perfil estratigráfico.

Esto debe realizarse para cada uno de los perfiles estratigráficos propuestos, con el objetivo de obtener el tipo de terreno que le corresponde según el EC8-1 [7], tal como se recoge en la tabla 2.2, y así excitarlo con los acelerogramas correspondientes.

Por ejemplo, el perfil estratigráfico P11 está formado por los suelos S1, S3 y S5, con un espesor de 5 metros cada uno, y S7 con un espesor de 35 metros. Como la fórmula sólo contempla los 30 primeros metros, el estrato S7 tendrá un espesor $h = 15$ m. De esta manera, a modo de ejemplo, se tiene:

Perfil estratigráfico	Estratos	h (m)	c_s (m/s)	$c_{s,30}$ (m/s)	Tipo terreno
P11	S1	5	70	201.82	C
	S3	5	130		
	S5	5	250		
	S7	15	800		

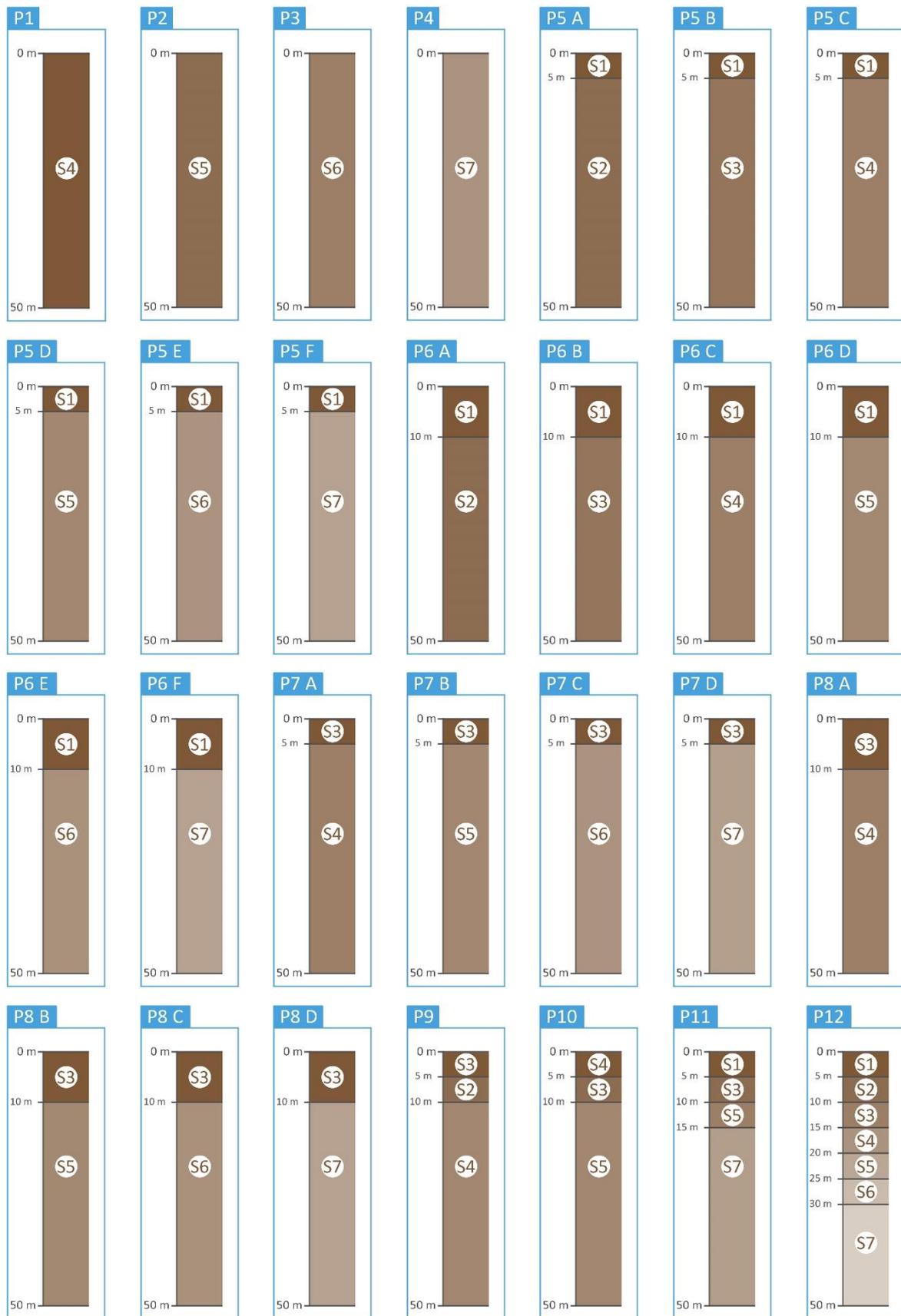


Figura 3.2: Perfiles estratigráficos estudiados.

En la Tabla 3.3 se presenta el resumen con el tipo de terreno resultante para todos los perfiles estratigráficos que se estudian.

Perfil estratigráfico	Estratos	h (m)	c_s (m/s)	$c_{s,30}$ (m/s)	Tipo terreno
P1	S4	30	160	160	D
P2	S5	30	250	250	C
P3	S6	30	400	400	B
P4	S7	30	800	800	A
P5 A	S1 S2	5 25	70 100	93.33	D
P5 B	S1 S3	5 25	70 130	113.75	D
P5 C	S1 S4	5 25	70 160	131.77	D
P5 D	S1 S5	5 25	70 250	175	D
P5 E	S1 S6	5 25	70 400	224	D
P5 F	S1 S7	5 25	70 800	292.14	E
P6 A	S1 S2	10 20	70 100	87.50	D
P6 B	S1 S3	10 20	70 130	101.11	D
P6 C	S1 S4	10 20	70 160	112	D
P6 D	S1 S5	10 20	70 250	134.62	D
P6 E	S1 S6	10 20	70 400	155.55	D

P6 F	S1 S7	10 20	70 800	178.72	E
P7 A	S3 S4	5 25	130 160	154.07	D
P7 B	S3 S5	5 25	130 250	216.66	C
P7 C	S3 S6	5 25	130 400	297.14	C
P7 D	S3 S7	5 25	130 800	430.34	B
P8 A	S3 S4	10 20	130 160	148.57	D
P8 B	S3 S5	10 20	130 250	191.18	C
P8 C	S3 S6	10 20	130 400	236.36	C
P8 D	S3 S7	10 20	130 800	294.34	E
P9	S3 S2 S4	5 5 20	130 100 160	140.54	D
P10	S4 S3 S5	5 5 20	160 130 250	200	C
P11	S1 S3 S5 S7	5 5 5 15	70 130 250 800	201.82	E
P12	S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7	5 5 5 5 5 5 20	70 100 130 160 250 400 800	179.22	E

Tabla 3.3: Tipos de terreno para cada perfil estratigráfico según el EC8-1 [7].

En la figura 3.3 se observa un gráfico donde se agrupan las velocidades de propagación de los perfiles estratigráficos estudiados según el tipo de terreno que propone el EC8-1 [7].

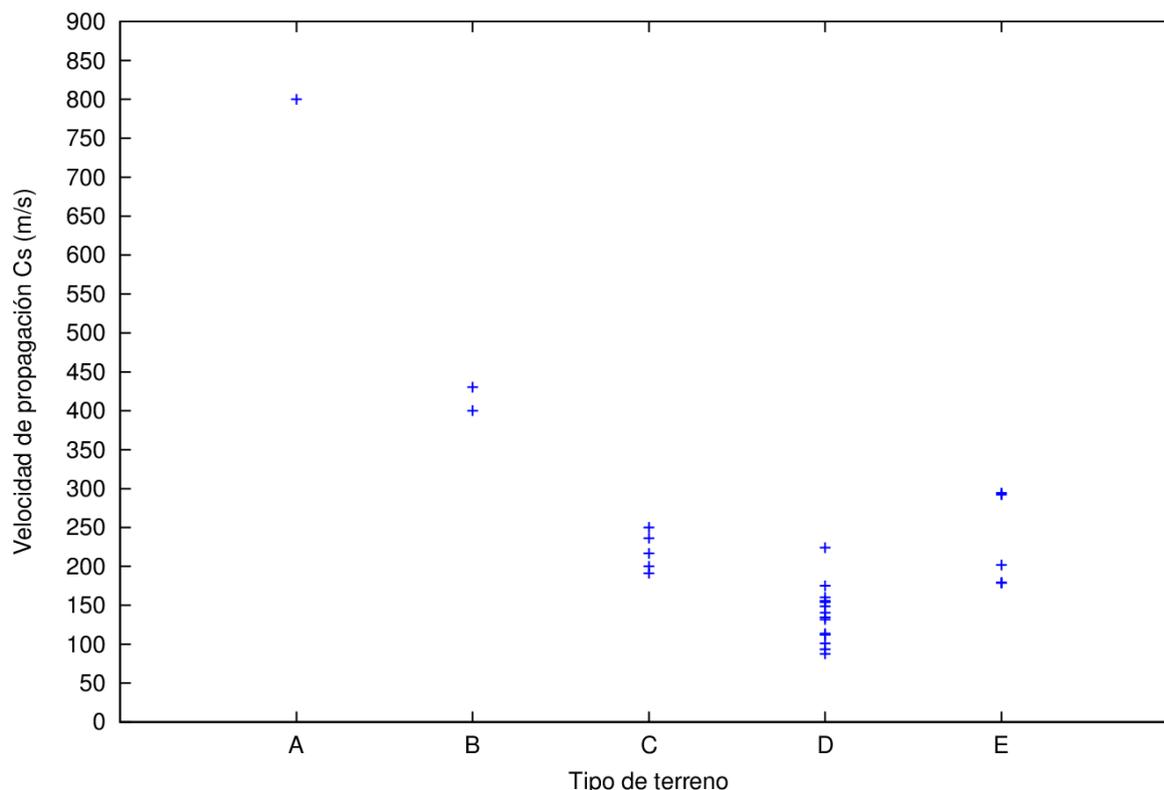


Figura 3.3: Tipos de terreno según la velocidad de propagación por el EC8-1 [7].

3.2 Obtención de los acelerogramas que definen la excitación sísmica

Como excitación se establecen una serie de acelerogramas artificiales definidos en superficie libre. Tal como se explica en la sección 2.3 del presente proyecto, estos acelerogramas se generan empleando el software SIMQKE [8] acordes a un espectro de respuesta máxima que ha sido definido previamente teniendo en cuenta lo que expone el EC8-1 [7] para los casos propuestos en la sección 3.1.3. En estos casos de estudio se observa cómo se tienen 5 tipos de terreno, A, B, C, D y E, según el EC8-1 [7]. Así, se han generado un conjunto de 15 terremotos artificiales, 3 para cada tipo de terreno, definidos estos como de respuesta elástica de Tipo 1 según EC8-1 [7], con una aceleración de diseño $a_g = 2.45 \text{ m/s}^2 = 0.25 \text{ g}$. Esto se justifica porque al tratarse de sismos artificiales, la norma establece que deben usarse un mínimo de 3 terremotos para que los resultados puedan ser analizados de forma conveniente. Todos los acelerogramas tienen una duración de señal de 20 segundos.

Por lo tanto, se tienen para el terreno tipo A, los acelerogramas A1, A2 y A3 (representados en la figura 3.4); para el terreno tipo B, los acelerogramas B1, B2 y B3 (figura 3.5); para el terreno tipo C, los acelerogramas C1, C2 y C3 (figura 3.6); para el terreno tipo D, los acelerogramas D1, D2 y D3 (figura 3.7); para el terreno tipo E, los acelerogramas E1, E2 y E3 (figura 3.8).

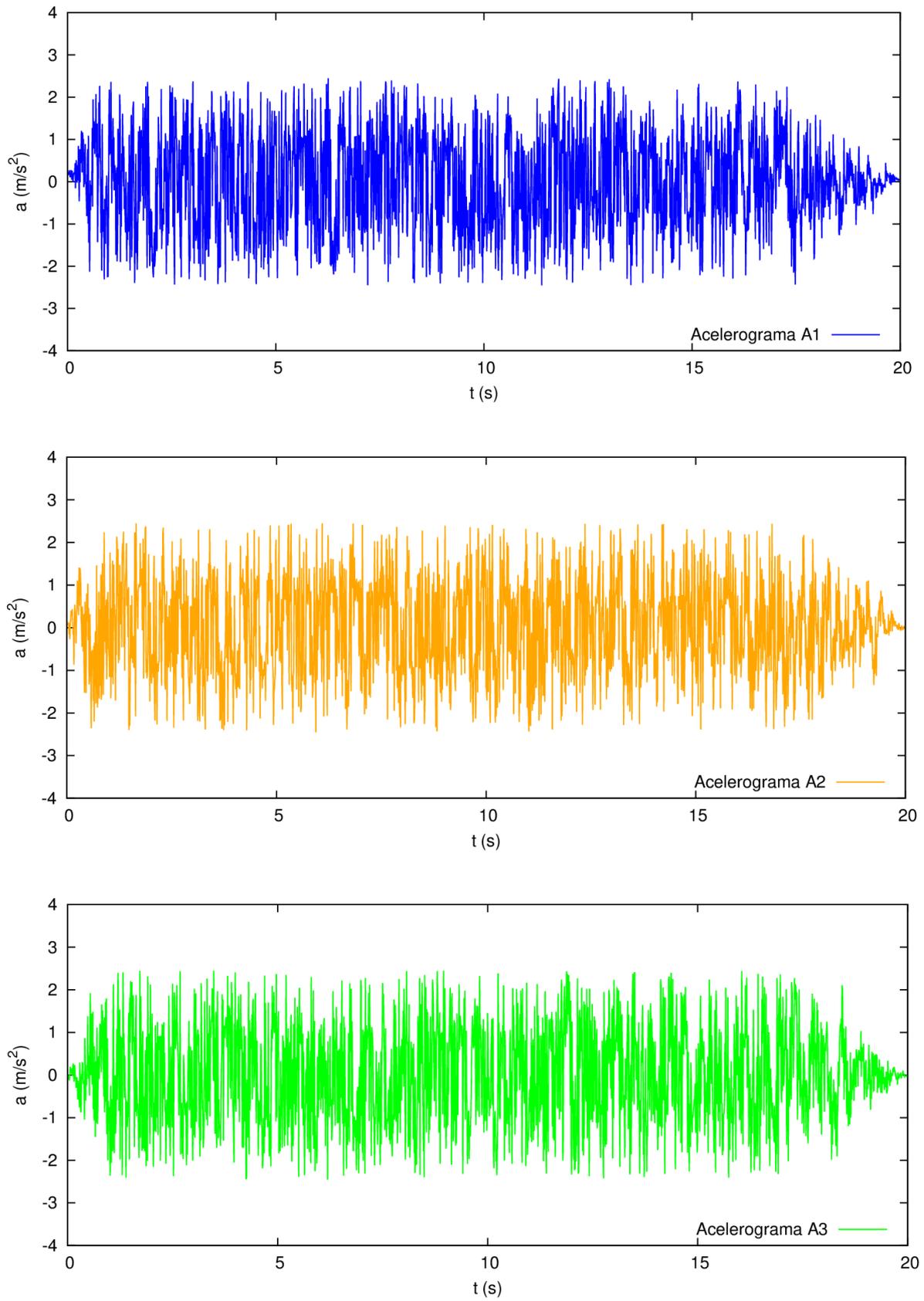


Figura 3.4: Acelerogramas artificiales para terreno Tipo A.

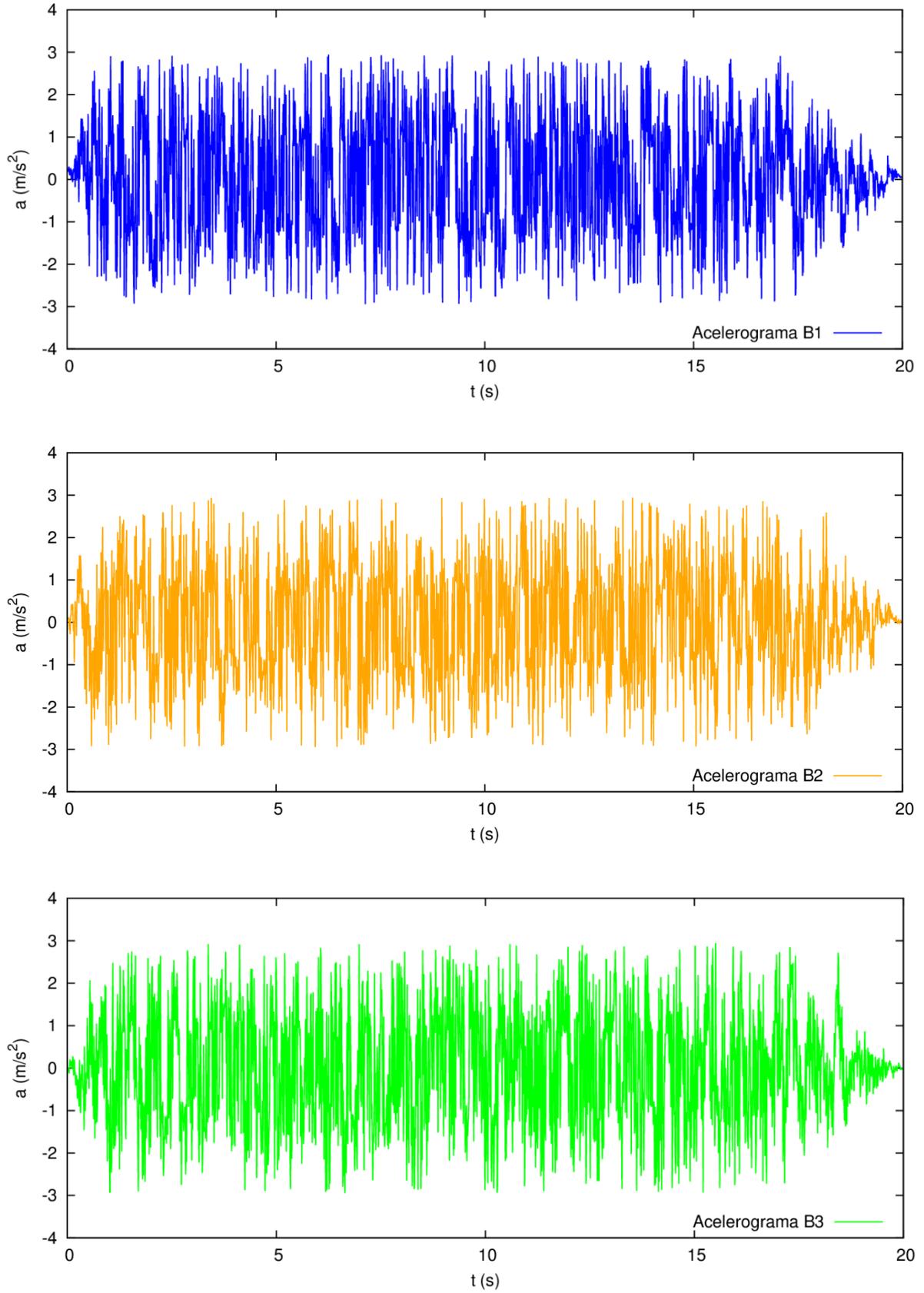


Figura 3.5: Acelerogramas artificiales para terreno Tipo B.

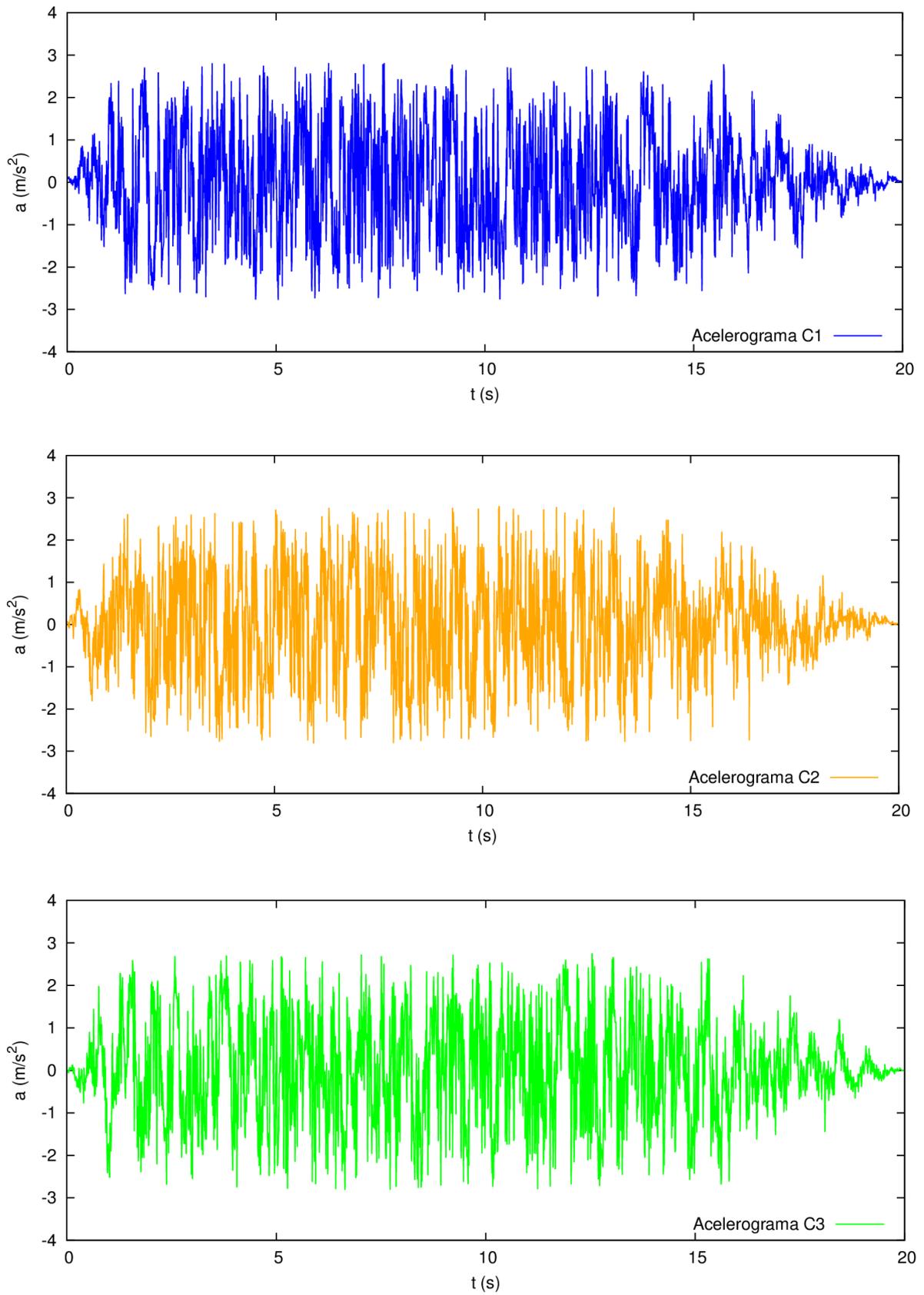


Figura 3.6: Acelerogramas artificiales para terreno Tipo C.

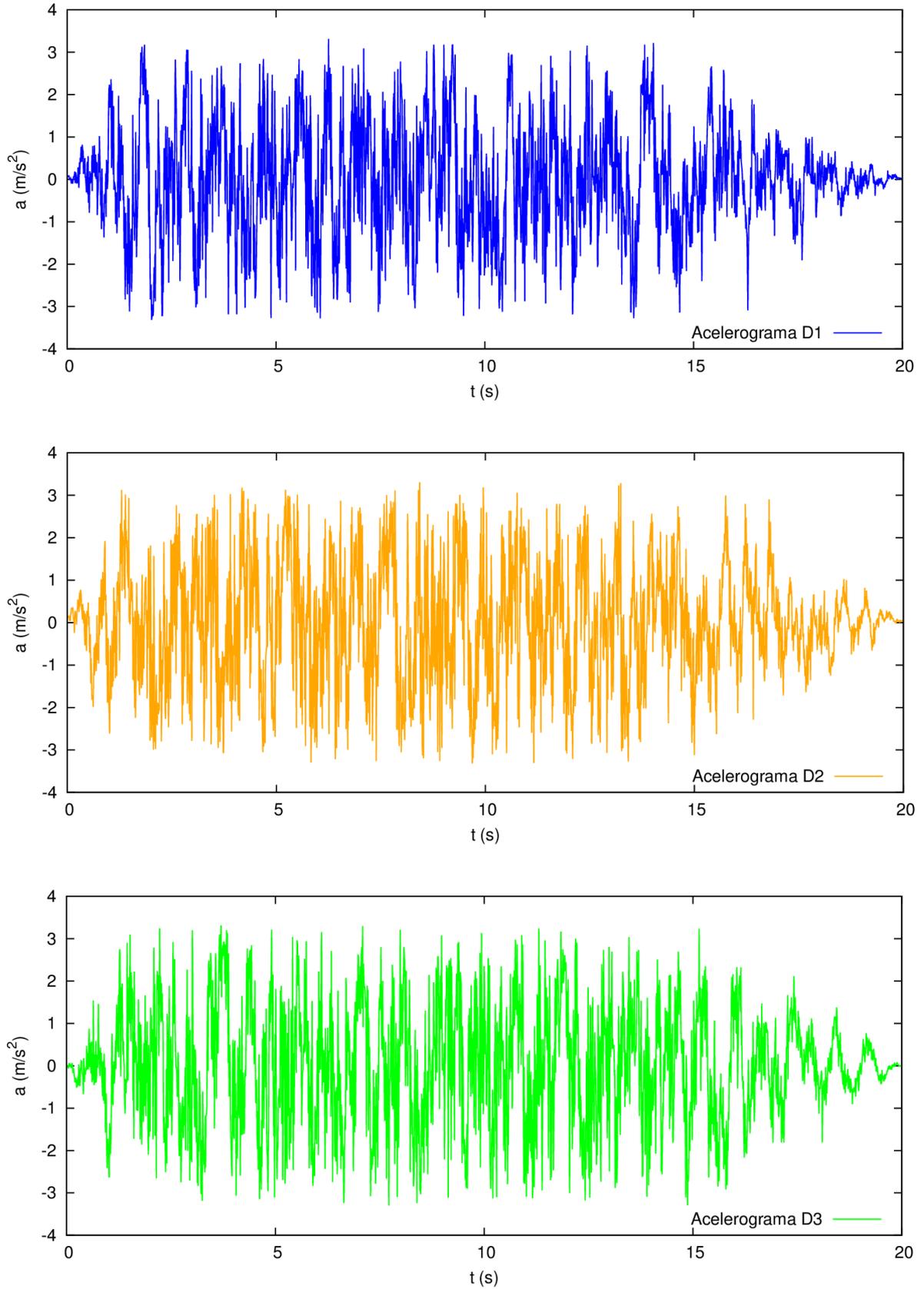


Figura 3.7: Acelerogramas artificiales para terreno Tipo D.

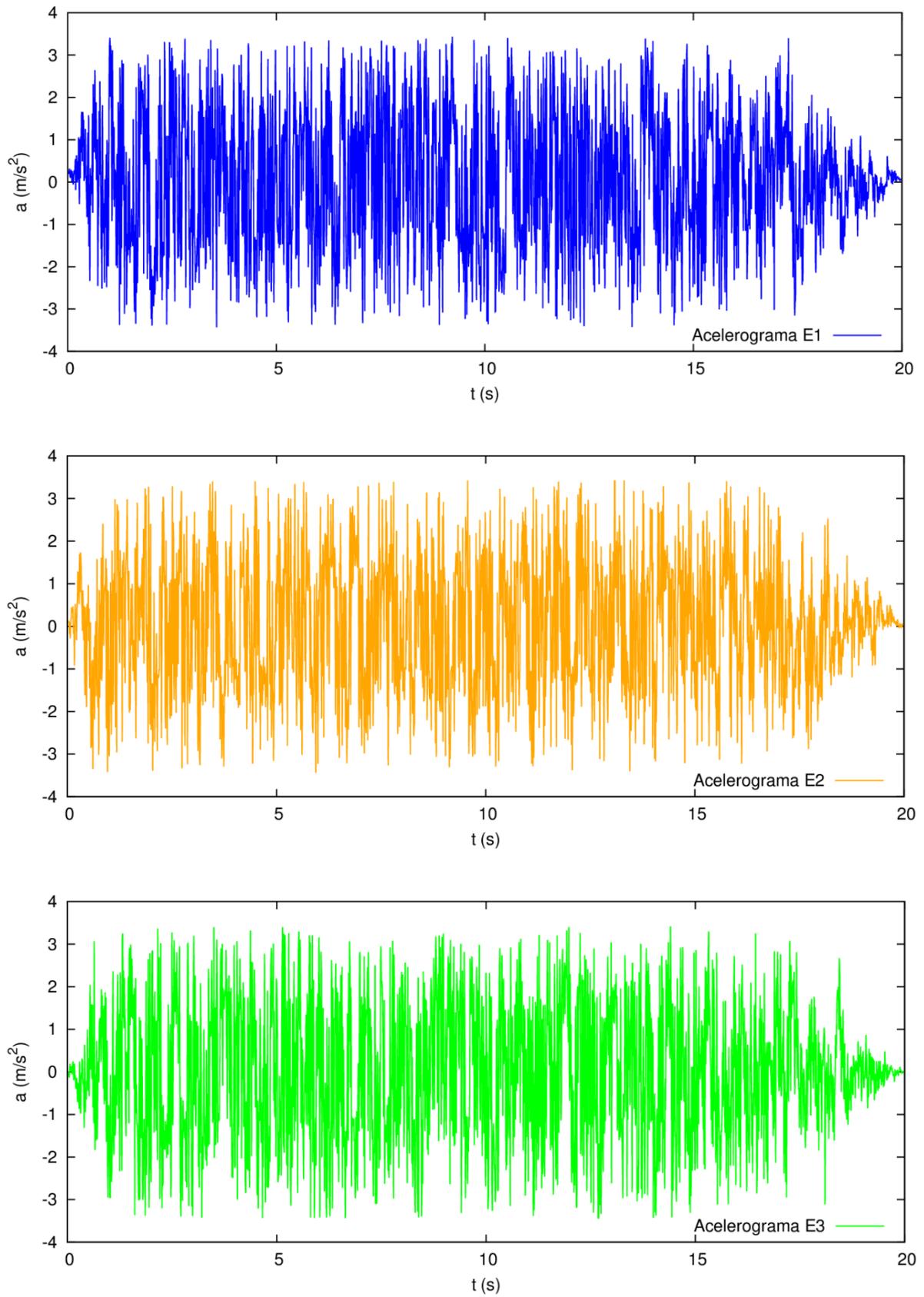


Figura 3.8: Acelerogramas artificiales para terreno Tipo E.

3.3 Resultados

3.3.1 Envoltentes de momentos

En esta sección se exponen los resultados de los casos más representativos del problema obtenidos en forma de envoltentes de momentos para las 4 configuraciones de pilote enterrado que se estudian. Las propiedades de cada configuración de pilote se detallan en la tabla 3.1.

En las figuras 3.9 a 3.19 se presentan los resultados obtenidos para una serie de perfiles estratigráficos representativos del total de casos estudiados (la totalidad de los resultados obtenidos se expone en el punto A.1 del Anexo de Resultados). Cada una de estas figuras se refiere a un perfil estratigráfico distinto y está compuesta de cuatro gráficas. A su vez, cada una de las cuatro gráficas está referida a una configuración de pilote diferente, como así se indica en la parte superior de las mismas, y en cada una de ellas se representan 3 envoltentes de momentos flectores máximos, cada una en un color distinto, correspondientes a los 3 acelerogramas según el tipo de terreno del perfil estratigráfico estudiado. El eje de ordenadas de cada gráfica representa la profundidad en metros y con signo negativo, mientras el eje de abscisas representa el momento flector máximo en $\text{kN} \cdot \text{m}$. Con líneas horizontales de puntos en color gris, se señalan las diferentes interfases del perfil estratigráfico en su profundidad correspondiente.

Analizando los resultados obtenidos se pueden sacar una serie de conclusiones. En un principio, y apoyado principalmente en trabajos de investigación como el de Dezi et al. [15], el de Mylonakis et al. [16] o el de Sica et al. [17], entre otros muchos, se esperaba que el momento flector máximo absoluto se diera, para los perfiles estratigráficos de dos o más estratos, en alguna de las interfases entre estratos o en el entorno de estas. Sin embargo, se observa que, para la práctica totalidad de los casos estudiados (la única excepción es el caso de la configuración de pilote 2 del perfil estratigráfico P4, de un sólo estrato de suelo tipo S7, el de mayor dureza de los suelos estudiados), el máximo valor de la envoltente de momentos se obtiene siempre en la cabeza del pilote, independientemente de la configuración de este o de la del perfil estratigráfico. La razón de esto puede encontrarse en que en los mencionados estudios se ensayan pilotes con diámetros inferiores a los 3 metros, mientras en el presente proyecto, orientado a la cimentación de aerogeneradores específicamente, se ensayan pilotes de gran diámetro, de 3.5 y 6 metros. Este hecho provoca la inclusión en este proyecto de un estudio de la influencia del diámetro sobre la distribución de momentos, explicado en el punto 3.3.2, con el objetivo de corroborar que esta particularidad está relacionada con el diámetro del pilote.

También se observa que, para las configuraciones de pilote 1 y 3, cuya esbeltez es en ambas $L/D = 3$, en la mayoría de los casos estudiados la evolución del momento es monótona decreciente con la profundidad, hasta hacerse nulo en la punta; incluso en algunos de estos casos la evolución sigue prácticamente una línea recta. Sin embargo, esto no se produce en aquellos casos en los que se tiene un perfil estratigráfico con un gran contraste de

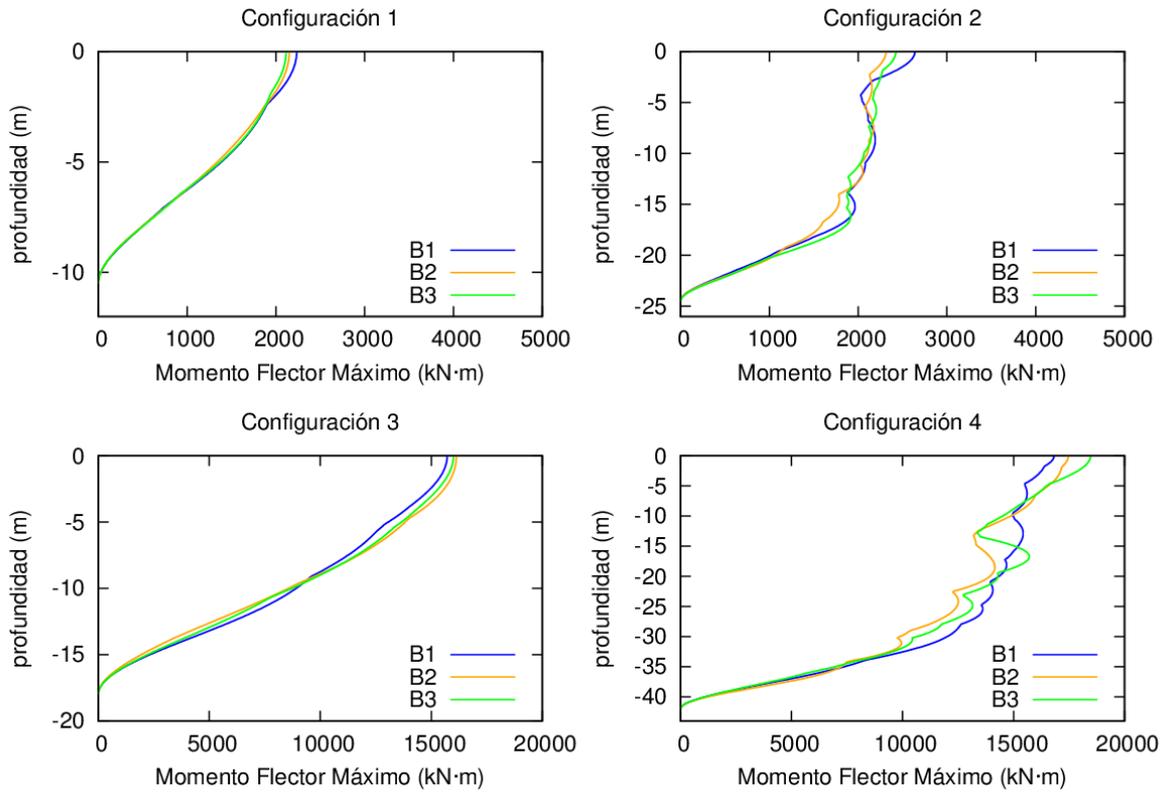


Figura 3.9: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas B1, B2 y B3 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas para el perfil estratigráfico P3.

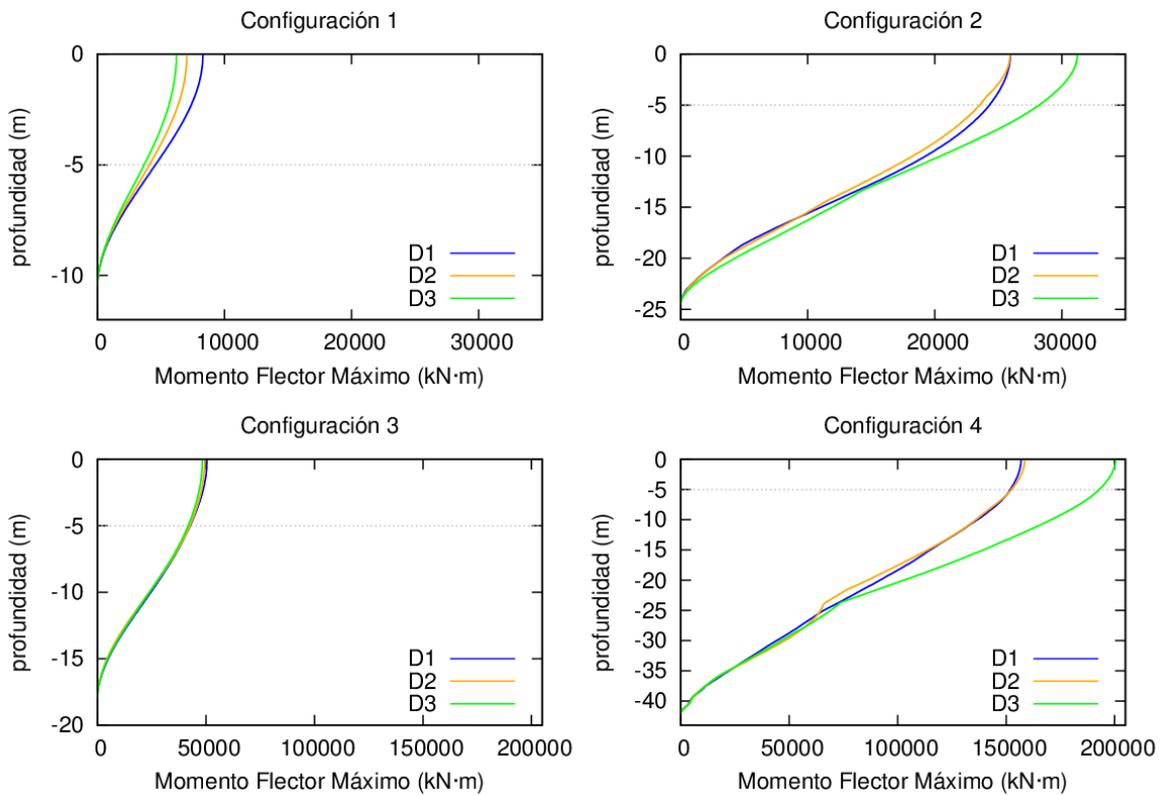


Figura 3.10: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas para el perfil estratigráfico P5 A.

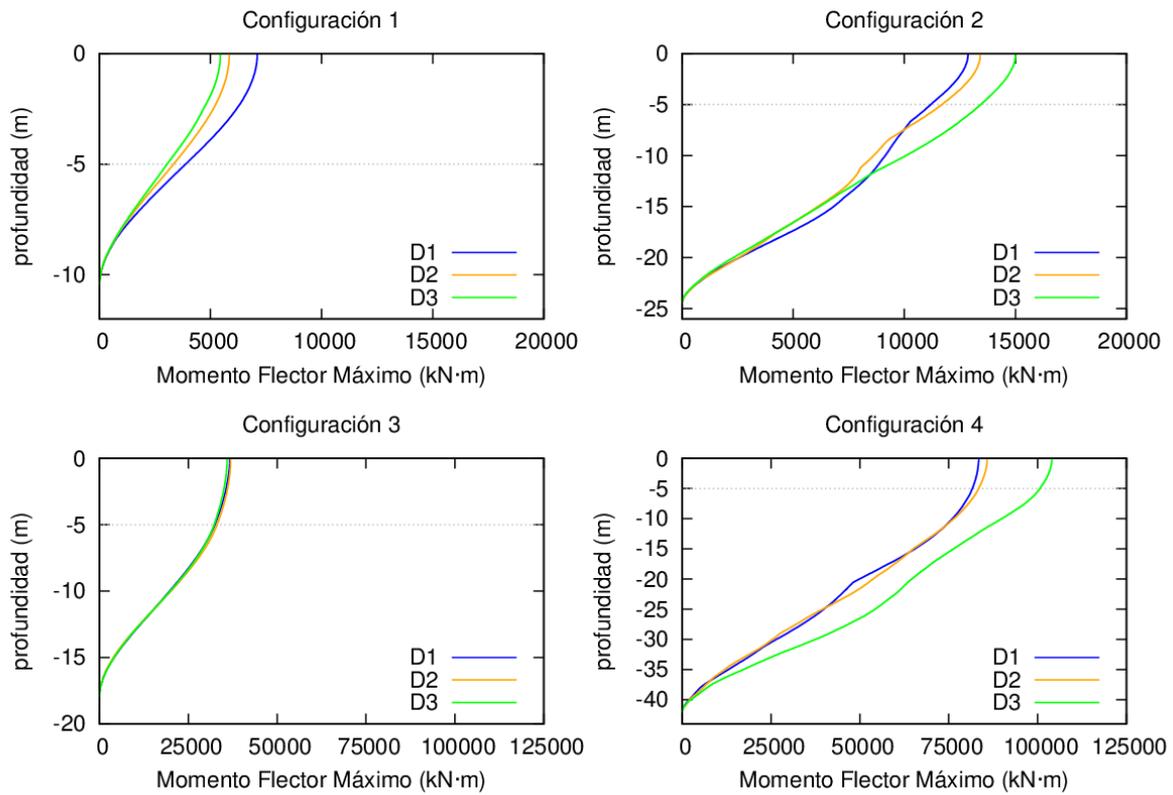


Figura 3.11: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas para el perfil estratigráfico P5 C.

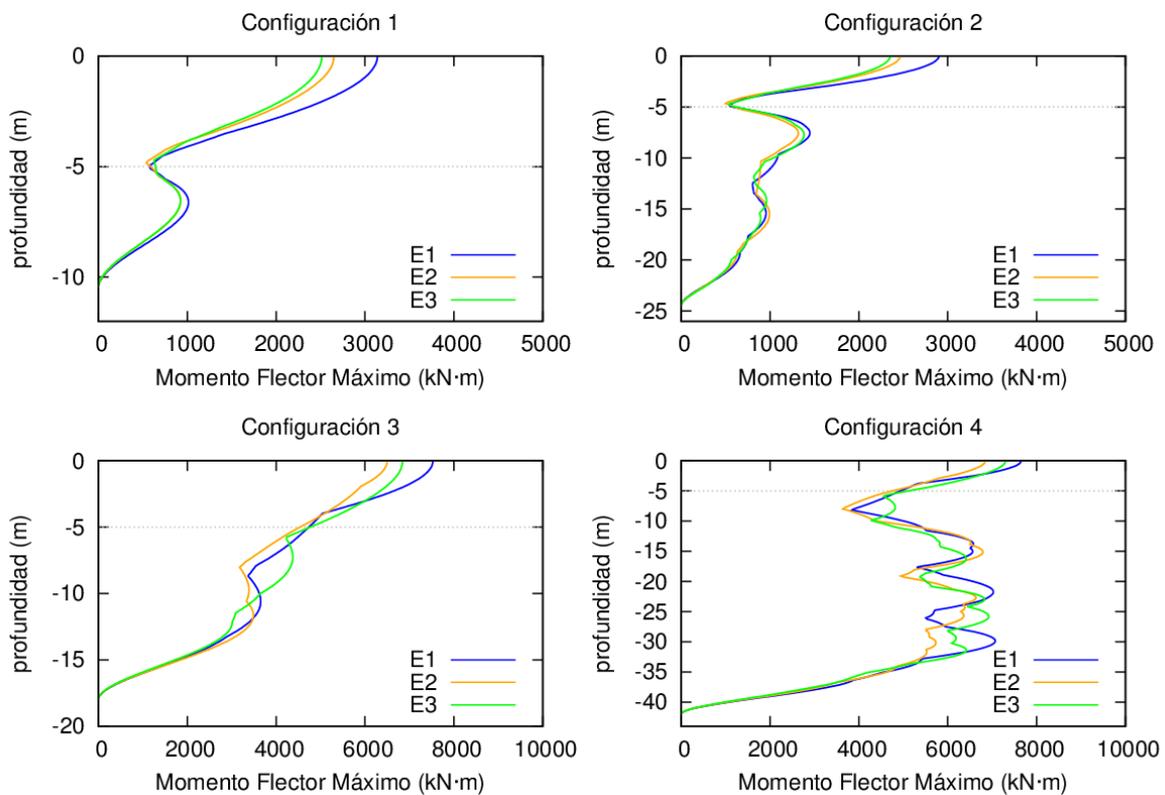


Figura 3.12: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas E1, E2 y E3 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas para el perfil estratigráfico P5 F.

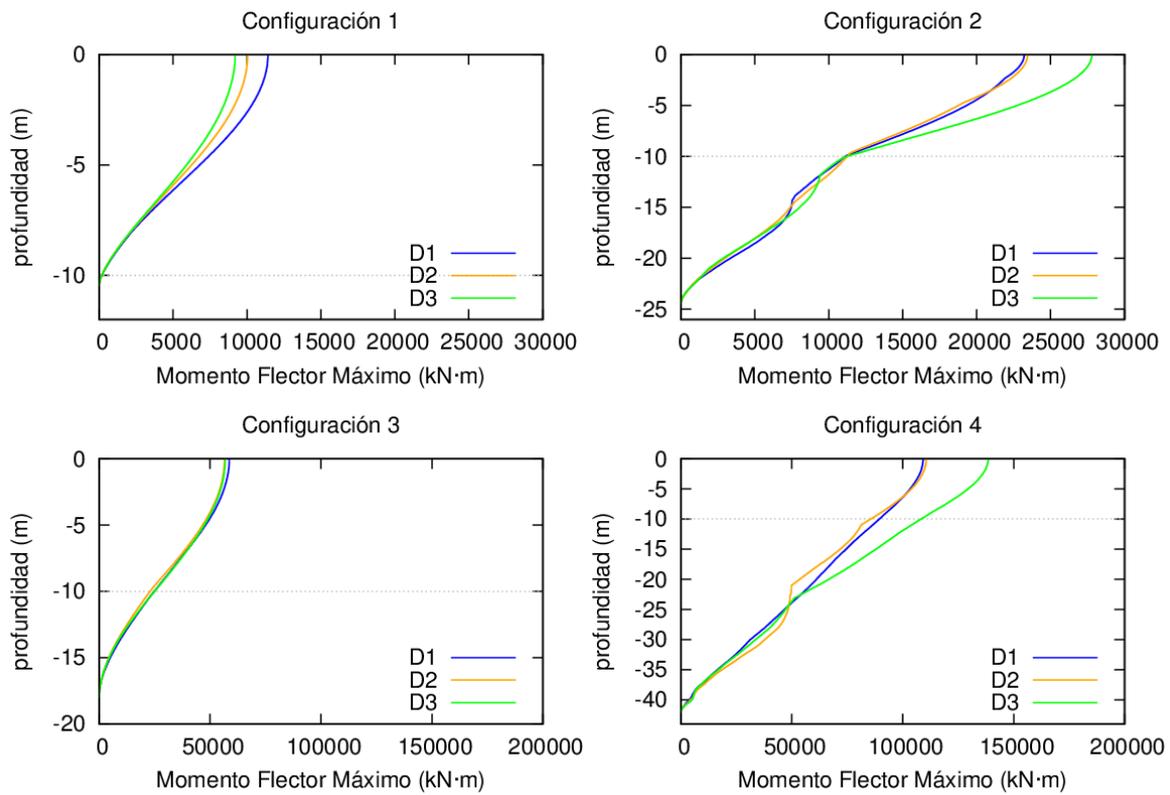


Figura 3.13: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas para el perfil estratigráfico P6 B.

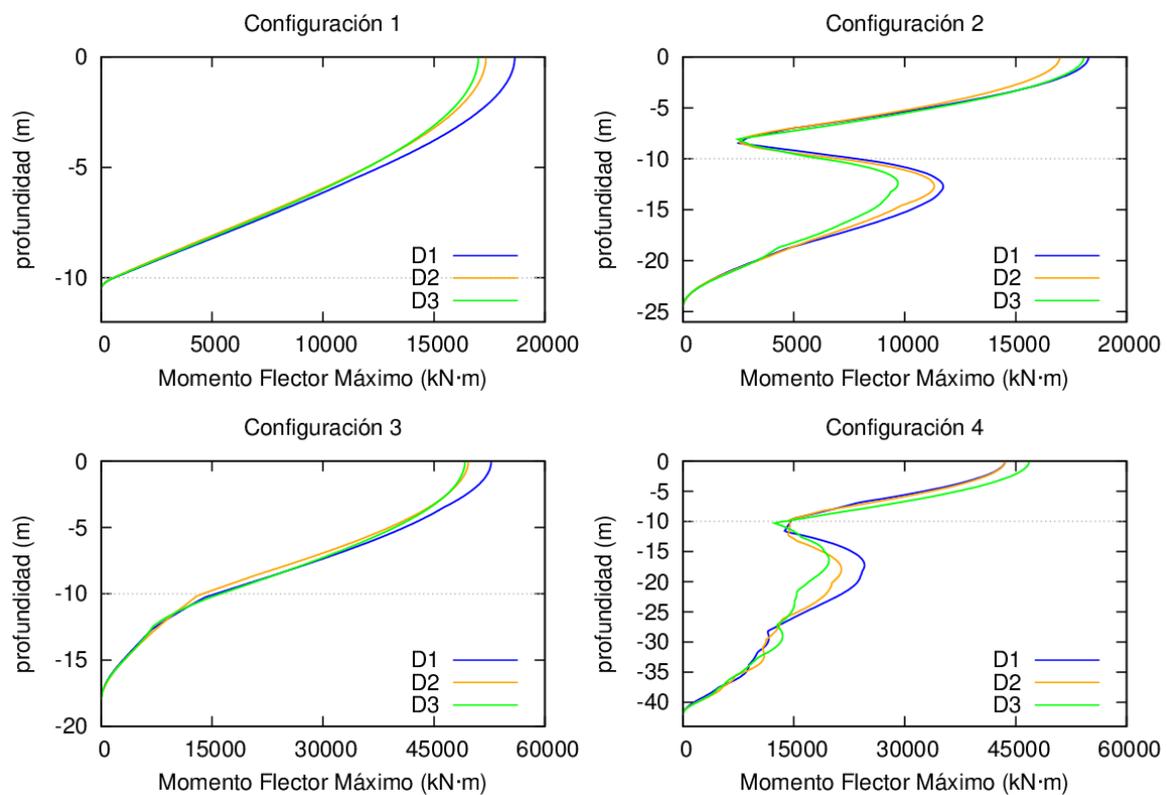


Figura 3.14: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas para el perfil estratigráfico P6 E.

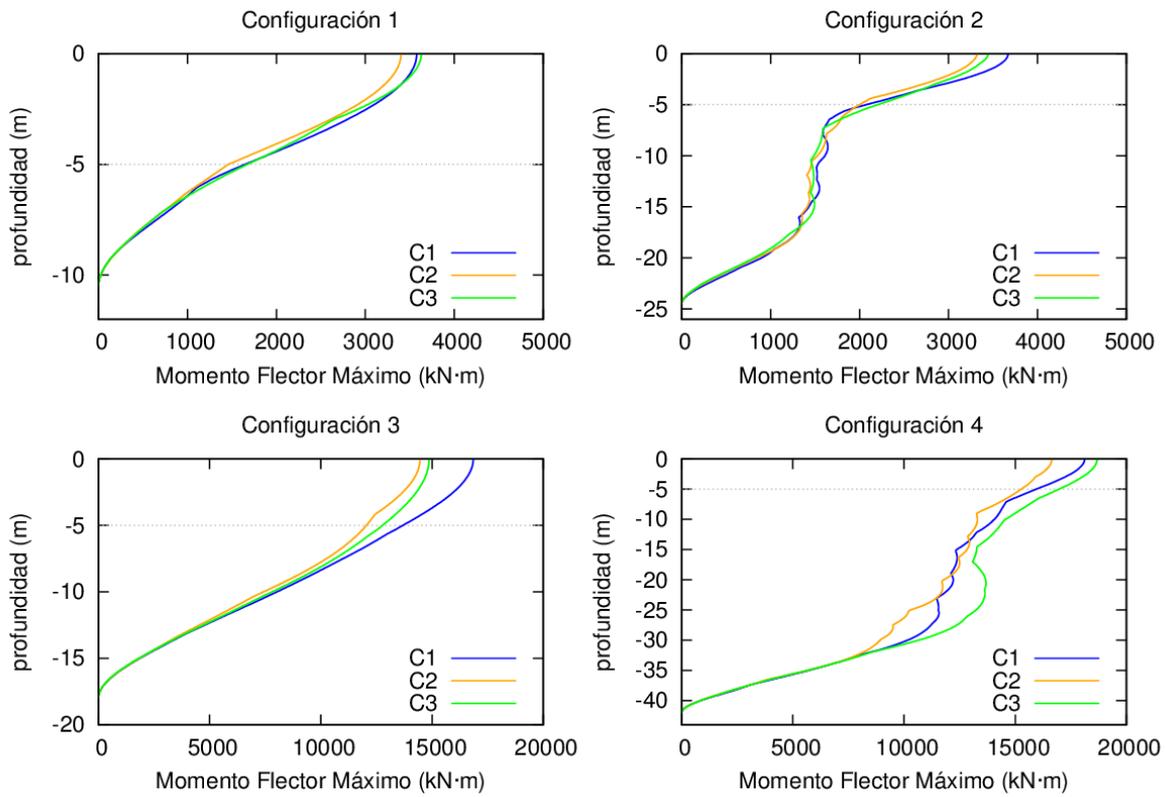


Figura 3.15: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas C1, C2 y C3 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas para el perfil estratigráfico P7 C.

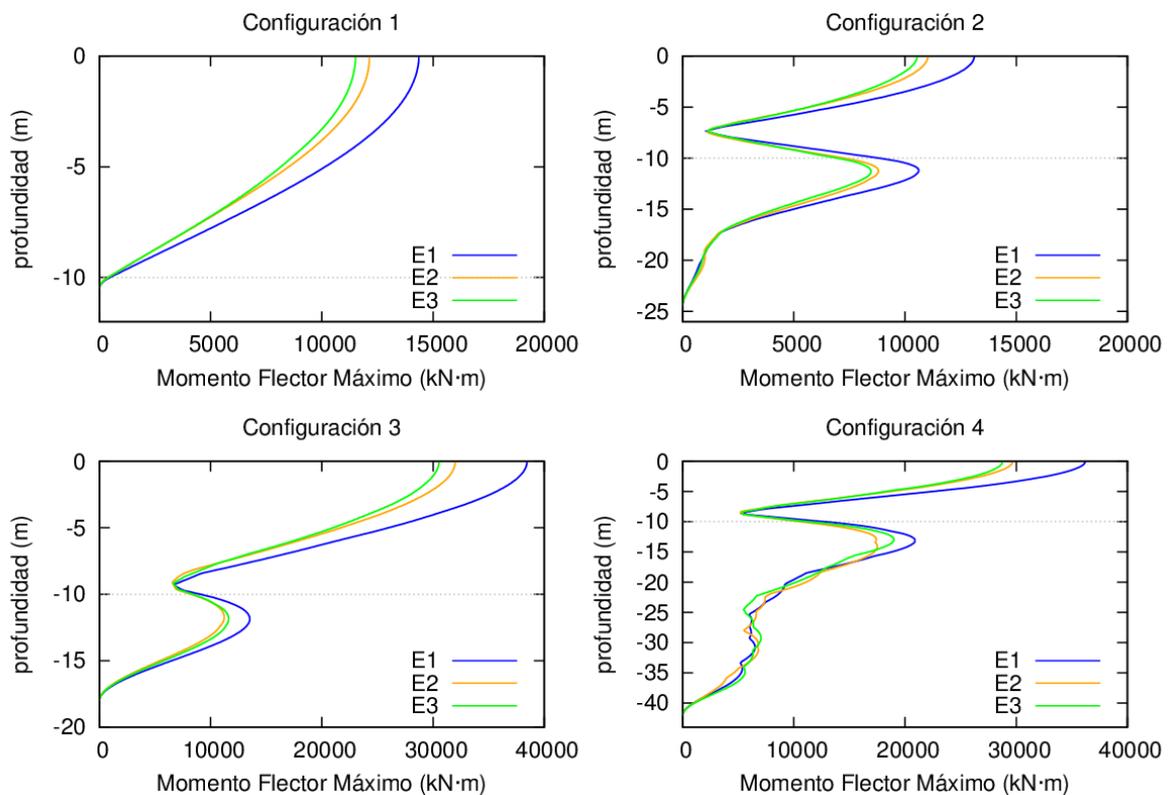


Figura 3.16: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas E1, E2 y E3 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas para el perfil estratigráfico P8 D.

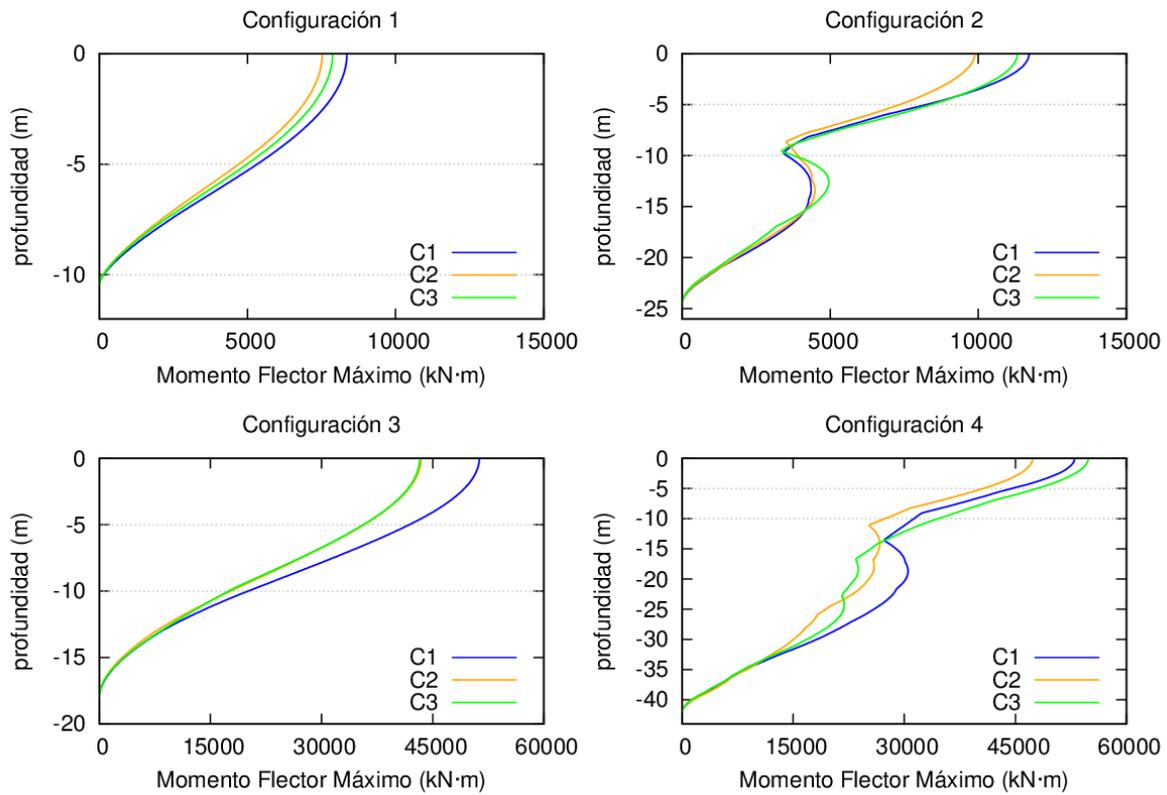


Figura 3.17: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas C1, C2 y C3 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas para el perfil estratigráfico P10.

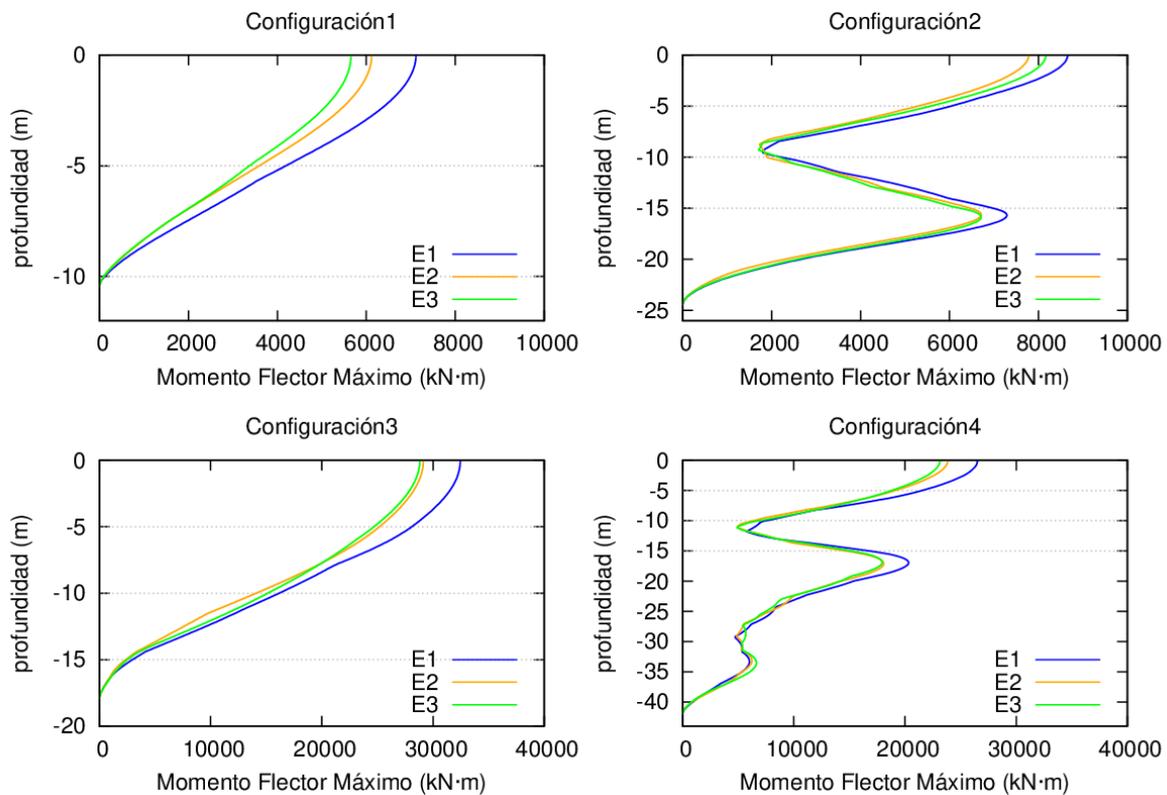


Figura 3.18: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas E1, E2 y E3 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas para el perfil estratigráfico P11.

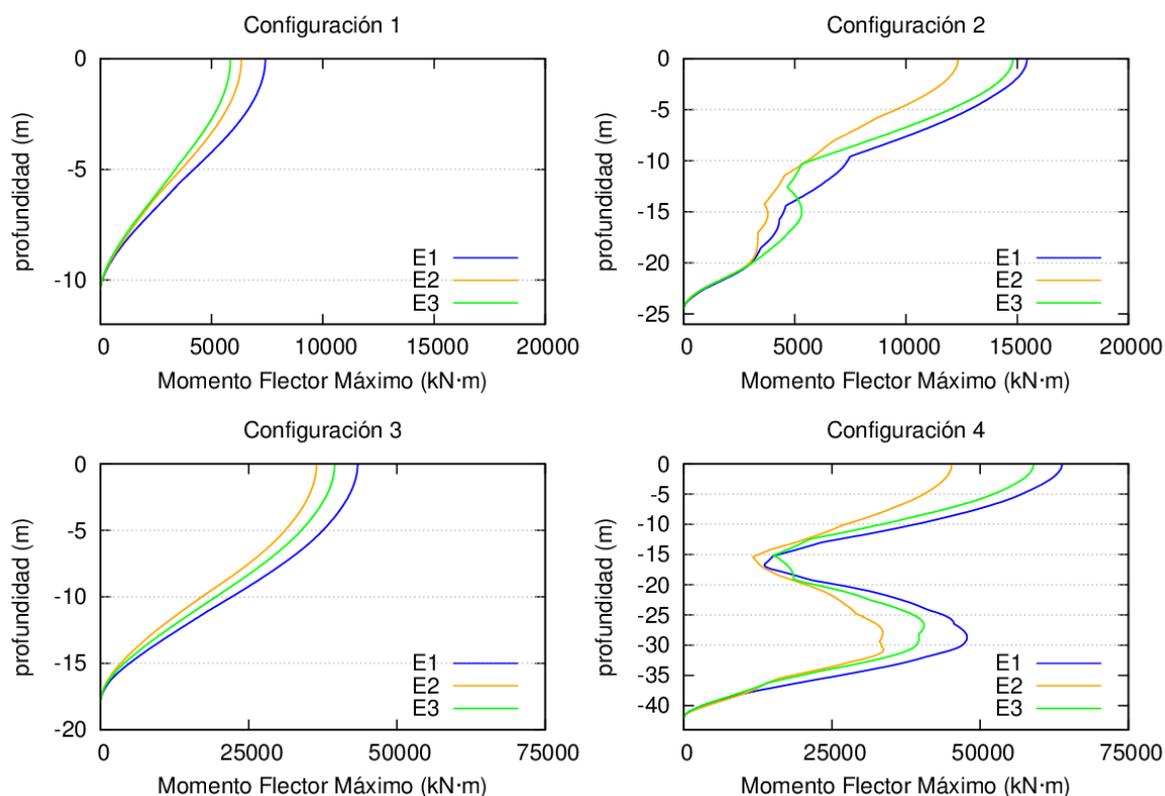


Figura 3.19: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas E1, E2 y E3 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas para el perfil estratigráfico P12.

rigidez entre estratos, como son los casos P5 F en ambas configuraciones de pilote o los casos P6 E y P8 D en la configuración de pilote 3, o un único estrato duro como el caso P3, donde la evolución del momento con la profundidad es decreciente hasta hacerse nulo en la punta pero no de forma monótona, pues presenta mínimos y máximos locales, normalmente en el entorno de las interfases entre estratos.

Para las configuraciones de pilote 2 y 4, cuya esbeltez es en ambas $L/D = 7$, ocurre prácticamente lo contrario. En la totalidad de los casos estudiados la evolución del momento decrece con la profundidad hasta hacerse nulo en la punta. Sin embargo, en la mayoría de ellos no lo hace de forma monótona, sino que presenta, especialmente en casos con un gran contraste de rigidez entre estratos, mínimos y máximos locales. Normalmente, aunque no necesariamente, se observan estos en el entorno de la interfase entre estratos cuando solamente hay dos estratos, o en el entorno de alguna de las interfases cuando el perfil estratigráfico está formado por tres o más estratos. Además, en estos últimos, por ejemplo en los perfiles P8 D y P11 para la configuración de pilote 2, y en los perfiles P11 y P12 para la configuración de pilote 4, se observa que el máximo local es de una magnitud comparable al momento máximo en la cabeza del pilote. En estas dos configuraciones de pilote, sólo en algunos de los perfiles con suelos muy blandos, como los casos P5 A y P6 A, se observa una evolución del momento monótona decreciente con la profundidad.

Se comparan ahora las configuraciones de pilote que presentan igual diámetro y distinta esbeltez. Como se ha visto, de las configuraciones de pilote estudiadas, dos presentan

esbeltez 3 y las otras dos, esbeltez 7. Se observa que, en las de mayor esbeltez (configuraciones 2 y 4), el valor del momento máximo en la cabeza del pilote es superior a las de menor esbeltez (configuraciones 1 y 3) prácticamente en la totalidad de los casos estudiados. Además, esto puede cuantificarse mediante una relación entre el valor del momento máximo en la cabeza de la configuración de mayor esbeltez y el valor del momento máximo en la cabeza de la configuración de menor esbeltez. Esta relación se establece para las configuraciones de igual diámetro y se denomina a partir de ahora como relación de momentos máximos en la cabeza. Se puede entonces establecer una clasificación apoyada en el valor de esta relación y en función de las características de los perfiles estratigráficos estudiados. Así, en perfiles estratigráficos de un sólo estrato de dureza media, la relación de momentos máximos en la cabeza es del orden de 2; para suelo duro la relación está alrededor de 1.5; sin embargo, para un estrato de suelo muy duro (perfil estratigráfico P4), contrariamente a lo expuesto, esta relación tiene un valor ligeramente inferior a 1. De igual manera, en perfiles estratigráficos de dos o más estratos se puede establecer una clasificación similar. En aquellos que presentan estratos de suelos blandos y un bajo contraste de rigidez entre estratos, la relación de momentos máximos en la cabeza tiene valor en torno a 4 ó 5; en perfiles estratigráficos formados por suelos de dureza media y con un contraste intermedio de rigidez entre estratos, la relación toma valores en torno a 2 ó 3; sin embargo, en perfiles estratigráficos con un contraste alto de rigidez entre estratos y algún estrato con un tipo de suelo duro o muy duro, la relación de momentos máximos en la cabeza está en valores cercanos a 1, siendo en alguna ocasión inferior a 1, contrario a la mayoría de los casos.

Por último, se realiza una comparación entre las configuraciones de pilote que presentan igual esbeltez y distinto diámetro. En este caso, las configuraciones 1 y 2 tienen un diámetro de 3.5 metros, y las configuraciones 3 y 4 tienen un diámetro de 6 metros. De forma análoga al caso anterior, se observa también que, en las configuraciones de mayor diámetro, el valor del momento máximo en la cabeza del pilote es superior al de las configuraciones de menor diámetro en todos los casos estudiados. Podría también establecerse una relación análoga a la anterior entre el valor del momento máximo en la cabeza de la configuración de mayor diámetro y el valor del momento máximo en la cabeza de la configuración de menor diámetro, y realizar también una clasificación basada en esta para los distintos perfiles estratigráficos estudiados. Sin embargo, esto era de esperar, pues el valor del momento es directamente proporcional al de la inercia de cada configuración de pilote, cuyo valor es su diámetro a la cuarta (D_p^4). Esto se comprueba poniendo las envolventes en forma de la derivada segunda del desplazamiento respecto a la profundidad, es decir, directamente proporcional al momento e inversamente proporcional a la inercia para cada configuración de pilote.

3.3.2 Estudio de la influencia del diámetro sobre la distribución de momentos

Como se introdujo en el punto 3.3.1, inicialmente se esperaba que el máximo valor de las envolventes de momentos obtenidas se diera, para los perfiles estratigráficos de dos o más

estratos, en alguna de las interfases entre estratos o en el entorno de estas. Esta premisa inicial se extrajo de trabajos como el de Dezi et al. [15], el de Mylonakis et al. [16] o el de Sica et al. [17], entre otros. Sin embargo, se observa que, para la totalidad de los casos estudiados (recuérdese la excepción de la configuración de pilote 2 en el perfil estratigráfico P4), el máximo valor de las envolventes de momentos se obtiene siempre en la cabeza del pilote, independientemente de la configuración de este o de la del perfil estratigráfico. La explicación a estos resultados está en que en los mencionados estudios se ensayan pilotes con diámetros inferiores a los 3 metros, mientras en el presente proyecto, orientado a la cimentación de aerogeneradores, se ensayan pilotes de gran diámetro, de 3.5 y 6 metros.

Se ha decidido entonces realizar un estudio de la influencia del diámetro sobre la distribución de momentos, para comprobar que, efectivamente, para pilotes con las mismas características que los estudiados, pero con diámetros mucho menores (entre 0.6 metros y 2 metros), y en los mismos perfiles estratigráficos, se observa en algunos de ellos, cómo el máximo valor de la envolvente de momentos se da justamente en las interfases entre estratos.

Se utilizan para este estudio las configuraciones de pilote 1, 2 y 4 expuestas en la tabla 3.1. De cada una de estas se realizan tres variaciones, en las que se cambia únicamente el valor del diámetro, y consecuentemente los parámetros relacionados con este, pero se mantienen el resto de propiedades mecánicas. Estas tres nuevas configuraciones se codifican añadiendo al número de configuración base, las letras a, b y c, en orden de diámetro creciente respectivamente. Las características de la totalidad de configuraciones de pilote ensayadas en este estudio de la influencia del diámetro se observan en la tabla 3.4, donde L_p es la longitud, D_p es el diámetro exterior y δ_p es la relación entre el diámetro interior y el diámetro exterior del pilote.

En las figuras 3.20 a 3.23 se presentan los resultados obtenidos para una serie de perfiles estratigráficos representativos del total de casos estudiados. Cada una de estas figuras se refiere a un perfil estratigráfico y está compuesta de cuatro gráficas. A su vez, cada una de las cuatro gráficas está referida a una configuración de pilote, de las expuestas en la tabla 3.5, como así se indica en la parte superior de las mismas, y en cada una de ellas se representa una envolvente de momentos flectores máximos correspondiente a un único acelerograma según el tipo de terreno del perfil estratigráfico estudiado. El eje de ordenadas de cada gráfica representa la profundidad en metros y con signo negativo, mientras el eje de abscisas representa el momento flector máximo normalizado por su diámetro a la cuarta. Con líneas horizontales de puntos en color gris, se señalan las diferentes interfases del perfil estratigráfico en su profundidad correspondiente.

Los resultados de la totalidad de los casos estudiados en este apartado se exponen en el punto A.2 del Anexo de Resultados. Debe aclararse que sólo se ha realizado el estudio para un grupo de los perfiles estratigráficos presentados en la figura 3.2., concretamente aquellos donde se observa más claramente la influencia del diámetro, que es el objetivo que se persigue con este estudio.

Analizando estos resultados se puede concluir que, efectivamente, cuando el diámetro del pilote es pequeño, y especialmente en perfiles estratigráficos de gran contraste de rigidez

entre estratos, se observa claramente cómo el momento flector máximo se produce exactamente en la interfase entre estratos. Es más evidente incluso cuanto mayor es la esbeltez del pilote, alcanzándose valores de momento flector máximo en la interfase de un valor muy superior al momento flector en la cabeza, que se sigue manteniendo como un máximo relativo. En perfiles estratigráficos de bajo contraste de rigidez entre estratos y tipos de suelo blandos, como por ejemplo el perfil P6 C para la configuración de pilote 2 y sus variaciones de diámetro (figura 3.21), esta peculiaridad se observa únicamente en la configuración de menor diámetro, pues en el resto de configuraciones, el momento en la interfase pasa a ser un máximo local. En situaciones como la del perfil estratigráfico P11, de más de 2 estratos, para la configuración de pilote 4 y sus variaciones de diámetro (figura 3.23), a pesar de la gran esbeltez del caso de menor diámetro, el momento máximo absoluto está en la cabeza del pilote, pero sí se observa claramente un momento máximo local en cada una de las interfases; estos máximos locales coincidentes con las interfases dejan de verse de forma clara conforme aumenta el diámetro de pilote en las diferentes variaciones de la configuración 4 para este perfil estratigráfico P11.

Pilote	L_p (m)	D_p (m)	δ_p
Configuración 1	10.5	3.5	0.97636
Configuración 1 - a	10.5	0.6	0.9588
Configuración 1 - b	10.5	1.2	0.9694
Configuración 1 - c	10.5	2	0.97363
Configuración 2	24.5	3.5	0.97636
Configuración 2 - a	24.5	0.6	0.9588
Configuración 2 - b	24.5	1.2	0.9694
Configuración 2 - c	24.5	2	0.97363
Configuración 4	42	6	0.97788
Configuración 4 - a	42	0.6	0.9588
Configuración 4 - b	42	1.2	0.9694
Configuración 4 - c	42	2	0.97363

Tabla 3.4: Características de las configuraciones de pilote para el estudio de la influencia del diámetro.

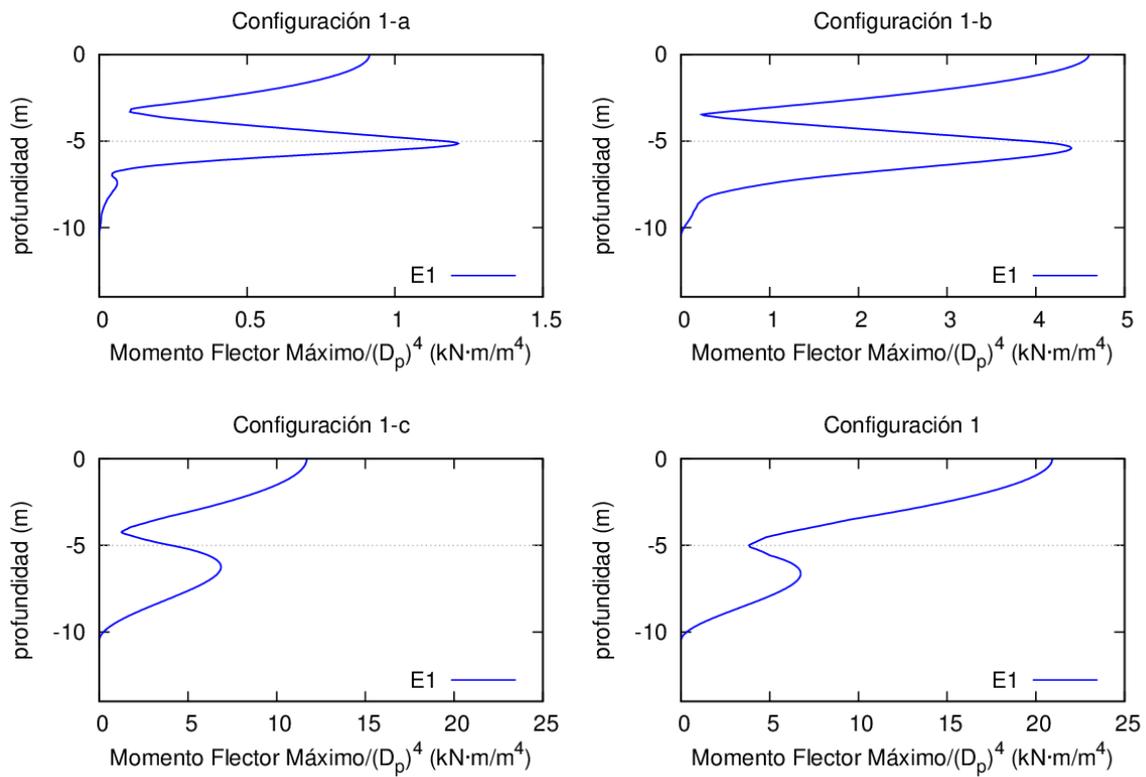


Figura 3.20: Envolvente de momentos máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma E1 en la configuración 1 de pilote en sus diferentes variaciones para la estratificación P5 F.

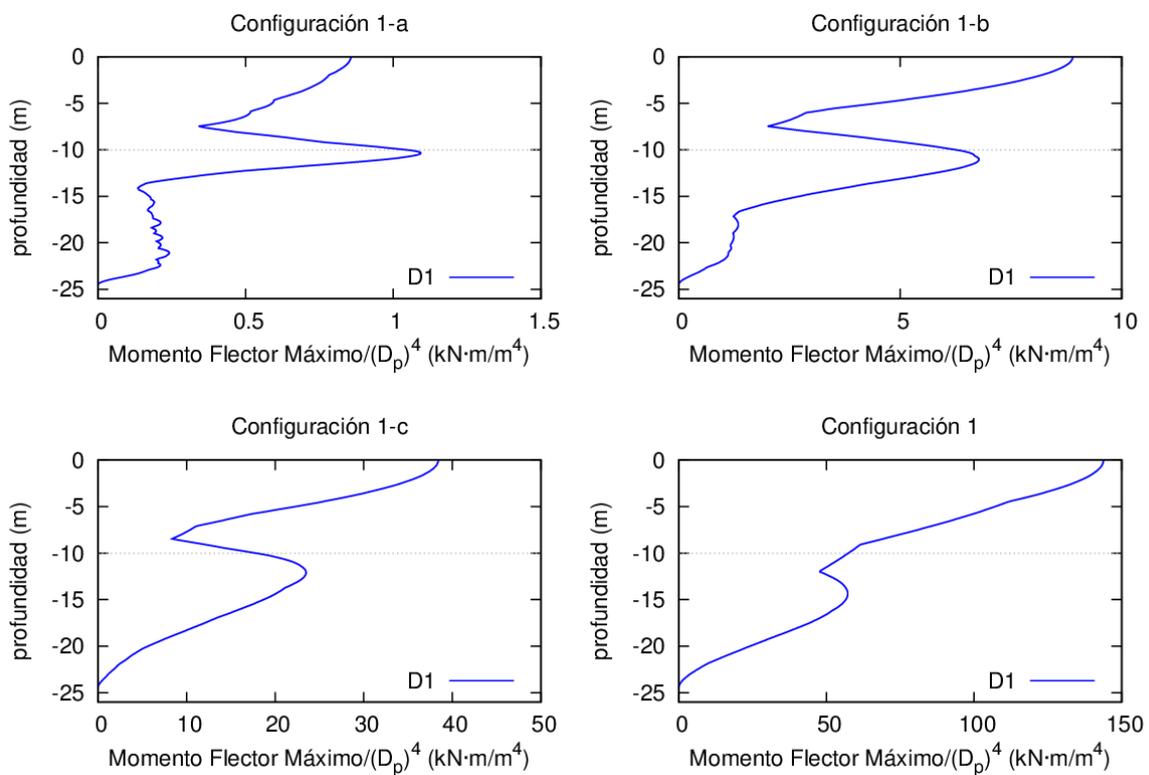


Figura 3.21: Envolvente de momentos máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma D1 en la configuración 2 de pilote en sus diferentes variaciones para la estratificación P6 C.

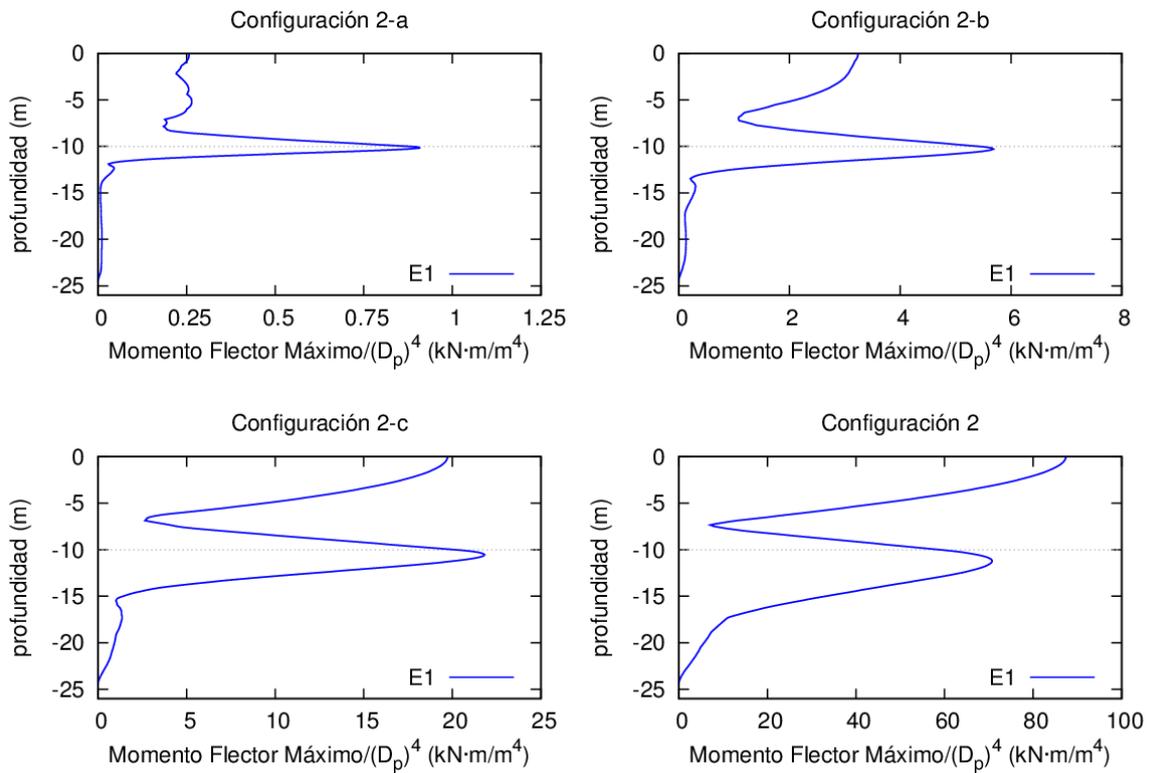


Figura 3.22: Envolvente de momentos máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma E1 en la configuración 2 de pilote en sus diferentes variaciones para la estratificación P8 D.

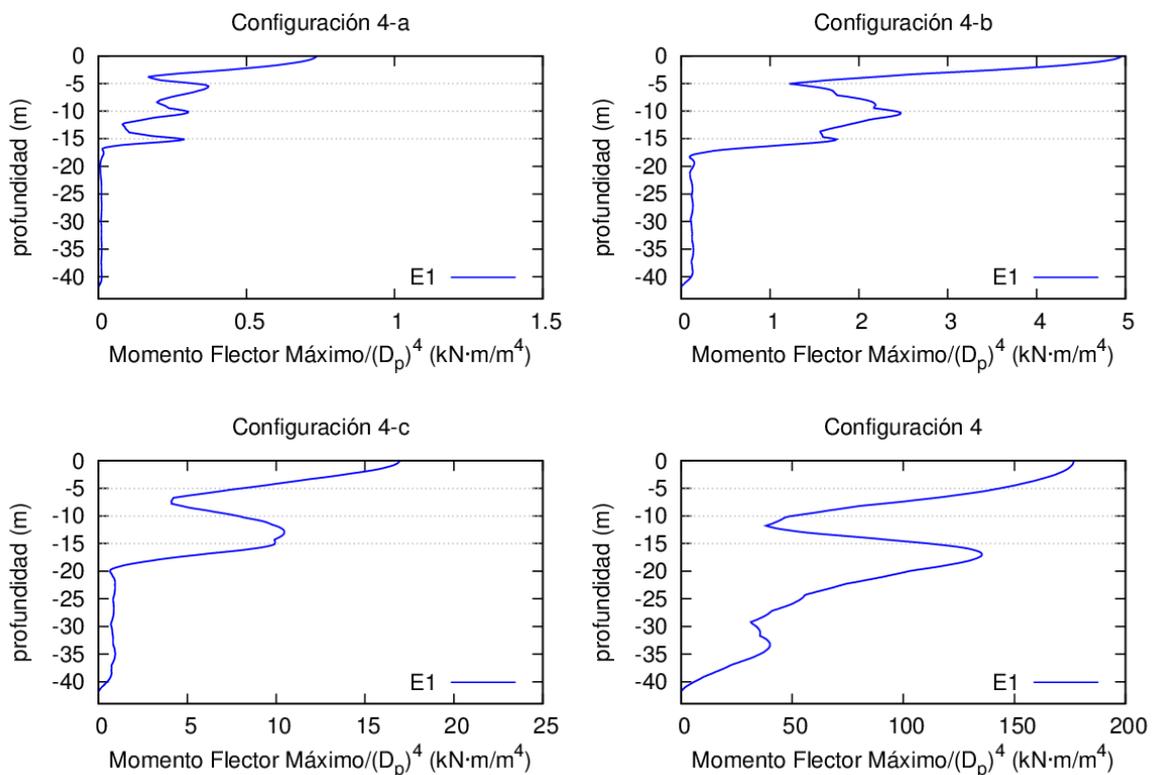


Figura 3.23: Envolvente de momentos máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma E1 en la configuración 4 de pilote en sus diferentes variaciones para la estratificación P11.

3.3.3 Estudio de la influencia de las condiciones de contorno en la punta del pilote

Tal como se expone en el punto 3.3.1, las envolventes de momentos flectores máximos se obtienen para pilotes de acero circulares huecos en cuya punta las condiciones de contorno son libertad total de desplazamientos laterales y de giro. Esto es una hipótesis simplificada, pues se considera que la influencia del terreno en la punta del pilote es despreciable. En esta sección se plantea la hipótesis de considerar que el terreno en la punta del pilote es solidario a este, de tal forma que puede asemejarse la base del pilote a un disco rígido sobre un semiespacio. El valor de esta impedancia en la base, tal como se expone en la sección 2.1.3, se obtiene según lo expuesto por Bielak [5], basado en los cálculos de Verbic y Veletsos [6]. Estos dos casos estudiados (consideración de impedancia nula o de una impedancia correspondiente a un disco rígido superficial) son extremos, por lo que la realidad probablemente se encuentre en algún punto intermedio de los resultados que se obtienen.

Se utilizan para este estudio las mismas configuraciones de pilote que en la sección 3.3.1 expuestas en la tabla 3.1. En las figuras 3.24 a 3.28 se presentan los resultados obtenidos para una serie de perfiles estratigráficos representativos del total de casos estudiados. Cada una de estas figuras se refiere a un perfil estratigráfico y está compuesta de cuatro gráficas. A su vez, cada una de las cuatro gráficas está referida a una configuración de pilote, de las expuestas en la tabla 3.1, como así se indica en la parte superior de las mismas, y en cada una de ellas se representan dos envolventes de momentos flectores máximos, una para el caso de la punta del pilote libre ($\kappa_{punta} = 0$), que es el caso ya expuesto en el punto 3.3.1, y otra para el caso de la punta con cierta impedancia ($\kappa_{punta} = \kappa_{Bielak}$), correspondientes ambas a un único acelerograma según el tipo de terreno del perfil estratigráfico estudiado. El eje de ordenadas de cada gráfica representa la profundidad en metros y con signo negativo, mientras el eje de abscisas representa el momento flector máximo en $\text{kN} \cdot \text{m}$. Con líneas horizontales de puntos en color gris, se señalan las diferentes interfases del perfil estratigráfico en su profundidad correspondiente.

Los resultados de la totalidad de los casos estudiados en este apartado se exponen en el punto A.3 del Anexo de Resultados. Debe aclararse que sólo se ha realizado el estudio para un grupo de los perfiles estratigráficos presentados en la figura 3.2.

Lo más llamativo que se observa al analizar los resultados es que, para el caso en que se supone cierta impedancia en la punta del pilote, el valor del momento flector precisamente en la punta es muy superior al valor del momento flector en la cabeza. Además, se observa en todos los casos cómo la evolución del momento flector es inicialmente decreciente, y al llegar a cierta profundidad (en la zona intermedia para las configuraciones de pilote con esbeltez 3 y en la zona de la punta para las configuraciones con esbeltez 7) se presenta un mínimo local, a partir del cual la evolución del momento pasa a ser creciente hasta alcanzar el momento flector máximo en la punta del pilote.

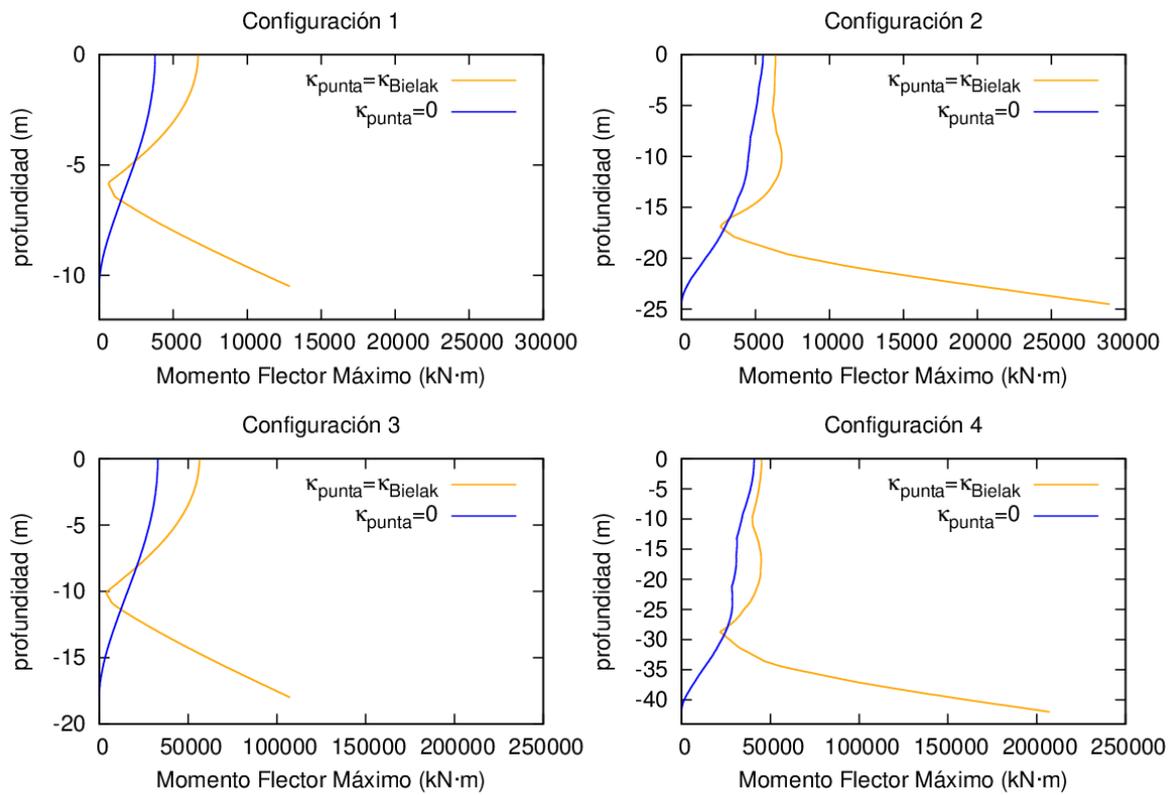


Figura 3.24: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas C1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P2.

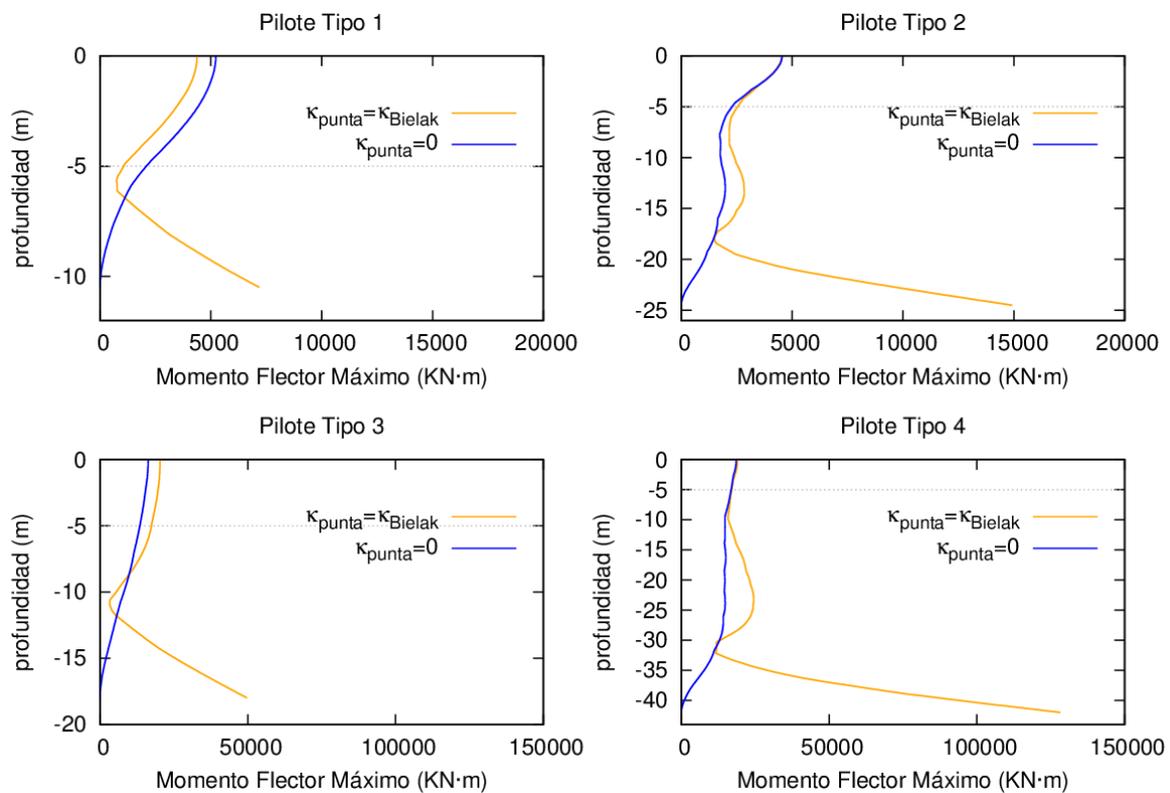


Figura 3.25: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas D1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P5E.

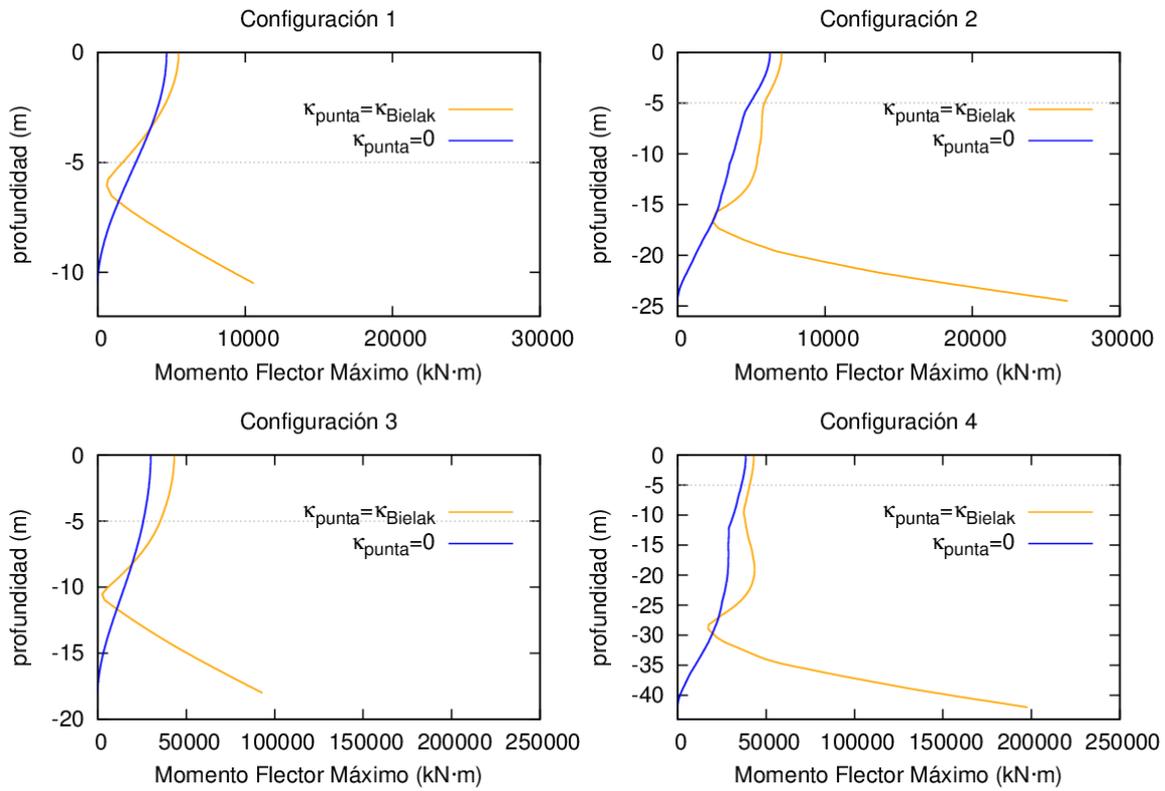


Figura 3.26: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas C1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P7 B.

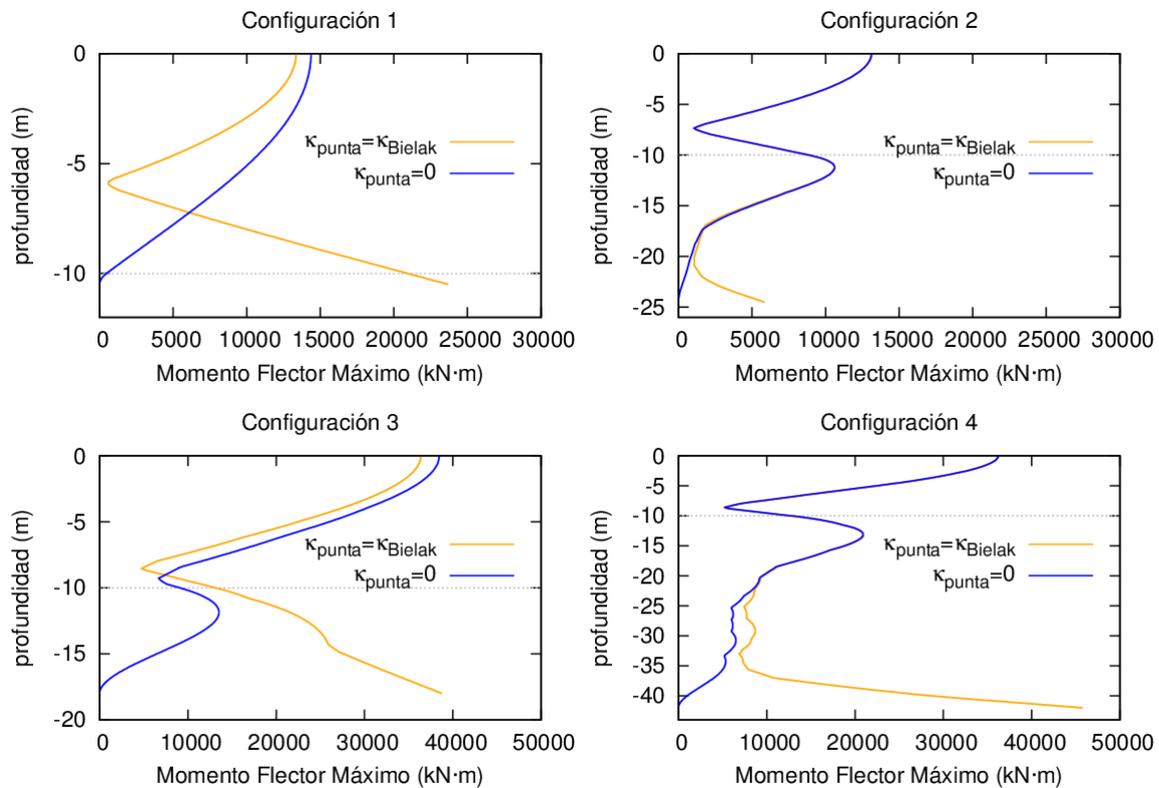


Figura 3.27: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas E1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P8 D.

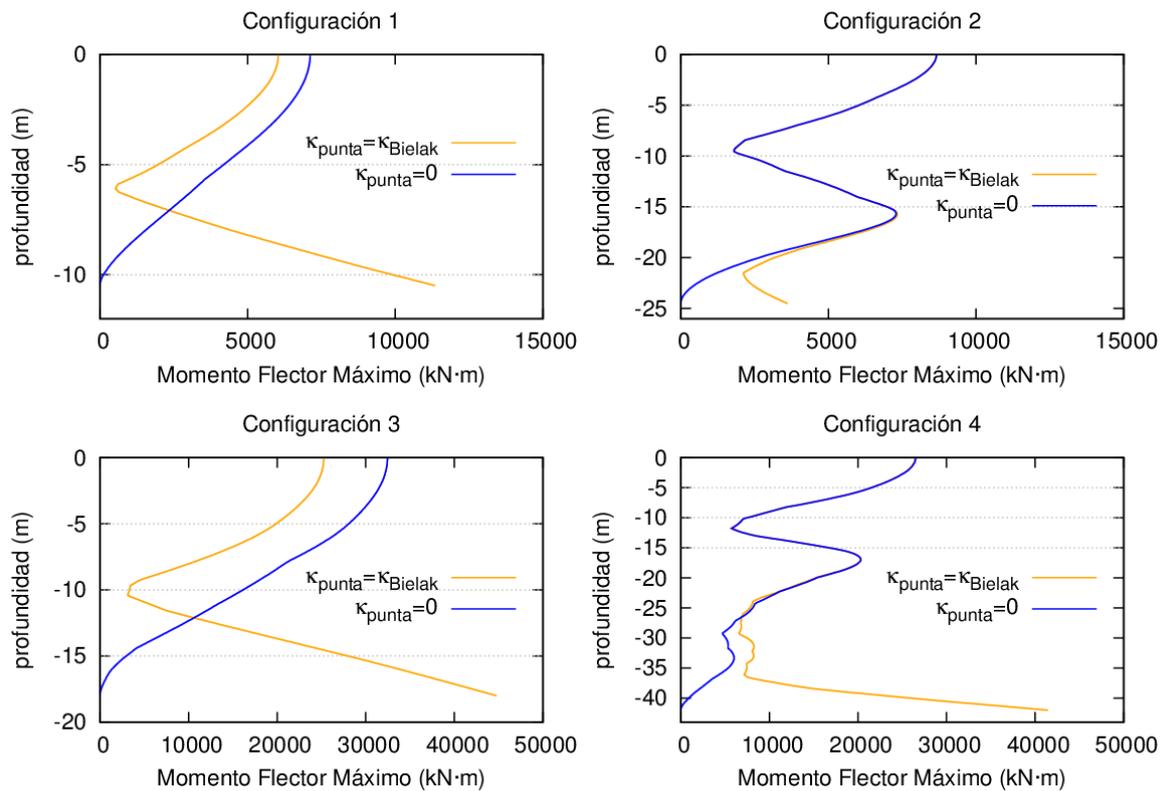


Figura 3.28: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas E1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P11.

Por otro lado, se puede ver que, en perfiles estratigráficos de bajo contraste de rigidez entre estratos y suelos principalmente blandos, para todas las configuraciones de pilote ambas envolventes tienen valores diferentes. Sin embargo, en perfiles estratigráficos de alto contraste de rigidez entre estratos y al menos un estrato con un tipo de suelo duro o muy duro, en las configuraciones de pilote de esbeltez 7 ambas envolventes tienen un tramo coincidente desde la cabeza del pilote y hasta cierta profundidad, mientras en las configuraciones de pilote de esbeltez 3 no se produce coincidencia de las envolventes en lo que a valores se refiere, pero sí se observa que la forma de las envolventes es similar hasta cierta profundidad.

Que el valor del momento flector en la punta del pilote se dispare de la forma en que se observa en los resultados no parece, en modo alguno, realista, dado que antes de que eso ocurriera plastificarían, probablemente, el terreno y/o el pilote. Por lo tanto, no se consideran aceptables los valores obtenidos en el caso de tener en cuenta la impedancia en la punta del pilote. Como se ha comentado, la realidad parece encontrarse en un punto intermedio entre ambos casos extremos estudiados. Habría que realizar entonces otro tipo de estudios para obtener resultados más cercanos a la realidad en la punta del pilote y su entorno.

3.3.4 Evolución del momento máximo en la cabeza del pilote

En esta sección se presentan gráficamente diferentes agrupaciones de los momentos máximos en la cabeza del pilote sobre los resultados obtenidos para el caso expuesto en el punto 3.3.1 y representados en el punto A.1 del Anexo de Resultados.

En la figura 3.29 se presentan dos gráficas. En ambas se representan los momentos máximos en la cabeza del pilote en función de $c_{s,30}$ para todos y cada uno de los casos estudiados, es decir, para los 28 perfiles estratigráficos y, de cada perfil estratigráfico, para cada uno de los 3 acelerogramas que le correspondan según el tipo de terreno y para las 4 configuraciones de pilote propuestas. El eje de ordenadas está referido al momento máximo en la cabeza del pilote dado en $\text{kN} \cdot \text{m}$, mientras el eje de abscisas representa el valor de $c_{s,30}$ del perfil estratigráfico en m/s . La gráfica inferior es un detalle de la superior, en la que se reduce el rango de valores de $c_{s,30}$ con el objetivo de que puedan verse los resultados con más claridad. En esta figura se observa que los mayores valores de momentos flectores máximos en la cabeza se dan para las configuraciones de pilote de mayor diámetro (configuraciones 3 y 4). Además, conforme se endurece el terreno (aumenta el valor de $c_{s,30}$) disminuye la magnitud de los momentos flectores máximos en la cabeza, hasta el punto de tener valores similares en las 4 configuraciones de pilote para los perfiles estratigráficos de mayor dureza, mientras en los más blandos se observan grandes diferencias.

La influencia del diámetro descrita hace que sea interesante explorar el caso de momentos flectores máximos en la cabeza normalizados por su diámetro a la cuarta (D_p)⁴, parámetro proporcional a la inercia de la sección del pilote. Así, en la figura 3.30 se presentan dos gráficas con los valores de los momentos máximos en la cabeza, normalizados por su diámetro a la cuarta, en función de $c_{s,30}$ para todos los casos estudiados. Esta figura es análoga a la 3.29, con la salvedad de que el eje de ordenadas está referido al momento máximo en la cabeza del pilote normalizado. En esta ocasión se observa cómo los mayores valores de momentos máximos normalizados se dan para las configuraciones de mayor longitud (configuraciones 2 y 4).

En la figura 3.31 se presentan gráficamente los valores de momentos flectores máximos en la cabeza para todos los casos estudiados, pero en esta ocasión agrupados en función del tipo de terreno que le corresponde a cada perfil estratigráfico según el EC8-1 [7]. El eje de ordenadas está referido al momento máximo en la cabeza del pilote, mientras el eje de abscisas representa el tipo de terreno según el EC8-1 [7]. En ella se ve claramente que son los terrenos tipo D, de baja dureza, los que presentan unos valores mayores de momentos máximos en la cabeza. Los terrenos tipo A y B, los más duros, tienen los valores más bajos, mientras el tipo C, de dureza media, presenta valores intermedios. En los terrenos tipo E, de dureza intermedia pero con un estrato muy duro, se observan valores intermedios similares a los de tipo C. Igual que en la figura 3.29, los mayores valores se corresponden con las configuraciones de pilote de mayor diámetro.

La figura 3.32 es análoga a la 3.31 pero abordando el caso de los momentos flectores máximos normalizados por su diámetro a la cuarta. La única diferencia es que el eje de ordenadas representa los momentos flectores máximos normalizados. Aquí, son también los

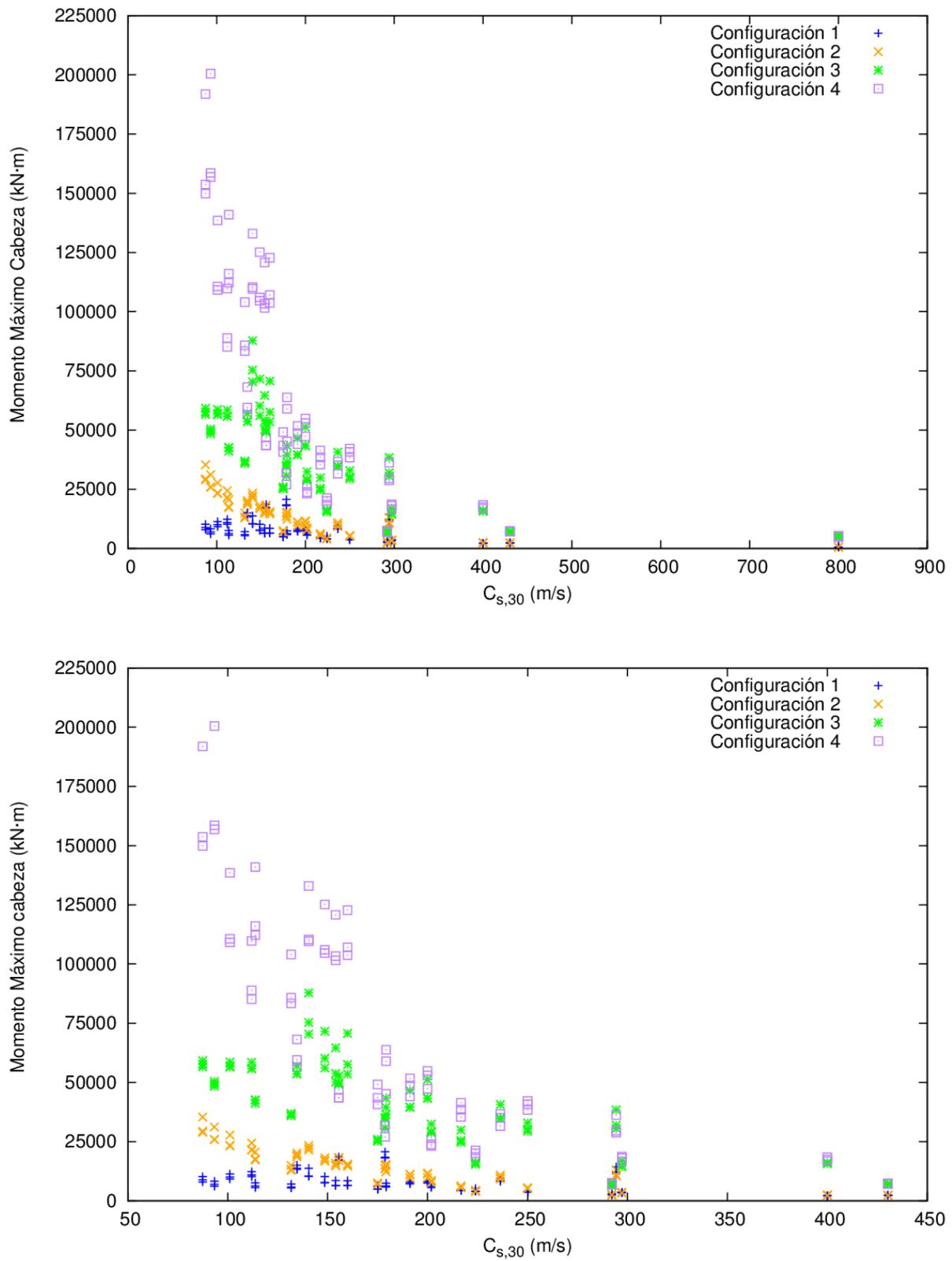


Figura 3.29: Evolución del momento máximo en la cabeza para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función de $c_{s,30}$ (en la figura inferior se expone un detalle para $c_{s,30}$ entre 50 y 450 m/s).

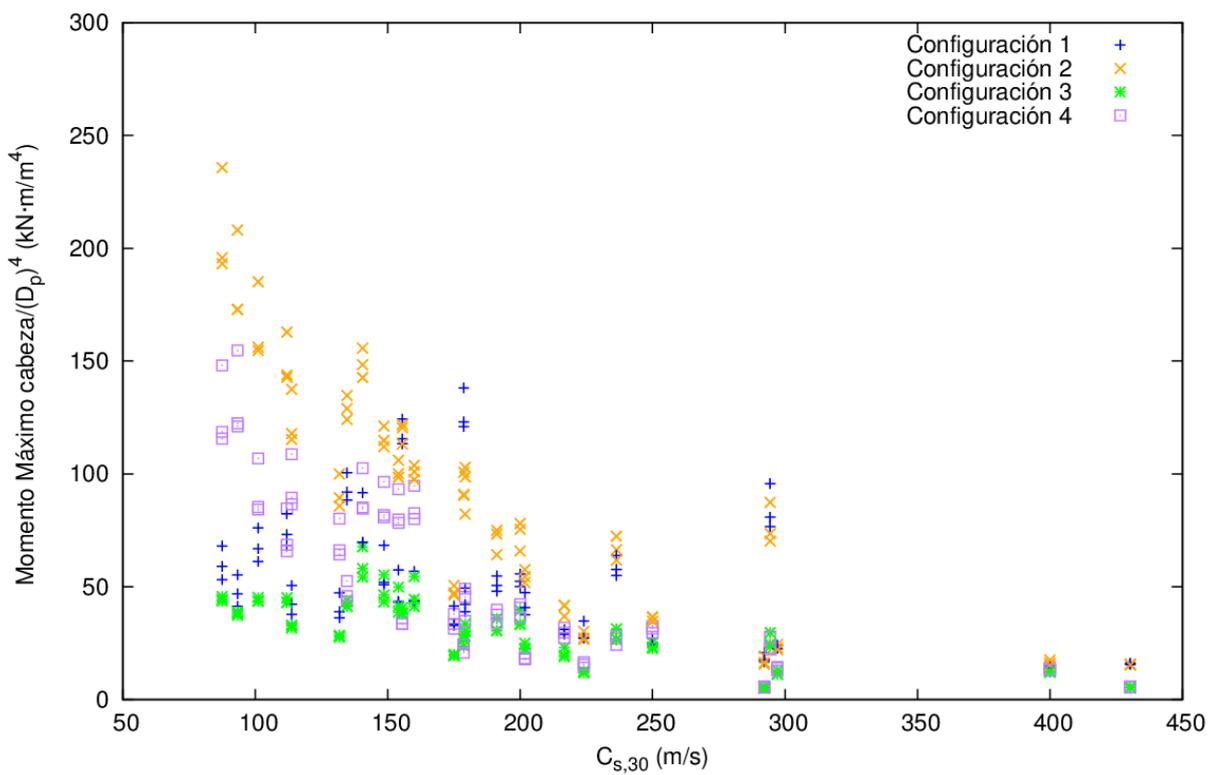
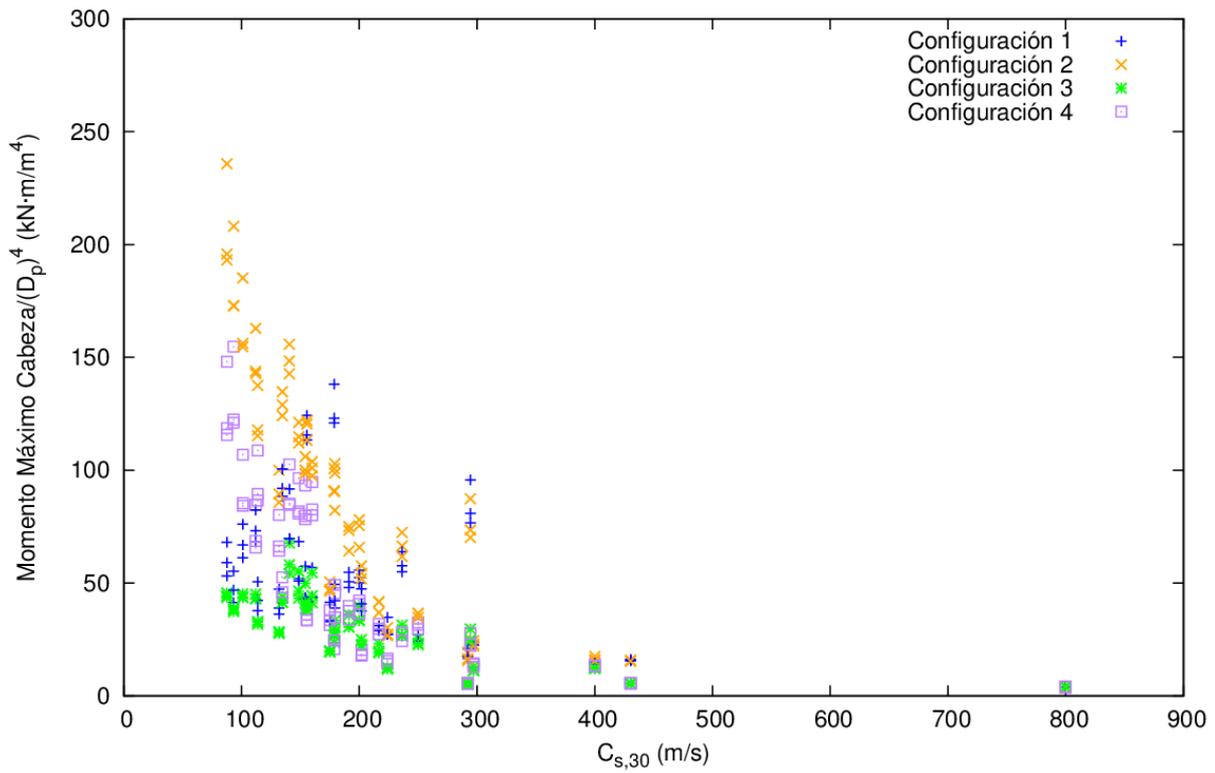


Figura 3.30: Evolución del momento máximo en la cabeza, normalizado por $(D_p)^4$, para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función de $C_{s,30}$ (en la figura inferior se expone un detalle para $C_{s,30}$ entre 50 y 450 m/s).

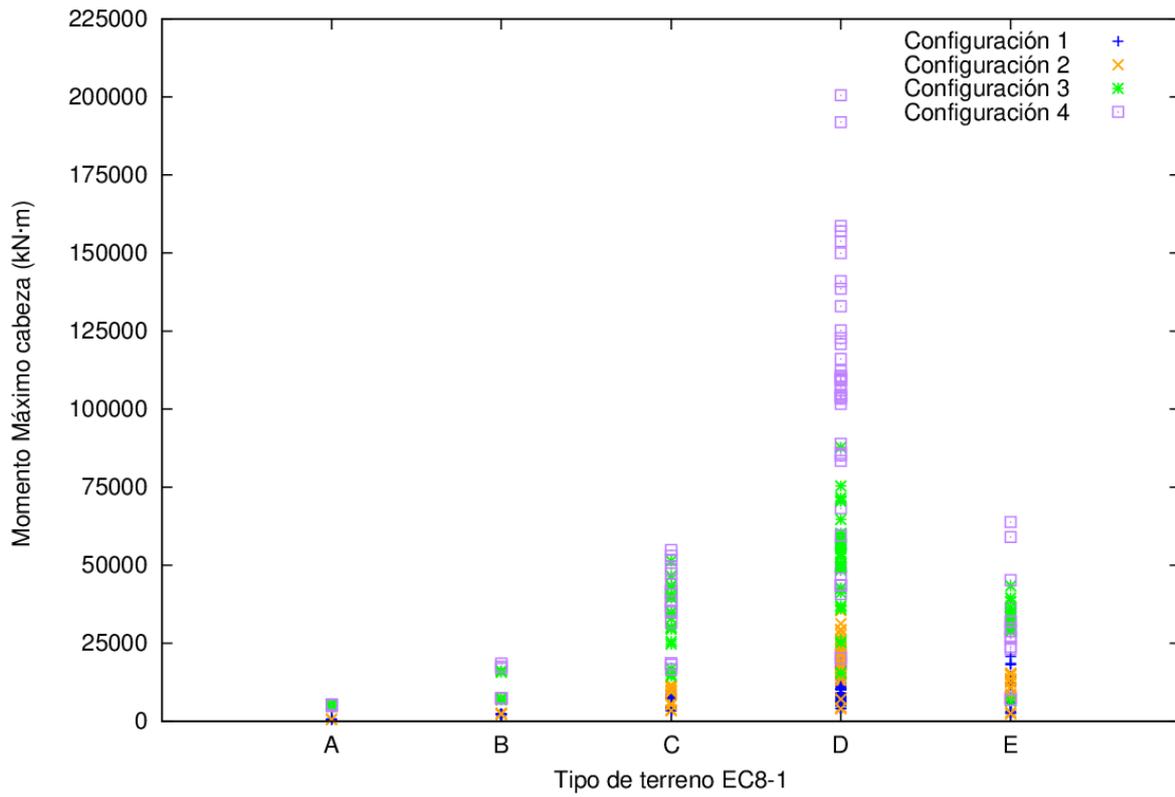


Figura 3.31: Evolución del momento máximo en la cabeza para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función del tipo de terreno según EC8-1.

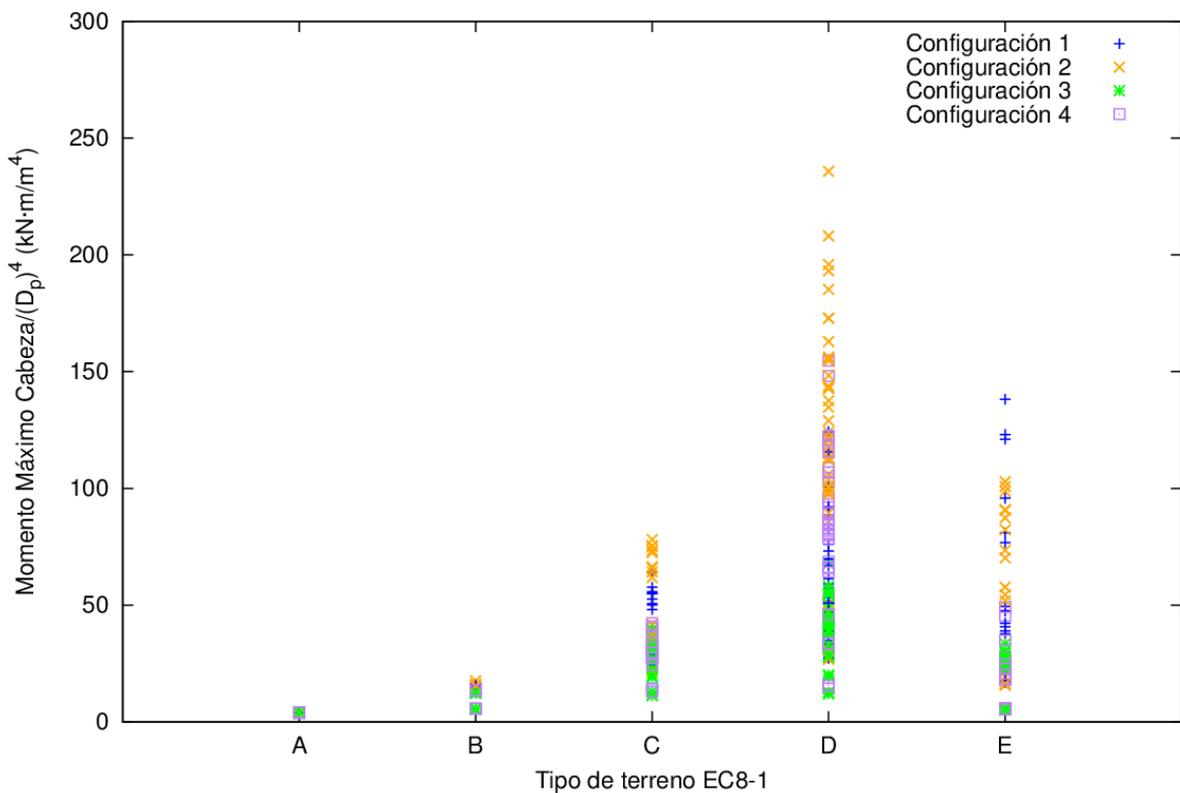


Figura 3.32: Evolución del momento máximo en la cabeza, normalizado por $(D_p)^4$, para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función del tipo de terreno según EC8-1.

terrenos tipo D los que muestran los mayores momentos máximos en la cabeza normalizados por su diámetro a la cuarta. Los terrenos tipo C y E presentan valores intermedios, mientras los terrenos tipo A y B tienen valores muy bajos de momentos máximos normalizados. Atendiendo a la configuración de pilote, en este caso se observa cómo las que presentan mayores valores para todos los tipos de terreno son las configuraciones 1 y 2, que son las de menor diámetro.

3.3.5 Evolución del momento máximo bajo el primer estrato

En esta sección se presentan gráficamente diferentes agrupaciones de los momentos máximos bajo el primer estrato de cada perfil estratigráfico sobre los resultados obtenidos para el caso expuesto en el punto 3.3.1 y representados en el punto A.1 del Anexo de Resultados.

Las figuras 3.33 a 3.36 son análogas respectivamente a las 4 figuras del punto 3.3.4, la única diferencia es que se representa el momento flector máximo bajo el primer estrato en lugar del momento flector máximo en la cabeza. Se observan muchos casos, especialmente visibles en las configuraciones de pilote de mayor diámetro y para terrenos blandos, en los que los momentos máximos bajo el primer estrato son de valor similar a los momentos máximos en la cabeza del pilote estudiados en el punto anterior. Sobre todo, se nota esta similitud en perfiles estratigráficos donde el primer estrato tiene una potencia de 5 metros. Este fenómeno se estudiará más detenidamente posteriormente en el punto 3.3.6.

En la figura 3.33 se observa que los mayores valores de momentos flectores máximos bajo el primer estrato se dan para las configuraciones de pilote de mayor diámetro (configuraciones 3 y 4). Conforme se endurece el terreno (aumenta el valor de $c_{s,30}$) disminuye la magnitud de los momentos flectores bajo el primer estrato.

En la figura 3.34 los mayores de momentos máximos normalizados se dan para las configuraciones de mayor longitud (configuraciones 2 y 4). Igualmente, a medida que aumenta el valor de $c_{s,30}$ del terreno, disminuye la magnitud de los momentos máximos bajo el primer estrato.

En la figura 3.35 son los terrenos tipo D los que presentan unos valores mayores de momentos máximos bajo el primer estrato. Los terrenos tipo A y B tienen los valores más bajos, mientras los tipo C y E presentan valores intermedios. Las configuraciones de pilote de mayor diámetro tienen mayores valores de momentos máximos bajo el primer estrato.

En la figura 3.35, análoga a la 3.36 pero con los momentos normalizados por el diámetro a la cuarta, se distribuyen los valores de igual forma en cuanto al tipo de terreno. Sin embargo, al disminuir la influencia del diámetro, son las configuraciones de mayor longitud las que presentan mayores valores de momentos.

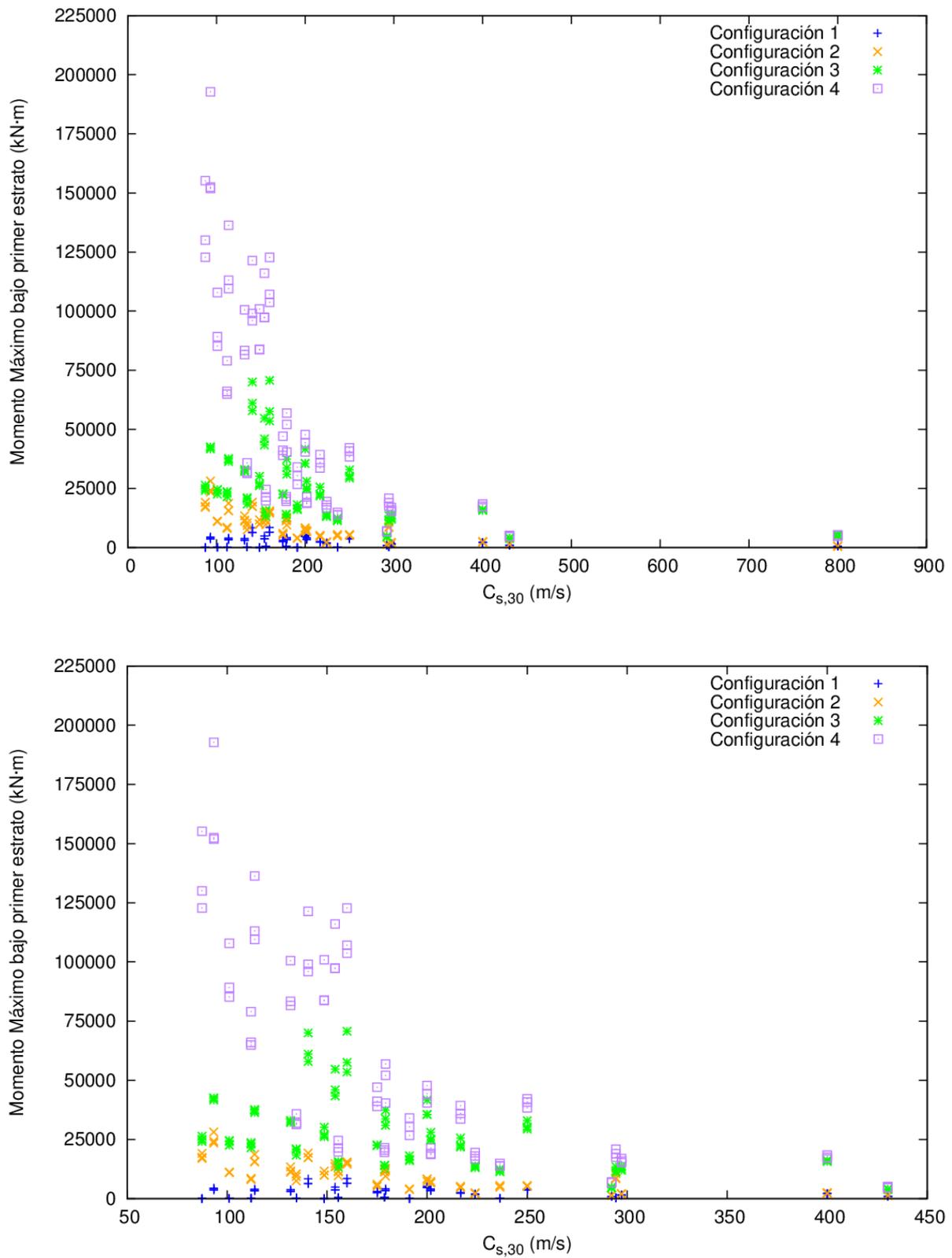


Figura 3.33: Evolución del momento máximo bajo el primer estrato para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función de $C_{s,30}$ (en la figura inferior se expone un detalle para $C_{s,30}$ entre 50 y 450 m/s).

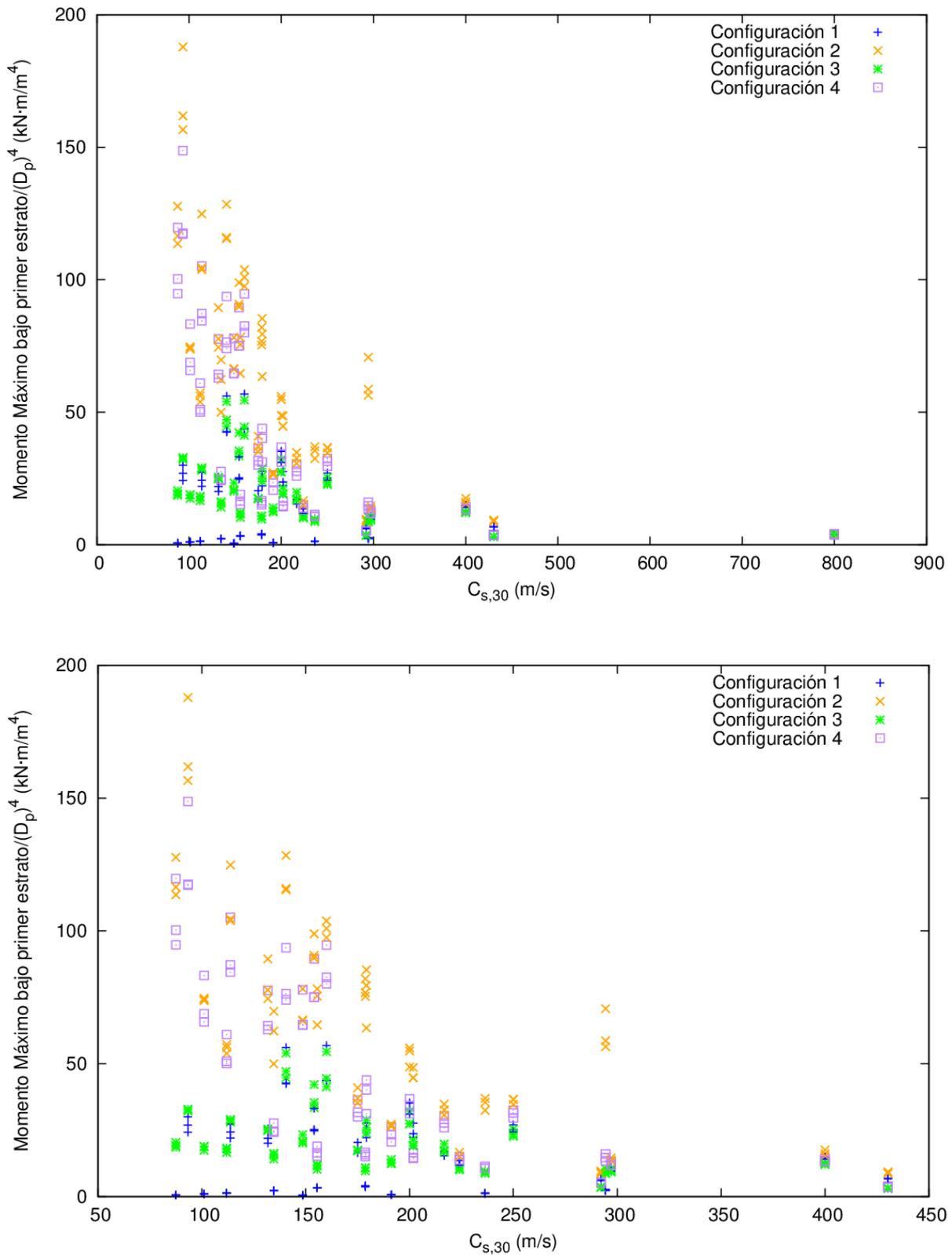


Figura 3.34: Evolución del momento bajo el primer estrato, normalizado por $(D_p)^4$, para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función de $c_{s,30}$ (en la figura inferior se expone un detalle para $c_{s,30}$ entre 50 y 450 m/s).

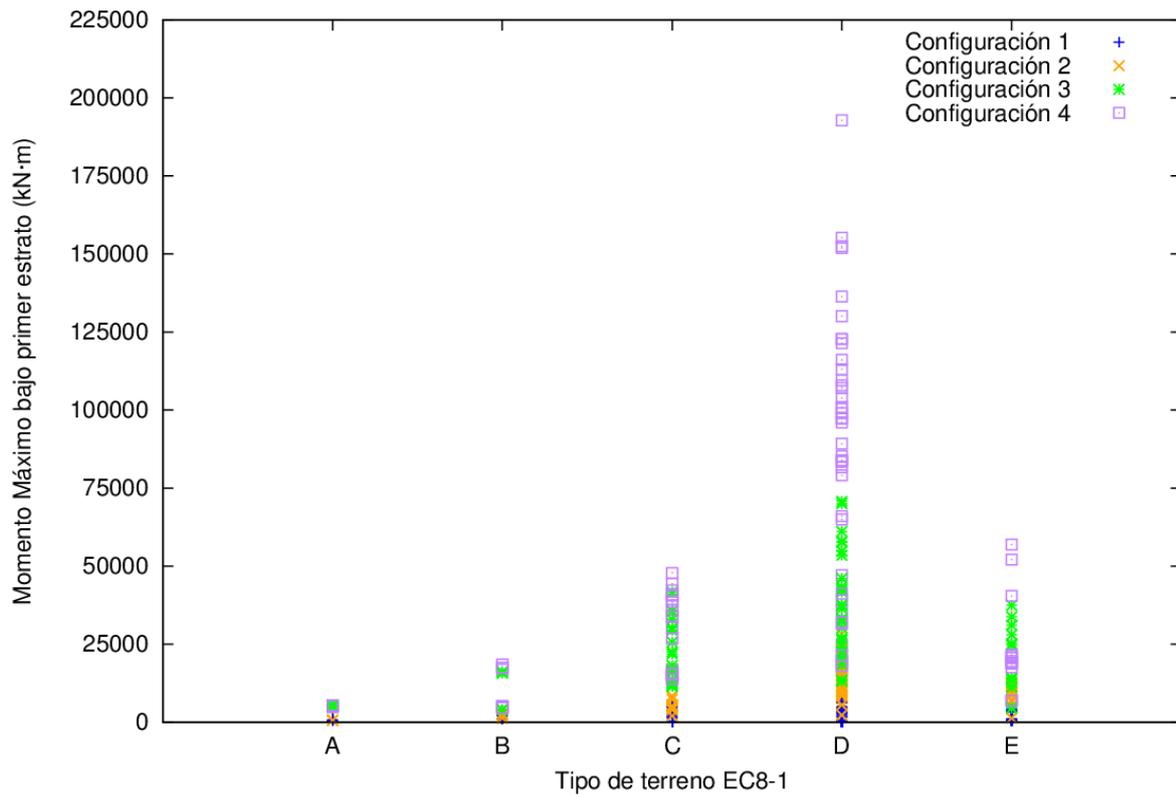


Figura 3.35: Evolución del momento máximo bajo el primer estrato para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función del tipo de terreno según EC8-1.

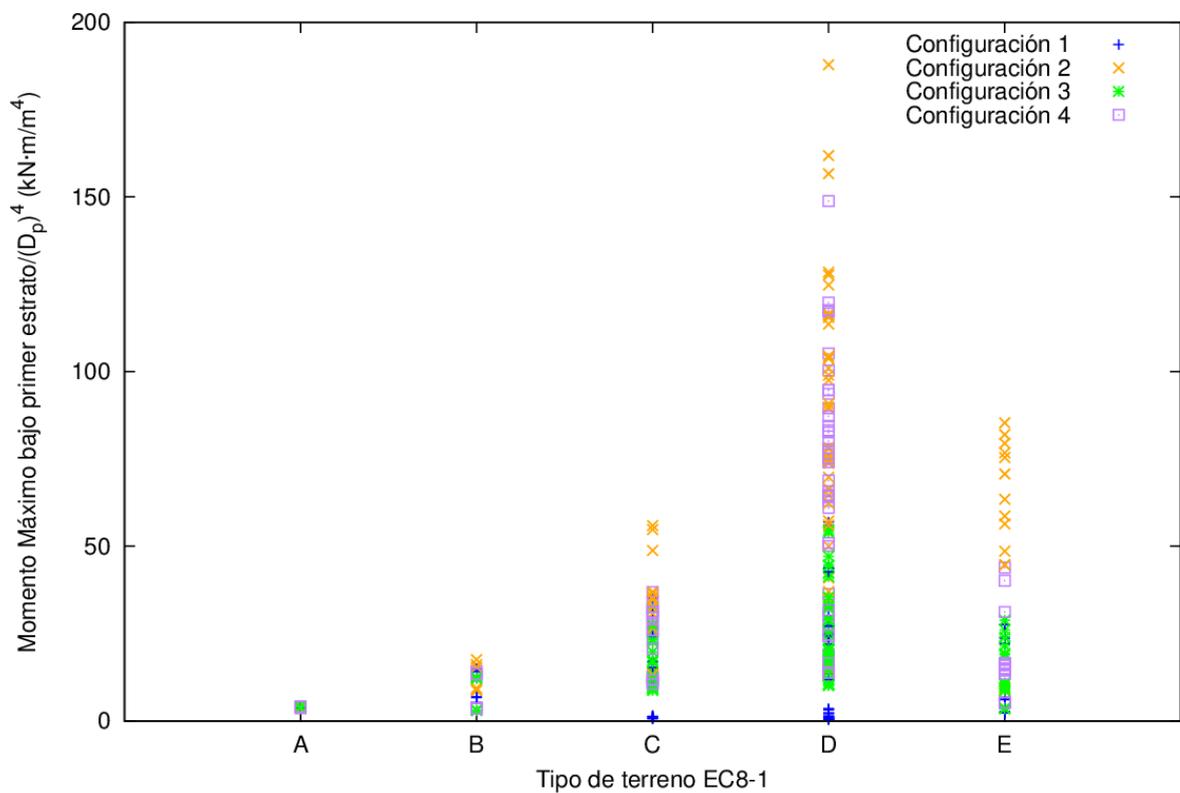


Figura 3.36: Evolución del momento máximo bajo el primer estrato, normalizado por $(D_p)^4$, para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función del tipo de terreno según EC8-1.

En todas las figuras de esta sección, en el caso particular de la configuración de pilote 1, la de menor longitud, se observan valores muy bajos de momentos. Esto es debido principalmente a que el segundo estrato tiene poca profundidad en relación al resto de configuraciones (0.5 metros en los perfiles estratigráficos con un primer estrato de 10 metros de profundidad, muy cerca de la punta del pilote, donde el momento es nulo; y 5.5 metros en los perfiles estratigráficos con un primer estrato de 5 metros, aproximadamente en la mitad del pilote) y por la tendencia de las envolventes de momentos obtenidas. Los casos con una potencia de 0.5 metros para el segundo estrato no se consideran representativos y pueden obviarse.

3.3.6 Evolución del ratio entre el momento máximo bajo el primer estrato y el momento máximo en la cabeza

En esta sección se presentan gráficamente diferentes agrupaciones de los ratios entre el momento máximo bajo el primer estrato y el momento máximo en la cabeza de cada perfil estratigráfico sobre los resultados obtenidos para el caso expuesto en el punto 3.3.1 y representados en el punto A.1 del Anexo de Resultados.

En la figura 3.37 se presentan dos gráficas. En ambas se representan los ratios en función de $c_{s,30}$ para todos y cada uno de los casos estudiados. El eje de ordenadas representa al ratio indicado, que es adimensional, mientras el eje de abscisas representa el valor de $c_{s,30}$ del perfil estratigráfico en m/s. La gráfica inferior es un detalle de la superior, en la que se reduce el rango de valores de $c_{s,30}$ con el objetivo de que puedan verse los resultados con más claridad. Los casos en que el ratio toma valor la unidad corresponden a los perfiles estratigráficos de un sólo estrato. Para el resto de los casos este ratio es inferior a la unidad, pues el momento en la cabeza es siempre mayor que el momento bajo el primer estrato, como se observa en las envolventes de momentos máximas obtenidas (recuérdese la excepción del caso de la configuración de pilote 2 en el perfil estratigráfico P4, que al ser de un sólo estrato se trata de uno de los casos en los que el ratio toma valor la unidad). Se distingue claramente un grupo de casos con ratio de valor entre 0.75 y 1, para las configuraciones 2, 3 y 4, que se corresponden con los perfiles estratigráficos en los que el primer estrato tiene una potencia de 5 metros, pues los valores de ambos momentos del ratio son más cercanos. Se observa otro grupo con ratio de valor comprendido entre 0.25 y 0.75, para todas las configuraciones de pilote, que se corresponden con perfiles estratigráficos en que el primer estrato tiene una potencia de 5 metros para la configuración de pilote 1, y de 10 metros para el resto de configuraciones. No se consideran representativos los casos de configuración de pilote 1 y perfil estratigráfico con profundidad del primer estrato 10 metros, pues el ratio toma valores muy cercanos a cero por lo comentado en el punto 3.3.5. No se observa una relación entre el ratio y la $c_{s,30}$ del terreno, pues hay valores de ratio de entre 0.25 y 1 para valores de $c_{s,30}$ muy próximos.

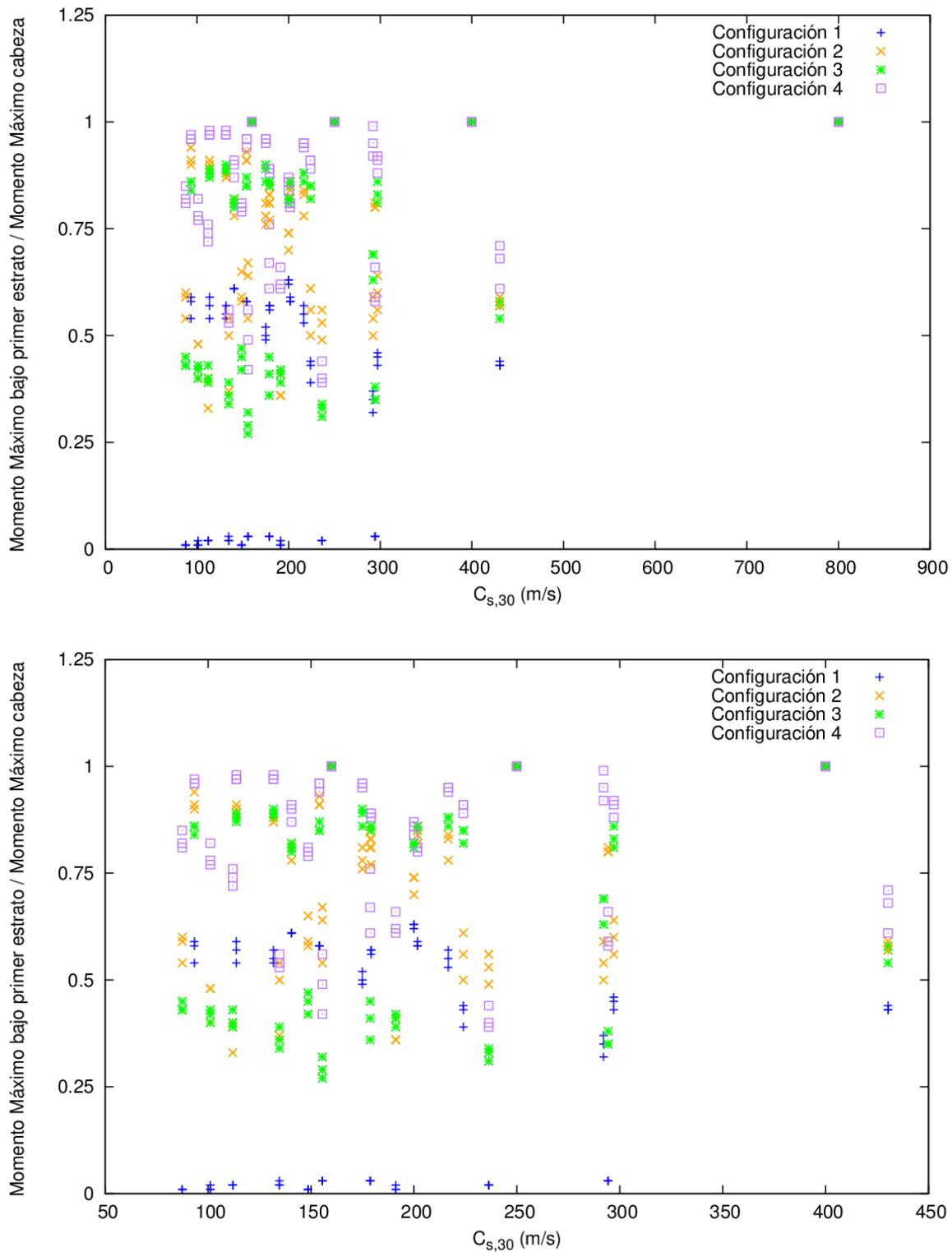


Figura 3.37: Evolución del ratio entre el momento máximo bajo el primer estrato y el momento máximo en la cabeza para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función de $C_{s,30}$ (en la figura inferior se expone un detalle para $C_{s,30}$ entre 50 y 450 m/s).

En la figura 3.38 se presentan gráficamente los valores de los ratios para todos los casos estudiados, pero en esta ocasión agrupados en función del tipo de terreno que le corresponde a cada perfil estratigráfico según el EC8-1 [7]. El eje de ordenadas está referido al ratio indicado, mientras el eje de abscisas representa el tipo de terreno según el EC8-1 [7]. Aquí puede verse que el ratio parece no tener dependencia del tipo de terreno, pues obviando los tipos A y B por tener un número de casos estudiados muy pequeño, menor de 5, para el resto de tipos de terrenos se observan ratios de entre 0.25 y 1 para todos los tipos de configuraciones de pilote (teniendo en cuenta el caso despreciable para la configuración de pilote 1) y con gran dispersión.

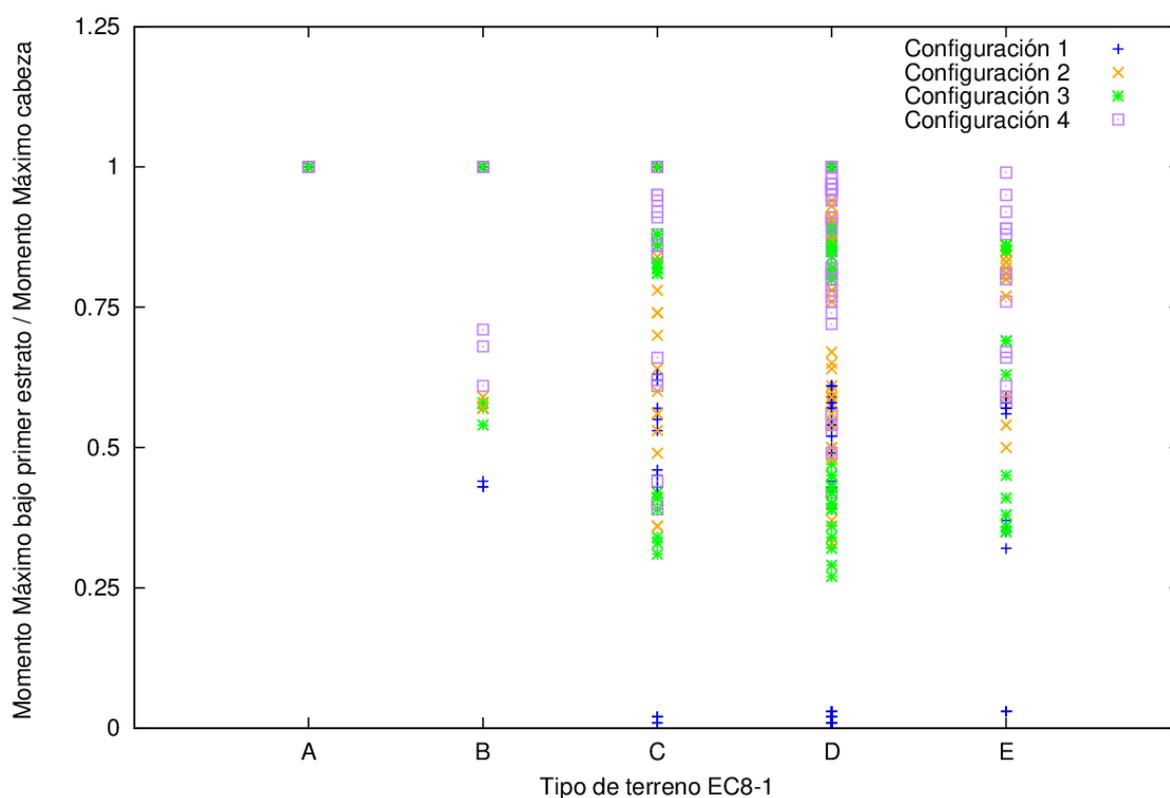


Figura 3.38: Evolución del ratio entre el momento máximo bajo el primer estrato y el momento máximo en la cabeza para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función del tipo de terreno según EC8-1 [7].

3.3.7 Evolución del ratio entre el momento máximo bajo el primer estrato y la media de momentos bajo el primer estrato

En esta sección se presentan gráficamente diferentes agrupaciones de los ratios entre el momento máximo bajo el primer estrato y la media de momentos bajo el primer estrato de cada perfil estratigráfico sobre los resultados obtenidos para el caso expuesto en el punto 3.3.1 y representados en el punto A.1 del Anexo de Resultados.

Las figuras 3.39 y 3.40 son análogas respectivamente a las 2 figuras del punto 3.3.6, la única diferencia es que se representa ahora el ratio correspondiente a este punto.

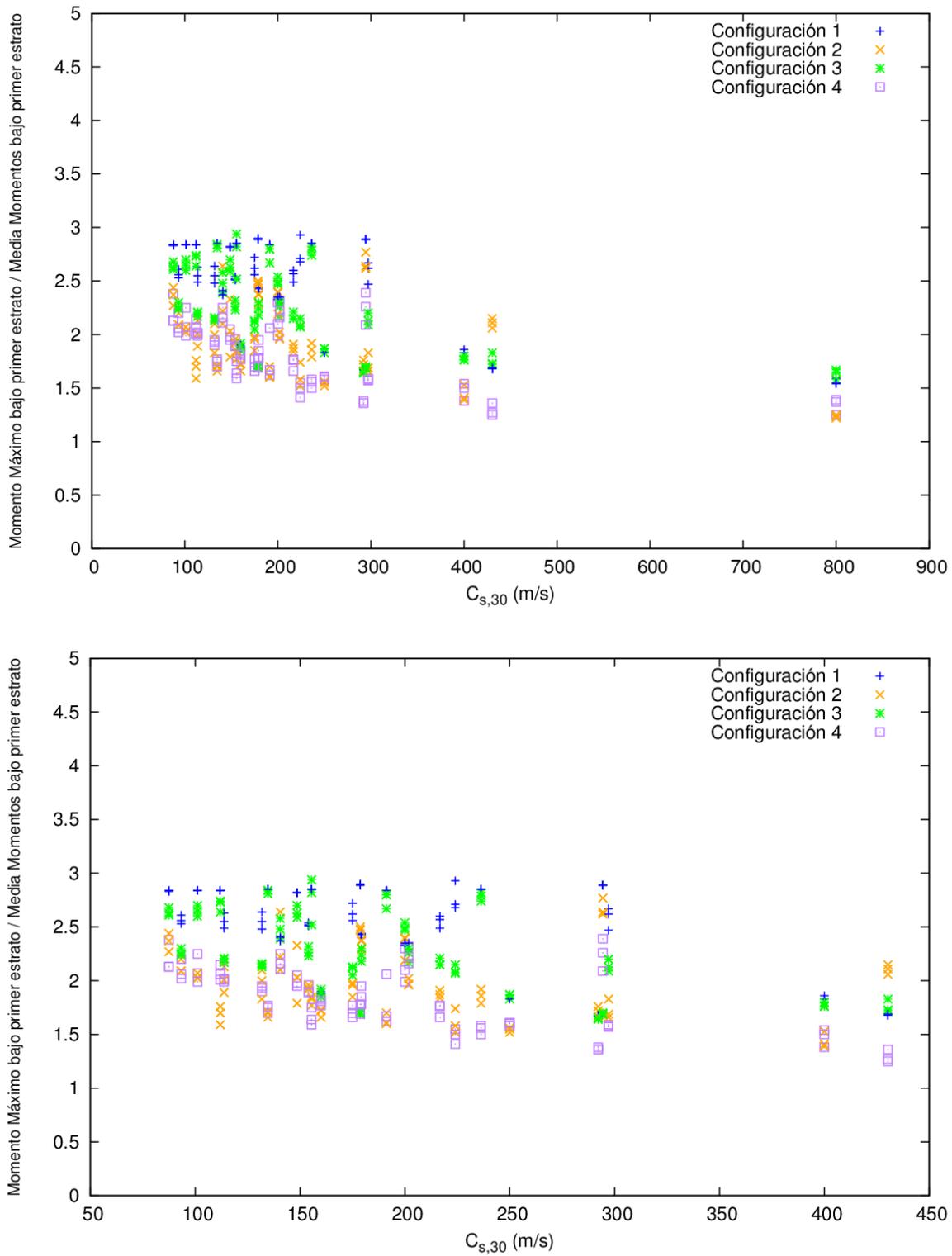


Figura 3.39: Evolución del ratio entre el momento máximo bajo el primer estrato y la media de momentos bajo el primer estrato para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función de $C_{s,30}$ (en la figura inferior se expone un detalle para $C_{s,30}$ entre 50 y 450 m/s).

En la figura 3.39 se observa que los ratios de todos los casos tienen valores superiores a 1, pues evidentemente el momento máximo bajo el primer estrato es siempre mayor o igual que la media de los momentos bajo el primer estrato, e inferiores a 3. El valor del ratio de las configuraciones de pilote de mayor esbeltez está comprendido en la mayoría de los casos entre valor 1.5 y 2, mientras, las configuraciones de pilote de menor esbeltez, tienen generalmente un ratio comprendido entre 2.5 y 3.

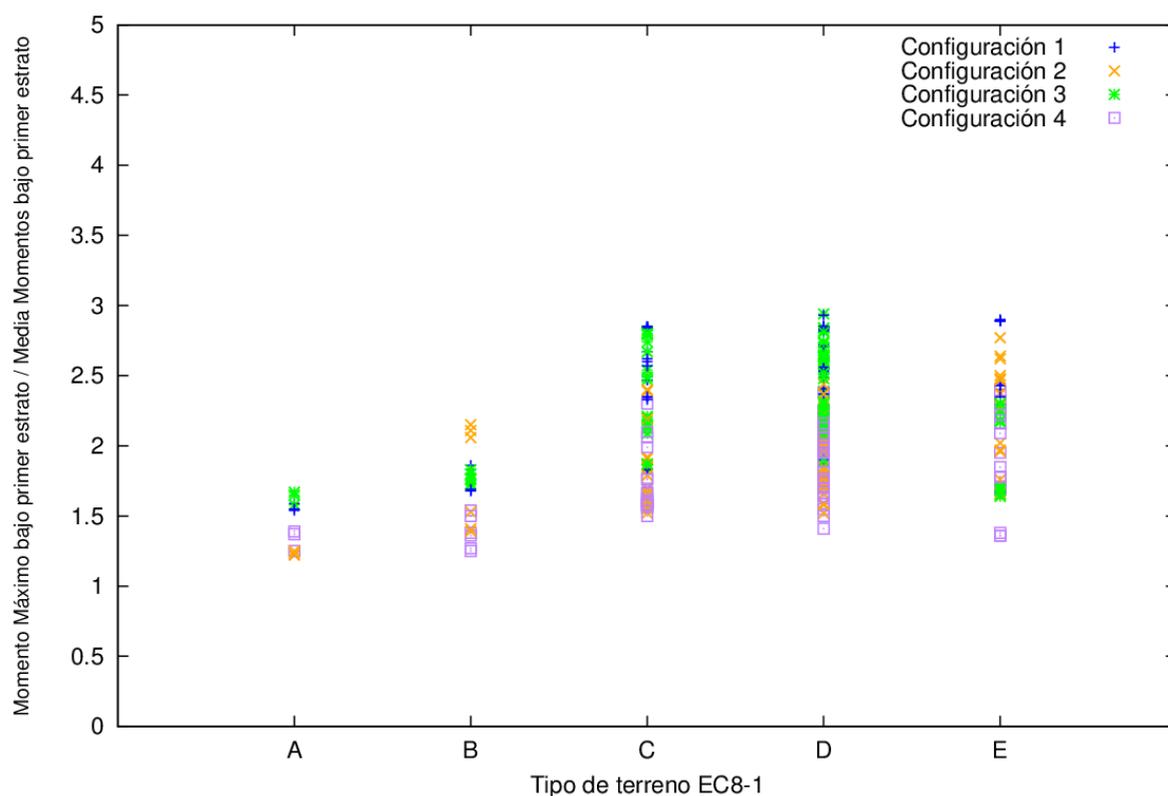


Figura 3.40: Evolución del ratio entre el momento máximo bajo el primer estrato y la media de momentos bajo el primer estrato para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función del tipo de terreno según EC8-1.

En la figura 3.40 se aprecia que no parece haber dependencia del tipo de terreno del perfil estratigráfico, pues en todos los tipos de terrenos se observa una distribución uniforme de los ratios entre valores de 1 y 3. Queda más claro aquí que este ratio está más relacionado con la esbeltez, pues hay una concentración mayor de puntos de las configuraciones de mayor esbeltez en el entorno de ratio 1-1.5, y una concentración mayor de puntos de las configuraciones de menor esbeltez en el entorno de ratio 2-3.

3.3.8 Propuesta de ajuste por mínimos cuadrados para la evolución de los momentos flectores máximos en la cabeza

En este punto se propone la realización de un ajuste por mínimos cuadrados de la evolución de los momentos flectores máximos en la cabeza en función de la $c_{s,30}$ del terreno para todos los casos estudiados.

El ajuste por mínimos cuadrados es una técnica de análisis numérico en la que dados un conjunto de puntos (pares ordenados) se pretende encontrar la función continua que mejor se aproxime a los datos, de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático. Básicamente consiste en minimizar la suma de cuadrados de las diferencias en las ordenadas (residuos) entre los puntos generados por la función elegida y los correspondientes valores en los datos. El objetivo de esta propuesta es encontrar una función para cada configuración de pilote estudiada que recoja una aproximación de todos los resultados obtenidos de momentos máximos en la cabeza del pilote y así poder interpolar para otros casos no estudiados.

La aproximación por mínimos cuadrados se basa en la minimización del error cuadrático medio $E_{cm}(f)$, cuya expresión se recoge en la ecuación (3.6), y se basa en el error e_k de una cierta función propuesta $f(x)$ en un solo punto (x_k, y_k) , cuya fórmula se tiene en la ecuación (3.5).

$$e_k = y_k - f(x_k) \quad (3.5)$$

$$E_{cm}(f) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (e_k)^2}{n}} \quad (3.6)$$

donde y_k son los valores de los momentos máximos en la cabeza en función de la $c_{s,30}$ del terreno, $f(x_k)$ es el valor de la función a la que se intenta aproximar y n es el número de valores, en este caso para cada configuración de pilote, que serían 84 (28 perfiles estratigráficos y 3 acelerogramas del espectro correspondiente para cada uno).

El ajuste por mínimos cuadrados se realiza con la función *fit* del software de representación gráfica de datos Gnuplot. Para cada una de las 4 configuraciones de pilote se realiza un ajuste y se utiliza una función del tipo:

$$f_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i \quad (3.7)$$

con $i = 1,2,3,4$ según la configuración de pilote y donde a_i , b_i y c_i son los coeficientes que se deben determinar y que han de minimizar la suma S_i de los cuadrados de los residuos que se presenta en la ecuación (3.7).

$$S_i = \sum_{k=1}^n (y_{ik} - f(x_{ik}))^2 = \sum_{k=1}^n (y_{ik} - a_i x_{ik}^2 - b_i x_{ik} - c_i)^2 \quad (3.8)$$

En la tabla 3.5 se recogen los coeficientes de la función de ajuste, la suma de cuadrados y el error cuadrático medio que se utilizan para construir la función de ajuste por mínimos

cuadrados de los momentos flectores máximos en la cabeza para cada configuración de pilote, presentadas en la figura 3.41.

Para conseguir un mejor ajuste, se utilizan los momentos flectores máximos en la cabeza normalizados por su diámetro a la cuarta, pues así se consigue un menor rango de valores. Por la misma razón se utilizan un rango de valores de $c_{s,30}$ comprendido entre 50 y 450 m/s, dejando fuera el caso extremo de $c_{s,30} = 800$ m/s, muy distante del resto casos.

Configuración de pilote	a_i	b_i	c_i	S_i	$E_{cm}(f)$
1	-0.00021 (± 0.00031)	0.056 (± 0.1561)	73.72 (± 0.17.22)	50909.2	25.55
2	0.0024 (± 0.00026)	-1.6696 (± 0.1316)	308.157 (± 14.52)	36170.4	21.53
3	0.0002 (± 0.00011)	-0.2242 (± 0.055)	65.3754 (± 6.033)	6247.93	8.95
4	0.00176 (± 0.00021)	-1.19025 (± 0.1071)	204.434 (± 11.81)	23955	17.52

Tabla 3.5: Parámetros del ajuste por mínimos cuadrados para la evolución de los momentos flectores máximos en la cabeza de las 4 configuraciones de pilote estudiadas.

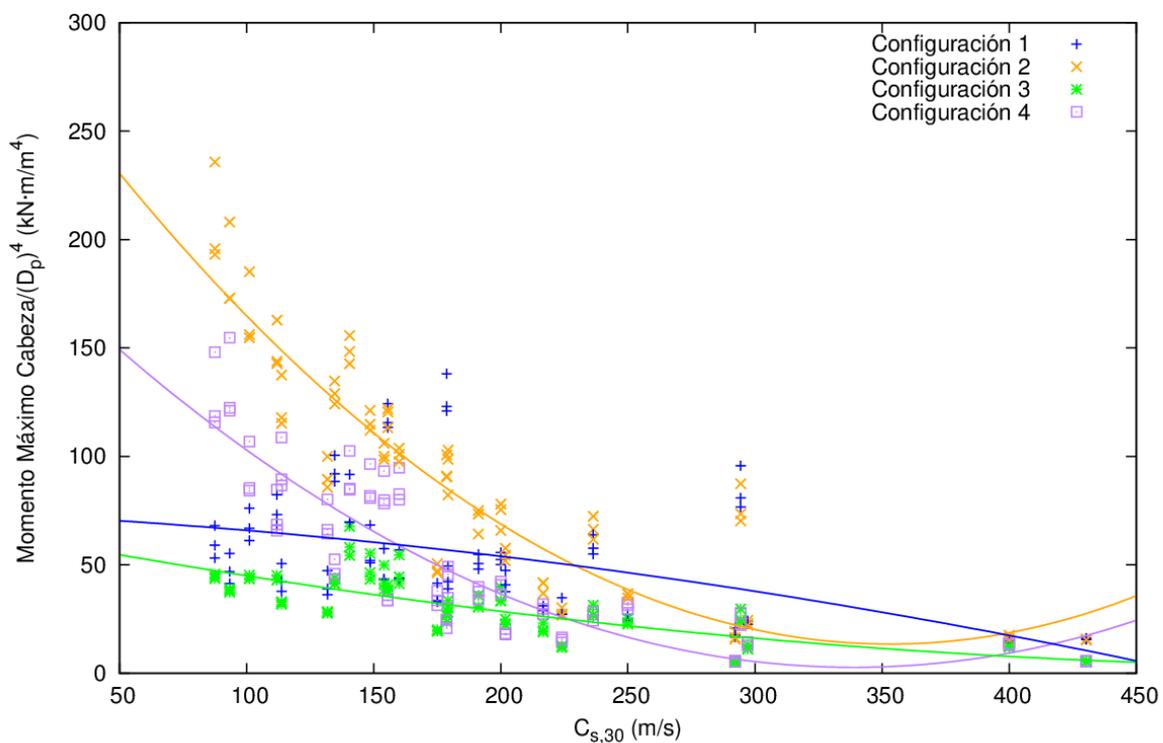


Figura 3.41: Ajuste por mínimos cuadrados de la evolución del momento máximo en la cabeza, normalizado por $(D_p)^4$, para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función de $c_{s,30}$ (detalle para $c_{s,30}$ entre 50 y 450 m/s).

En la figura 3.41 se presentan las parábolas resultantes del ajuste por mínimos cuadrados propuesto para cada configuración de pilote. La parábola de la configuración de pilote 1 es convexa, con un pendiente descendente con el valor de $c_{s,30}$. La parábola de la configuración 3 es cóncava de pendiente casi nula, prácticamente lineal, y también descendente con el valor de $c_{s,30}$. Las parábolas de las configuraciones 2 y 4, las de mayor esbeltez, son ambas cóncavas con una rama descendente hasta alcanzar un mínimo aproximadamente en $c_{s,30} = 350$ m/s, y luego una rama ascendente de menor pendiente.

3.3.9 Propuesta de ajuste por mínimos cuadrados para la evolución de los momentos flectores máximos bajo el primer estrato

En este punto se propone la realización de un ajuste por mínimos cuadrados de la evolución de los momentos flectores máximos bajo el primer estrato en función de la $c_{s,30}$ del terreno para todos los casos estudiados. Se realiza de forma análoga al punto 3.3.8.

En la tabla 3.6 se recogen los coeficientes de la función de ajuste, la suma de cuadrados y el error cuadrático medio que se utilizan para construir la función de ajuste por mínimos cuadrados de los momentos flectores máximos en la cabeza para cada configuración de pilote, presentadas en la figura 3.42.

Se recuerda que, para conseguir un mejor ajuste, se utilizan los momentos flectores máximos en la cabeza normalizados por su diámetro a la cuarta, pues así se consigue un menor rango de valores. Por la misma razón se utilizan un rango de valores de $c_{s,30}$ comprendido entre 50 y 450 m/s, dejando fuera el caso extremo de $c_{s,30} = 800$ m/s, muy distante del resto casos.

Configuración de pilote	a_i	b_i	c_i	S_i	$E_{cm}(f)$
1	-0.00018 (± 0.00017)	0.064 (± 0.0857)	10.6962 ($\pm 0.17.22$)	15349.4	14.03
2	0.00135 (± 0.00029)	-0.9987 (± 0.1476)	196.46 (± 16.28)	45497.3	24.15
3	0.000031 (± 0.00012)	-0.0876 (± 0.060)	35.7289 (± 6.705)	7715.97	9.95
4	0.00158 (± 0.00024)	-1.0642 (± 0.1216)	179.73 (± 13.42)	30899.3	19.90

Tabla 3.6: Parámetros del ajuste por mínimos cuadrados para la evolución de los momentos flectores máximos bajo el primer estrato para las 4 configuraciones de pilote estudiadas.

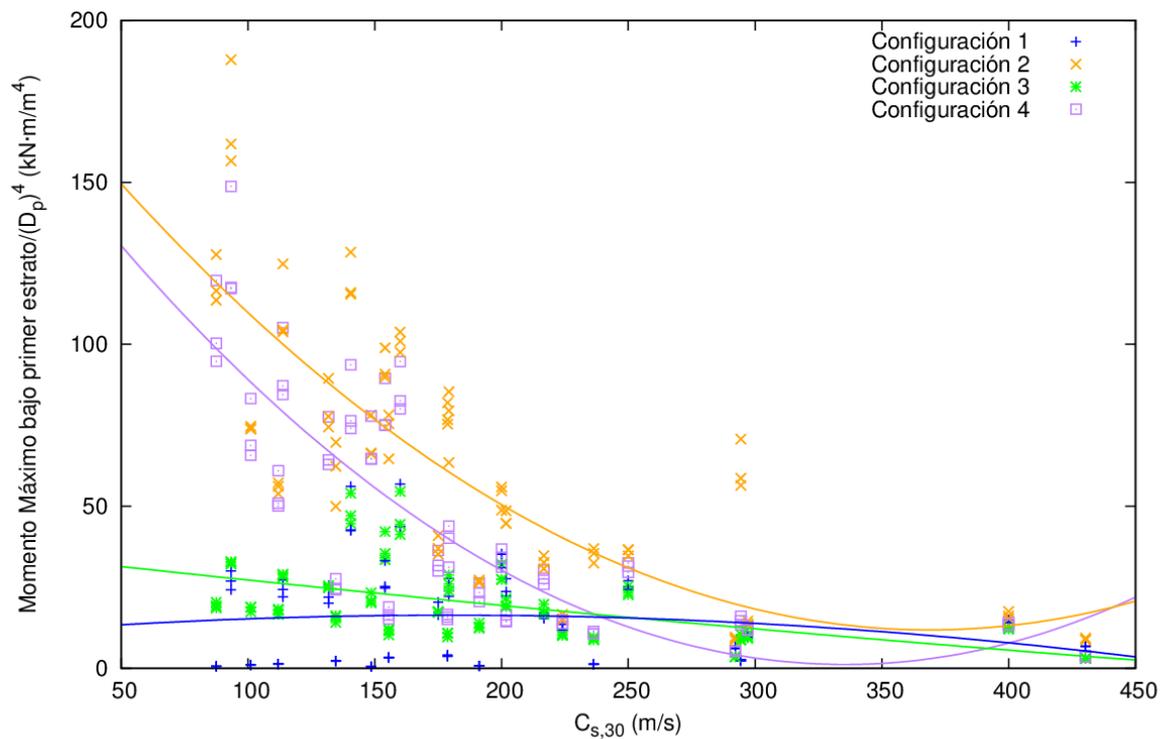


Figura 3.42: Ajuste por mínimos cuadrados de la evolución del momento máximo bajo el primer estrato, normalizado por $(D_p)^4$, para las 4 configuraciones de pilote estudiadas en función de $C_{s,30}$ (detalle para $C_{s,30}$ entre 50 y 450 m/s).

En la figura 3.42 se presentan las parábolas resultantes del ajuste por mínimos cuadrados propuesto para cada configuración de pilote. La parábola de la configuración de pilote 1 es convexa, con una rama ascendente de pendiente poco pronunciada, alcanza un máximo en $C_{s,30} = 300$ m/s, y luego una rama descendente de poca pendiente. La parábola de la configuración 3 es cóncava de pendiente casi nula, prácticamente lineal, y también descendente con el valor de $C_{s,30}$. Las parábolas de las configuraciones 2 y 4, las de mayor esbeltez, son ambas cóncavas con una rama descendente hasta alcanzar un mínimo aproximadamente en $C_{s,30} = 350$ m/s, y luego una rama ascendente de menor pendiente.

4.1 Revisión

Este Proyecto Fin de Carrera se enmarca en el ámbito de la Dinámica de Estructuras y más concretamente, en el estudio de la respuesta dinámica de estructuras enterradas sometidas a la acción de terremotos.

Se ha realizado un estudio amplio para el análisis de la influencia de la estratigrafía del terreno sobre los esfuerzos de origen sísmico en monopilotes de gran diámetro para aerogeneradores. Se han estudiado 4 configuraciones de pilote de acero cilíndrico hueco, asimilables a una viga tipo Euler-Bernoulli, enterrados en 28 perfiles estratigráficos de diferentes combinaciones de suelos y sometidos a excitación sísmica mediante una terna de 3 acelerogramas compatibles con cada espectro de respuesta correspondiente. Para esto se ha utilizado un modelo tipo Winkler, en el que el suelo se sustituye por una serie de impedancias (combinación de resortes y amortiguadores) repartidas a lo largo del pilote y sometidas en su base al campo de desplazamientos incidente verticalmente sobre el espacio estratificado y provocado por un campo de ondas SH. La respuesta de este modelo se ha obtenido de forma analítica en el dominio de la frecuencia. Se ha realizado el análisis final en el dominio del tiempo para terremotos sintéticos compatibles con el tipo de terreno haciendo uso de la FFT, y se han obtenido las envolventes de valores máximos de momentos flectores a lo largo del pilote. Esto se ha hecho para el caso de considerar nula la impedancia en la base del pilote, es decir, con giro y desplazamiento libres. Los resultados se han agrupado y se ha realizado un estudio paramétrico de algunos valores característicos de las envolventes que engloba todos los casos estudiados y que permite obtener una serie de conclusiones prácticas.

Adicionalmente se ha realizado un estudio de la influencia del diámetro del pilote sobre la distribución de momentos, pues se ha trabajado con diámetros grandes y los resultados obtenidos han sido diferentes a los esperados por lo expuesto en otros trabajos para pilotes de menor diámetro.

Debido a que las condiciones de contorno para el caso por defecto son de libertad total para giros y desplazamientos laterales, una hipótesis simplificada, se ha considerado también la posibilidad de abordar el otro caso extremo. Así se ha estudiado la influencia de las condiciones de contorno en la punta del pilote, considerando en esta una impedancia puntual que puede asemejarse a un disco rígido sobre un semiespacio.

4.2 Conclusiones

Terminado el proyecto, se puede sintetizar el estudio realizado en una serie de conclusiones y comentarios dispuestos a continuación:

- En la práctica totalidad de los casos estudiados (sólo se ha encontrado una excepción) el máximo valor de la envolvente de momentos se obtiene siempre en la cabeza del pilote, independientemente de la configuración de este o de la del perfil estratigráfico. Este hecho difiere de lo inicialmente esperado por lo observado en otros trabajos (Dezi et al. [15], Mylonakis et al. [16], Sica et al. [17]), en los que se analizan pilotes de menor diámetro y donde los máximos valores se obtienen normalmente en las interfases entre estratos. La explicación parece encontrarse en la utilización en este proyecto de grandes diámetros, de 3.5 y 6 metros, muy superiores a los estudiados en los trabajos mencionados; en el estudio de la influencia del diámetro sobre la distribución del momento, que también se aborda en este proyecto, se confirma esta particularidad.
- En las configuraciones de pilote de menor esbeltez (configuraciones 1 y 3; $L/D=3$), la evolución del momento es monótona decreciente con la profundidad hasta hacerse nulo en la punta del pilote; en algunos casos la evolución del momento sigue prácticamente una línea recta. Esto no se produce sin embargo para los casos de perfiles estratigráficos con gran contraste de rigidez entre estratos, donde la evolución es igualmente decreciente pero no de forma monótona, sino que presenta diferentes mínimos y máximos locales, normalmente en el entorno de las interfases entre estratos.
- En las configuraciones de pilote de mayor esbeltez (configuraciones 2 y 4; $L/D=7$), la evolución del momento es decreciente con la profundidad hasta hacerse nulo en la punta del pilote, pero no de forma monótona, sino que se observan varios máximos y mínimos locales. Especialmente en perfiles estratigráficos con un gran contraste de rigidez entre estratos y con algún estrato de gran dureza, se tienen máximos locales de una magnitud comparable al momento máximo en la cabeza del pilote. Esto no se produce sin embargo para los casos de perfiles estratigráficos con bajo contraste de rigidez entre estratos, donde la evolución del momento es monótona decreciente de forma similar a la mayoría de casos para las configuraciones de menor esbeltez.
- A igualdad de diámetro, las configuraciones de pilote de mayor esbeltez presentan valores de momento máximo en la cabeza superiores a las configuraciones de menor esbeltez prácticamente en la totalidad de casos estudiados. En perfiles estratigráficos de un sólo estrato de dureza media, la relación de momentos máximos entre las configuraciones de mayor esbeltez y las de menor esbeltez es de orden 2; para suelo duro la relación se sitúa en torno a 1.5 y para suelo muy duro la relación es menor que 1. En perfiles estratigráficos de dos o más estratos

con bajo contraste de rigidez entre estratos y suelos blandos, esta relación se sitúa entre 4 y 5; para suelos de dureza media y contraste intermedio de rigidez entre estratos la relación es del orden de 2 ó 3; en perfiles estratigráficos de gran contraste de rigidez entre estratos y algún estrato duro o muy duro, se tienen valores de esta relación cercanos a 1, en ocasiones inferior.

- A igualdad de esbeltez, las configuraciones de pilote de mayor diámetro presentan valores de momento máximo en la cabeza del pilote muy superiores a las configuraciones de menor diámetro. Esto era de esperar, porque el valor del momento es directamente proporcional al de la inercia de la sección, cuyo valor es su diámetro a la cuarta.
- En el estudio de la influencia del diámetro sobre la distribución de momentos se comprueba que, para diámetros pequeños y especialmente en perfiles con gran contraste de rigidez entre estratos, el momento flector máximo se produce exactamente en la interfase entre estratos o muy próxima a esta. Cuanto mayor es la esbeltez del pilote más evidente es este fenómeno, y se alcanzan valores de momento flector máximo en la interfase muy superiores a los valores de momento flector máximo en la cabeza del pilote. Así, utilizando diámetros menores, pero manteniendo el resto de características de los pilotes y los terrenos iguales, se obtienen resultados similares a los de estos trabajos mencionados.
- En el estudio de la influencia de las condiciones de contorno en la punta del pilote, se observa cómo los mayores valores de la envolvente se obtienen en la punta para el caso en que se considera una impedancia correspondiente a un disco rígido superficial, contrario al caso de impedancia nula en la punta donde el valor del momento es siempre nulo. Sin embargo, estos valores de momento obtenidos en la punta son muy altos y no parecen de ningún modo realistas, pues antes de que eso ocurriese el terreno y/o el pilote plastificarían. La realidad parece encontrarse en un punto intermedio a los dos casos extremos estudiados. Serían necesarios otro tipo de estudios en la punta del pilote y su entorno que permitan obtener resultados más cercanos a la realidad.
- Del análisis de la evolución del momento máximo en la cabeza se deduce que los mayores valores se dan para las configuraciones de pilote de mayor diámetro, y que conforme se endurece el terreno disminuye la magnitud de estos valores, hasta ser muy parecidos en los terrenos de mayor dureza para las 4 configuraciones de pilote estudiadas. Atendiendo al tipo de terreno, son los de tipo D, de baja dureza, los que presentan mayores valores de momentos máximos en la cabeza; los de tipo A y B, los más duros, presentan los valores más bajos, mientras los tipos C y E, de dureza intermedia, aunque este último presenta un estrato muy duro, presentan valores intermedios. La influencia del diámetro descrita aquí, motiva la exploración del caso de momentos flectores máximos en la cabeza normalizados por su diámetro a la cuarta, parámetro proporcional a la inercia del pilote. En este último caso son las configuraciones de mayor longitud

las que presentan mayores valores de momentos máximos normalizados. Atendiendo al tipo de terreno sucede lo mismo que para el caso no normalizado.

- En el análisis de la evolución del momento máximo bajo el primer estrato se observan muchos casos en los que estos valores son de magnitud similar a los momentos máximos en la cabeza del pilote, especialmente en las configuraciones de mayor diámetro y para terrenos blandos y de una potencia del primer estrato de 5 metros. También se deduce que los mayores valores de momentos flectores máximos bajo el primer estrato se dan para configuraciones de pilote de mayor diámetro y que conforme se endurece el terreno disminuye la magnitud de estos valores. Al normalizar estos valores por su diámetro a la cuarta son las configuraciones de mayor longitud las que presentan los mayores valores. En cuanto a la clasificación por tipo de terreno, en ambos casos son los de tipo D los que tienen los mayores valores de momento máximo bajo el primer estrato, mientras los de tipo A y B, terrenos más duros, presentan los valores más bajos. Los de tipo C y E tienen valores intermedios.
- En lo referente a la evolución del ratio entre el momento máximo bajo el primer estrato y el momento máximo en la cabeza, se observa que para todos los casos estudiados es inferior a la unidad (toma valor la unidad para los casos de perfiles stratigráficos de un sólo estrato), pues el momento máximo en la cabeza es siempre superior (recuérdese la excepción, pero este caso es de un sólo estrato y no influye en el ratio). En perfiles stratigráficos con potencia 5 metros para el primer estrato, este ratio toma valor 0.75-1 en las configuraciones de pilote 2, 3 y 4, pues los valores que definen el ratio son más cercanos. Para una potencia del primer estrato de 10 metros el ratio se sitúa en valores comprendidos entre 0.25 y 0.75 para estas configuraciones. En el caso de la configuración de pilote 1, se tiene una serie de perfiles stratigráficos con valores de ratio cercanos a 0, que se corresponden con aquellos de 10 metros de potencia para el primer estrato, y no se consideran representativos. En ningún caso se observa relación alguna entre este ratio y la dureza del terreno, pues se tienen valores de entre 0.25 y 1 para terrenos con propiedades similares.
- Analizando la evolución del ratio entre el momento máximo bajo el primer estrato y la media de momentos bajo el primer estrato se puede ver que el ratio se sitúa entre 1 y 3 para todos los casos. Para las configuraciones de mayor esbeltez se sitúa entre valor 1.5 y 2, mientras para las de menor esbeltez este ratio está comprendido entre 2.5 y 3. Parece no existir dependencia del tipo de terreno, pues en todos se observan una distribución relativamente uniforme de ratios de valores entre 1 y 3. Este ratio parece estar más relacionado con la esbeltez del pilote, dado que se observa que los de mayor esbeltez tienen ratio 1-1.5, mientras en los de menor esbeltez se sitúa este ratio entre valor 2 y 3.
- De la propuesta de ajuste por mínimos cuadrados que se realiza tanto para los momentos máximos en la cabeza como para los momentos máximos bajo el primer estrato, normalizados ambos por su diámetro a la cuarta y dejando fuera

el caso extremo de mayor dureza para conseguir un mejor ajuste, y que tiene por objetivo obtener una aproximación de los resultados y así poder interpolar para otros casos no estudiados, se observa cómo las parábolas resultantes de las configuraciones de pilote de mayor esbeltez son parábolas cóncavas con una rama de gran pendiente descendente según aumenta la dureza del terreno hasta alcanzar un mínimo absoluto para suelos duros, a partir del cual presenta una rama ascendente de pendiente mucho menos pronunciada; en las de menor esbeltez, la de mayor diámetro es una parábola cóncava que prácticamente se aproxima a una línea recta de poca pendiente y descendente según aumenta la dureza del terreno, mientras la de menor diámetro es una parábola cóncava de una rama descendente de poca pendiente conforme aumenta la dureza del terreno.

4.3 Comentarios finales

Para tener una idea de la importancia de la magnitud de los momentos cinématicos calculados en los capítulos anteriores, se pretende en estos últimos comentarios compararlos con la capacidad a momento de las secciones estudiadas. No se realizarán comprobaciones de pandeo o inestabilidad local de la sección porque debido a su complejidad escapan al alcance de este proyecto. No obstante, sí se puede abordar un cálculo aproximado del momento de plastificación de la sección.

Para pilotes de acero circulares huecos con espesor comprendido entre 40 mm y 60 mm, la tensión de plastificación es $f_y = 335 \text{ N/mm}^2$, mientras para espesor superior a 63 mm, la tensión de plastificación es $f_y = 325 \text{ N/mm}^2$ (Wijngaarden [18]).

El Eurocódigo 3: Parte 1-1 [13] (Table 5.2 (sheet 3 of 3)) clasifica los pilotes circulares huecos en función de un ratio entre su diámetro exterior y su espesor para las secciones a flexión y/o compresión. Este ratio lo compara con un factor dependiente de la tensión de plastificación de la sección $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$.

Así, para las configuraciones de pilote 1 y 2 ($D_p=3.5 \text{ m}$ y $t_p=41.37 \text{ mm}$), este ratio entre el diámetro exterior y el espesor de la sección es $D_p/t_p = 84.6$, superior al valor de referencia que se propone en el EC3-1-1 [13], que es de $90\varepsilon^2$. Para las configuraciones 3 y 4 ($D_p=6 \text{ m}$ y $t_p=66.37 \text{ mm}$), este ratio entre el diámetro exterior y el espesor de la sección es $D_p/t_p = 90.4$, igualmente superior al valor de referencia $90\varepsilon^2$. De acuerdo con esto, el EC3-1-1 [13] remite al Eurocódigo3: Parte 1-6 [19], donde se denominan los pilotes estudiados como de tipo lámina.

Calculando ahora el módulo resistente de la sección W para las configuraciones de pilote con igual diámetro, las 1 y 2 por un lado, las 3 y 4 por el otro, se tiene:

$$(W)_1 = (W)_2 = \frac{\pi [(D_p)^4 - (D_i)^4]}{32D_p} = 195 \cdot 10^6 \text{ mm}^3 \quad (4.2a)$$

$$(W)_3 = (W)_4 = \frac{\pi [(D_p)^4 - (D_i)^4]}{32D_p} = 922 \cdot 10^6 \text{ mm}^3 \quad (4.2b)$$

donde D_i es el diámetro interior de la sección.

Conocido el módulo resistente de la sección para cada configuración de pilote, se puede calcular el momento de plastificación de la sección $M_y = f_y \cdot W$. Este momento de plastificación puede ahora ser comparado con los momentos cinemáticos máximos M_{max} a los que son sometidas cada una de las secciones. La tabla 4.1 muestra, para cada configuración de pilote, los momentos de plastificación junto con los momentos cinemáticos máximos y los coeficientes de utilización correspondientes M_{max}/M_y .

Configuración de pilote	f_y (N/mm ²)	W (mm ³)	M_y (kN · m)	M_{max} (kN · m)	$\frac{M_{max}}{M_y}$
1	335	$195 \cdot 10^6$	65500	25000	38.2 %
2	335	$195 \cdot 10^6$	65500	37500	57.25 %
3	325	$922 \cdot 10^6$	300000	87500	29.2 %
4	325	$922 \cdot 10^6$	300000	200000	66.6 %

Tabla 4.1: Momentos de plastificación, momentos cinemáticos máximos y coeficientes de utilización para las 4 configuraciones de pilote estudiadas.

Los momentos cinemáticos obtenidos son inferiores, aunque cercanos, al momento de plastificación de la sección. Aun así, hay que tener en cuenta que no es esta la única carga a la que está sometida la sección, ya que deberá también soportar las cargas estáticas derivadas del peso propio de la superestructura, así como el resto de cargas dinámicas (viento, olas y cargas sísmicas inerciales). En un aerogenerador aparcado, el momento total que debe soportar es la superposición de los esfuerzos estáticos, momentos inerciales y los momentos cinemáticos. En el caso de un aerogenerador en explotación, además de estos se debe considerar el momento que provocan el viento sobre las palas en movimiento.

Viendo lo dispuesto en la tabla 4.1, la probabilidad de que la superposición de todos los esfuerzos supere el momento de plastificación de la sección es alta y conlleva por lo tanto

la necesidad de tener en cuenta estos momentos cinemáticos a la hora de dimensionar las secciones. En las configuraciones de mayor esbeltez, la 2 y la 4, los coeficientes de utilización son superiores al 50%, del 57% y del 66%, respectivamente. Mientras en las configuraciones de menor esbeltez, la 1 y la 3, el coeficiente de utilización se sitúa cercano al 40% y al 30%, respectivamente. Estos valores reflejan la importancia que tiene la consideración de los momentos cinemáticos de origen sísmico a la hora de diseñar la cimentación para aerogeneradores de gran diámetro con monopilotes de acero circulares huecos.

Para diámetros inferiores a los de las configuraciones de pilote estudiadas en este proyecto, los momentos máximos se encuentran normalmente en la interfase entre estratos. En estos casos, se suele tener en cuenta una condición de contorno de giro nulo en la cabeza del pilote, pues haciendo esta consideración no varía de forma sensible la distribución de momentos máximos a lo largo del pilote. Siguiendo este razonamiento, en este proyecto, donde se estudian pilotes de mayor diámetro, también se impuso esta condición de contorno de giro nula cabeza. Sin embargo, analizados los resultados, se observa que los momentos máximos se obtienen en la práctica totalidad de los casos precisamente en la cabeza del pilote. Como consecuencia de ello, trabajos posteriores deberían tener en cuenta condiciones de contorno más realistas, aunque se estima que las conclusiones generales de este estudio no variarán sensiblemente.

REFERENCIAS

- [1] EWEA, The European Wind Energy Association. The European Offshore wind industry – key trends and statistics 2015, Report, 2015.
- [2] Byrne BW & Houlsby GT. Foundations for offshore wind turbines, *Philos Trans R Soc Lond*, 361 (1813): 2909-2930, 2003.
- [3] Musial W & Ram B. Large-Scale Offshore Wind Power in the United States. Assessment of Opportunities and Barriers. National Renewable Energy Laboratory, US, 2010, doi:10.2172/1219151. <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1219151>.
- [4] Novak M, Nogami T & Aboul-Ella F. Dynamic soil reactions for plane strain case. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 104 (4): 953–959, 1978.
- [5] Bielak J. Dynamic behavior of structures with embedded foundations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3: 259–274, 1975.
- [6] Verbic B & Veletsos AS. Impulse response functions for elastic foundations. *SRR Report 15, Department of Civil Engineering, Rice University, Houston, Texas*, 1972.
- [7] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. *Standard EN-1998-1:2004, CEN/TC 250*, 2004.
- [8] Vanmarcke EH. SIMKQE: A program for artificial motion generation. *Technical Report, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA*, 1976.
- [9] Carswell W, Johansson J, Løvholt F, Arwade SR, Madshus C, DeGroot DJ & Myers AT. Founding damping and the dynamics of offshore wind turbine monopiles. *Renewable Energy J*, 80: 724-736, 2015.
- [10] Jung S, Kim S-R, Patil A, Hung LC. Effect of monopile foundation modeling on the structural response of a 5-MW offshore wind turbine tower. *Ocean Engineering J*, 109: 479-488, 2015.
- [11] Negro V, López-Gutiérrez J-S, Esteban MD, Matutano C. Uncertainties in the design of support structures and foundations for offshore wind turbines. *Renewable Energy J*, 63: 125-132, 2014.

- [12] Randolph M & Gourvenec S. Offshore Geotechnical Engineering. *Spon Press/ Taylor & Francis*, 2011. ISBN: 978-0-415-47744-4.
- [13] Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. *Standard EN-1993-1-1:2005, CEN/TC 250*, 2005.
- [14] Recommended practice for Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design. *American Petroleum Institute*, 2000.
- [15] Dezi F, Carbonari S, Leoni G. Kinematic bending moments in pile foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (3): 119-132, 2009.
- [16] Mylonakis G, Di Laora R, Mandolini A. The Role of Pile Diameter on Earthquake-Induced Bending. *Perspectives on European Engineering and Seismology. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 34: 533-556, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-07118-3_17
- [17] Sica S, Mylonakis G, Simonelli AL. Transient kinematic pile bending in two-layer soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering J*, 31(7): 891-905, 2011.
- [18] Wijngaarden M. Concept design of Steel bottom founded support structures for offshore wind turbines. *Bachelor Thesis, DELFT*, 2013.
- [19] Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures. *Standard EN-1993-1-6:2007, CEN/TC 250*, 2007.



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles

INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA
ESTRATIGRAFÍA DEL TERRENO SOBRE LOS
MOMENTOS DE ORIGEN SÍSMICO EN
MONOPILOTES PARA AEROGENERADORES

ANEXO DE RESULTADOS

P
F
C



Envolvente de momentos

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

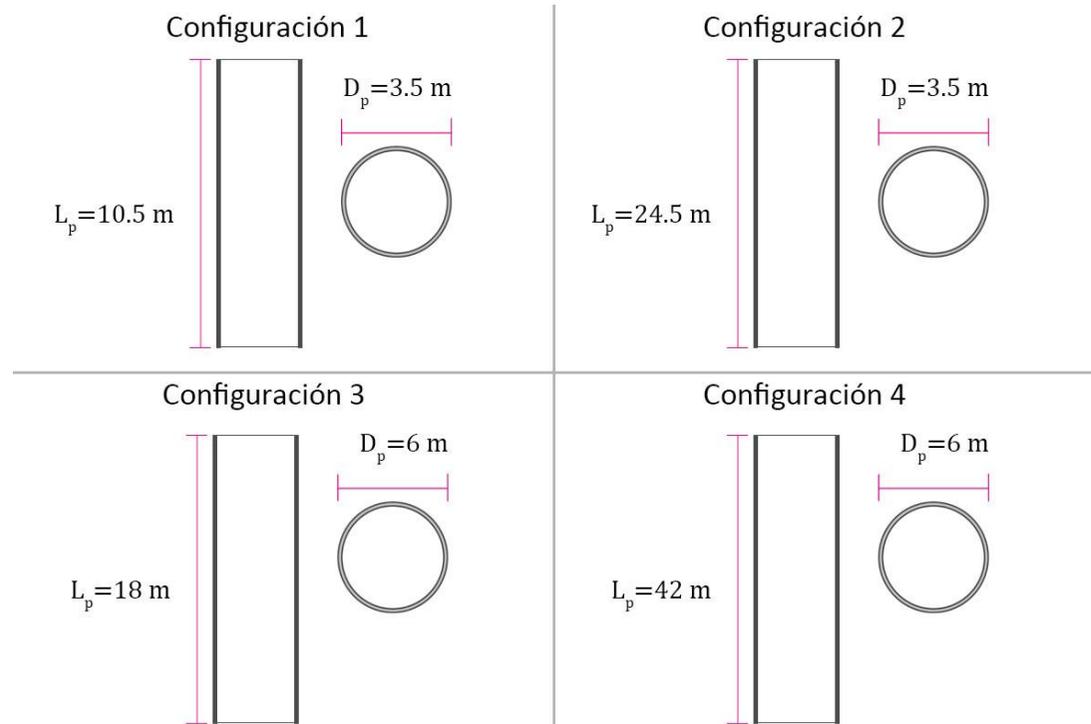
En la parte superior de la columna izquierda se muestra el perfil estratigráfico estudiado, codificado de la manera en que se describe en el punto 3.3.1. Se distingue cada estrato que lo conforma, su potencia y su tipo de suelo según la tabla 3.2.

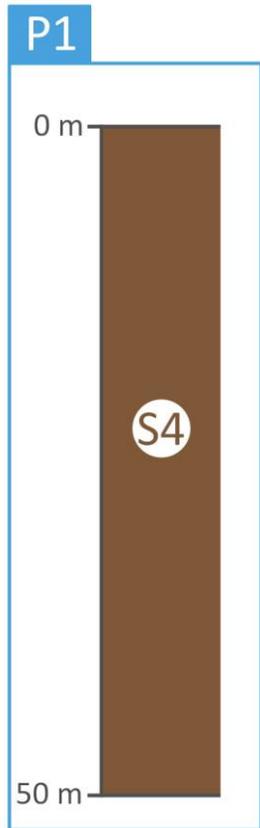
TIPO DE TERRENO

En la parte inferior de la columna izquierda se presenta el tipo de terreno según el EC8-1 [7] que le corresponde al perfil estratigráfico estudiado, tal como se dispone en la tabla 3.3.

FIGURAS DE RESULTADOS

En la columna derecha se presentan las figuras de resultados de la sección 3.3.1, compuestas de 4 gráficas, cada una referida a una configuración de pilote de las de la tabla 3.1. En la sección 3.3.1 se detalla la composición de cada gráfica y en el pie de figura se explica su contenido.





D

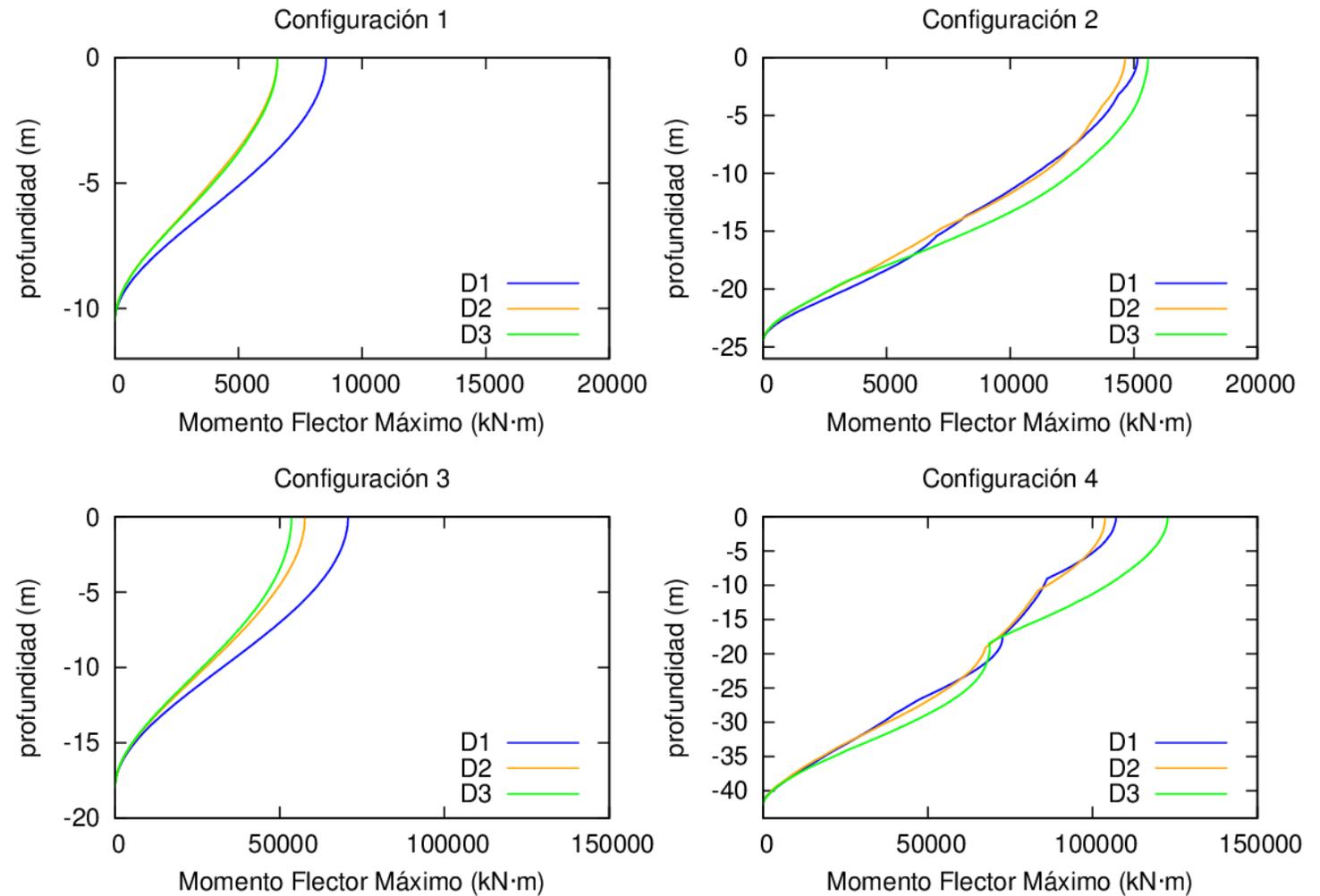


Figura A - 1.1: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P1.

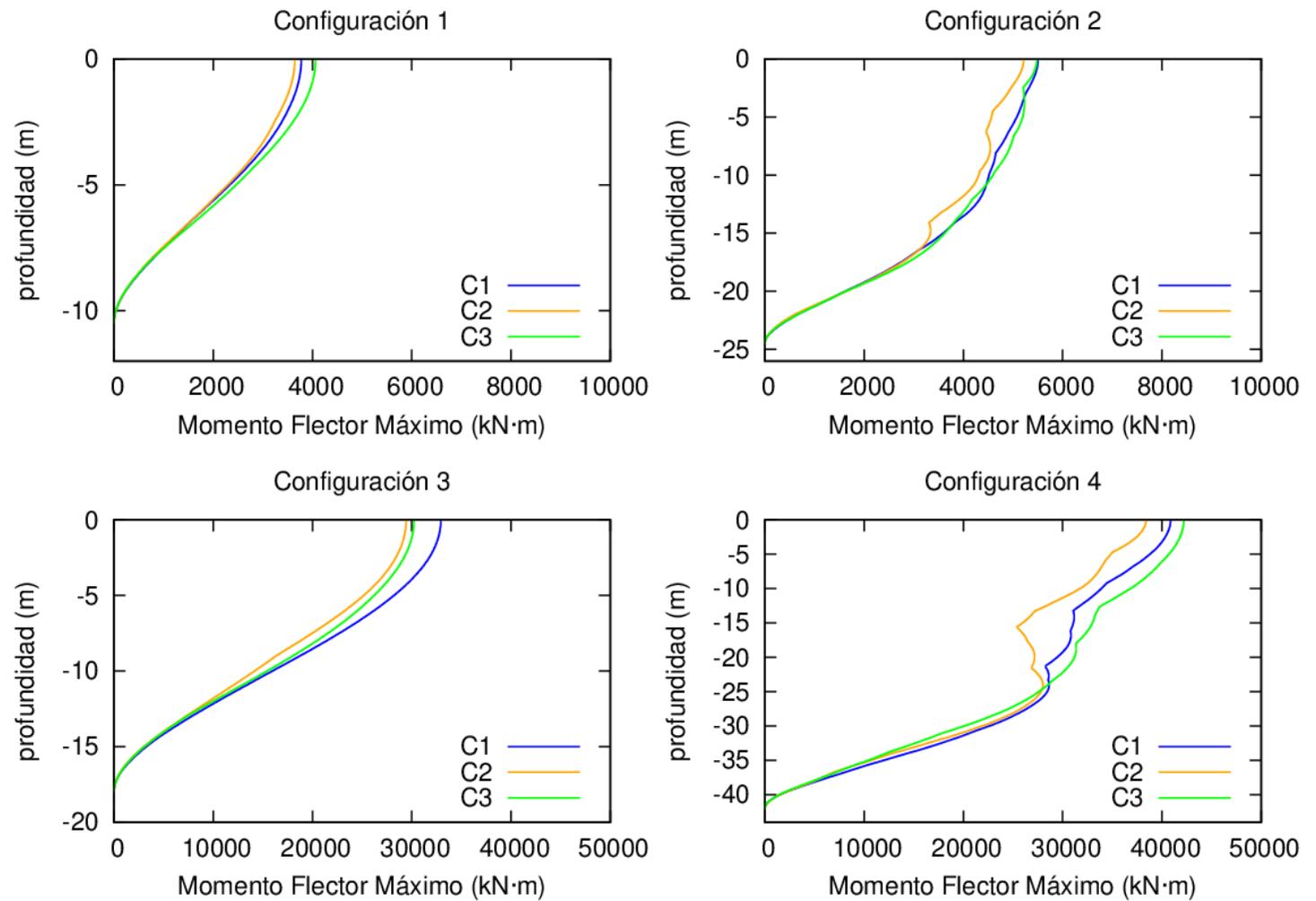
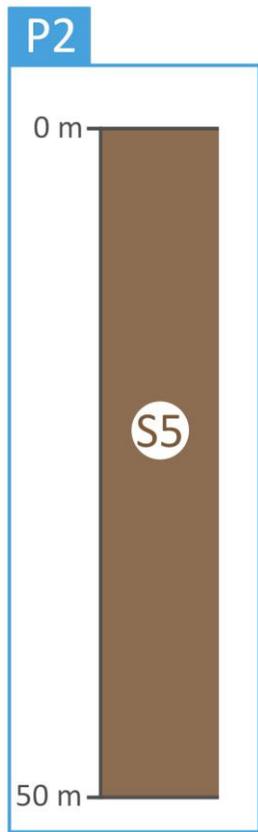
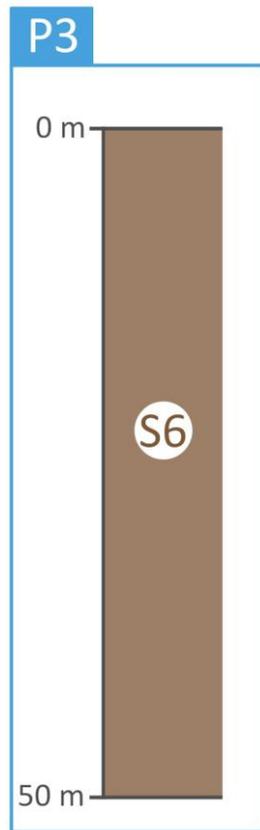


Figura A - 1.2: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas C1, C2 y C3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P2.



B

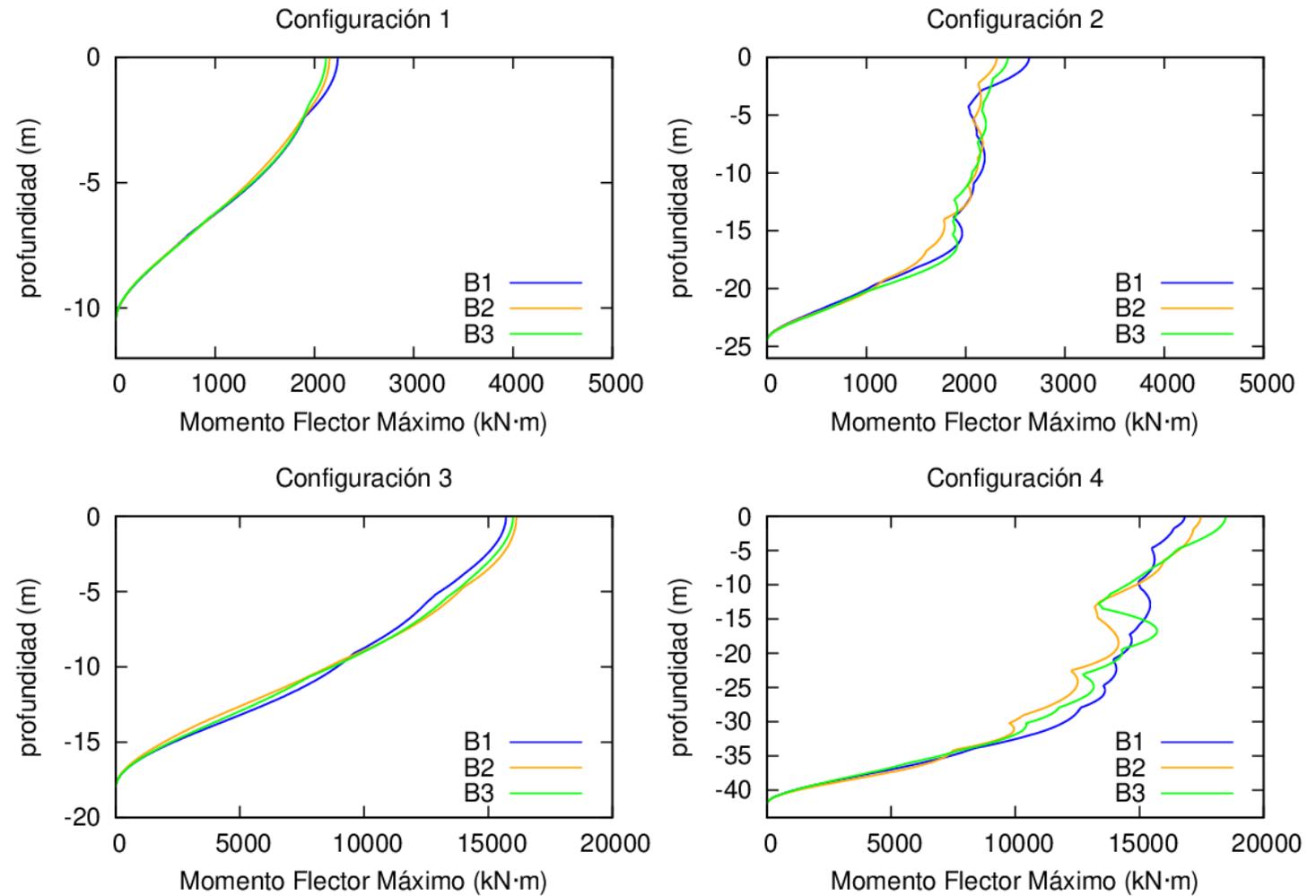
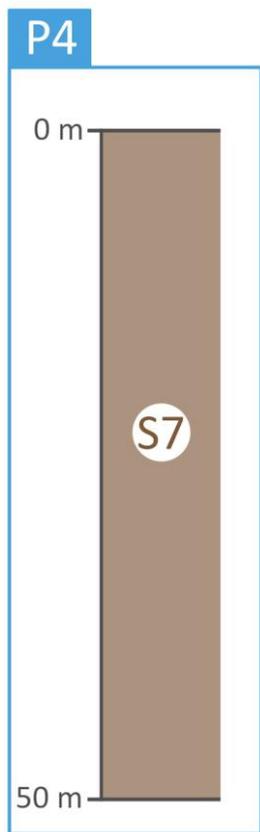


Figura A - 1.3: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas B1, B2 y B3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P3.



A

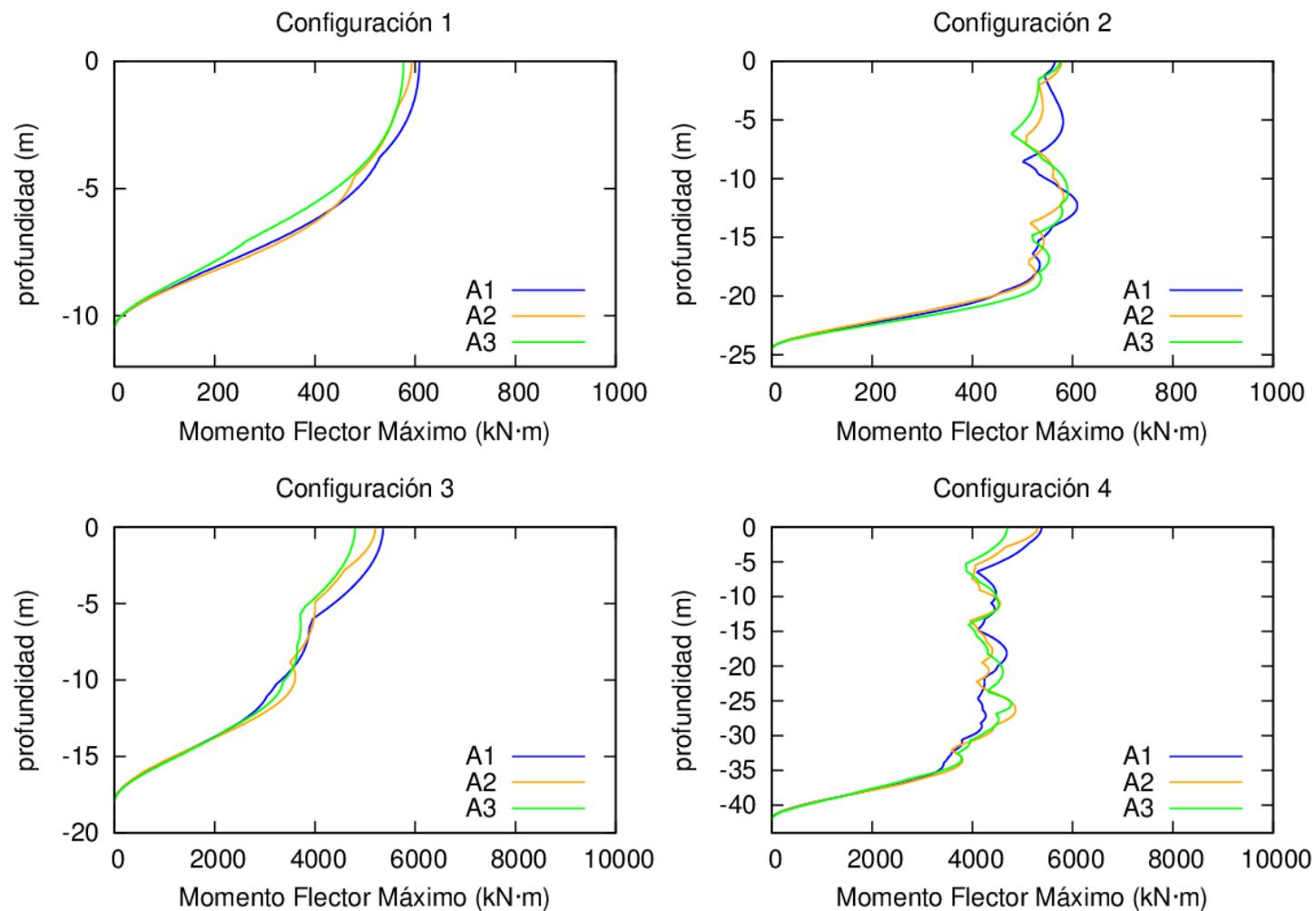
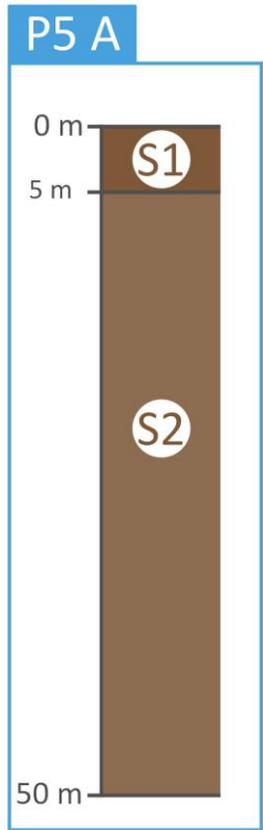


Figura A - 1.4: Envoltura de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas A1, A2 y A3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P4.



D

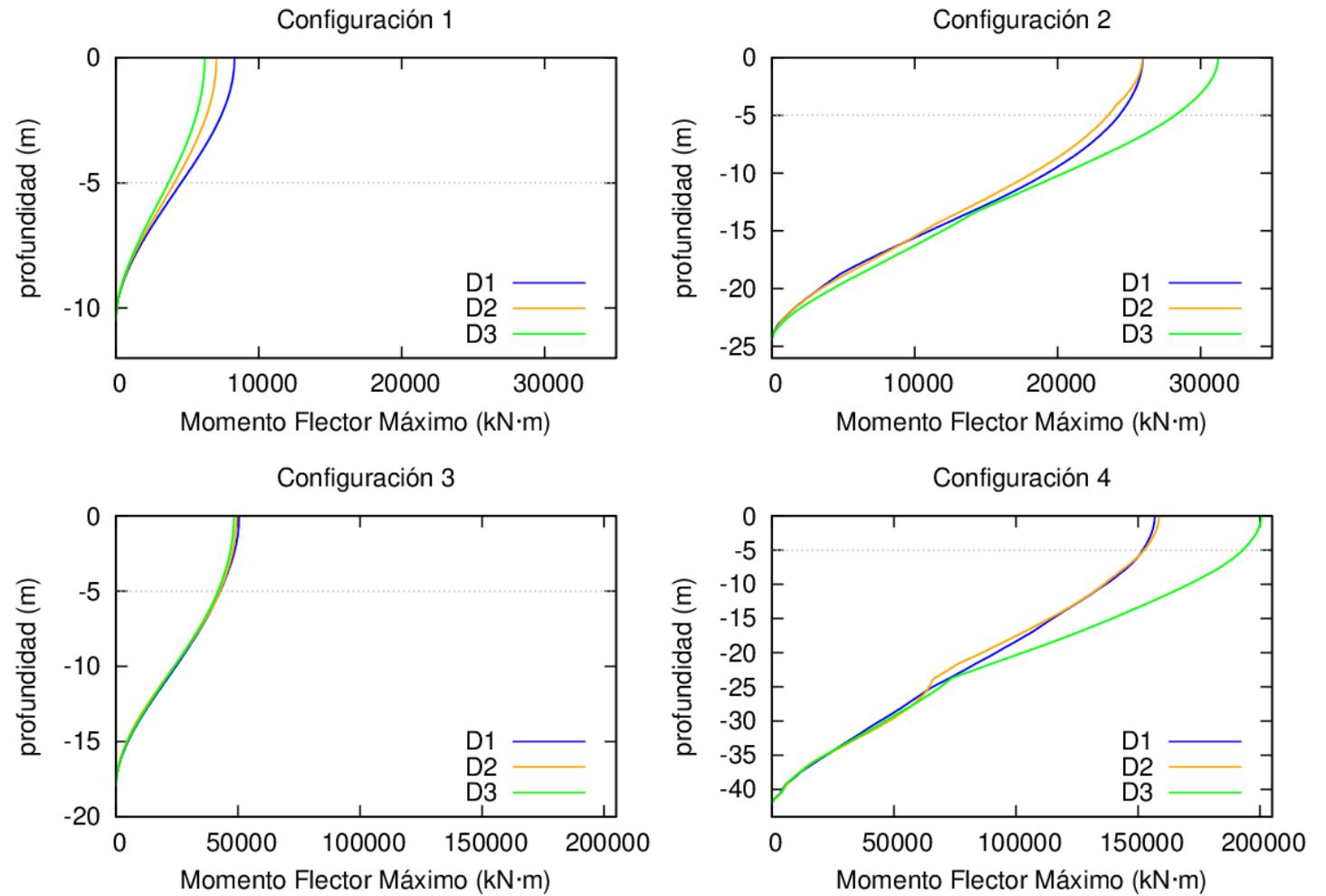
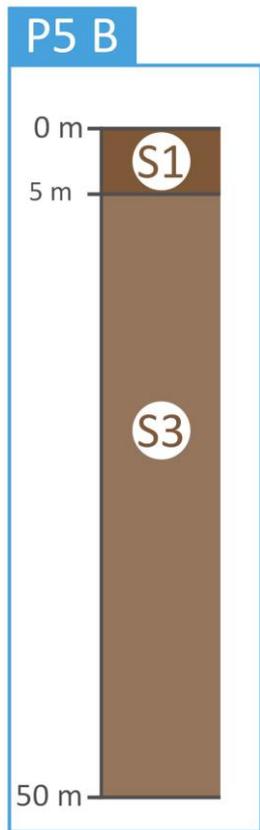


Figura A - 1.5: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P5 A.



D

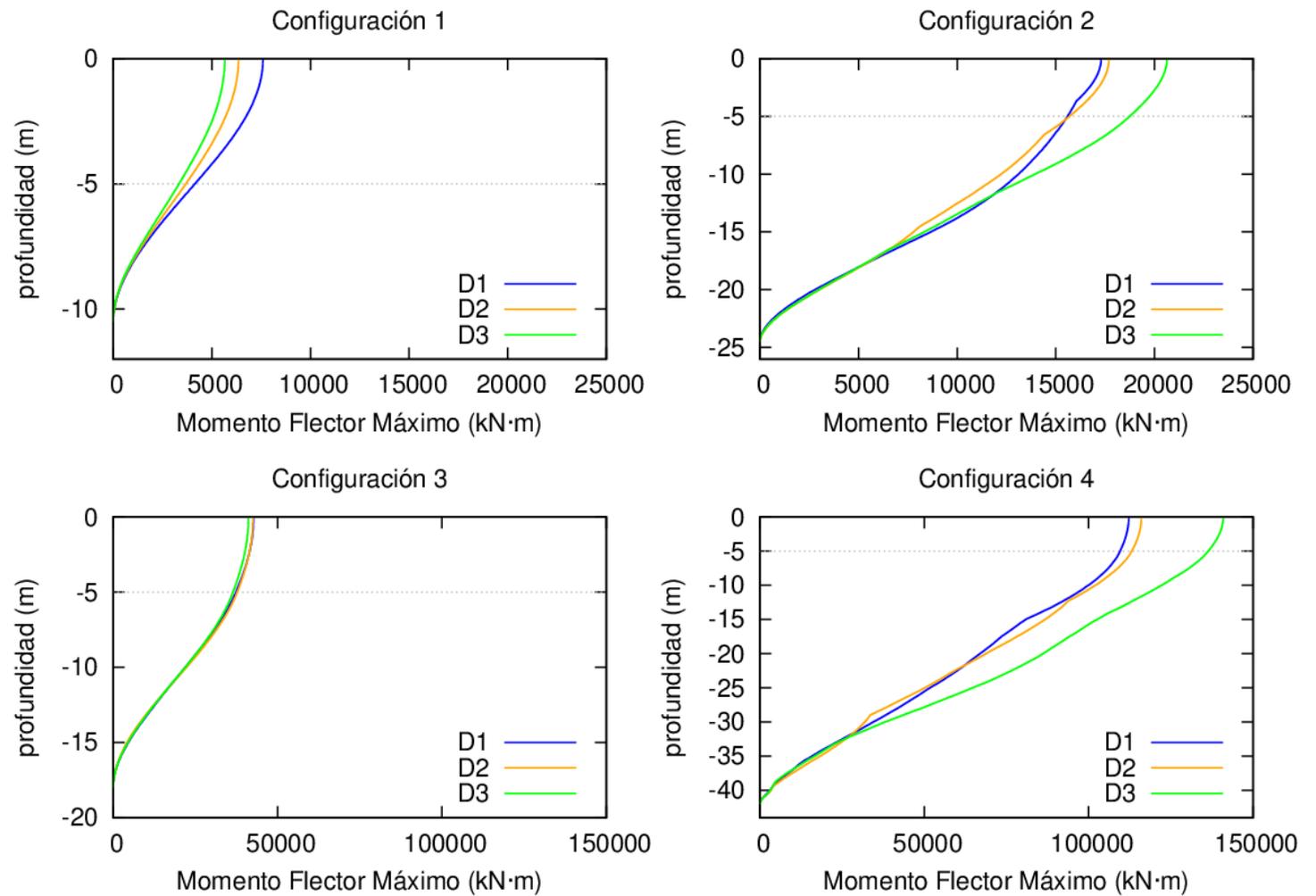
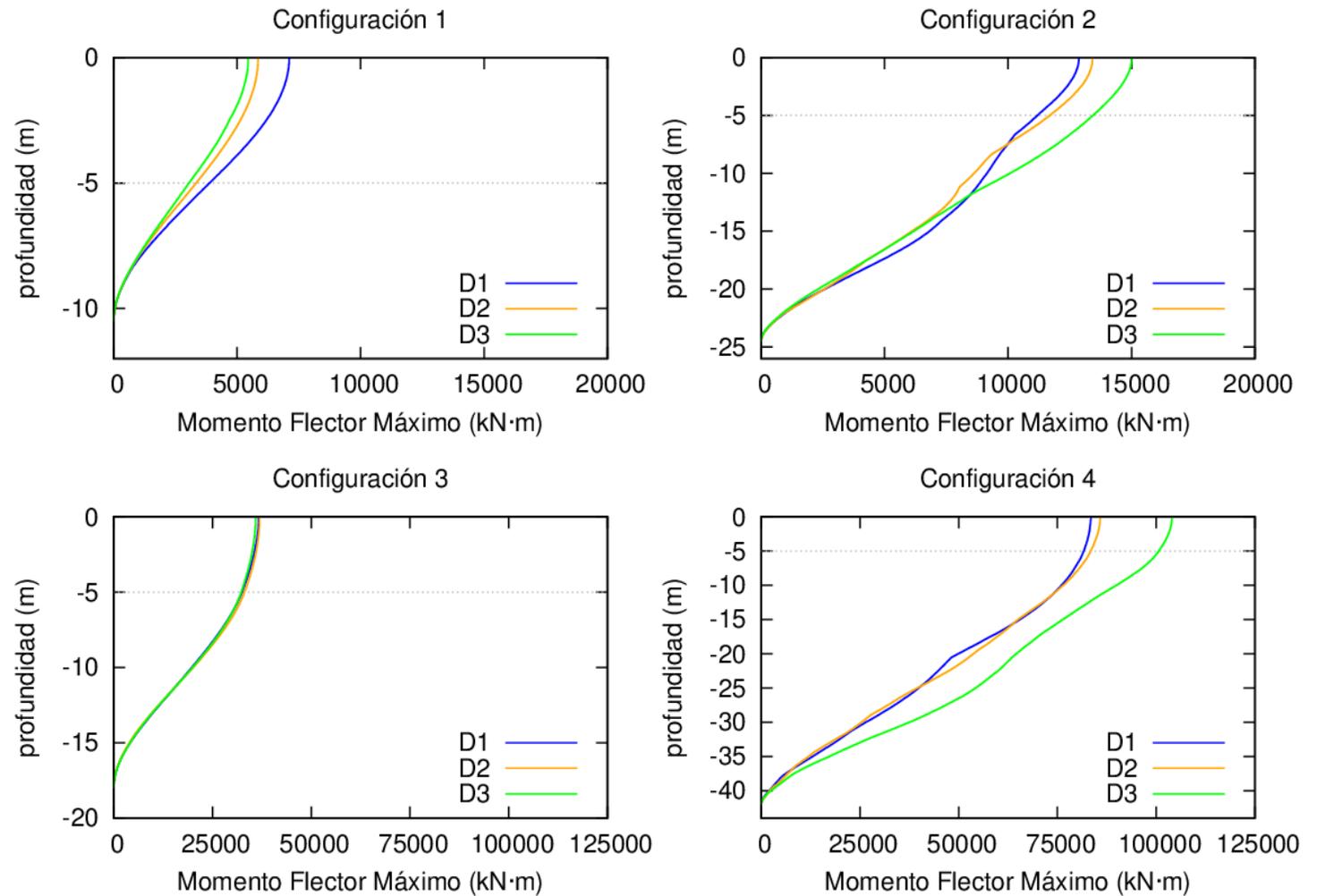
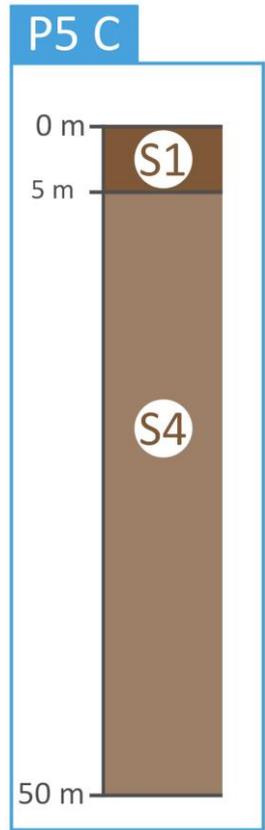
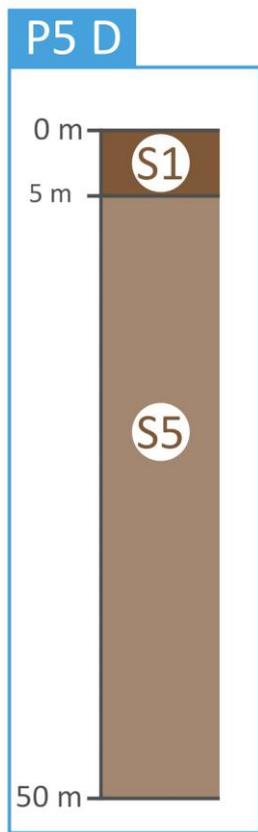


Figura A - 1.6: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P5 B.



D

Figura A - 1.7: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P5 C.



D

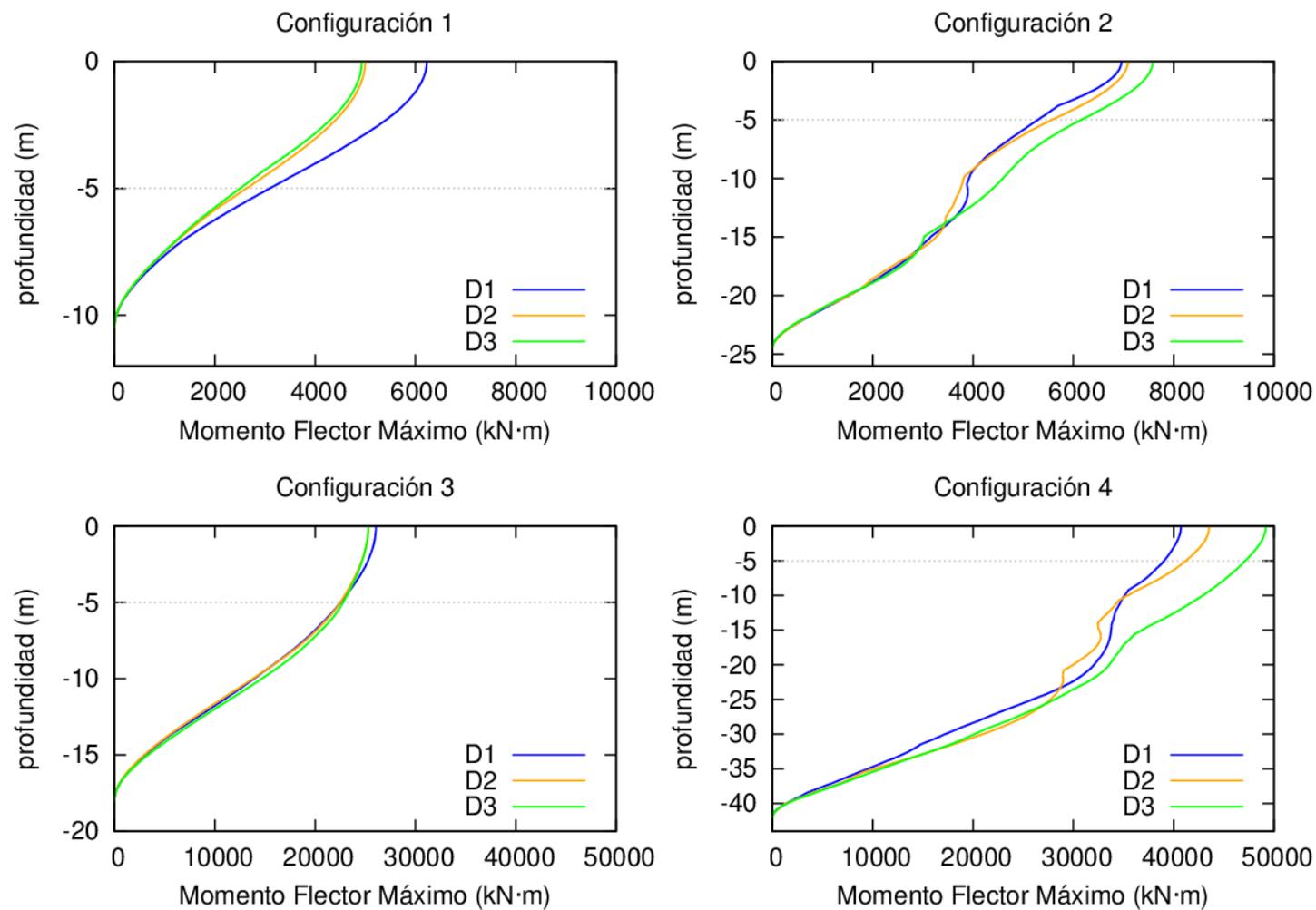
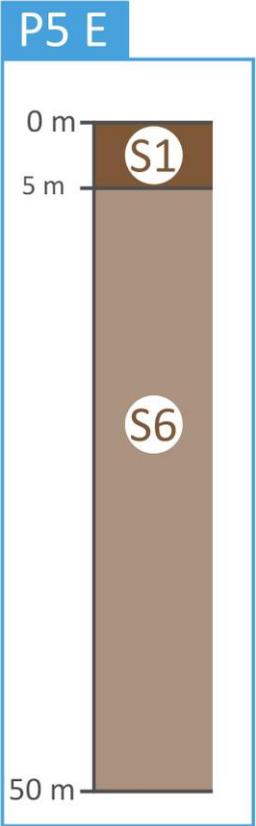


Figura A - 1.8: Envoltura de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P5 D.



D

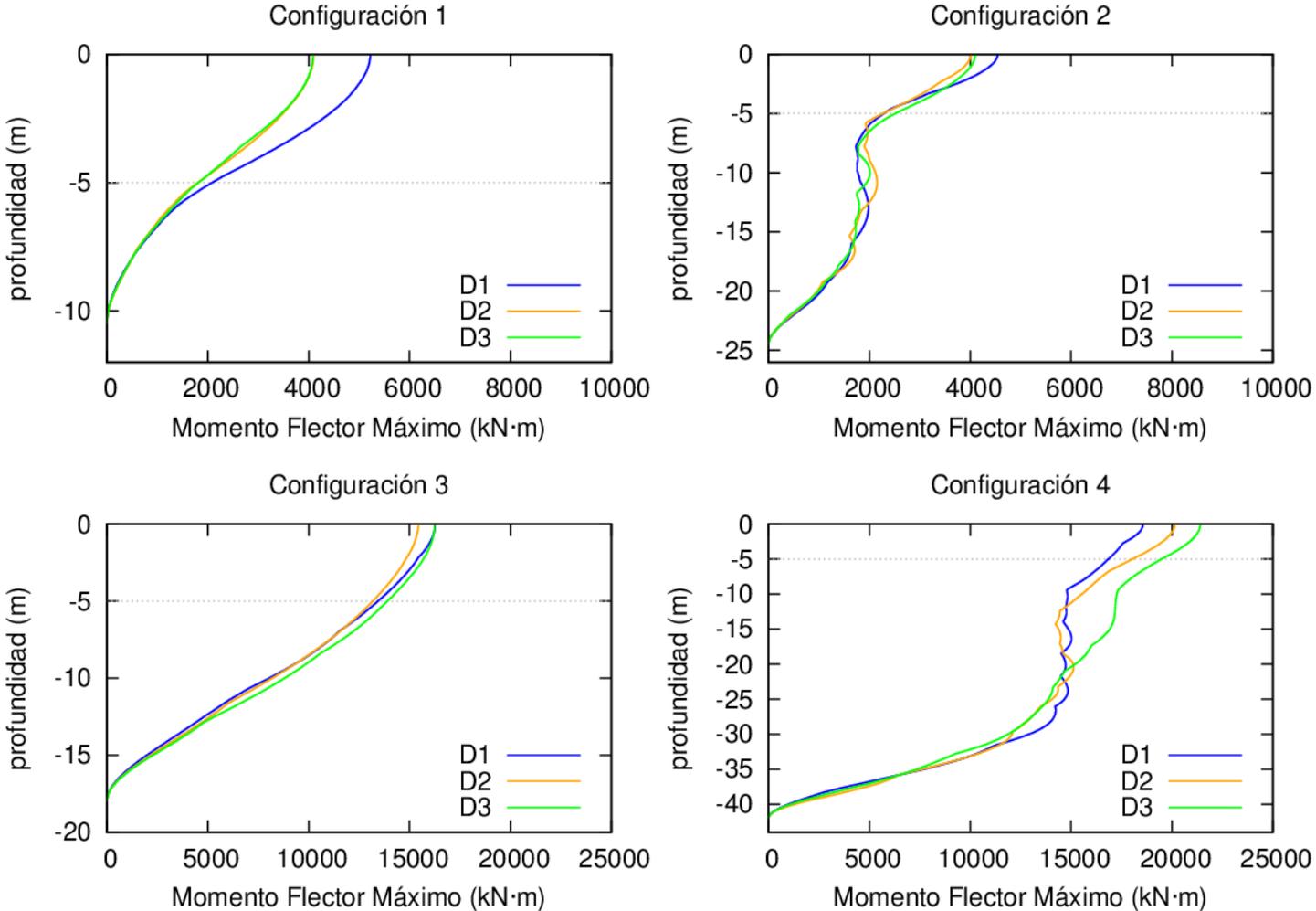
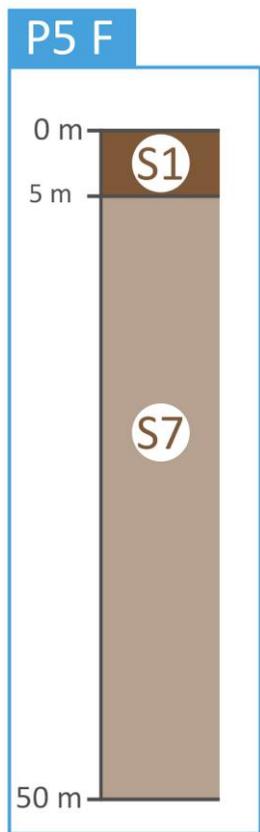


Figura A - 1.9: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P5 E.



E

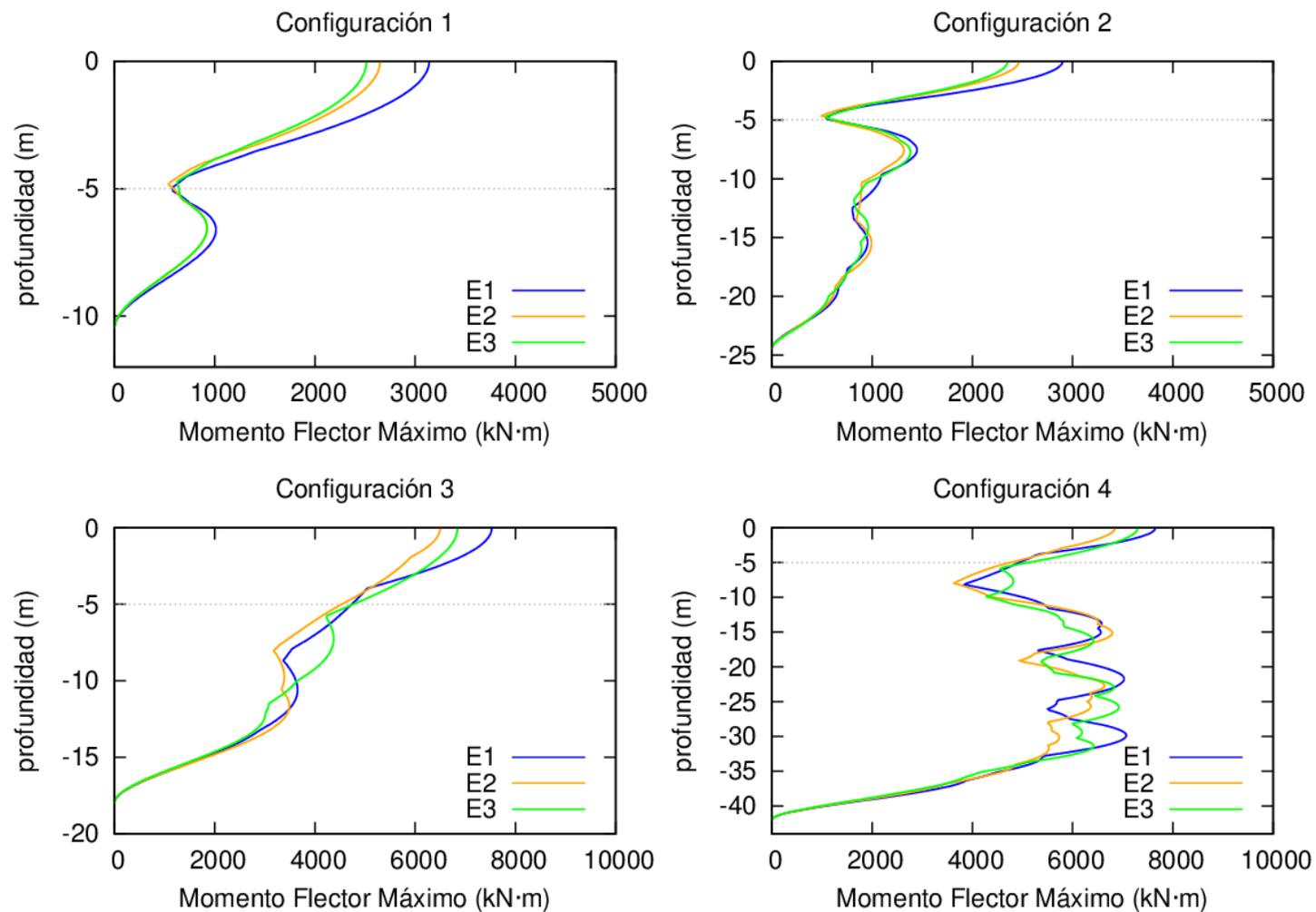


Figura A - 1.10: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas E1, E2 y E3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P5 F.

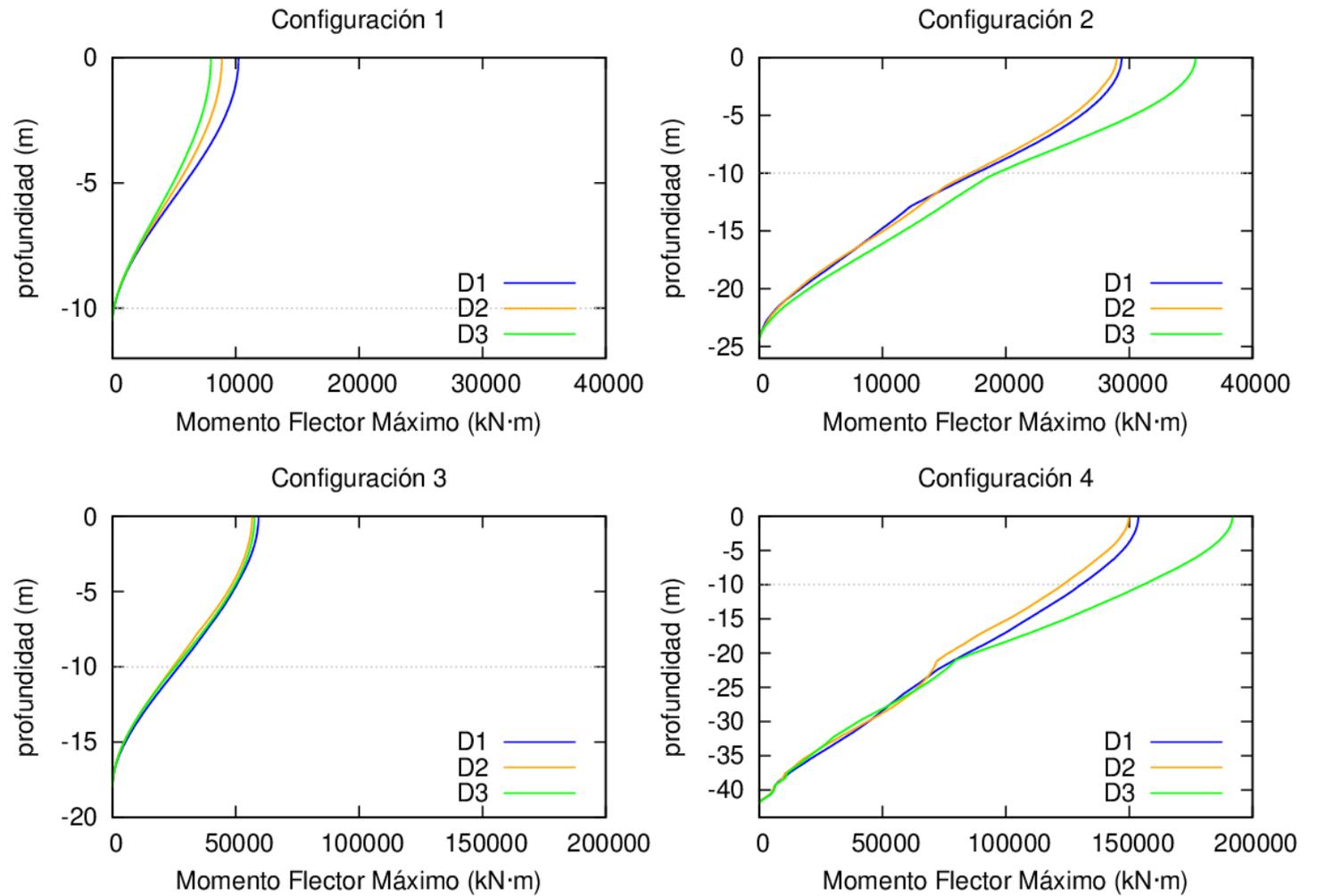
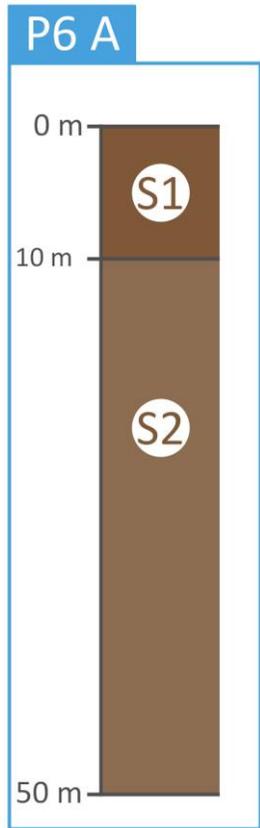
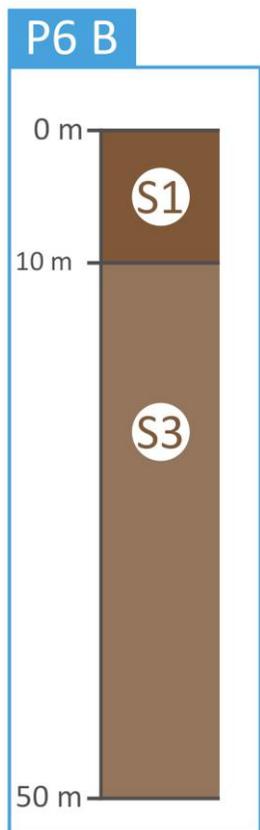


Figura A - 1.11: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P6 A.



D

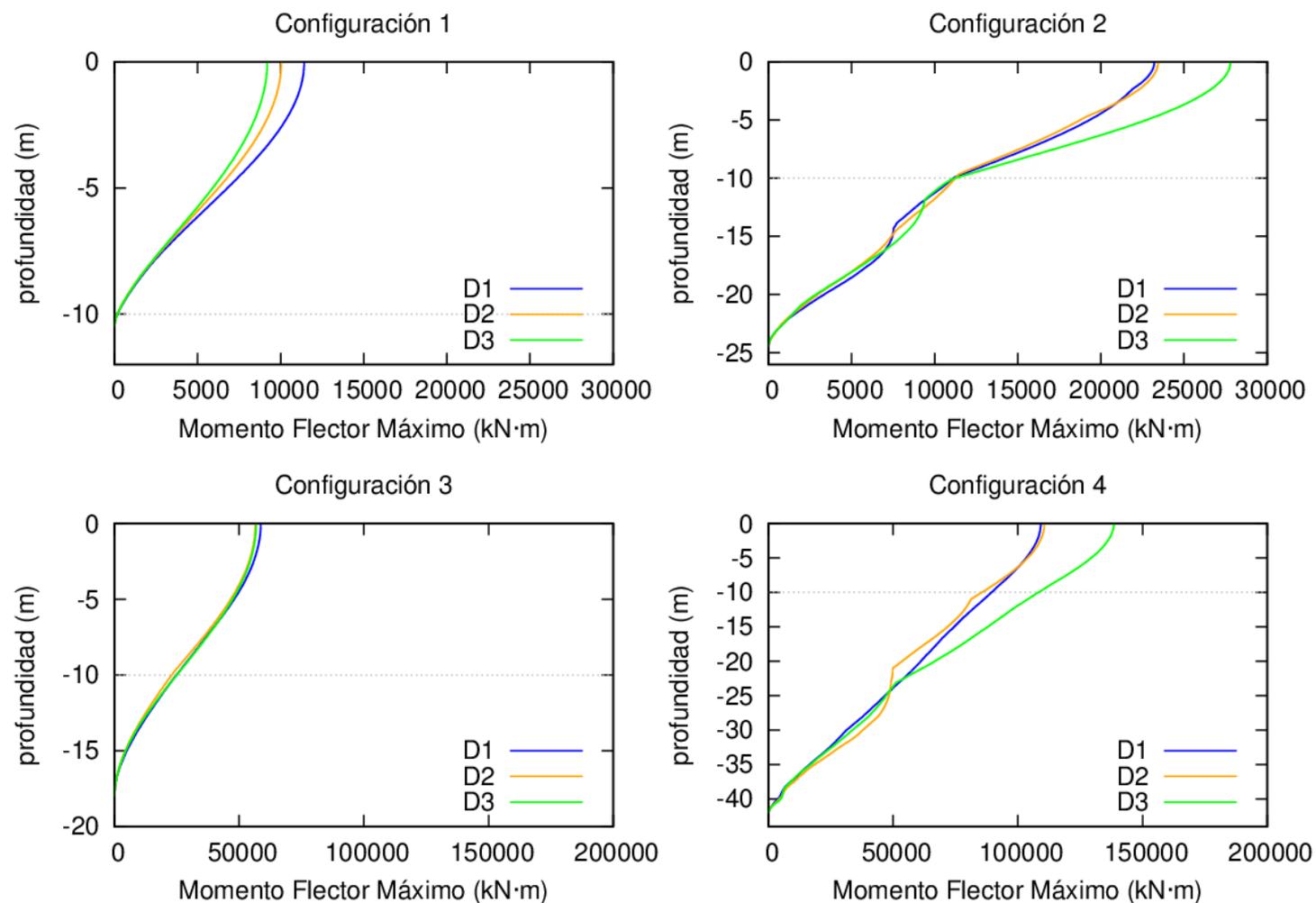


Figura A - 1.12: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P6 B.

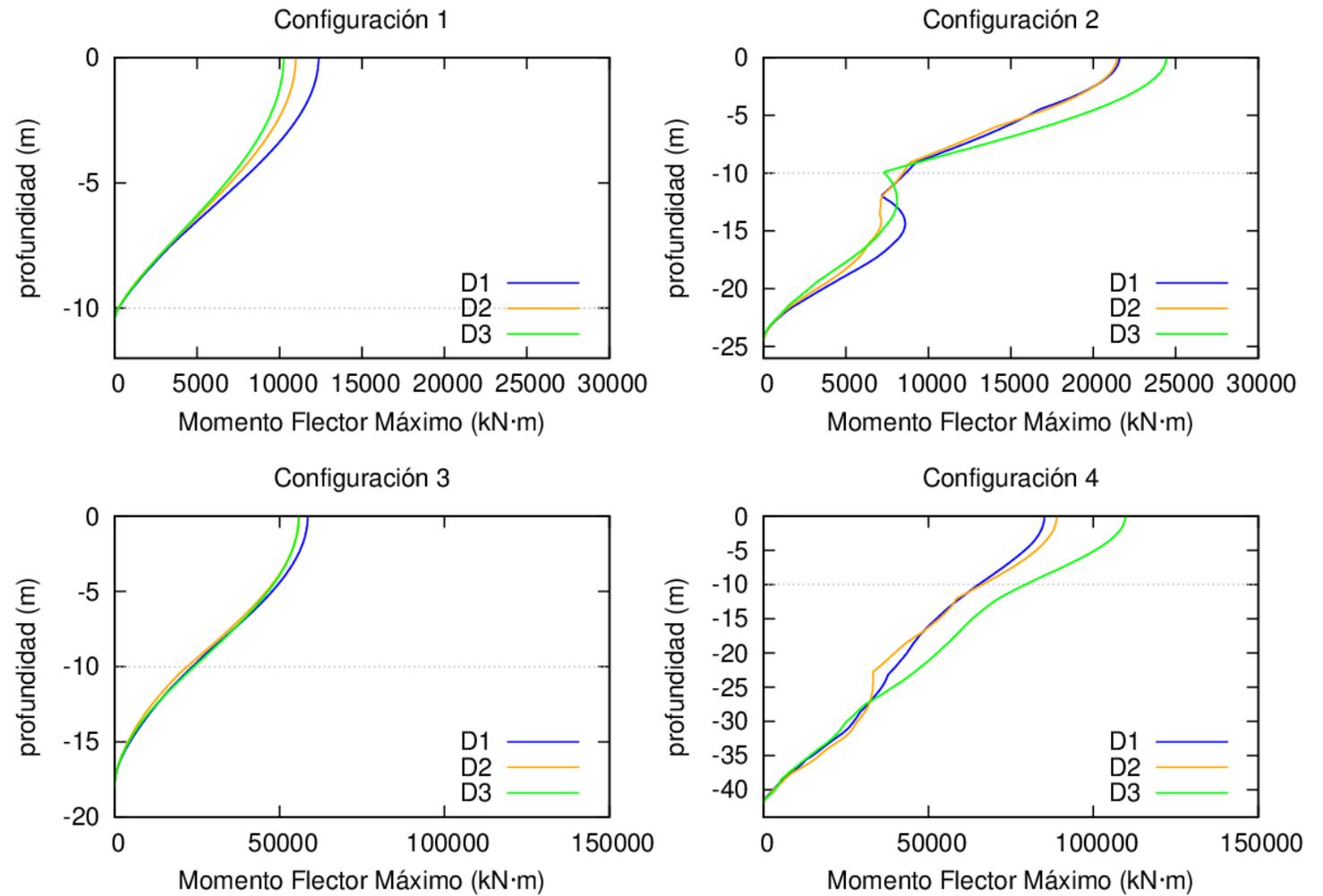
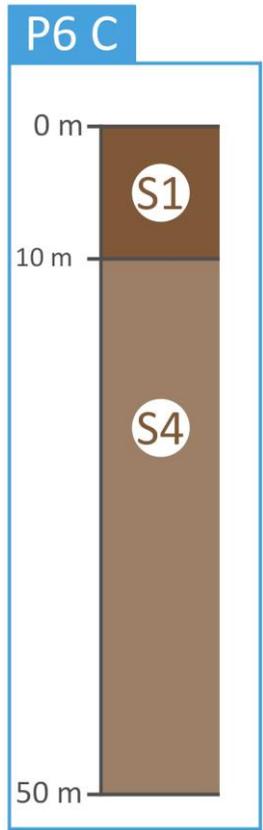
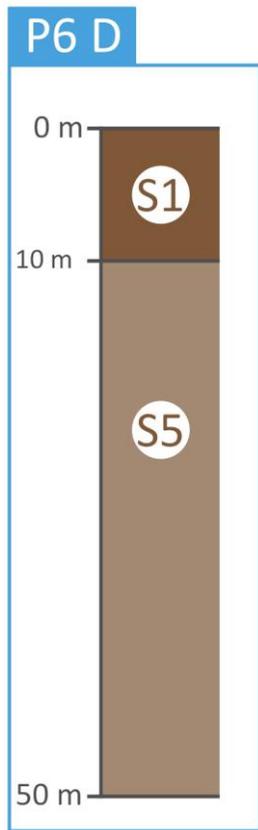


Figura A - 1.13: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P6 C.



D

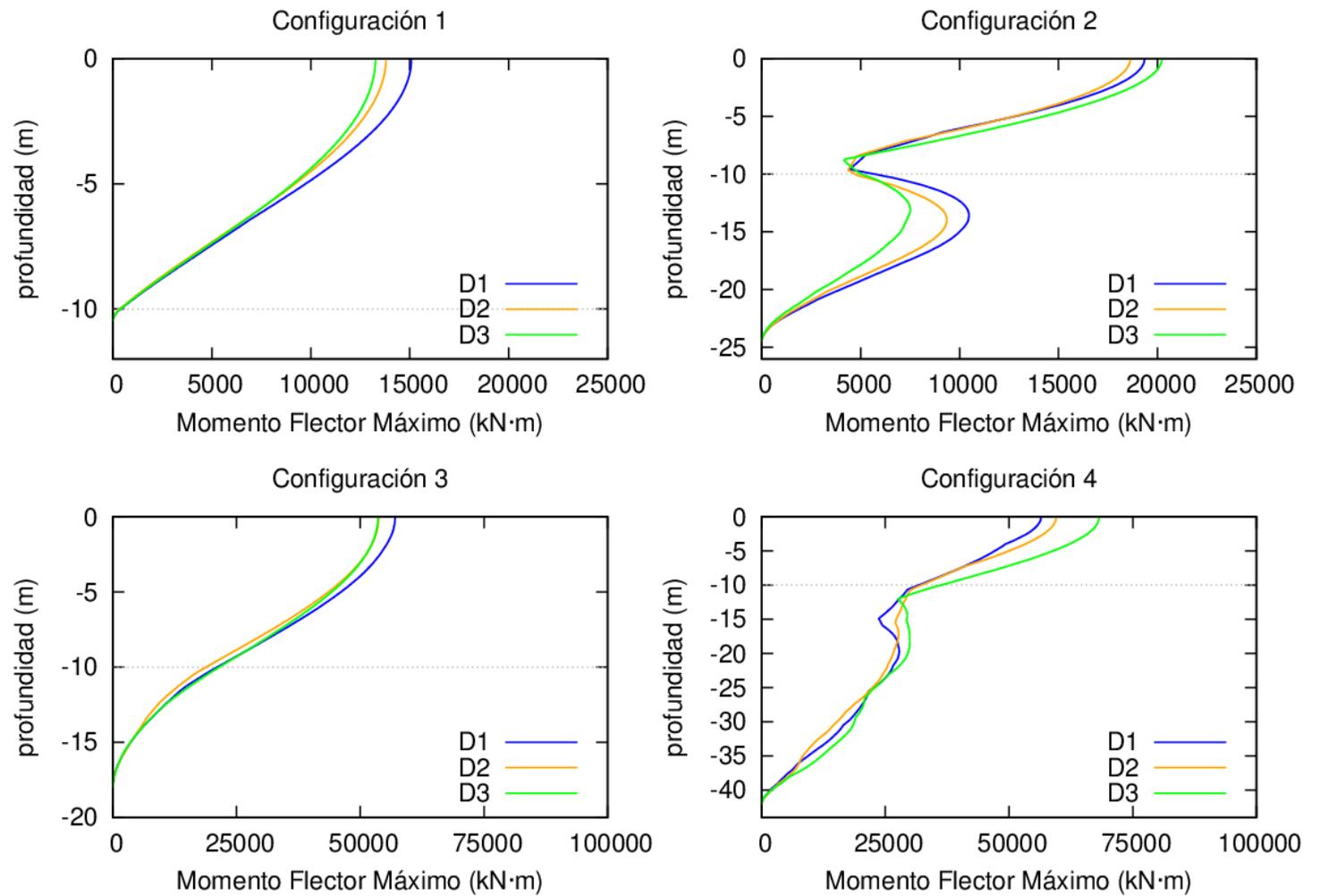


Figura A - 1.14: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P6 D.

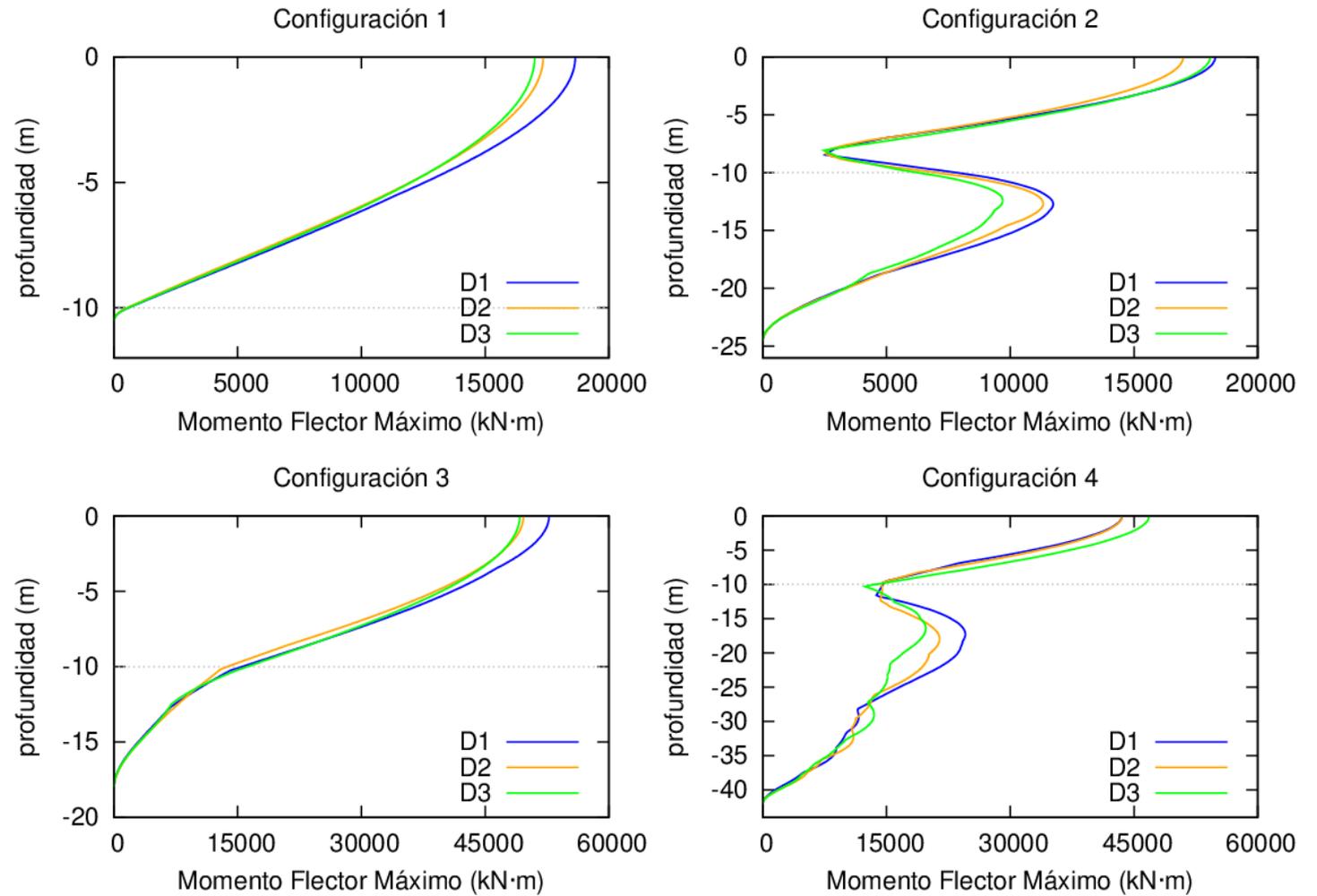
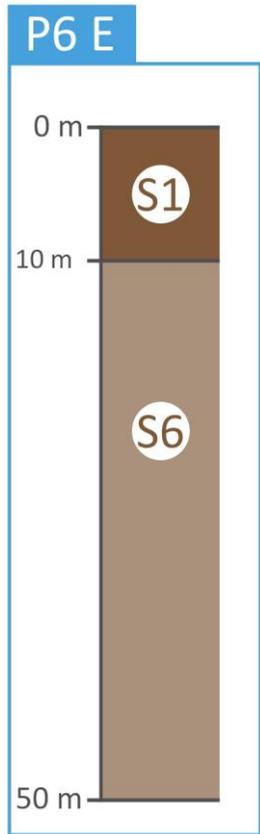
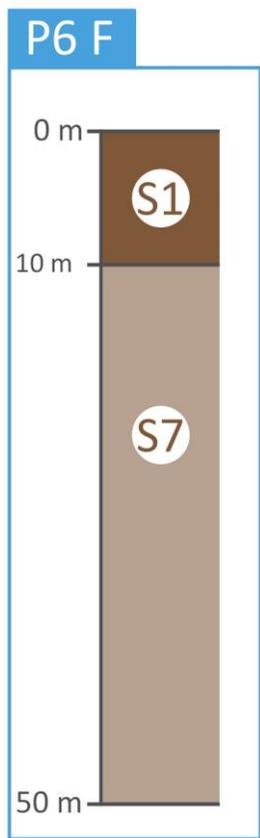


Figura A - 1.15: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P6 E.



E

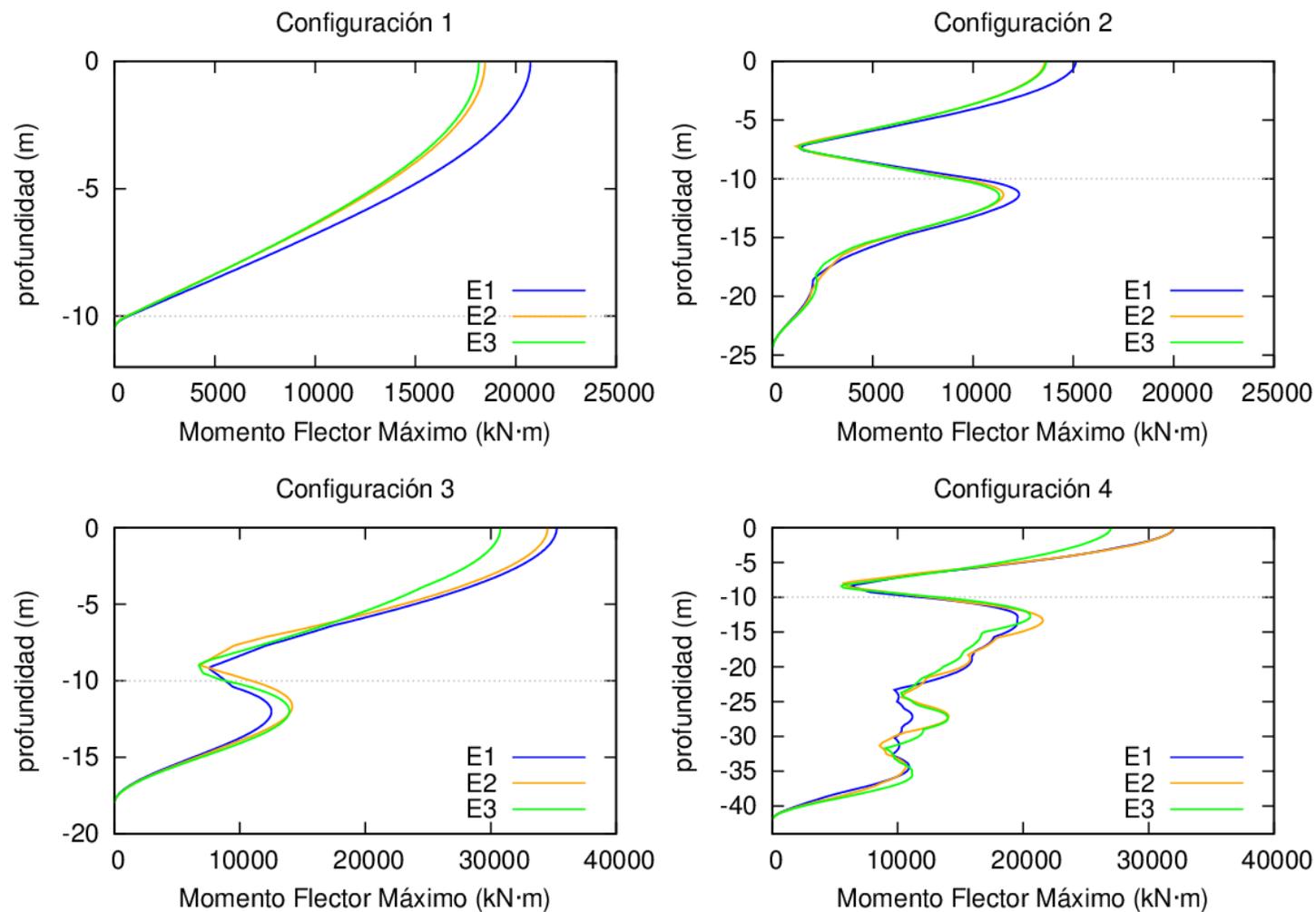


Figura A - 1.16: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas E1, E2 y E3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P6 F.

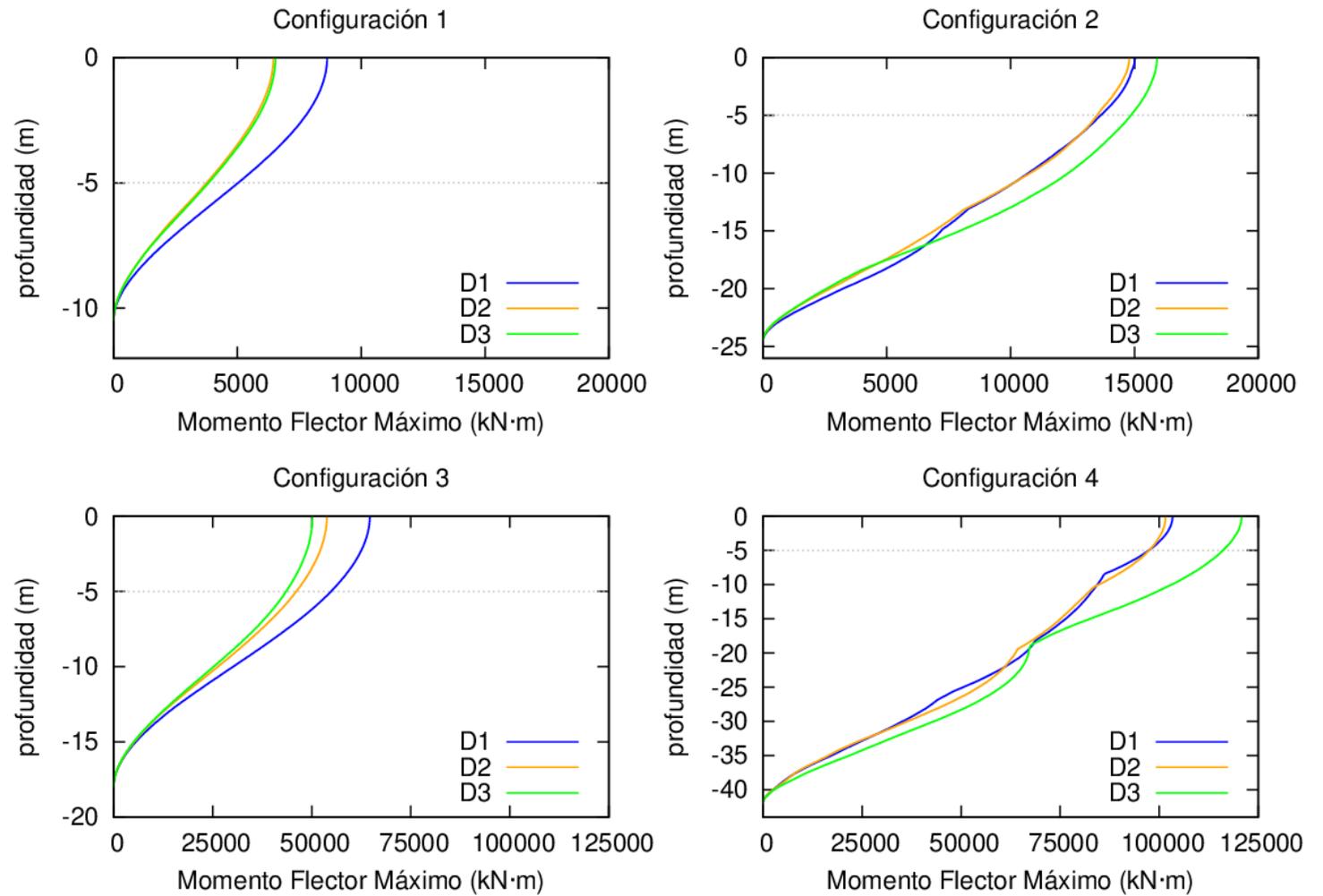
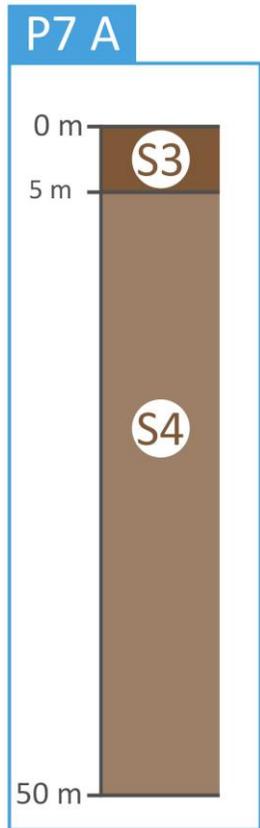
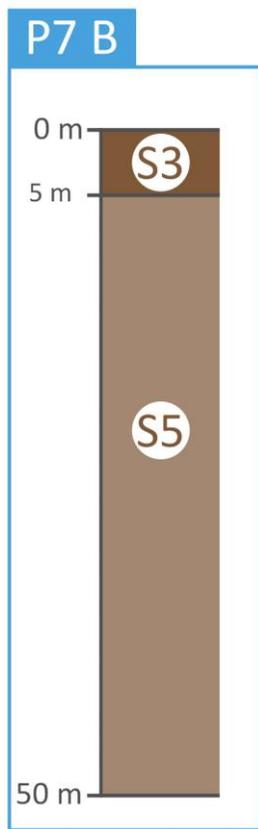


Figura A - 1.17: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P7 A.



C

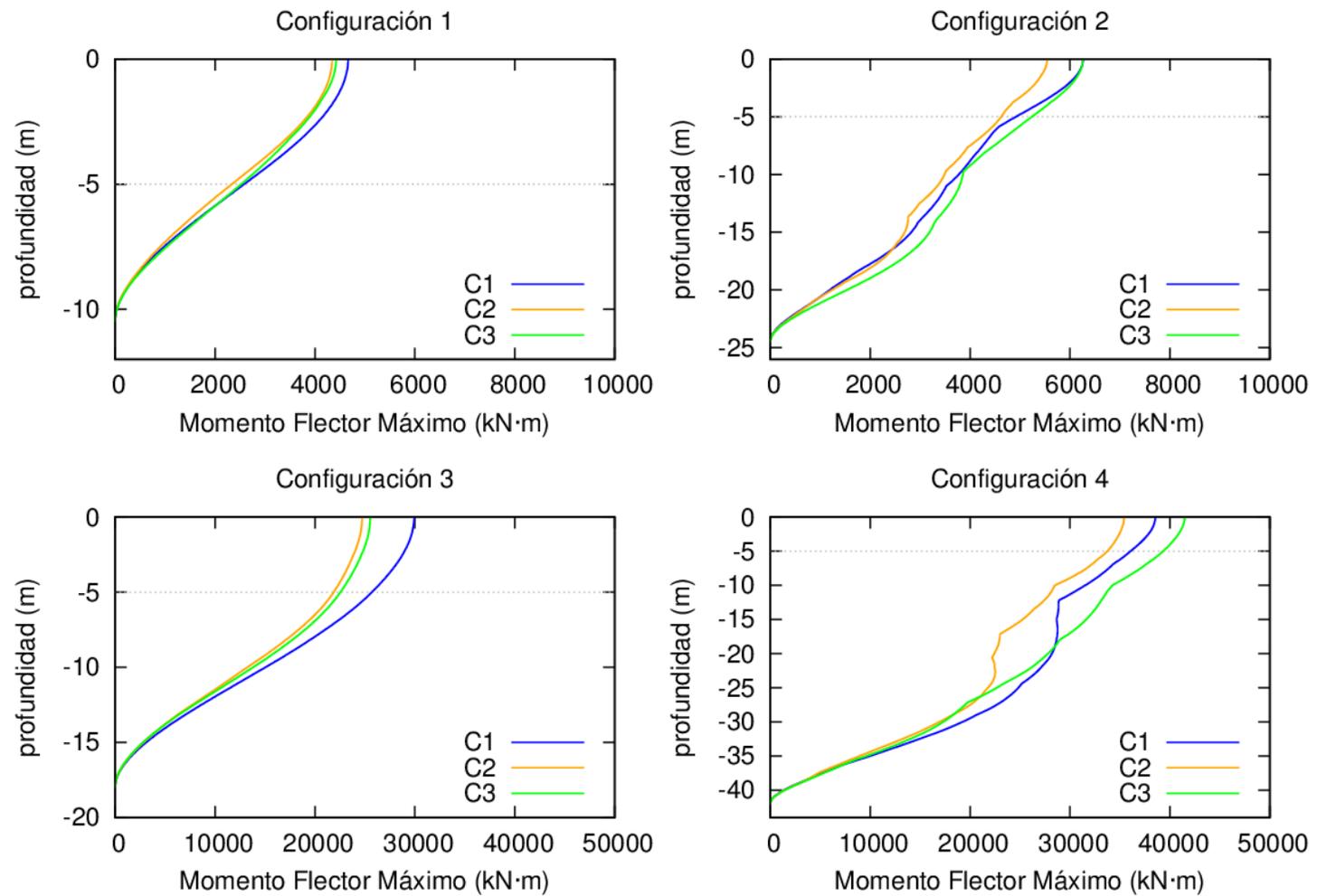


Figura A - 1.18: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas C1, C2 y C3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P7 B.

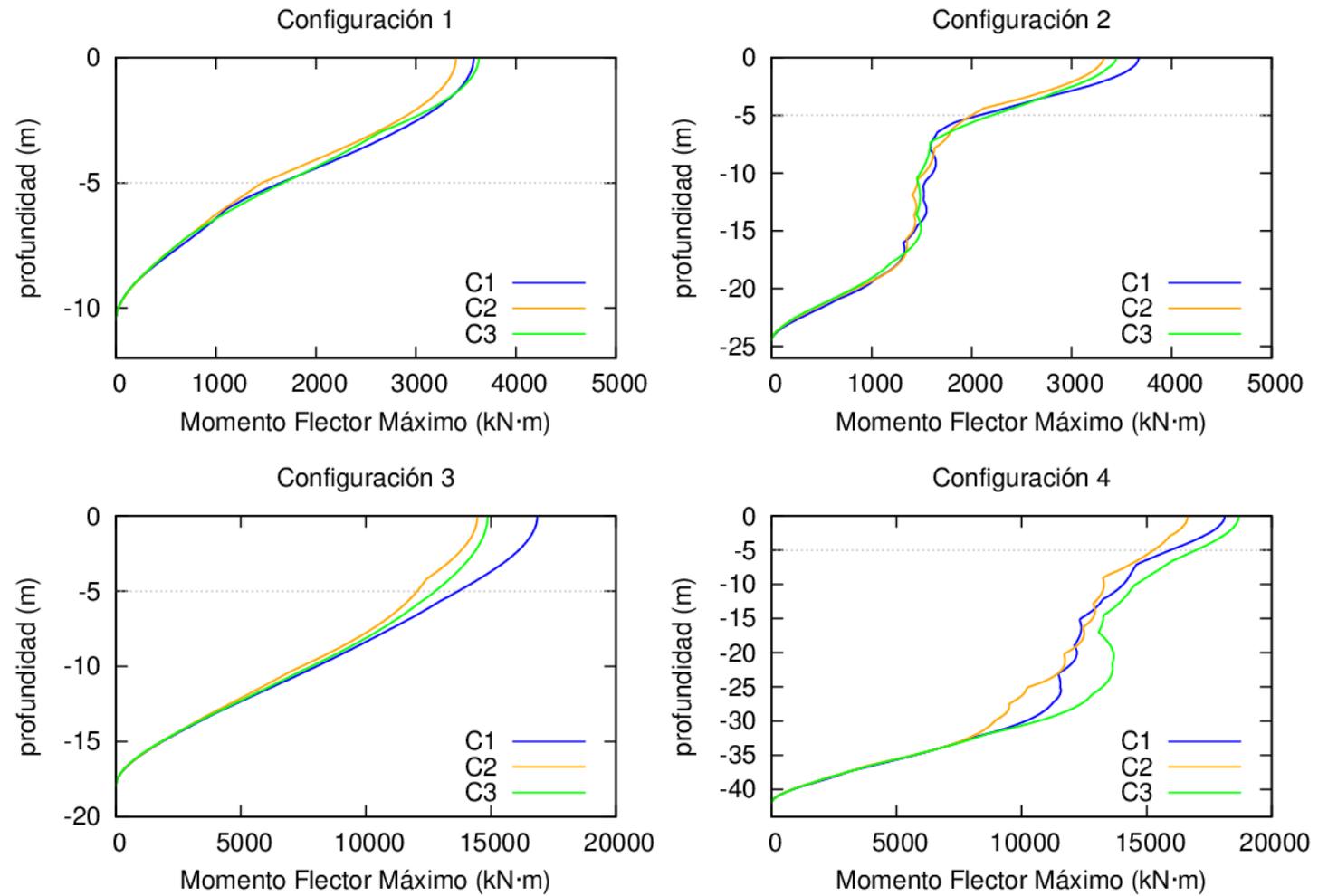
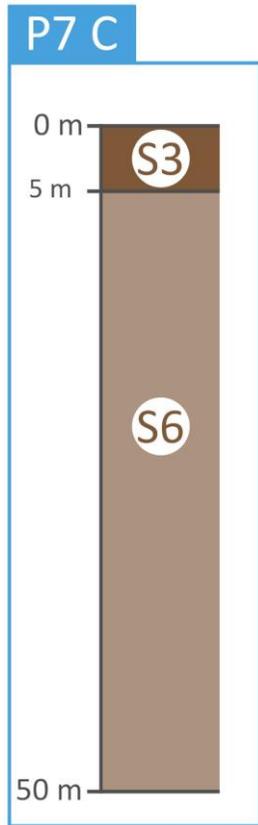
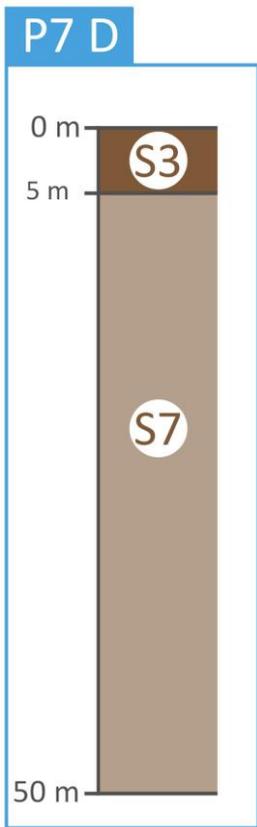


Figura A - 1.19: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas C1, C2 y C3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P7 C.



B

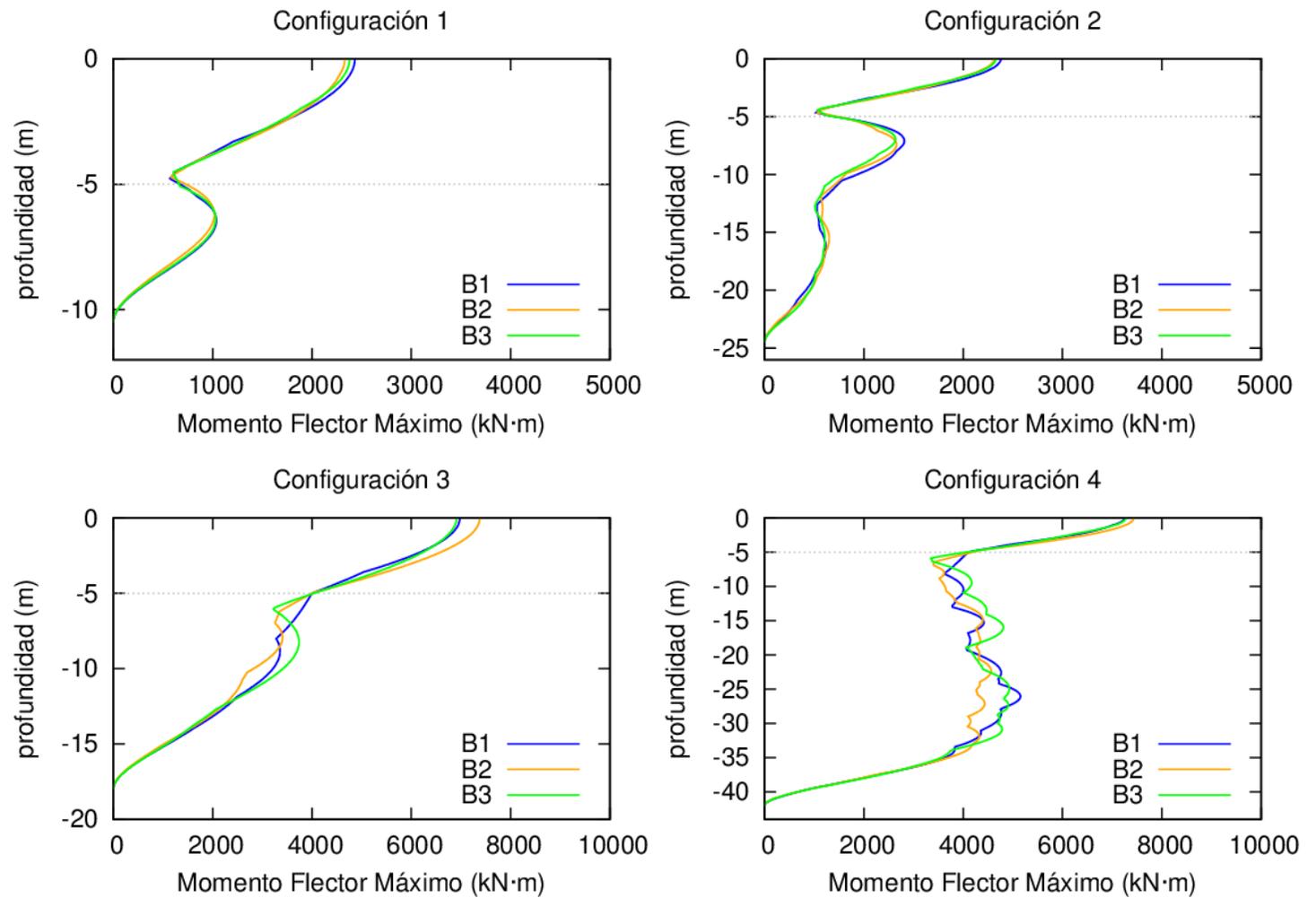
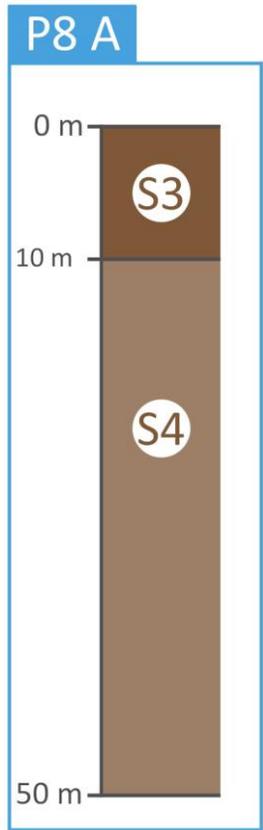


Figura A - 1.20: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas B1, B2 y B3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P7 D.



D

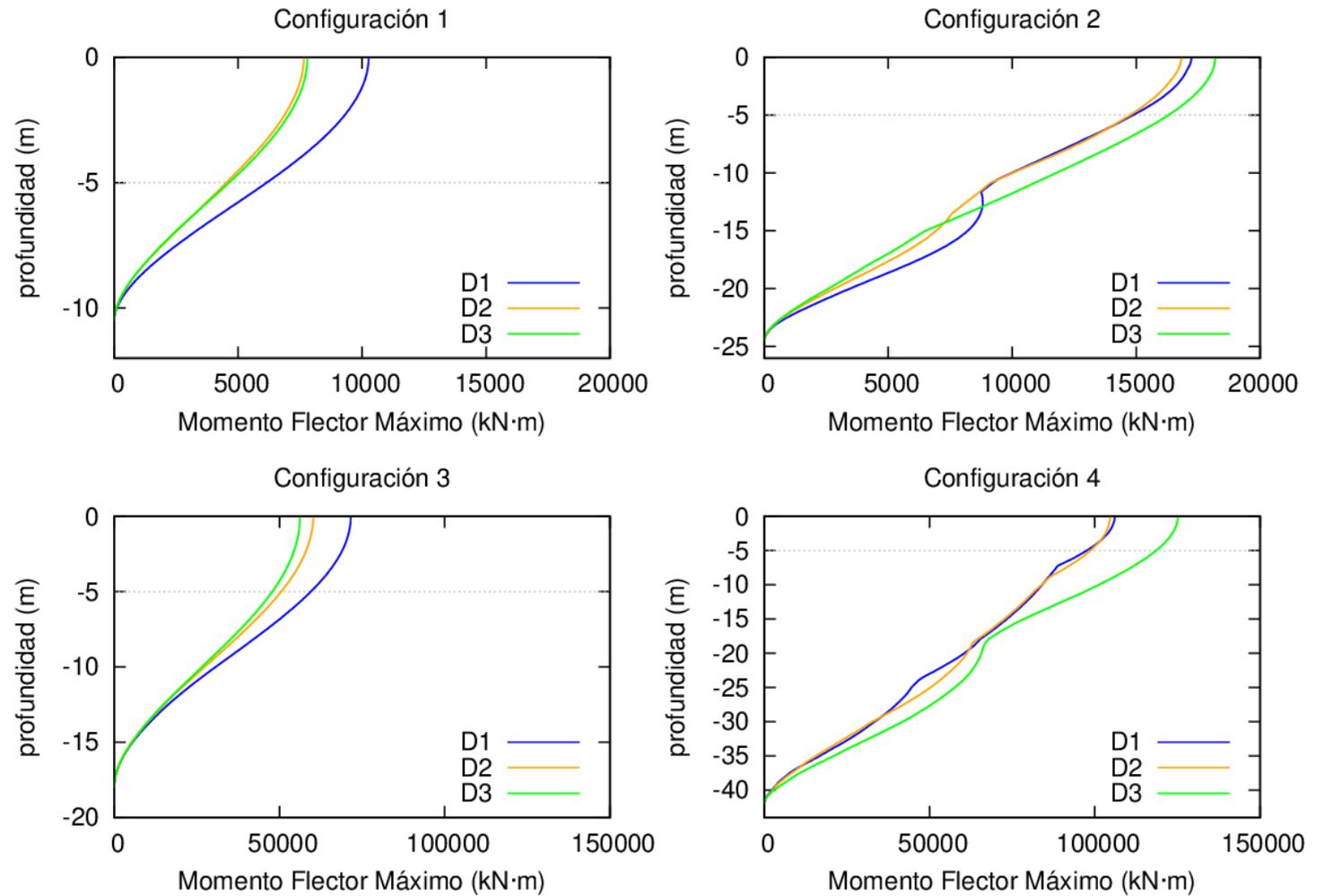
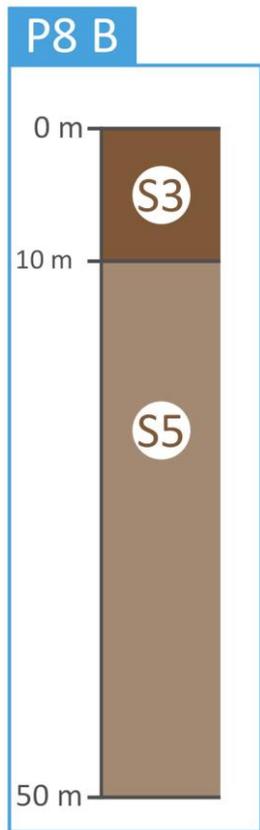


Figura A - 1.21: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P8 A.



C

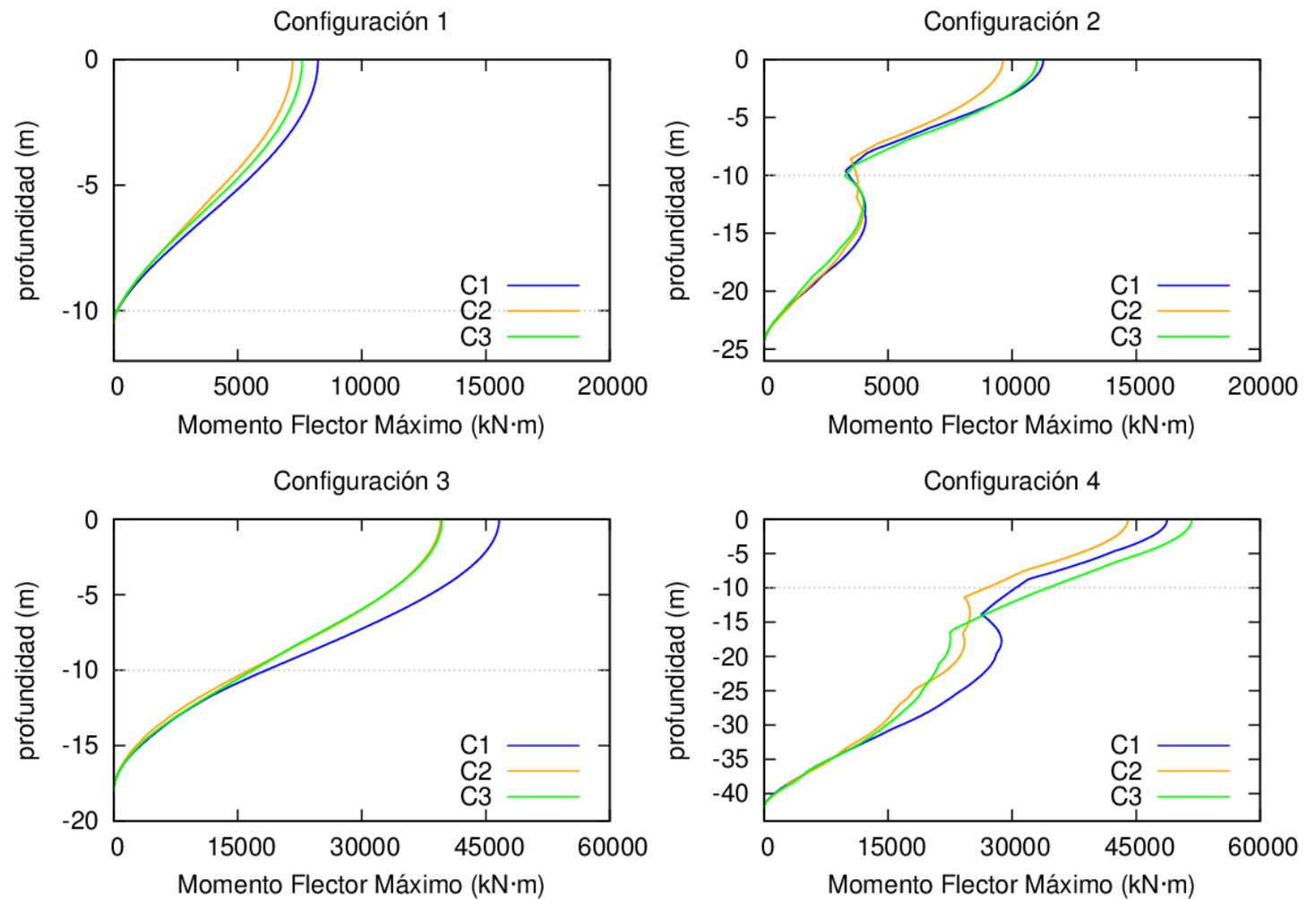


Figura A - 1.22: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas C1, C2 y C3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P8 B.

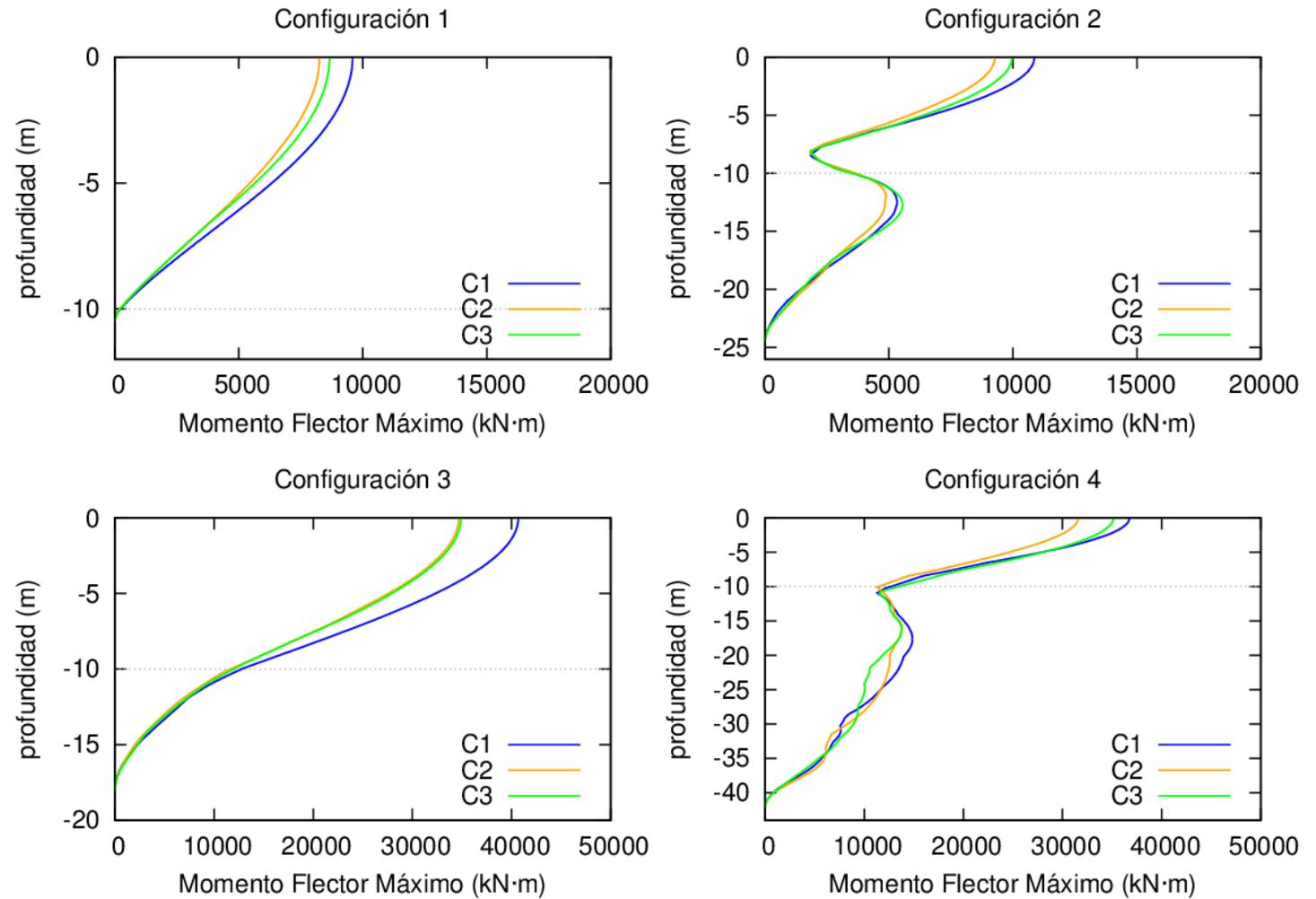
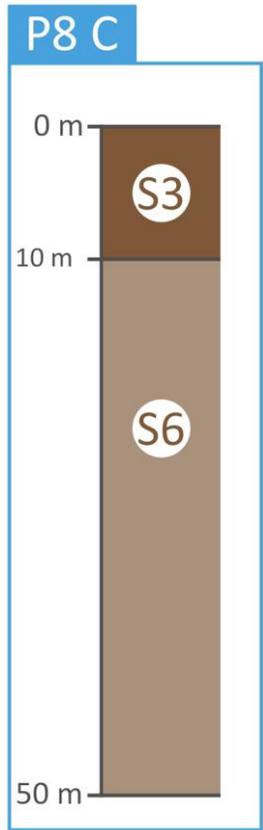
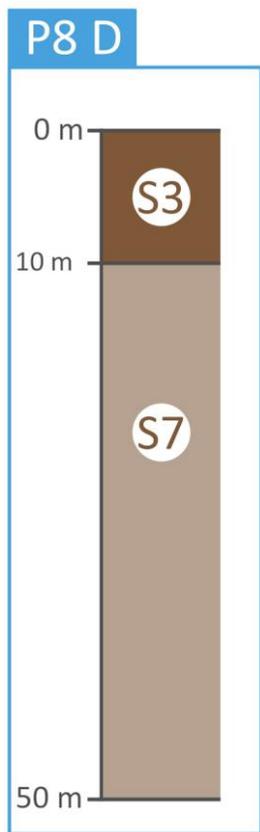


Figura A - 1.23: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas C1, C2 y C3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P8 C.



E

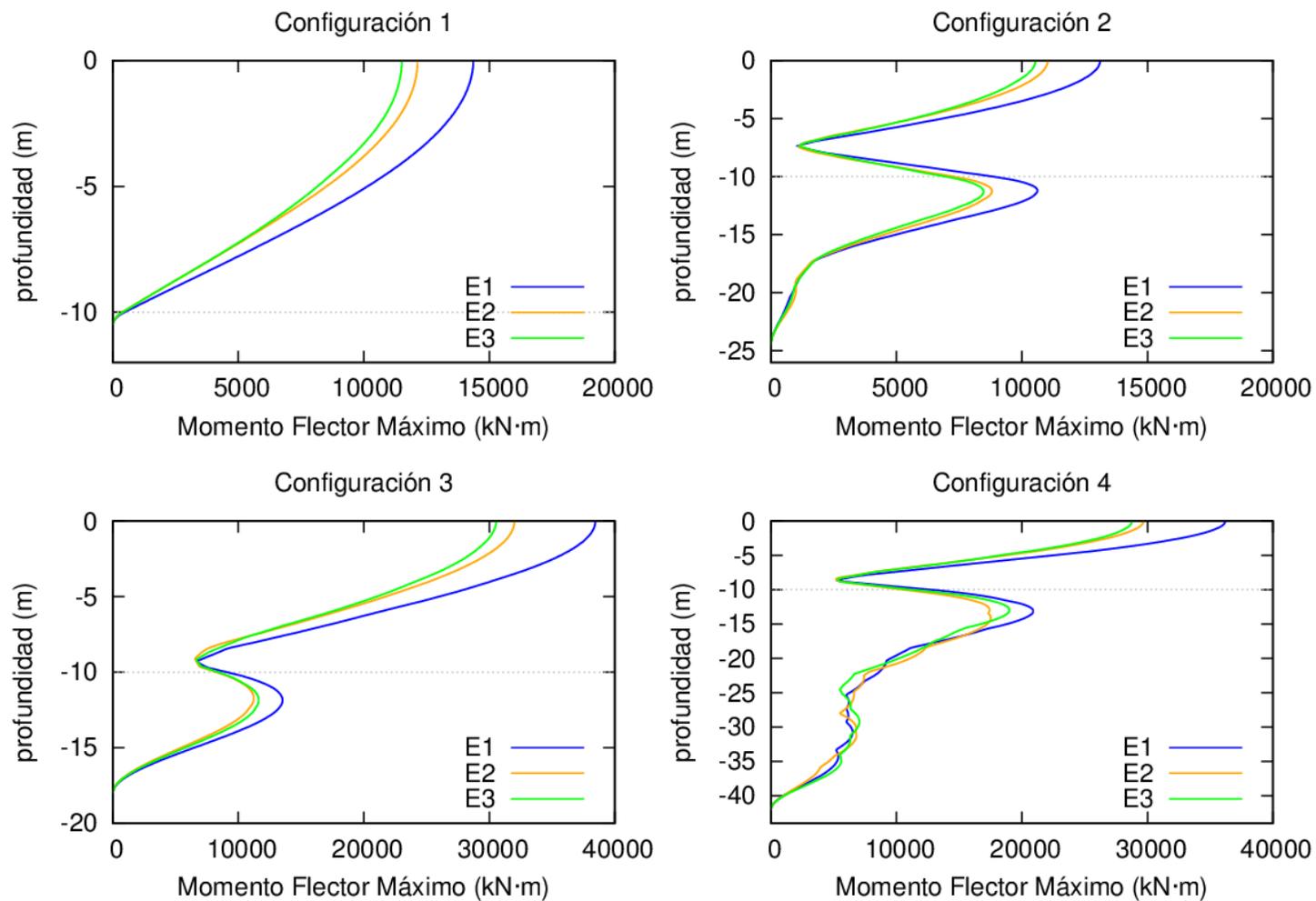


Figura A - 1.24: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas E1, E2 y E3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P8 D.

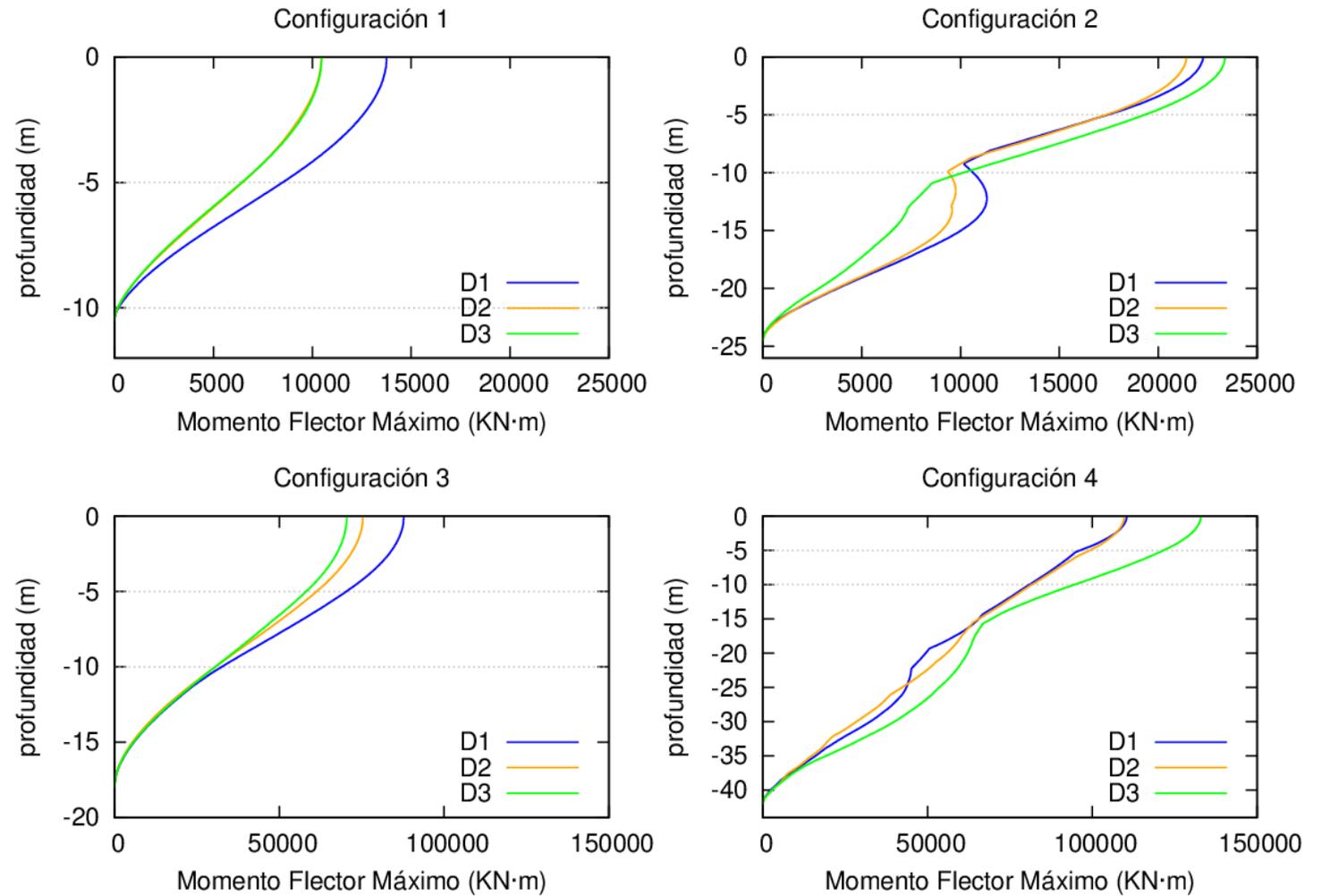
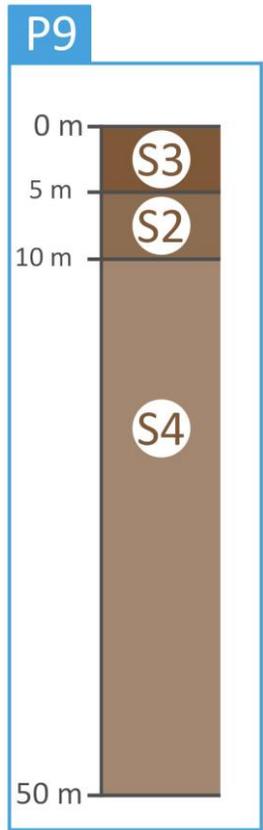


Figura A - 1.25: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas D1, D2 y D3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P9.

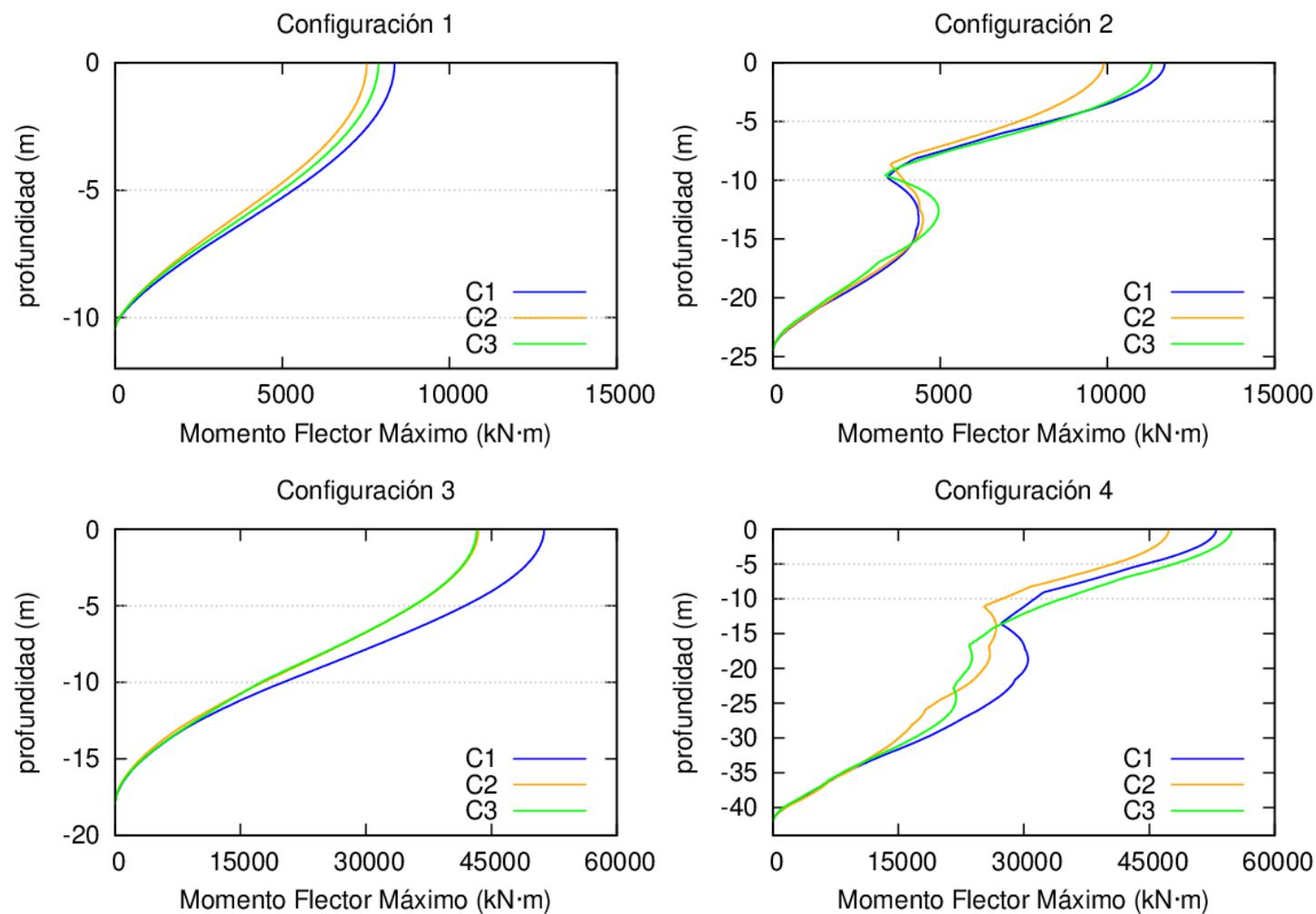
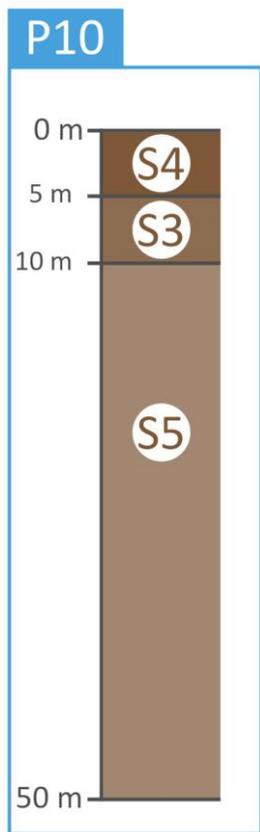


Figura A - 1.26: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas C1, C2 y C3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P10.

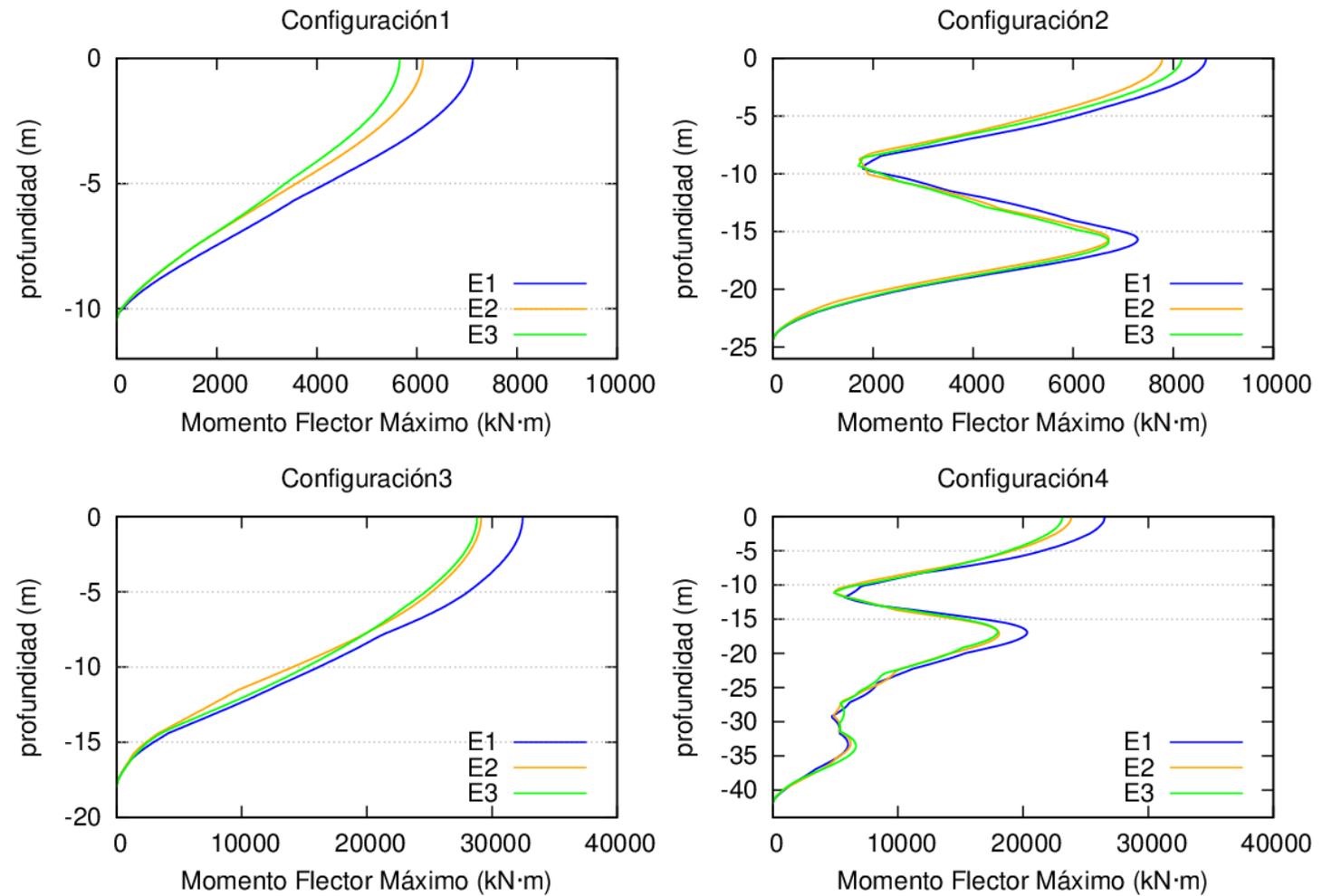
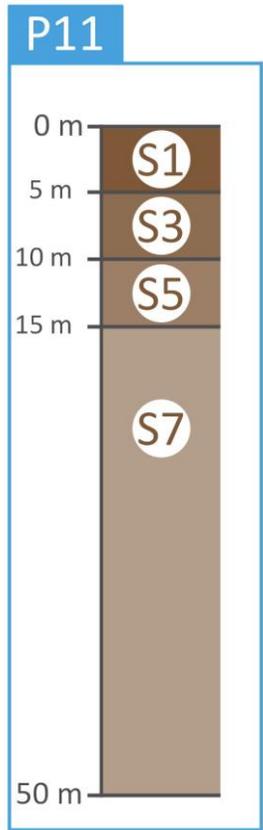
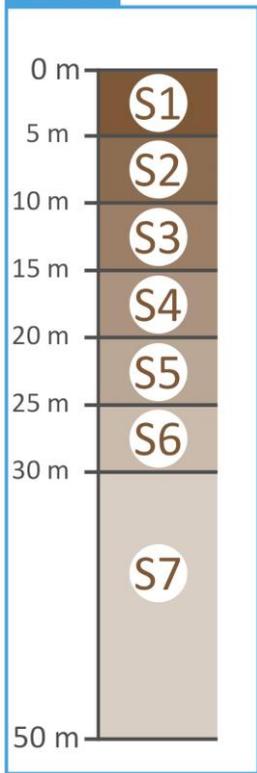


Figura A - 1.27: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas E1, E2 y E3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P11.

P12



E

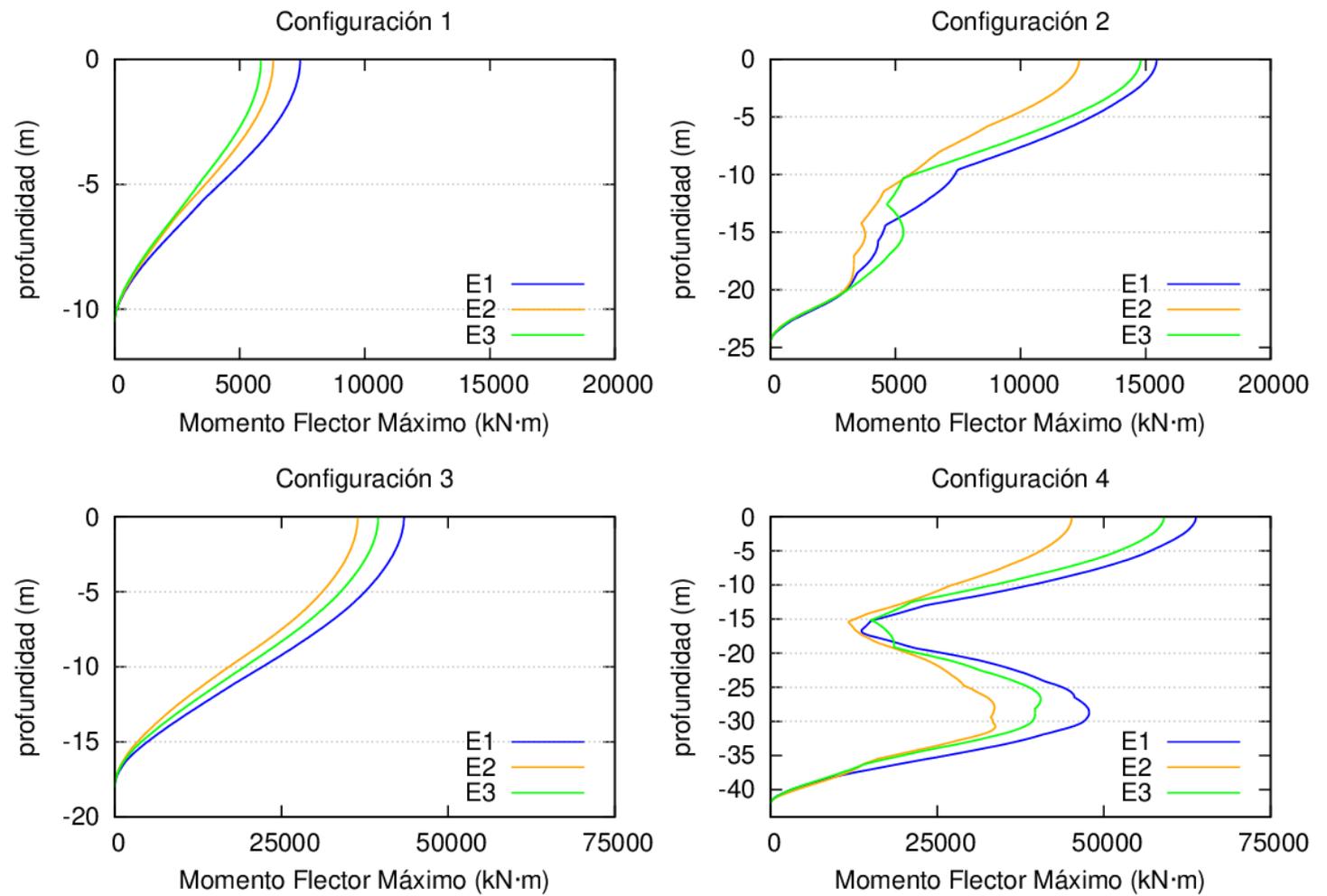


Figura A - 1.28: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos a partir de los acelerogramas E1, E2 y E3 en las 4 configuraciones de pilotes estudiadas para la estratificación P12.

A.2

Estudio de la influencia del diámetro sobre la distribución de momentos

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

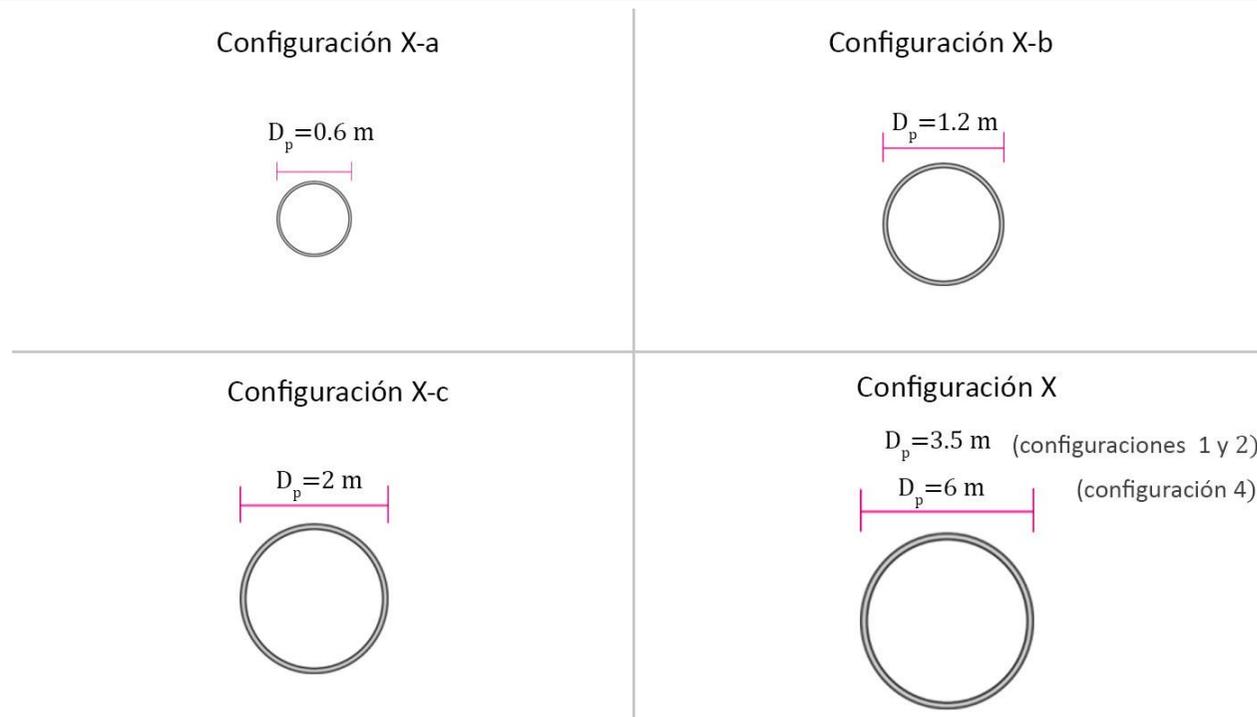
En la parte superior de la columna izquierda se muestra el perfil estratigráfico estudiado, codificado de la manera en que se describe en el punto 3.3.2. Se distingue cada estrato que lo conforma, su potencia y su tipo de suelo según la tabla 3.2.

TIPO DE TERRENO

En la parte inferior de la columna izquierda se presenta el tipo de terreno según el EC8-1 [7] que le corresponde al perfil estratigráfico estudiado, tal como se dispone en la tabla 3.3.

FIGURAS DE RESULTADOS

En la columna derecha se presentan las figuras de resultados de la sección 3.3.2, compuestas de 4 gráficas, cada una referida a una configuración de pilote de las de la tabla 3.4 (la básica y sus tres variaciones en cada caso). En la sección 3.3.2 se detalla la composición de cada gráfica y en el pie de figura se explica su contenido.



ANEXO DE RESULTADOS

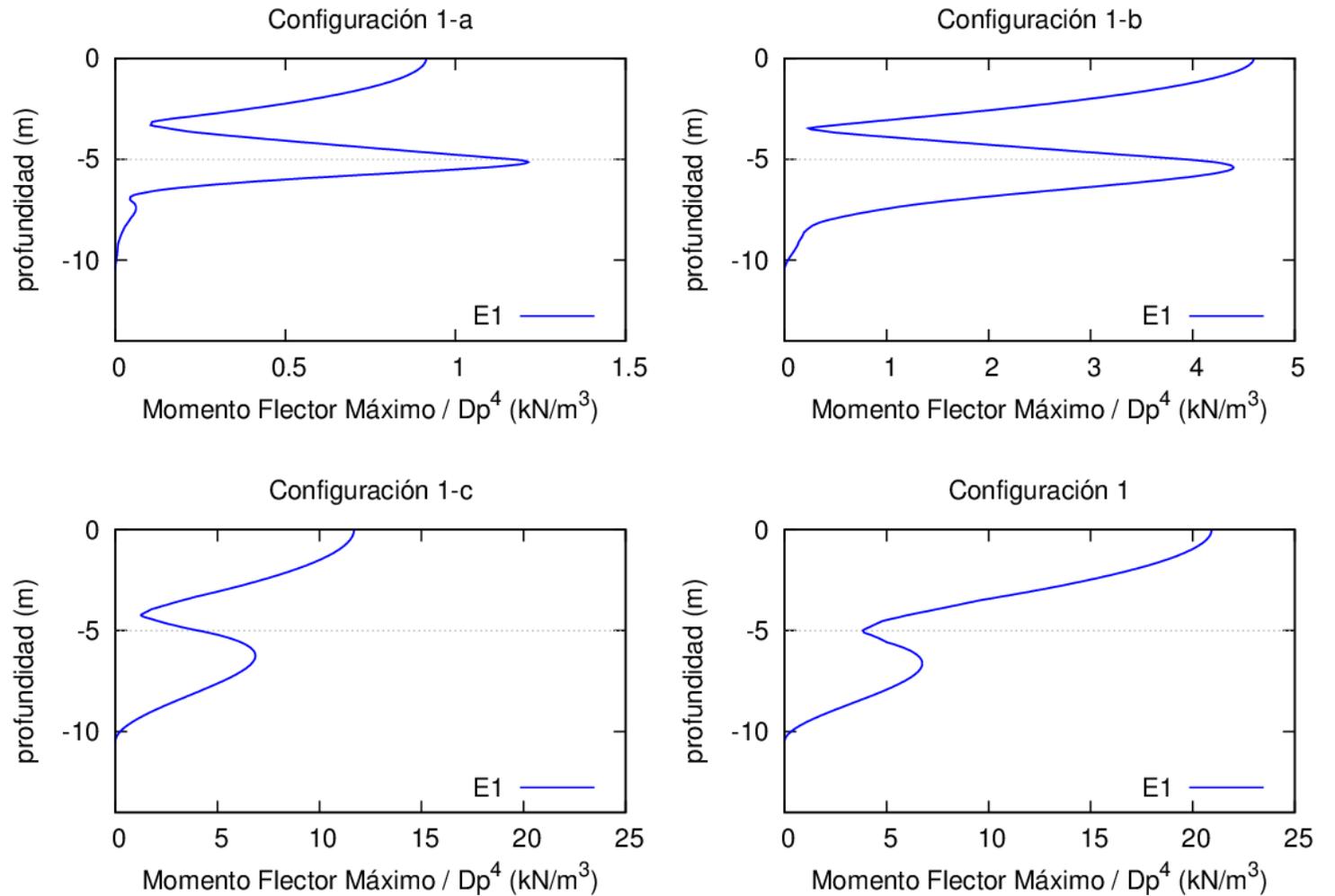
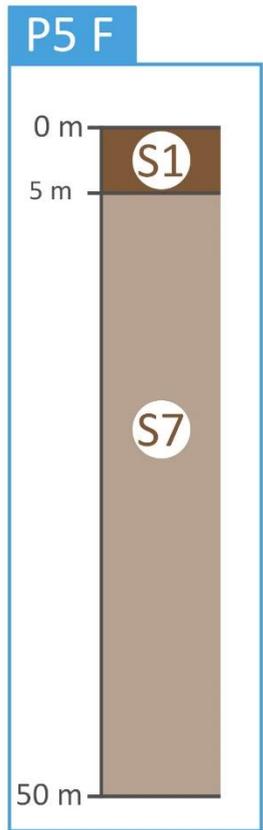
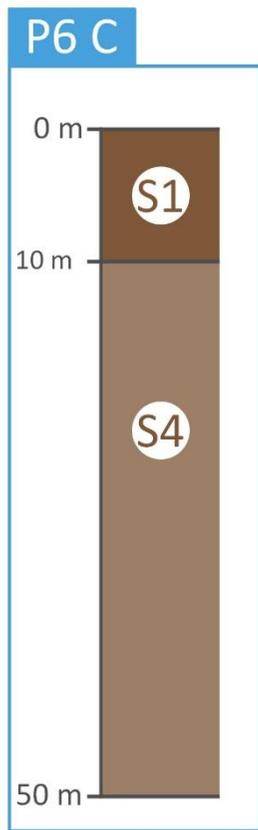


Figura A - 2.1: Envoltura de momentos flectores máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma E1 en la configuración de pilote 1 en sus diferentes variaciones para la estratificación P5 F.



D

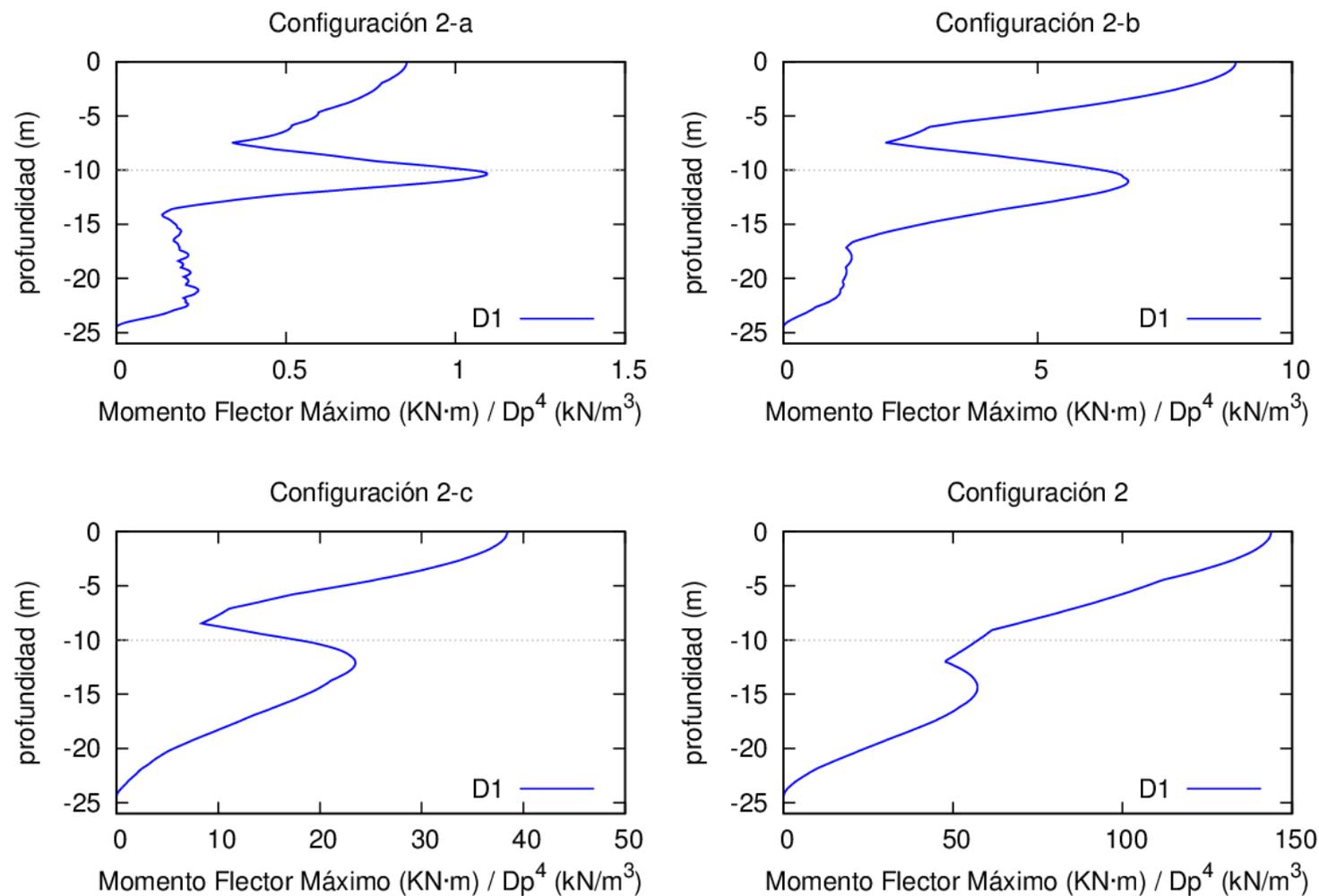
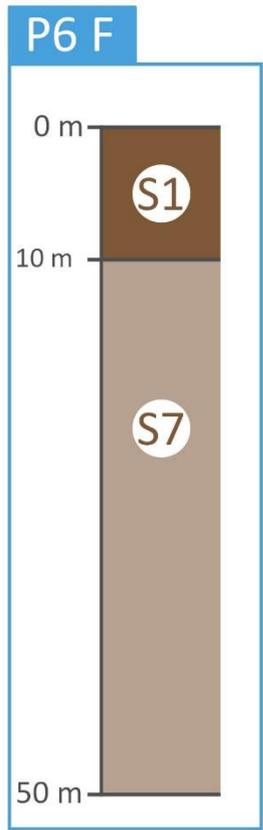


Figura A - 2.2: Envolvente de momentos flectores máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma D1 en la configuración de pilote 2 en sus diferentes variaciones para la estratificación P6 C.



E

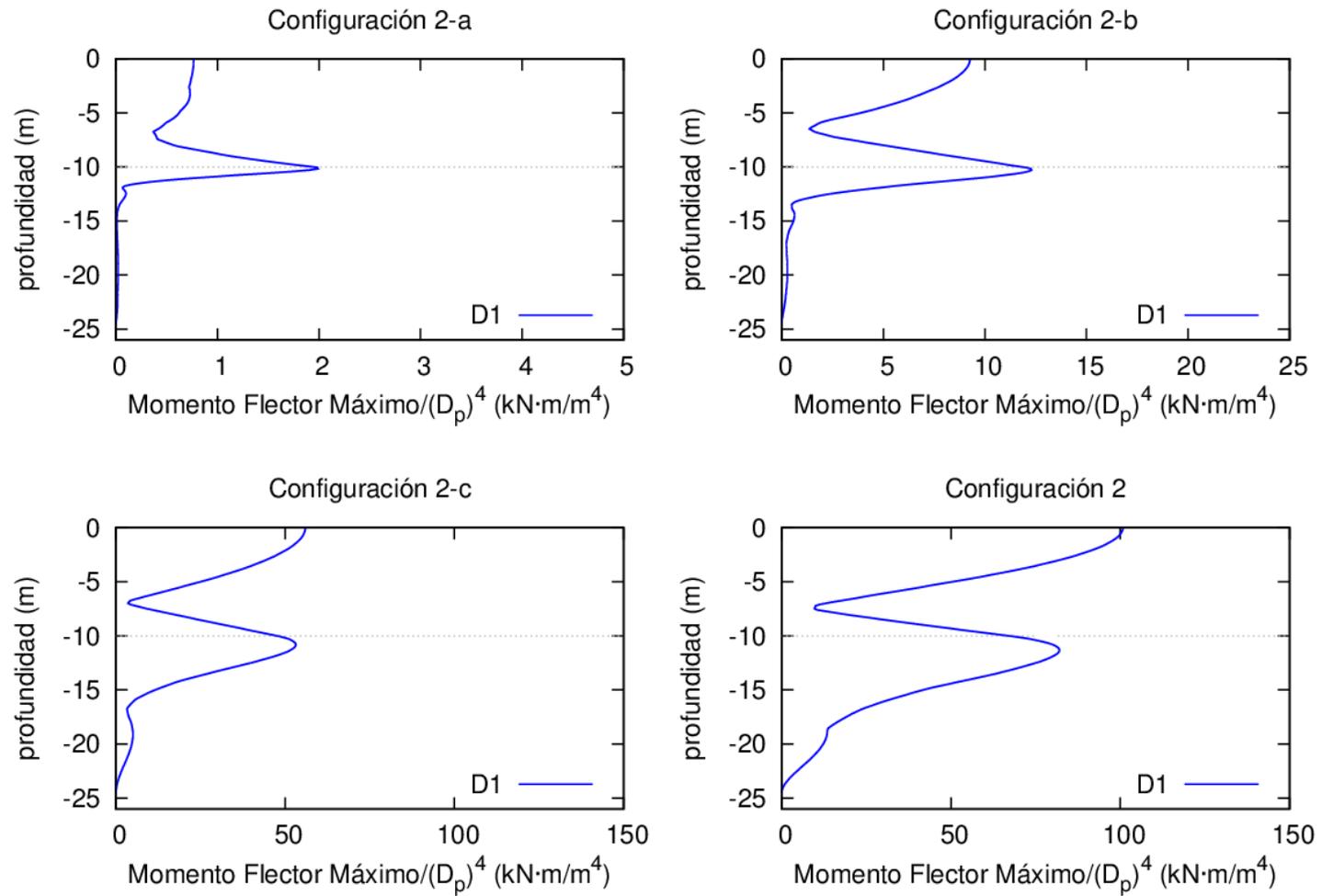
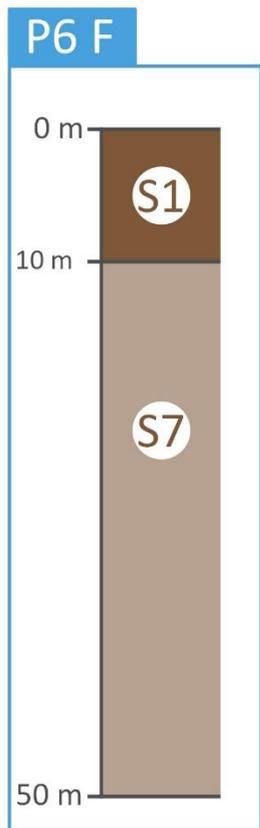


Figura A - 2.3: Envolvente de momentos flectores máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma E1 en la configuración de pilote 2 en sus diferentes variaciones para la estratificación P6 F.



E

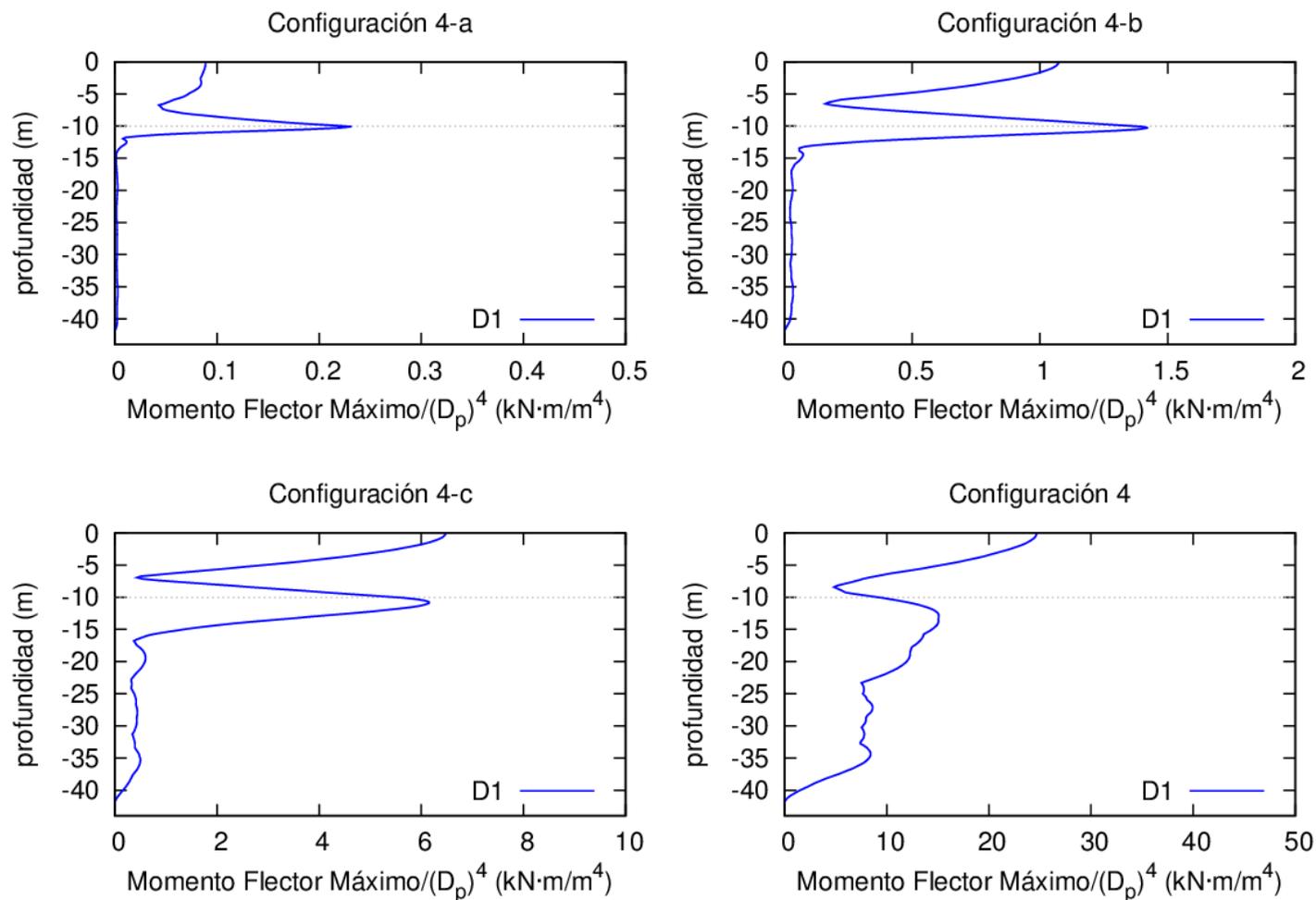


Figura A - 2.4: Envolvente de momentos flectores máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma E1 en la configuración de pilote 4 en sus diferentes variaciones para la estratificación P6 F.

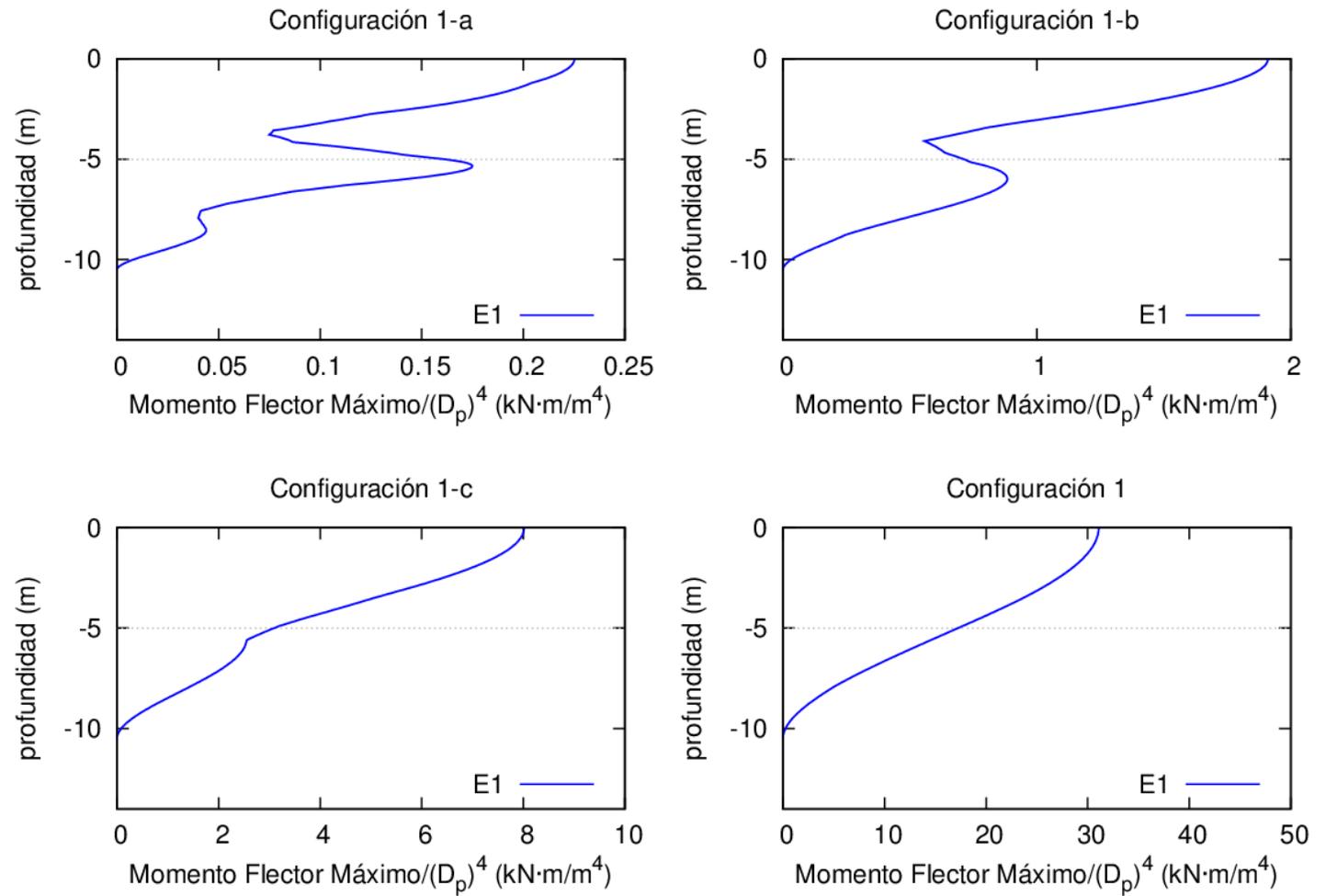
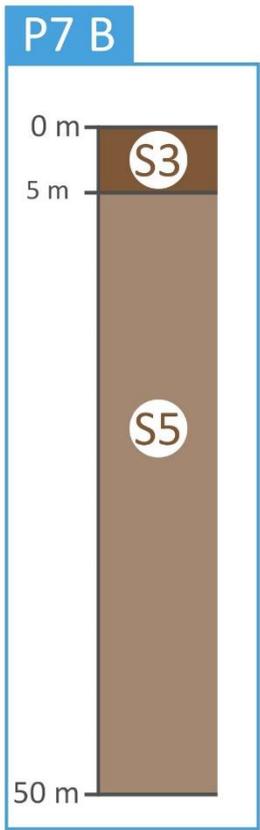
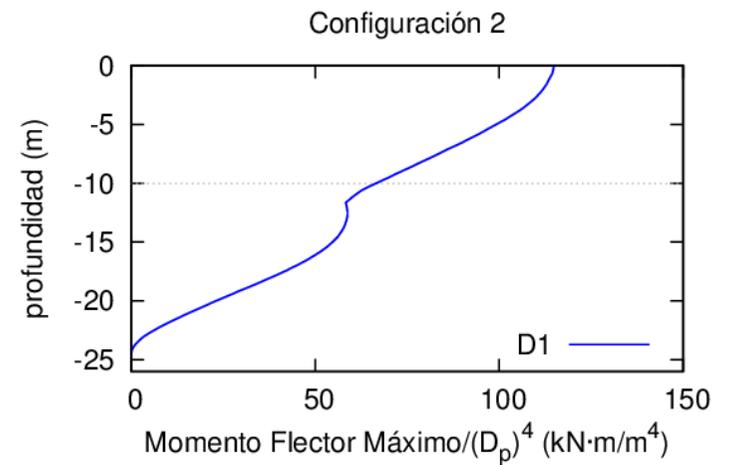
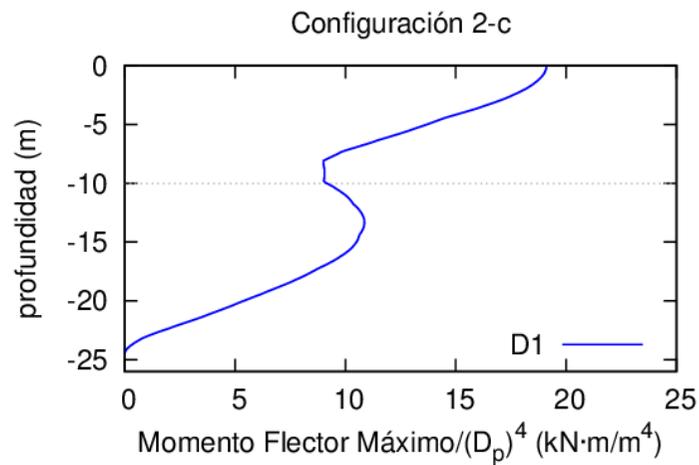
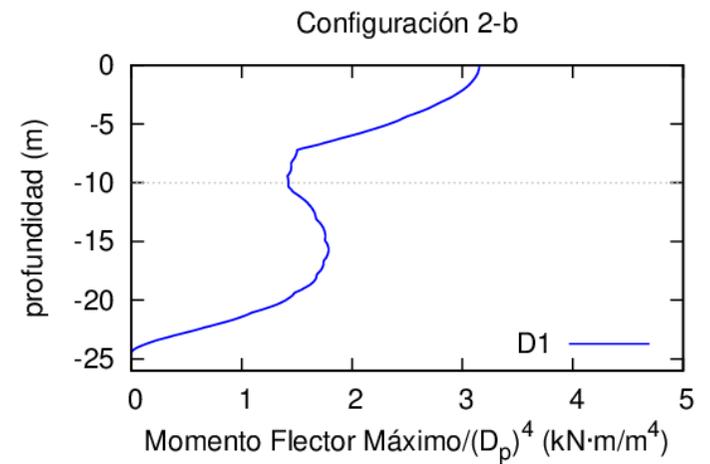
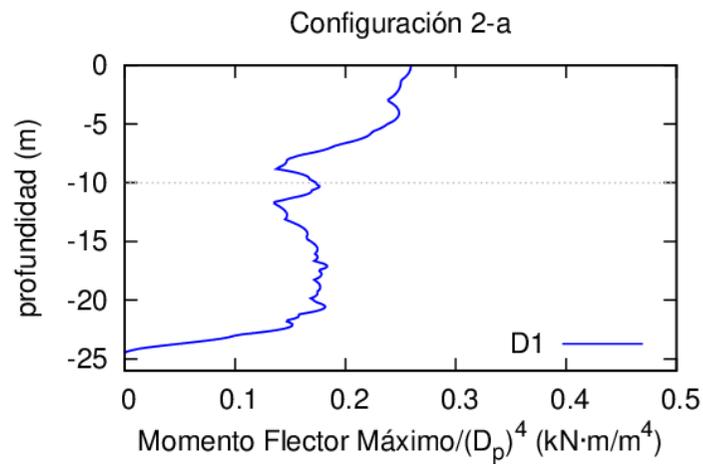
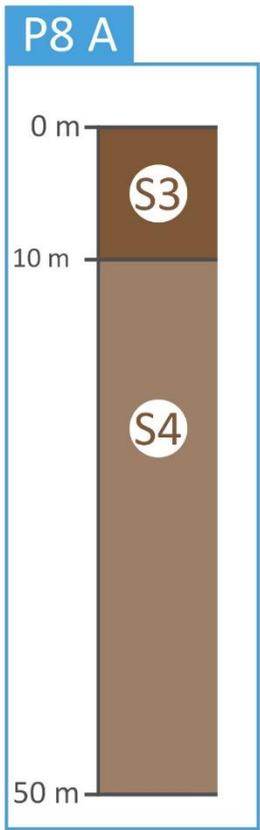
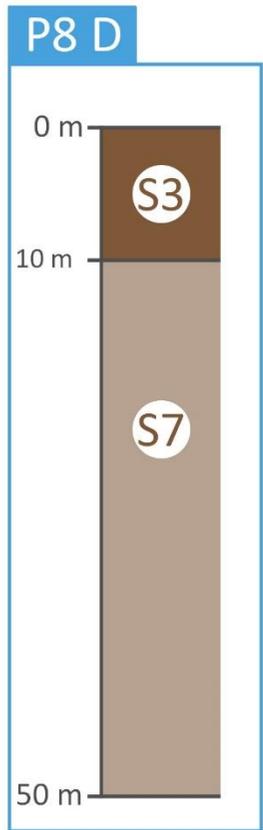


Figura A - 2.5: Envolvente de momentos flectores máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma C1 en la configuración de pilote 1 en sus diferentes variaciones para la estratificación P7 B.



D

Figura A - 2.6: Envoltente de momentos flectores máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma D1 en la configuración de pilote 2 en sus diferentes variaciones para la estratificación P8 A.



E

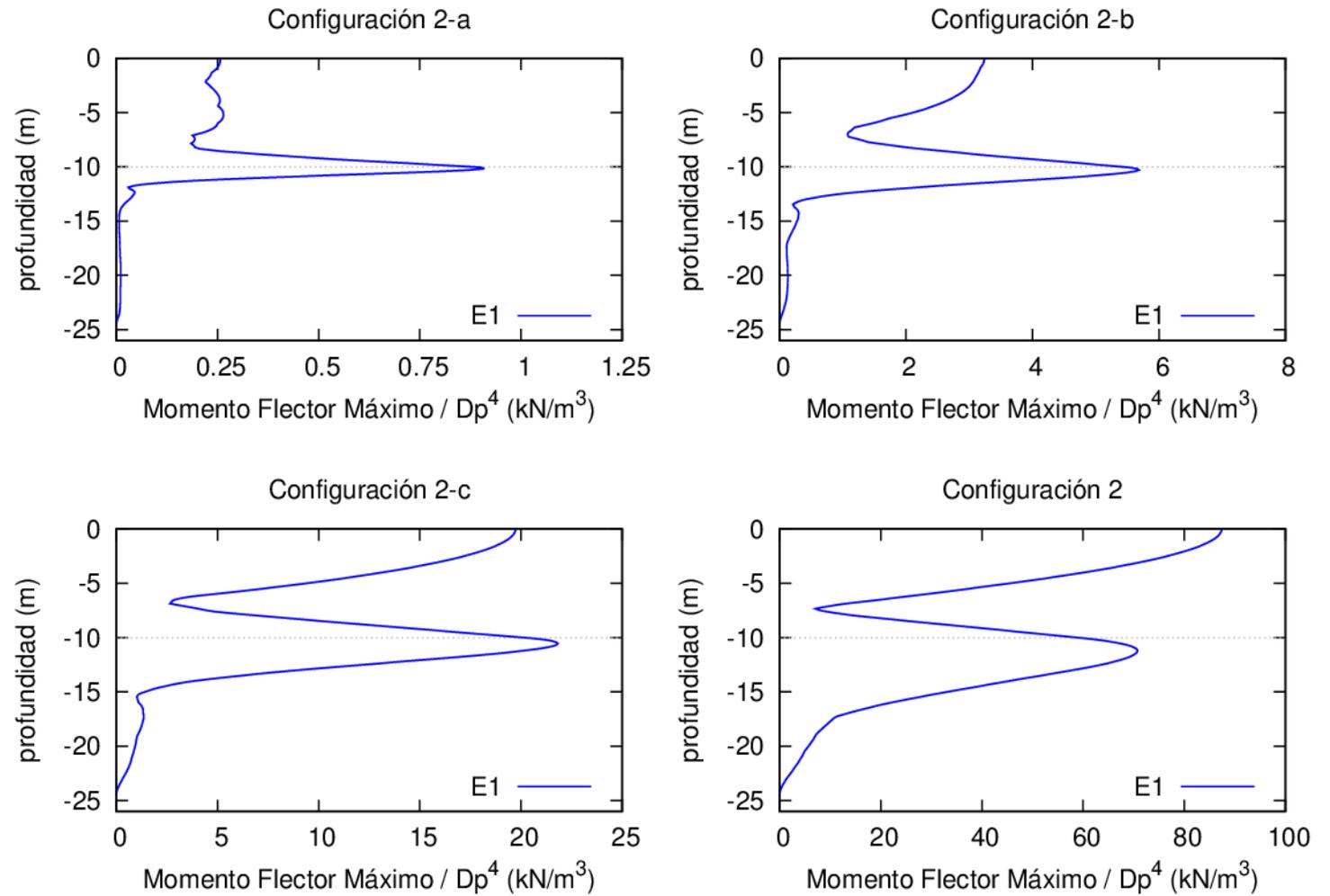
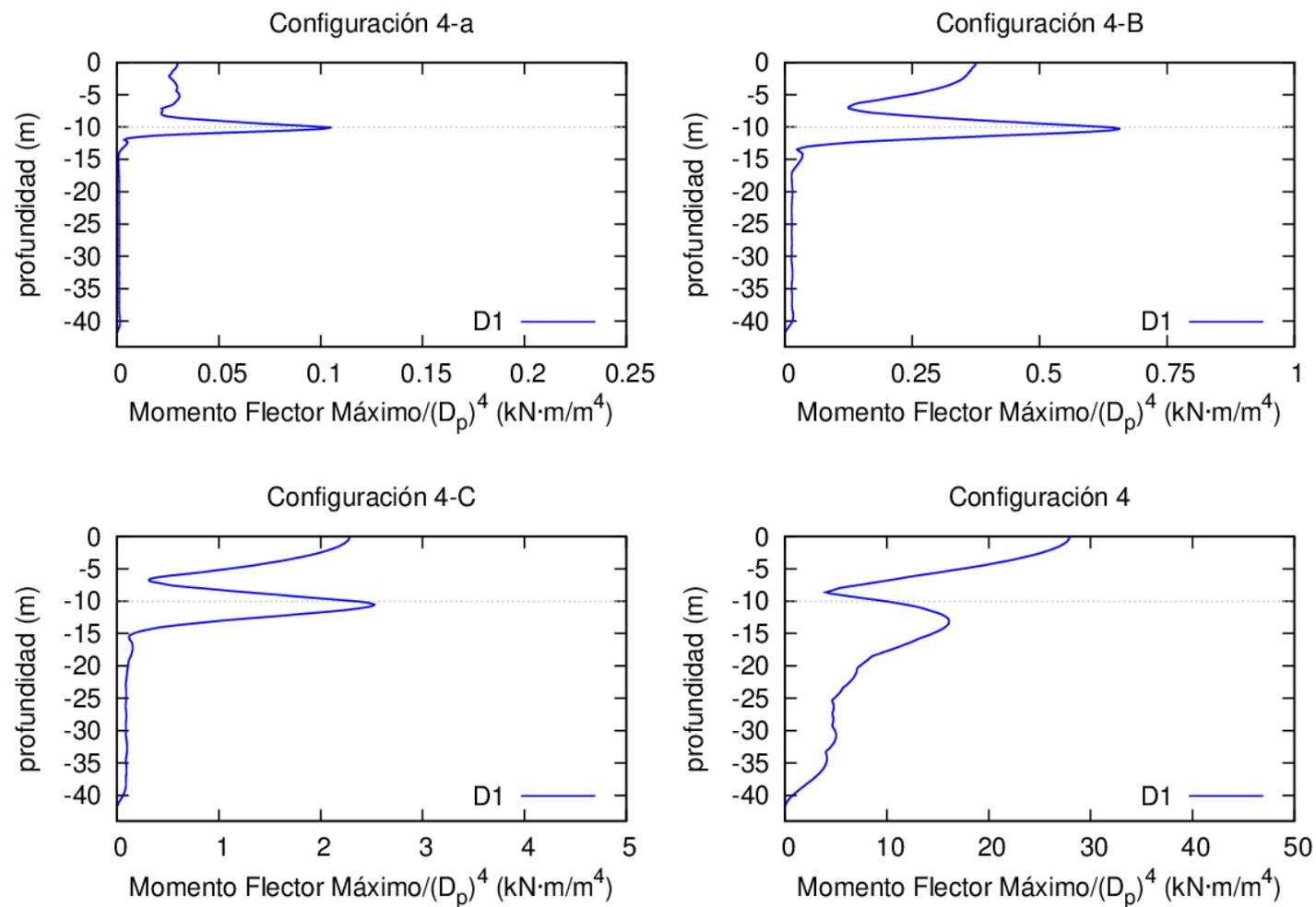
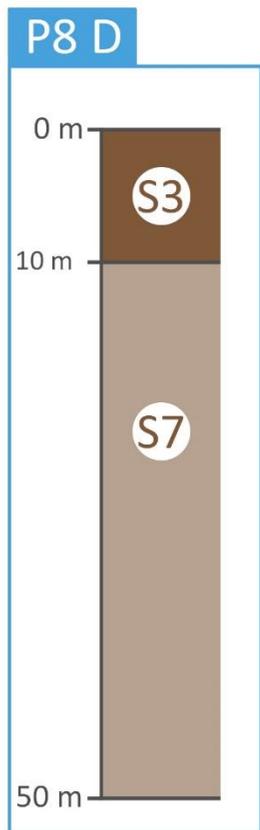


Figura A - 2.7: Envolvente de momentos flectores máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma E1 en la configuración de pilote 2 en sus diferentes variaciones para la estratificación P8 D.



E

Figura A - 2.8: Envolvente de momentos flectores máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma E1 en la configuración de pilote 4 en sus diferentes variaciones para la estratificación P8 D.

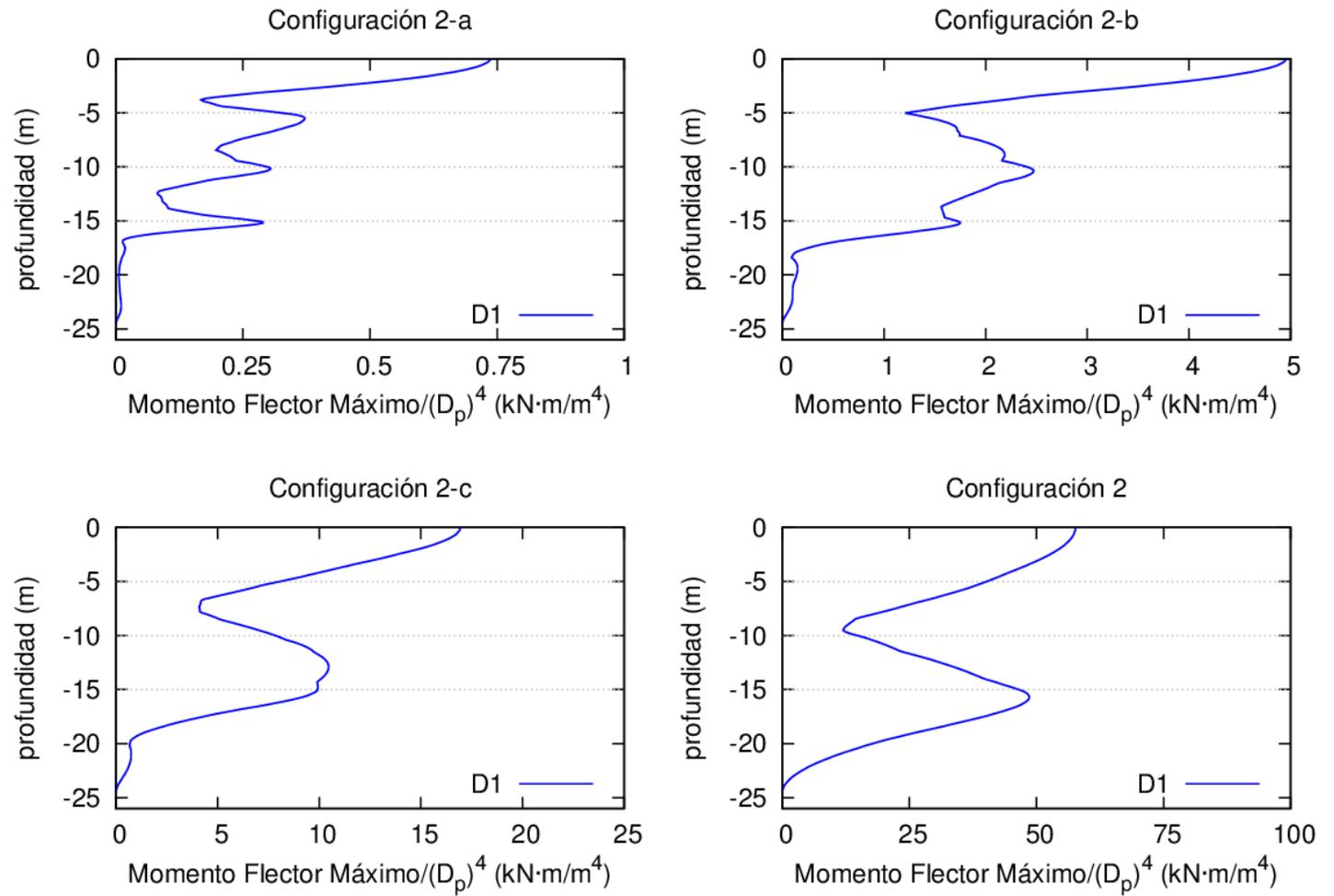
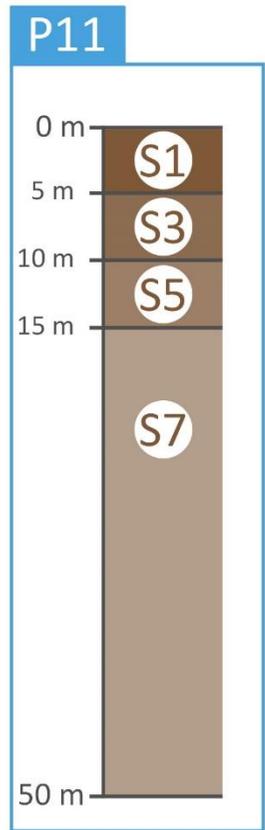
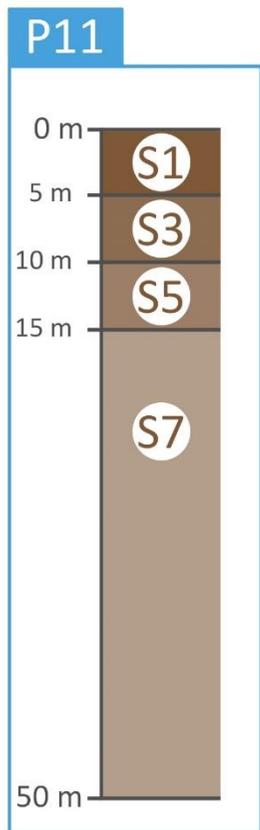


Figura A - 2.9: Envolvente de momentos flectores máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma E1 en la configuración de pilote 2 en sus diferentes variaciones para la estratificación P11.



E

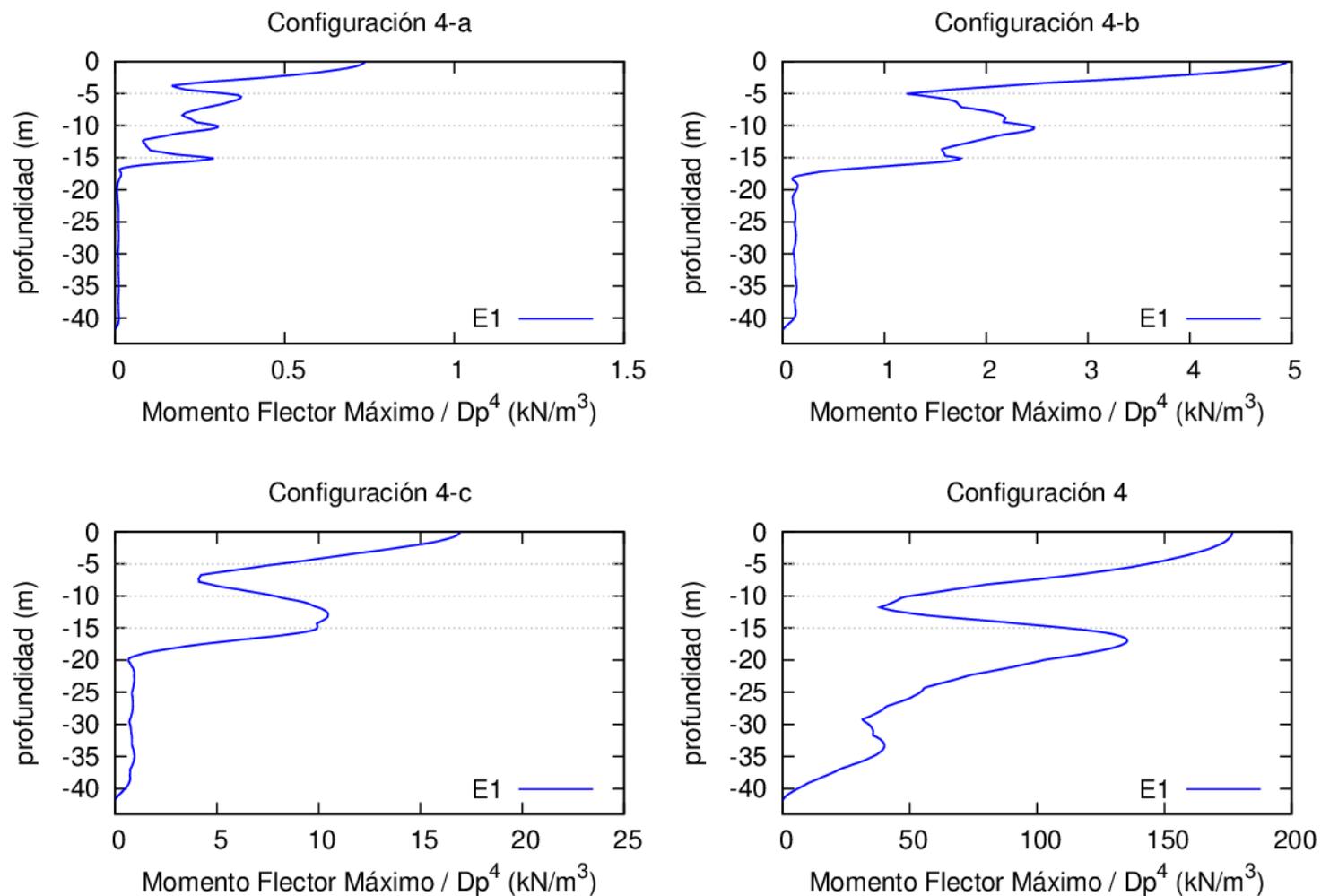


Figura A - 2.10: Envolvente de momentos flectores máximos normalizados por el diámetro a la cuarta obtenidos para el acelerograma E1 en la configuración de pilote 4 en sus diferentes variaciones para la estratificación P1

A.3

Estudio de la influencia de las condiciones de contorno en la punta del pilote

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

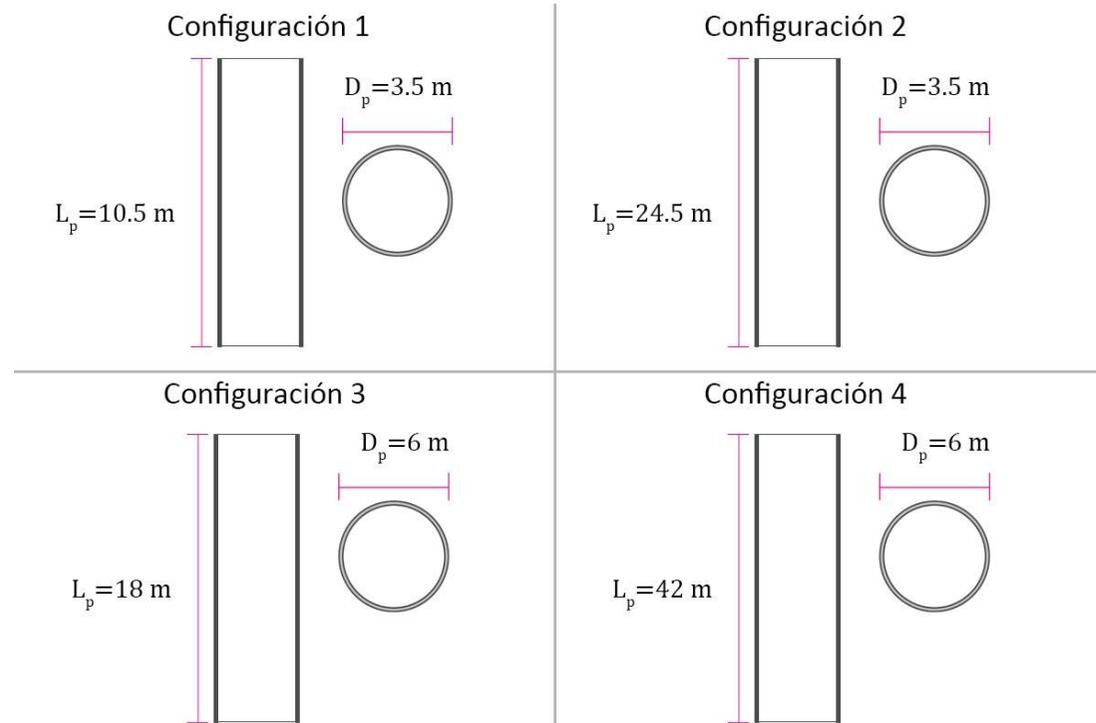
En la parte superior de la columna izquierda se muestra el perfil estratigráfico estudiado, codificado de la manera en que se describe en el punto 3.3.3. Se distingue cada estrato que lo conforma, su potencia y su tipo de suelo según la tabla 3.2.

TIPO DE TERRENO

En la parte inferior de la columna izquierda se presenta el tipo de terreno según el EC8-1 [7] que le corresponde al perfil estratigráfico estudiado, tal como se dispone en la tabla 3.3.

FIGURAS DE RESULTADOS

En la columna derecha se presentan las figuras de resultados de la sección 3.3.3, compuestas de 4 gráficas, cada una referida a una configuración de pilote de las de la tabla 3.1. En la sección 3.3.3 se detalla la composición de cada gráfica y en el pie de figura se explica su contenido.



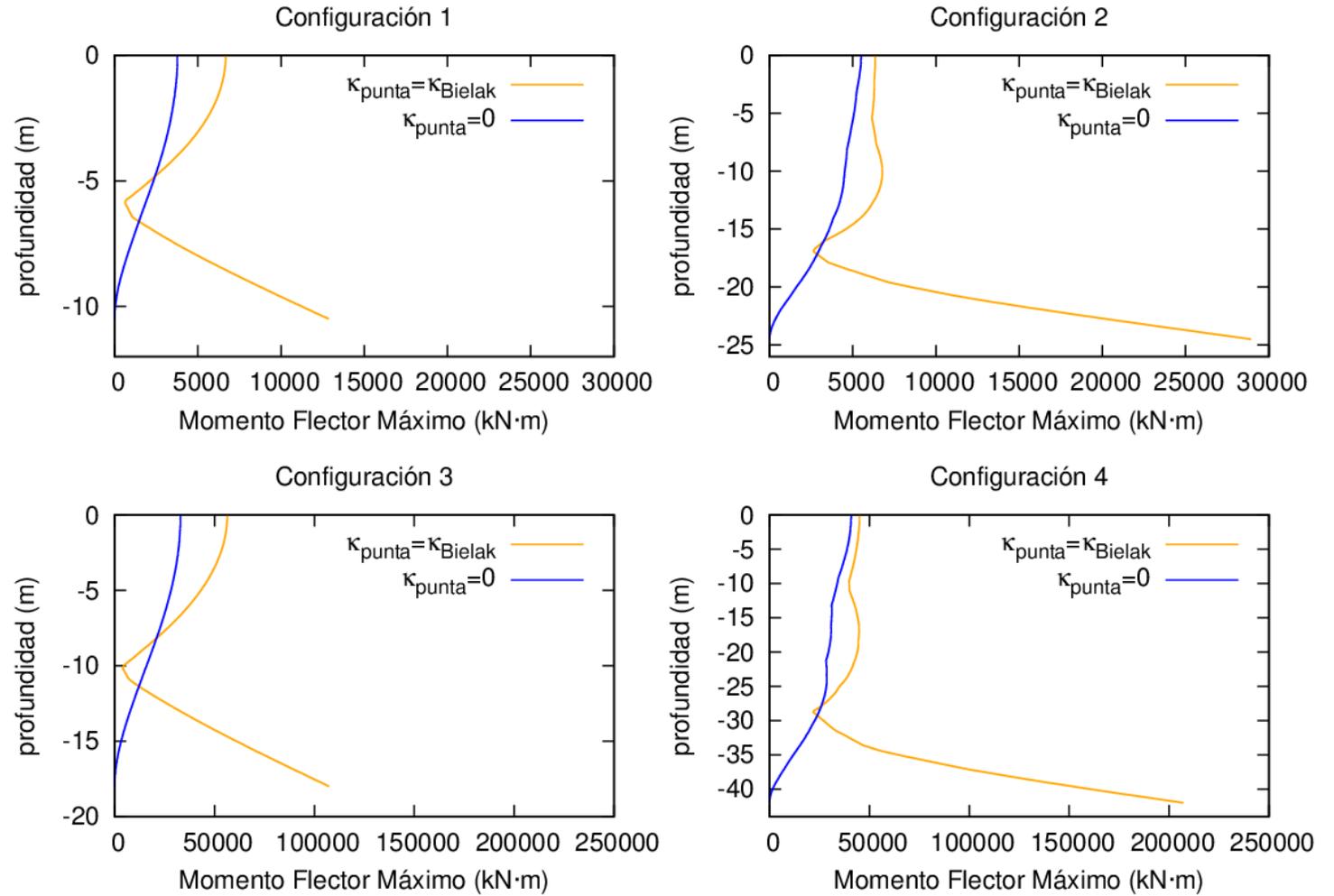
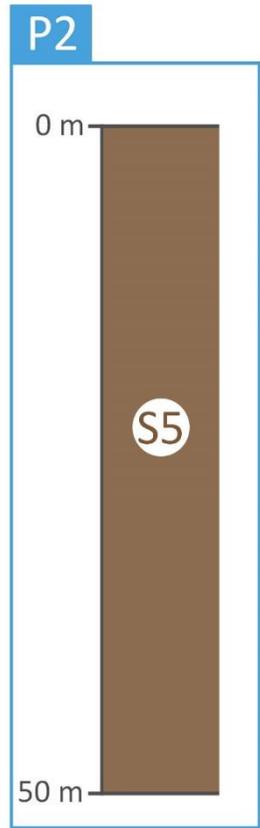
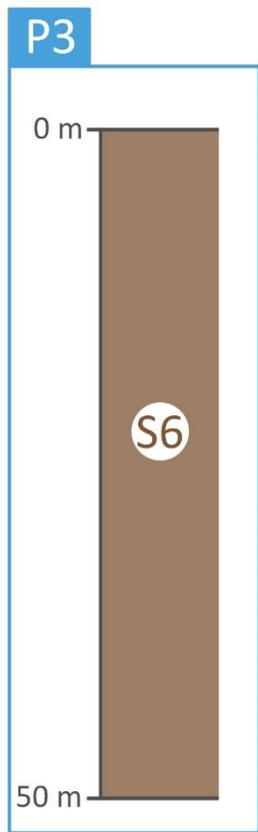


Figura A - 3.1: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas C1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P2.



B

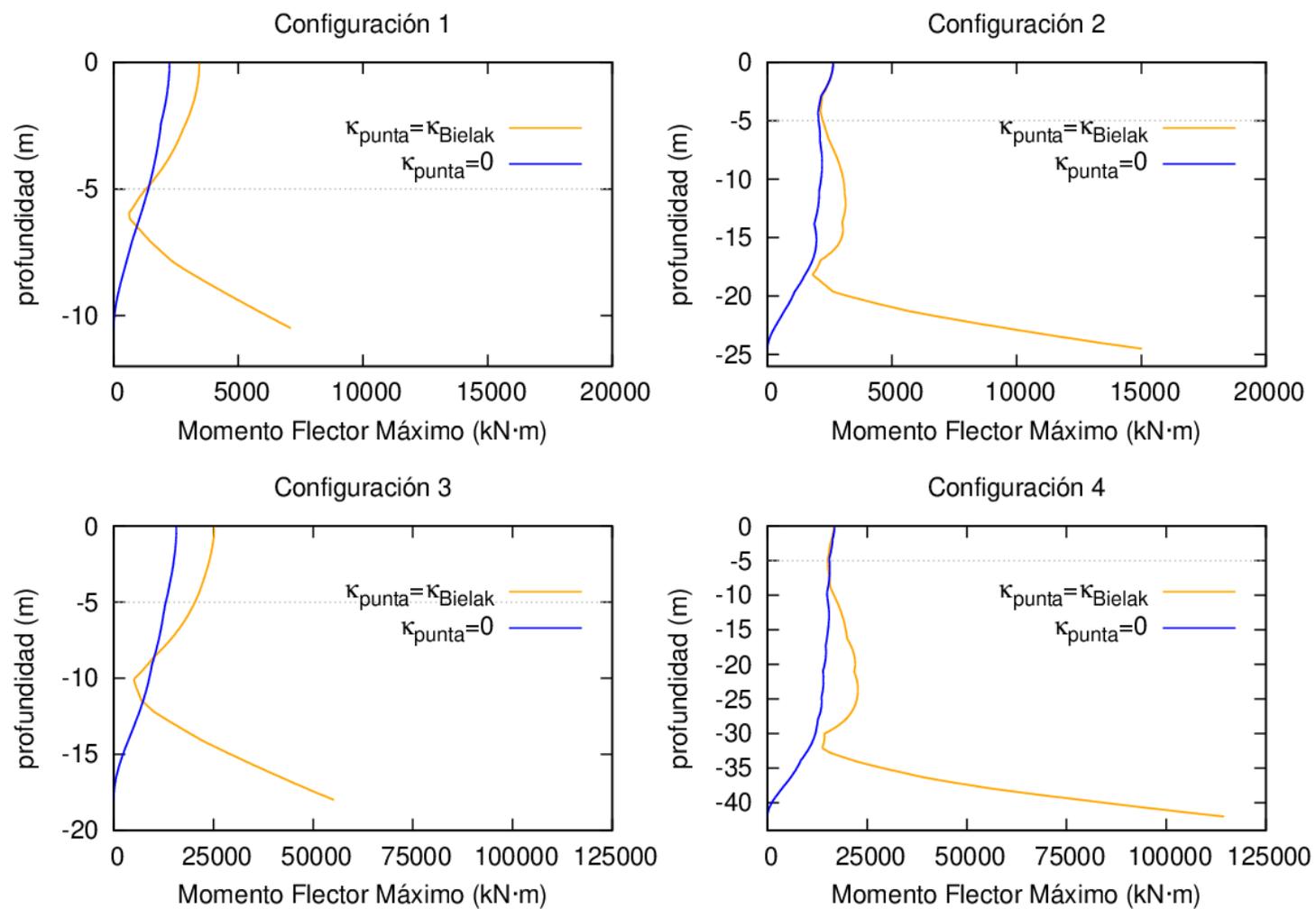
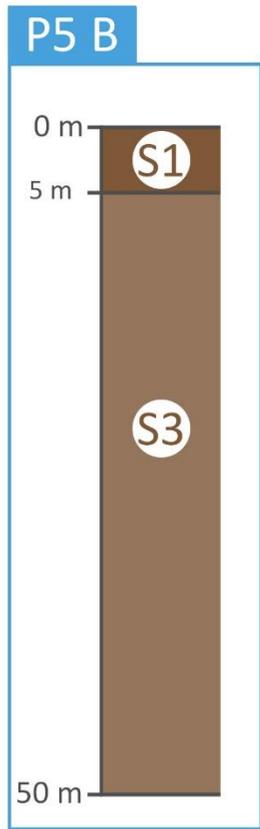


Figura A - 3.2: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas B1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P3.



D

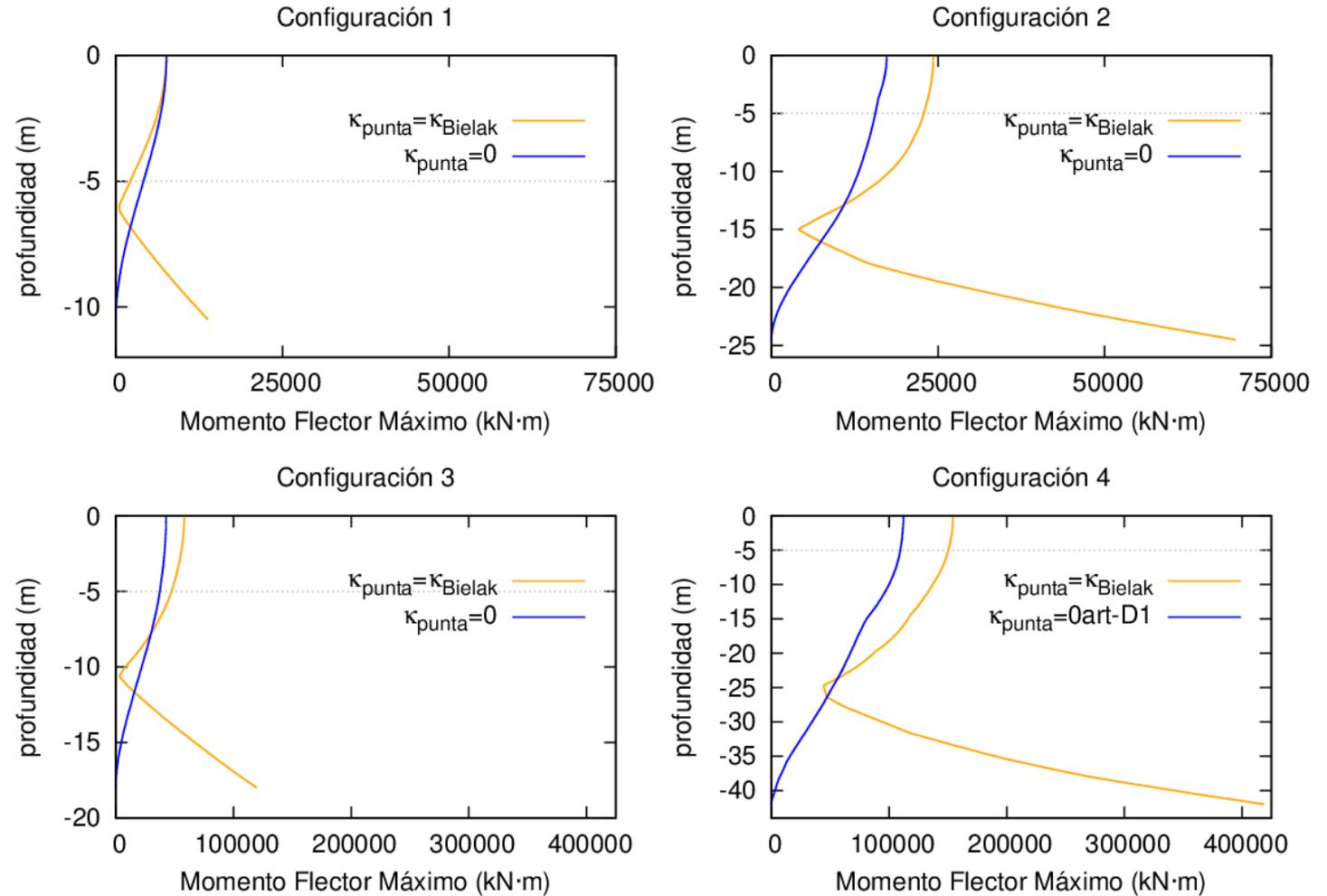
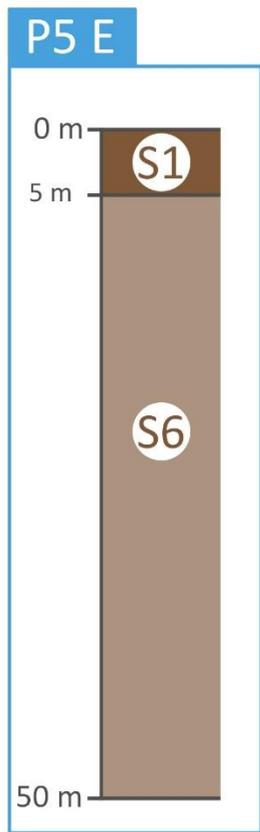


Figura A - 3.3: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas D1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P5 B.



D

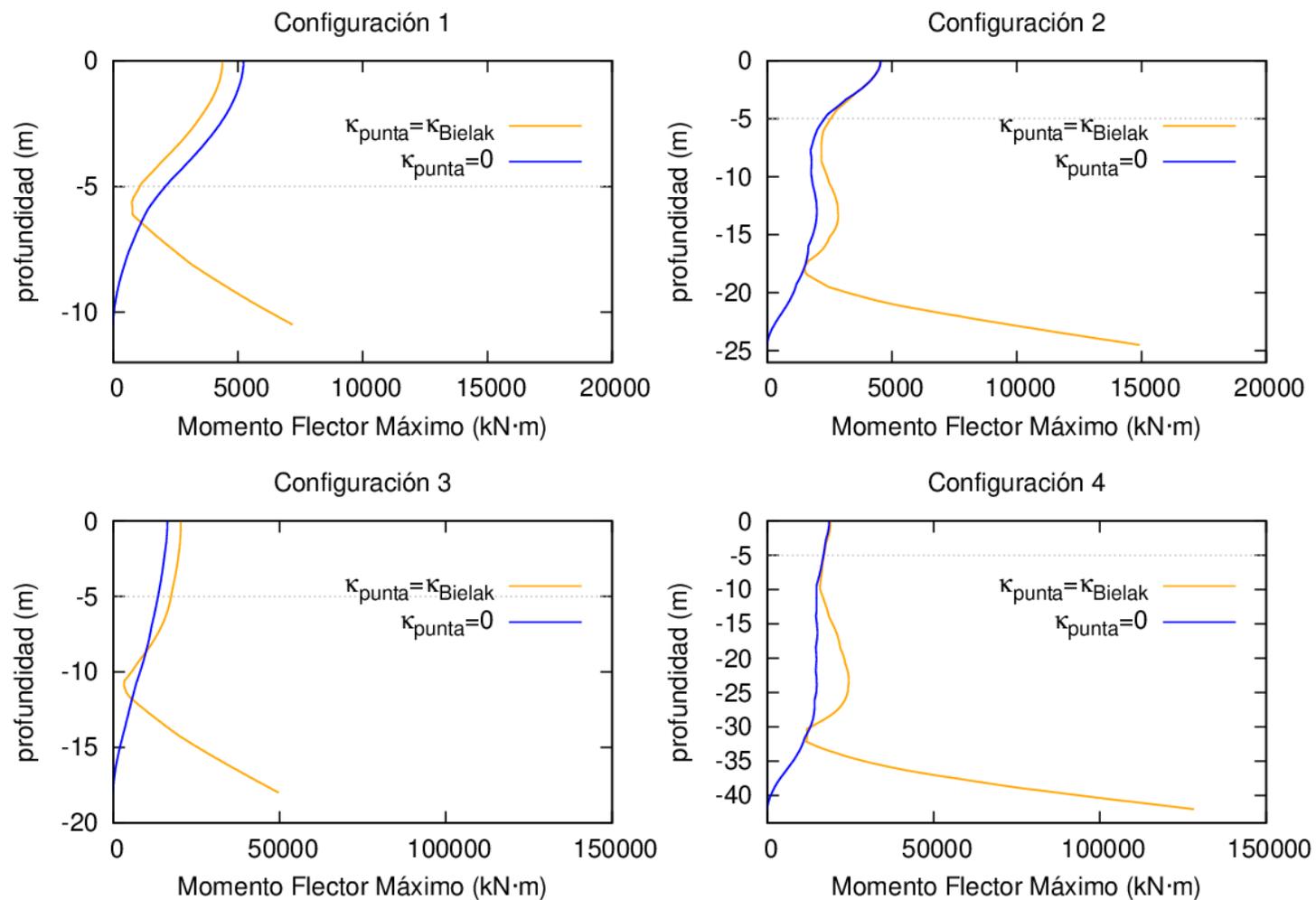


Figura A - 3.4: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas D1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P5E.

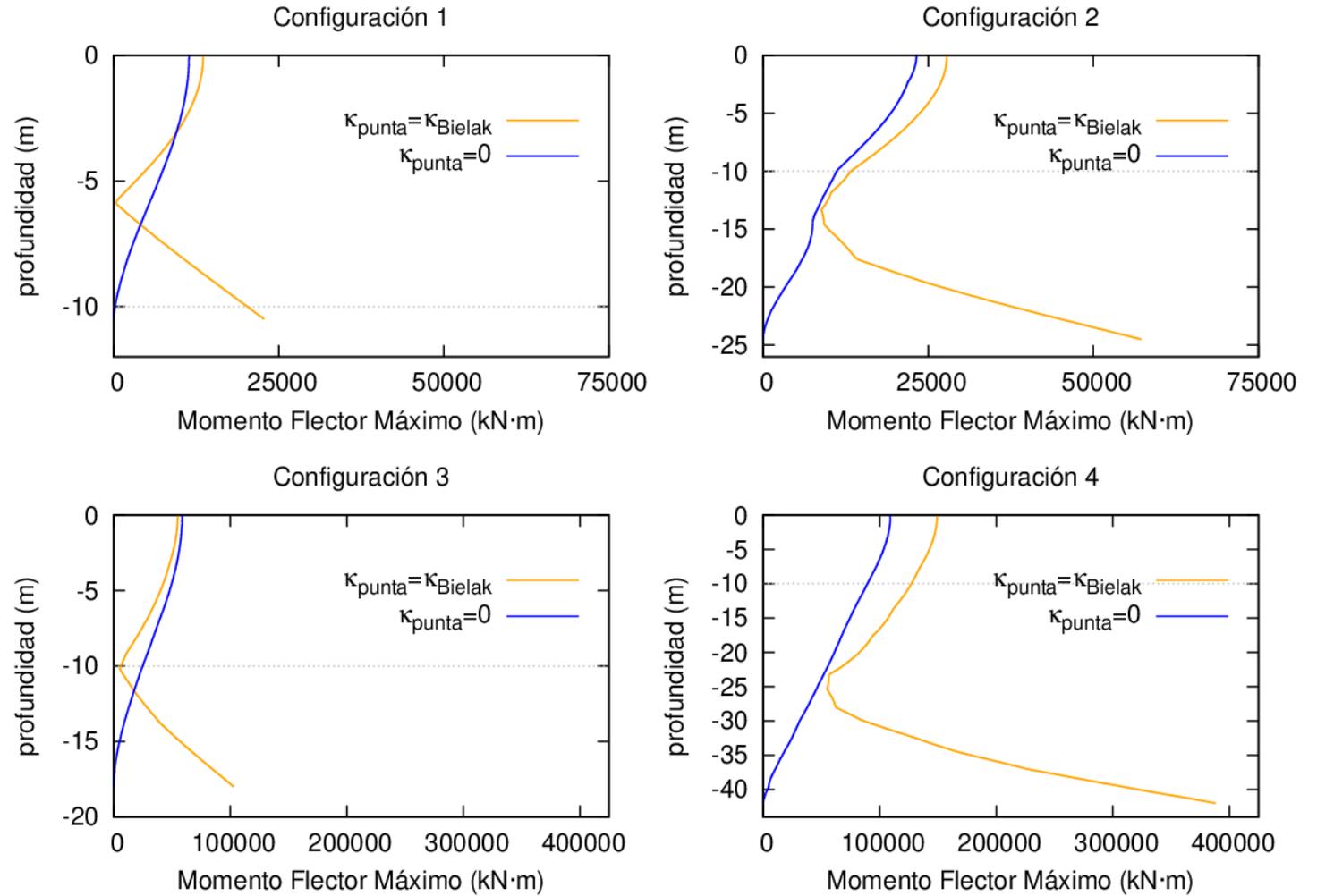
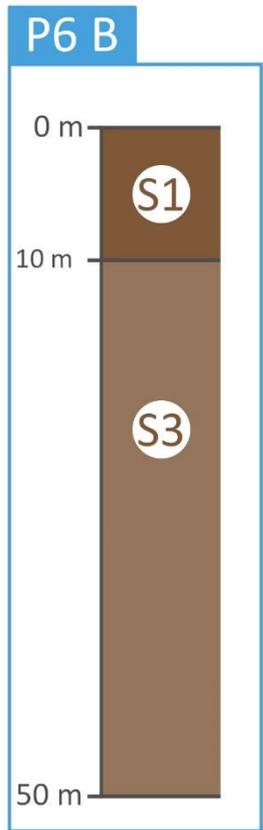
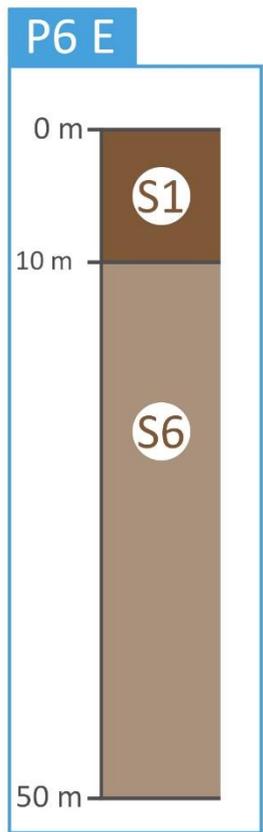


Figura A - 3.5: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas D1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P6 B.



D

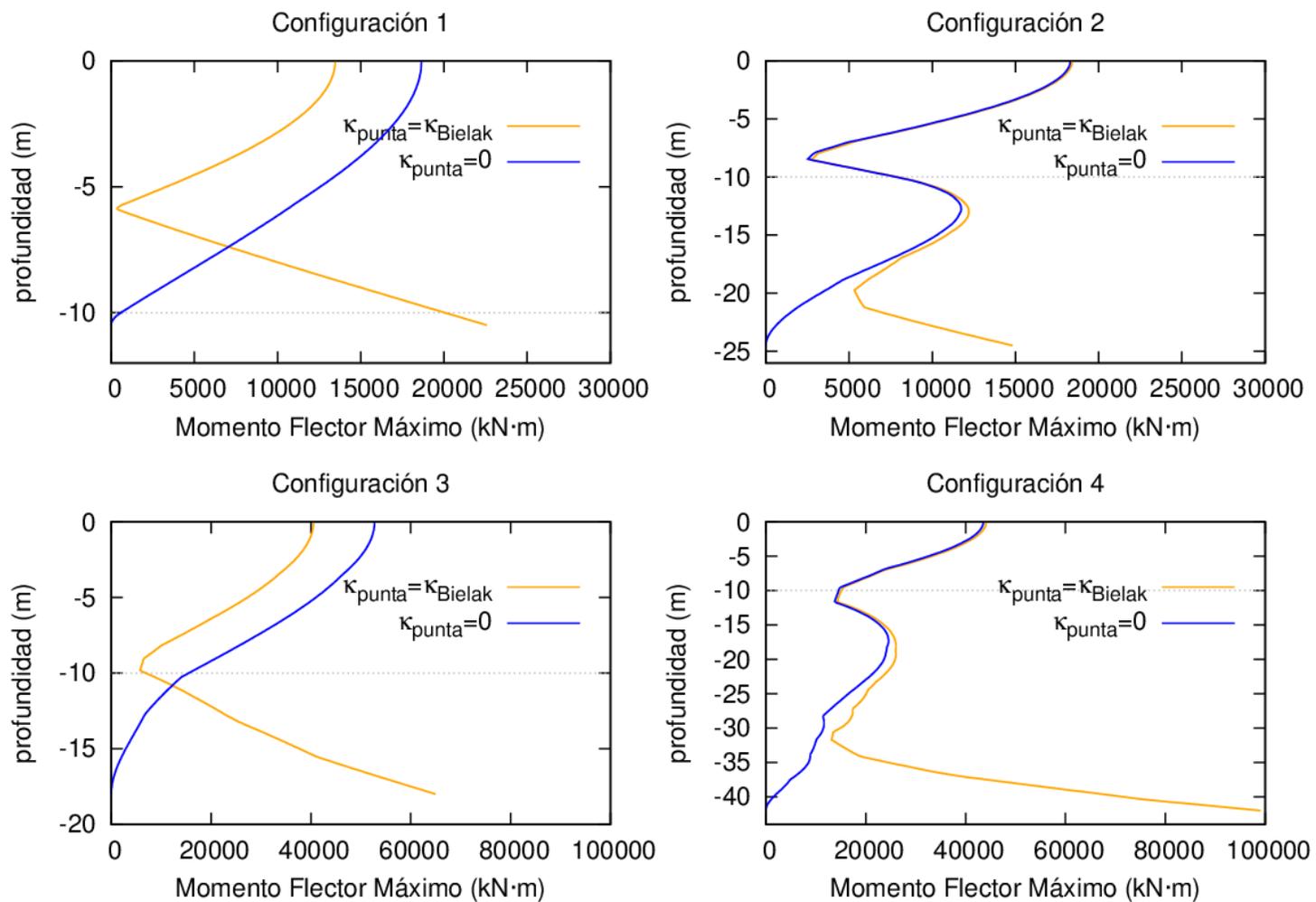


Figura A - 3.6: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas D1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P6 E.

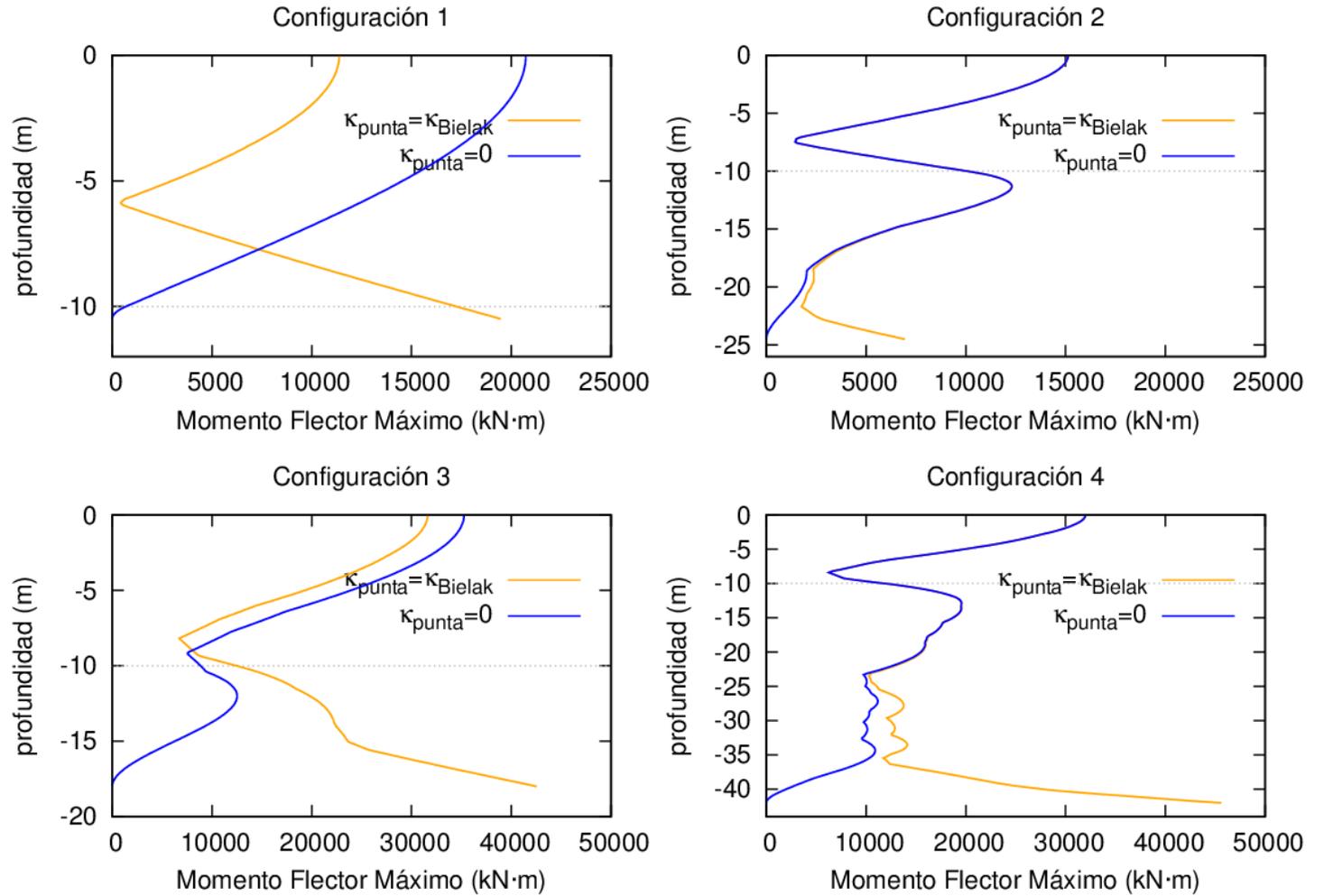
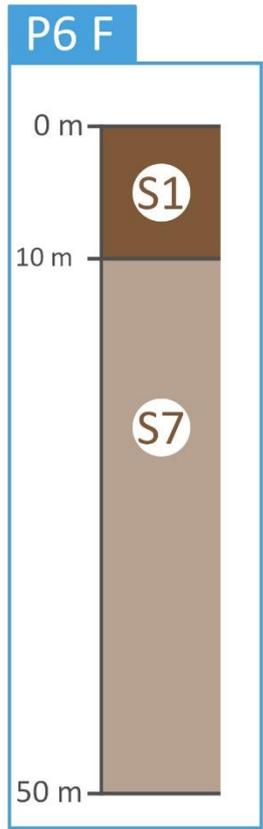
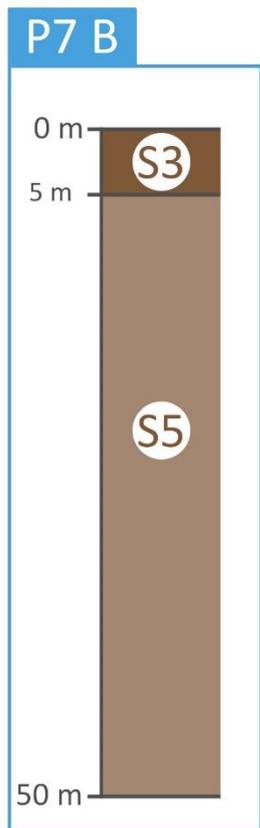


Figura A - 3.7: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas E1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P6F.



C

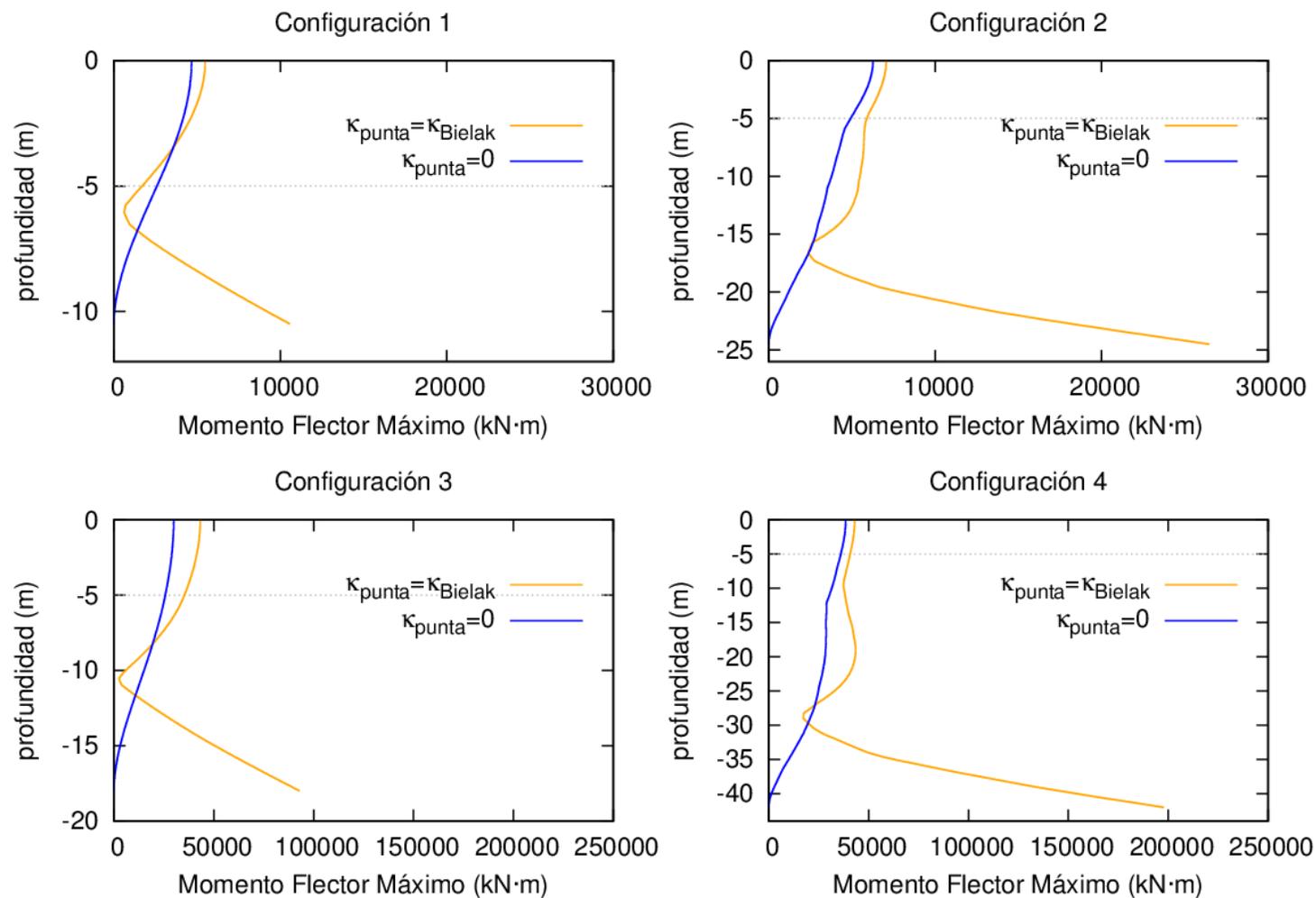
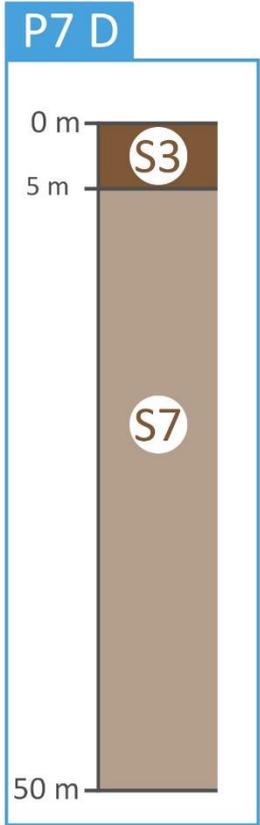


Figura A - 3.8: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas C1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P7 B.



B

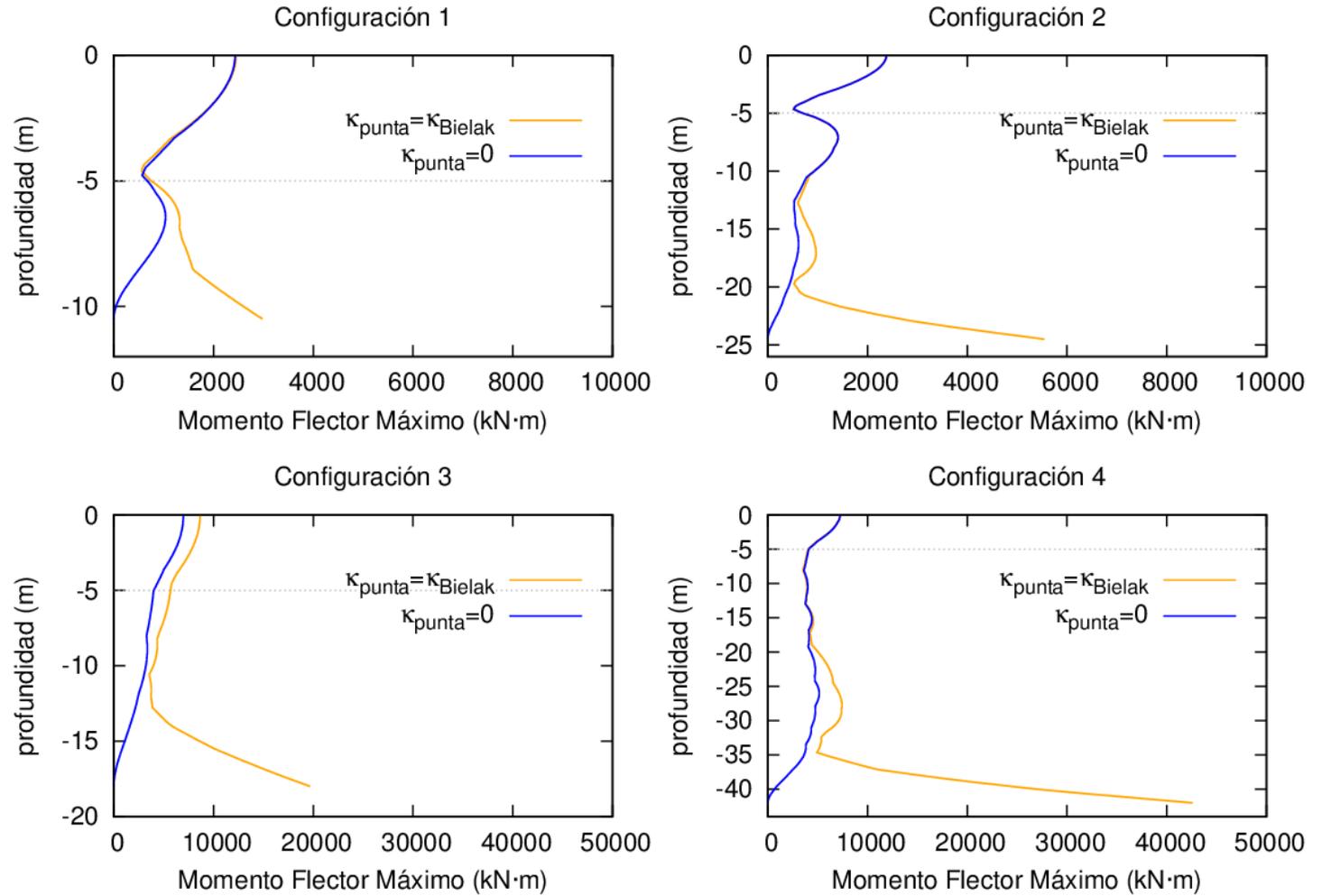
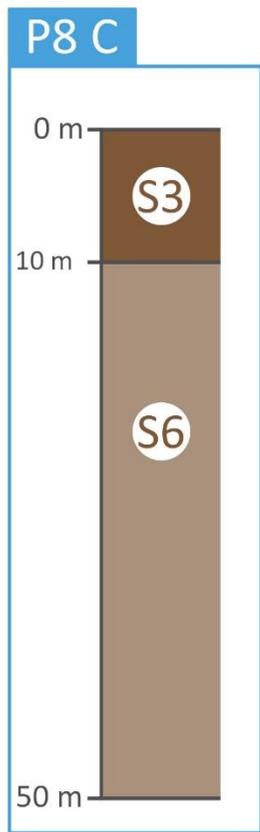


Figura A - 3.9: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas B1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P7 D.



C

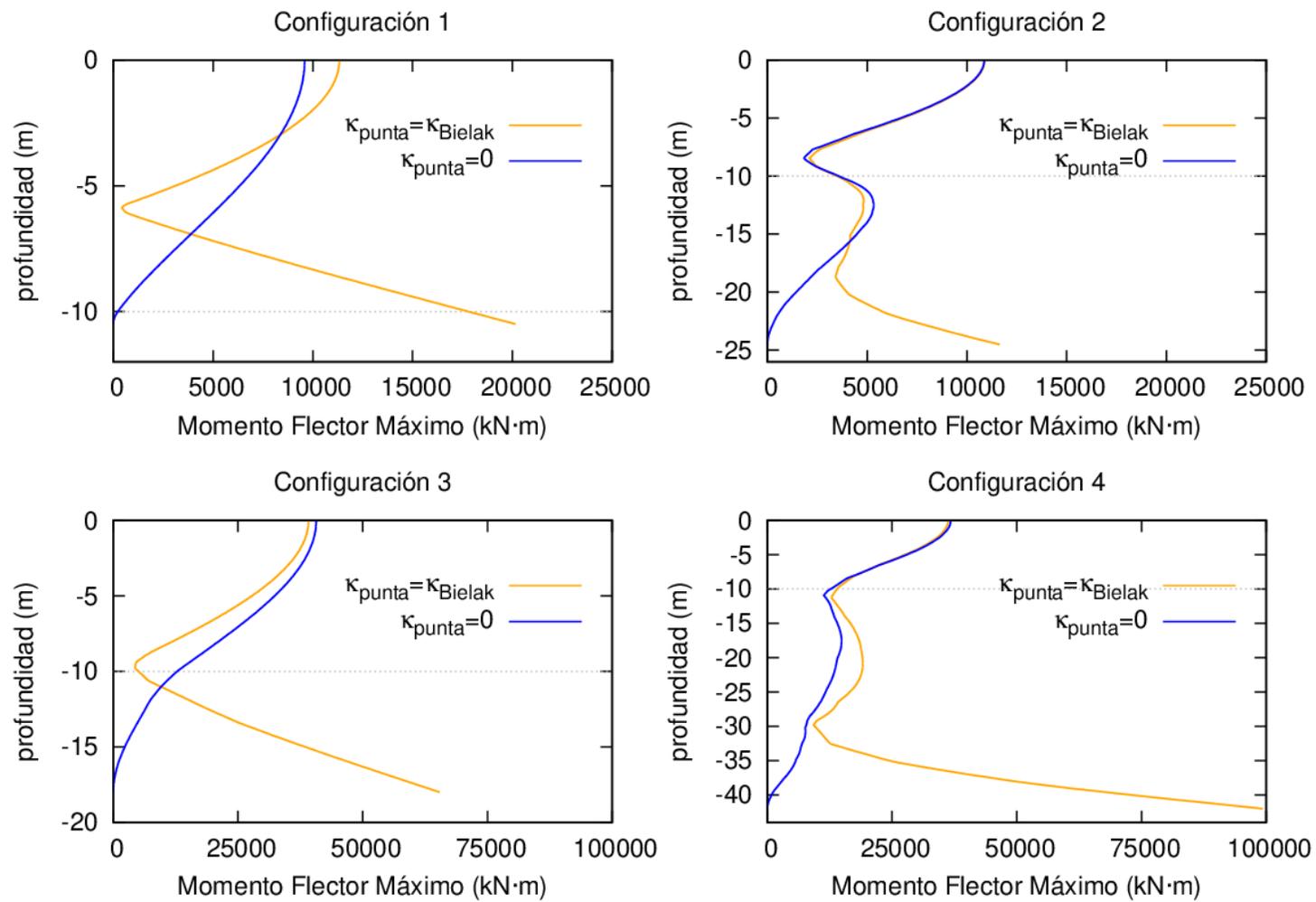
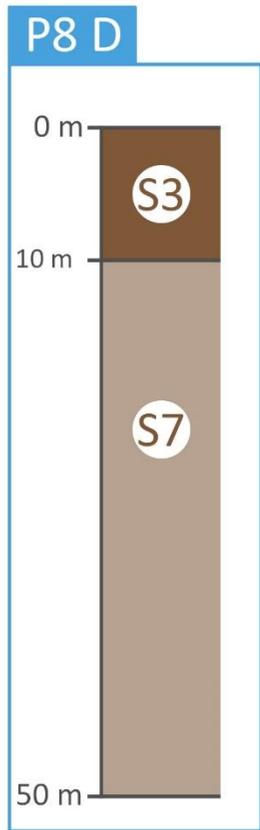


Figura A - 3.10: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas C1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P8 C.



E

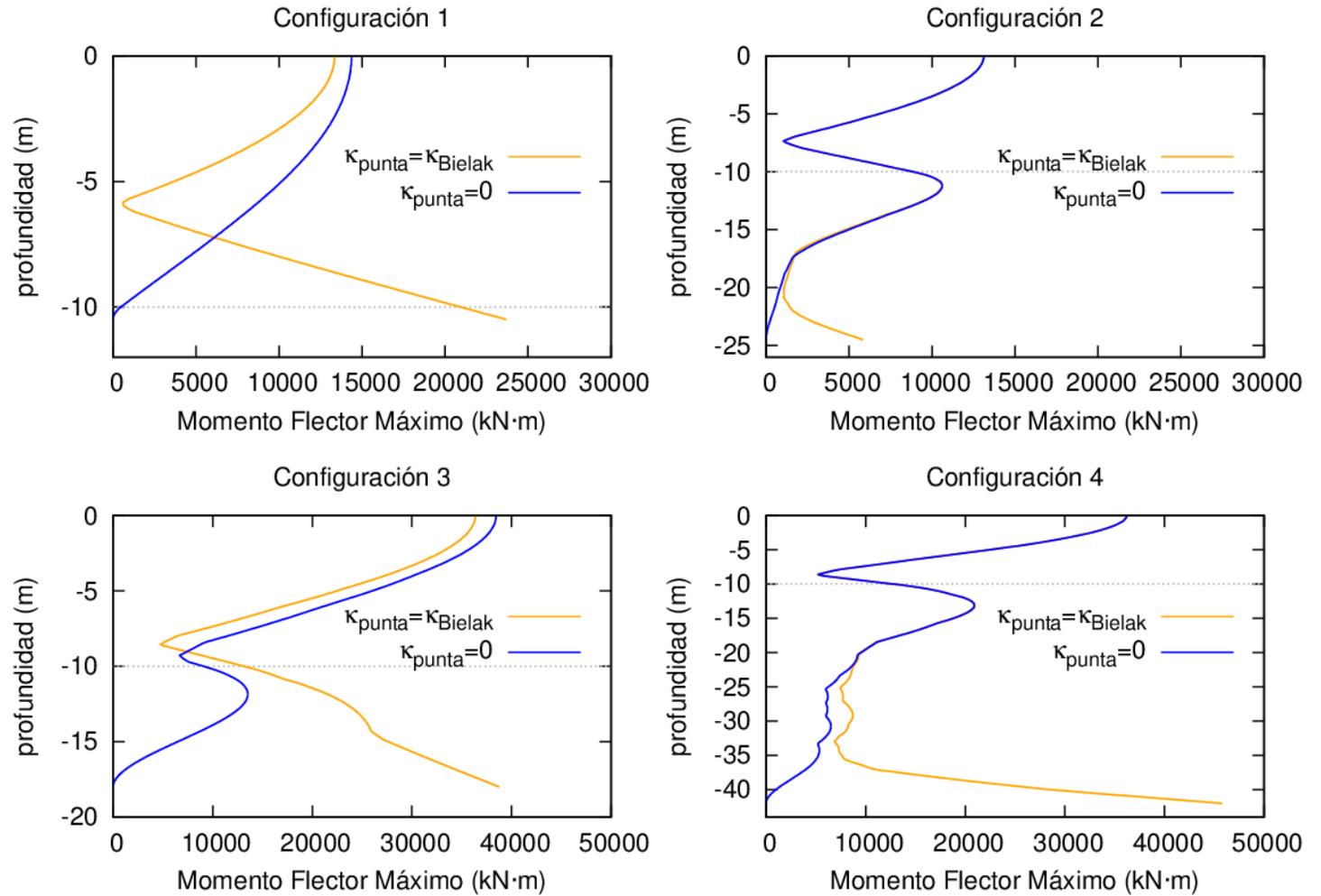


Figura A - 3.11: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas E1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P8 D.

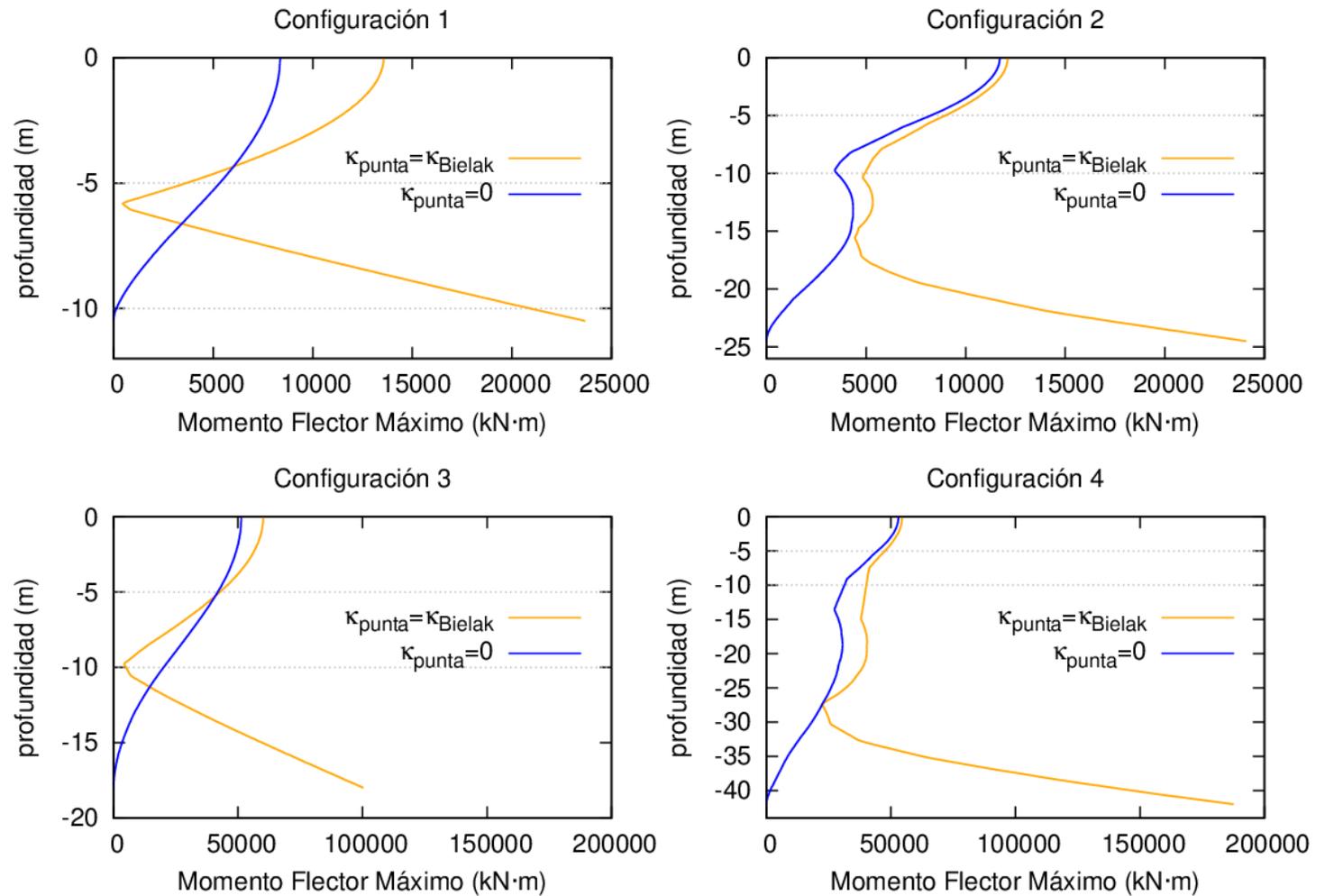
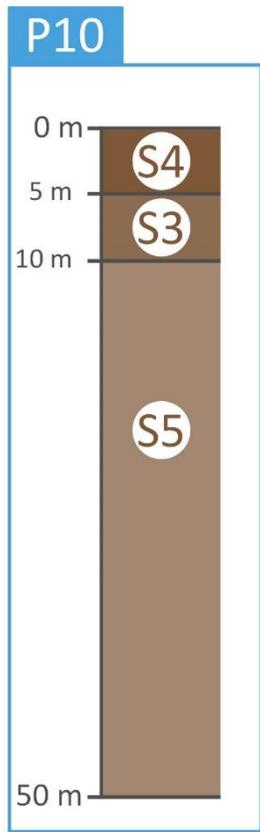


Figura A - 3.12: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas C1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P10.

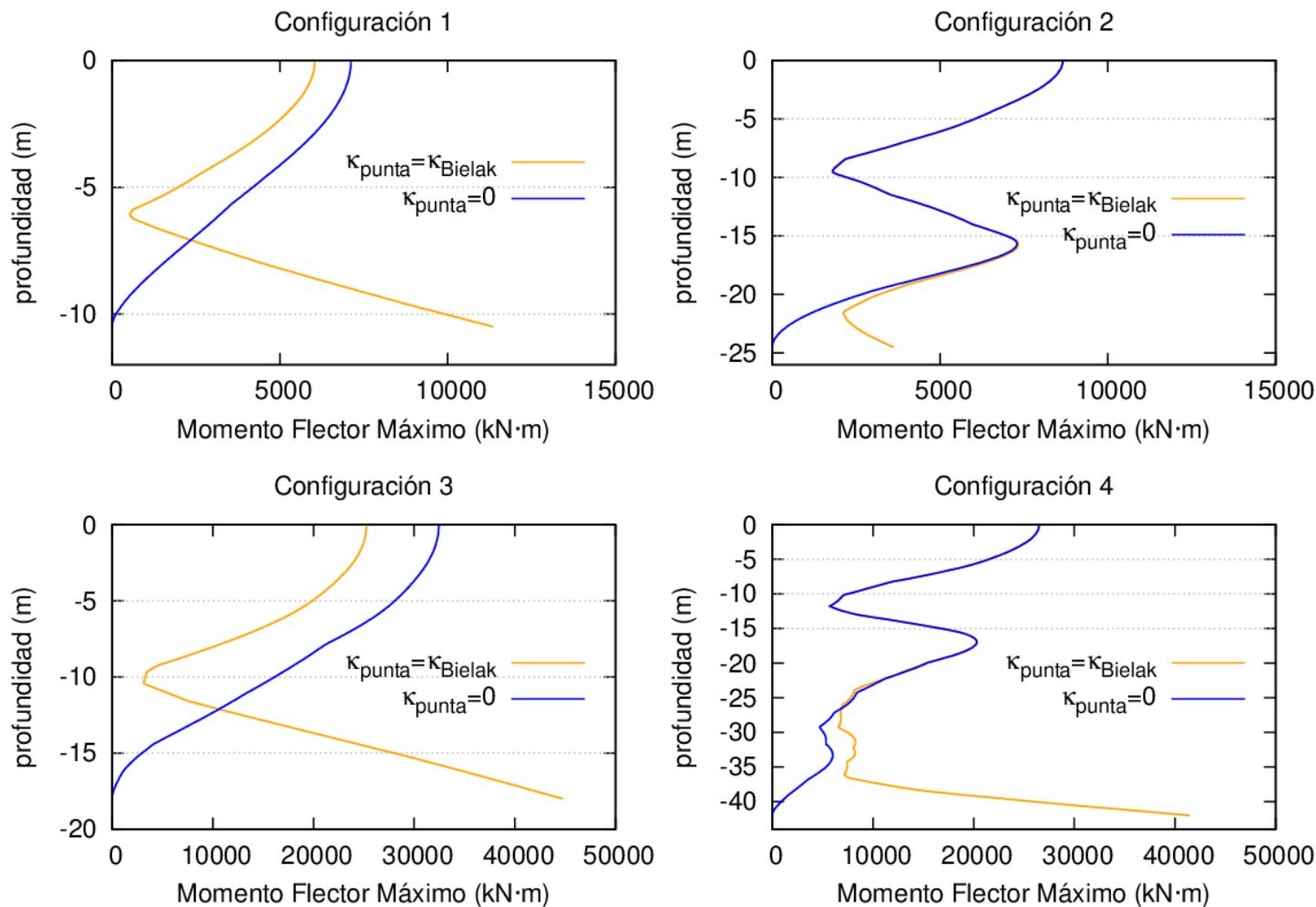
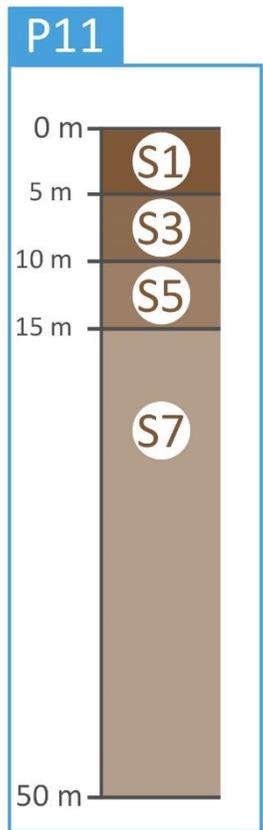
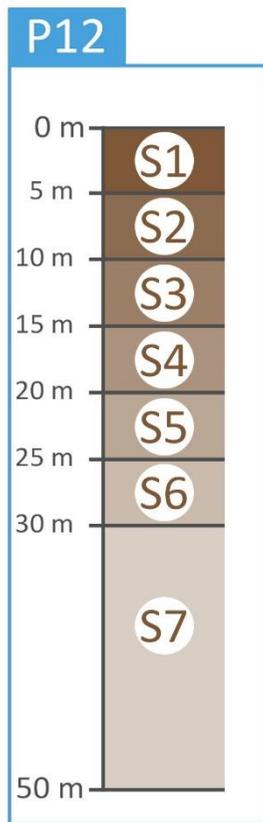


Figura A - 3.13: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas E1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P11.



E

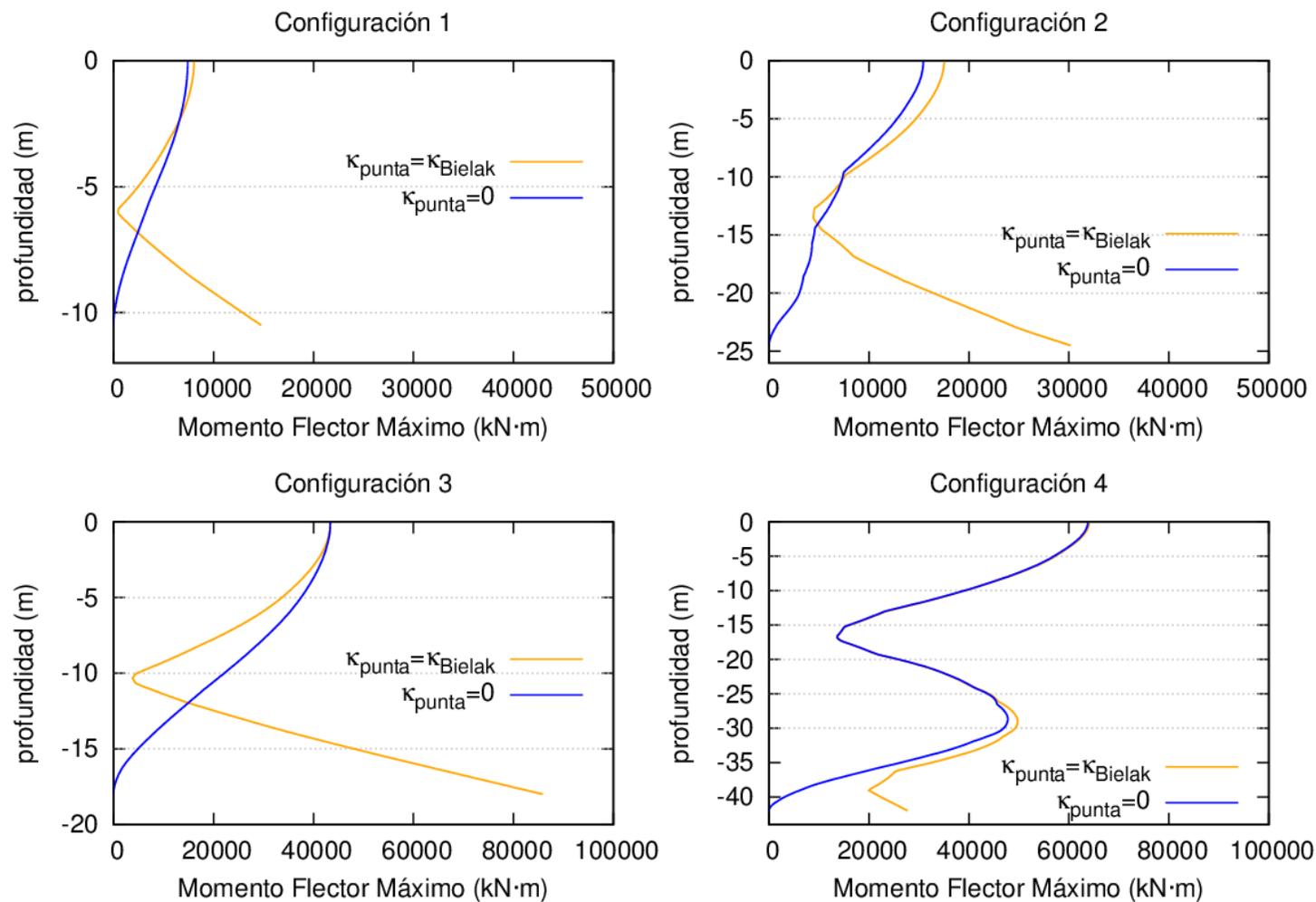


Figura A - 3.14: Envolvente de momentos flectores máximos obtenidos para los acelerogramas E1 en las 4 configuraciones de pilote estudiadas con los dos tipos de C.C. en la punta para el perfil estratigráfico P12.

PFC

