

cmn2019

Congress on Numerical
Methods in Engineering
Congresso de Métodos
Numéricos em Engenharia
Congreso de Métodos
Numéricos en Ingeniería

July 01-03, 2019

Editors
Paulo B. Lourenço *University of Minho*
Paulo Flores *University of Minho*
Stéphane Clain *University of Minho*



APM|AC SEMNI

Congress on Numerical Methods in Engineering

Congresso de Métodos
Numéricos em Engenharia

Congreso de Métodos
Numéricos en Ingeniería

CMN 2019

July 1 – 3
Guimarães, Portugal

All rights are reserved.

The papers included in this publication are presented mainly in the submission state provided by the authors after scientific reviewing. The editors do not accept any responsibility for possible errors or inaccuracies.

ISBN: 978-989-54496-0-6

© Universidade do Minho

Departamento de Engenharia Civil, Azurém, 4800-058 Guimarães

Tel: +351 253510200, Fax: +351 253510217

Organizing Committee

Paulo B. Lourenço, Universidade do Minho
Paulo Flores, Universidade do Minho
Stéphane Clain, Universidade do Minho
David Greiner, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Irene Arias, Universitat Politècnica de Catalunya
Manuel Tur, Universitat Politècnica de València

Executive Organizing Committee

Graça Vasconcelos, Universidade do Minho
João Pereira, Universidade do Minho
Miguel Nóbrega, Universidade do Minho

Conference Secretariat

Ana Fonseca, University of Minho
Department of Civil Engineering
P-4800-058, Azurém
Guimarães, PORTUGAL
Tel +351 253 510 498
Email: cmn2019@civil.uminho.pt

Scientific Committee

Adélia Sequeira (IST/UTL)
António Ferreira (FEUP)
Antonio Huerta (UPC)
Carlos Mota Soares (IST/UTL)
Carlos Pina (LNEC)
David Greiner (ULPGC)
Dinar Camotim (IST/UTL)
Elías Cueto (UNIZAR)
Eugenio Oñate (UPC)
Fermín Navarrina (UDC)
Helder Rodrigues (IST/UTL)
Ignacio Romero (UPM)
Ignasi Colominas (UDC)
Irene Arias (UPC)
Isabel Figueiredo (UC)
Ivo Dias (LNEC)
João Rocha Almeida (UNL)
Joan Baiges (UPC)
Jorge Ambrósio (IST/UTL)
José Carlos Pereira (IST/UTL)
José César de Sá (FEUP)
José María Goicolea (UPM)
Luís Filipe Menezes (UC)
Manuel Alves (FEUP)
Manuel Casteleiro (UDC)
Manuel Tur (UPV)
Miguel Cervera (UPC)
Paulo B. Lourenço (UM)
Paulo Oliveira (UBI)
Paulo Piloto (IPB)
Paulo Vila Real (UA)
Pedro Camanho (FEUP)
Pedro Díez (UPC)
Pilar Ariza (US)
Riccardo Rossi (UPC)
Xavier Oliver (UPC)

TABLE OF CONTENTS

Preface	6
Summary	7
Contents	8
Plenary lectures	21
Papers	27
Authors Index	1389

Preface

CMN 2019 aims to be a forum for the discussion of relevant scientific, and technological developments in computational mechanics, numerical methods and engineering applications. CMN 2019 is jointly organized by the Portuguese (APMTAC) and the Spanish (SEMNI) Associations and follows the previous congress editions of Madrid (2002), Lisbon (2004), Granada (2005), Porto (2007), Barcelona (2009), Coimbra (2011), Bilbao (2013), Lisbon (2015) and Valencia (2017).

The scientific program comprises six plenary lectures from internationally known researchers and is structured in almost 30 thematic sessions in different fields of research. We sincerely thank the session organizers for their contribution for the success of the congress.

The congress is open to everyone interested in numerical methods and the objective of the series is to create an excellent forum for dissemination of the latest scientific and technical developments and for the exchange of new ideas in emerging topics. We hope this can be achieved and the participants enjoy the technical and social program planned, together with the welcoming and UNESCO World Heritage city of Guimarães.

More than 275 participants from 30 countries are expected making CMN 2019 a truly international event. We are happy to share with you an exciting program composed of almost 300 contributions concerning a wide range of activities and research fields in numerical methods. The series of conferences benefits immensely from joining young participants (and the future of our community) with more senior academics and professionals, with a very attractive conference fee for young participants. Young participants totalize 40% of the participants, which is to be noted.

Thinking about the young participants, a unique presentation possibility is offered with oral (more formal and less interactive) and poster (informal and interactive) presentations of the same paper. We are also happy that three post-congress advanced software courses are offered to all participants, again at a modest fee, which total more than 50 participants.

We warmly thank the contributors, the authors, the speakers and the exhibitors of the event and wish this conference will offer you fruitful discussions and a pleasant time in Guimarães.

Guimarães, July 2019

Paulo B. Lourenço, Paulo Flores & Stéphane Clain, for APMTAC

David Greiner, Irene Arias & Manuel Tur, for SEMNI

SUMMARY

Plenary lectures	21
Sessions	
ST1 Discrete element modelling of masonry structures	27
ST2 Geotechnics and Geoengineering	64
ST6 Computational Methods in Acoustics and Vibration	112
ST7 Meshless and Particle Formulations in Computational Mechanics	238
ST8 Unfitted discretization methods: From theory to multidisciplinary applications	266
ST9 Offshore Engineering	282
ST10 Recent Advances in Shape and Topology optimization	325
ST12 Numerical models for heat and mass transfer	331
ST13 Técnicas de reducción de modelos/Model order reduction techniques	449
ST14 Constitutive Modelling and Material Parameter Identification	454
ST15 Composites modelling: characterization, behaviour and structures	478
ST16 Metal forming processes: Formability characterization, damage and ductile fracture	515
ST17 Computational biomechanics and applications	529
ST18 Steel and composite structures	552
ST19 Vibration Problems in Structures	665
ST20 Mechanics of soft tissues Experimental and numerical techniques	724
ST21 New trends in very high order numerical methods	758
ST23 Fracture, collapse and nonlinear behaviour in concrete structures and quasi-fragile materials	764
ST25 Computational Rheology	842
ST27 Modelling of masonry structures	867
ST28 Multi-body dynamics	1013
ST29 Computational Modeling in Mechanobiology and Tissue Engineering	1091
ST30 Optimization, Metaheuristics and Evolutionary Algorithms in Civil Engineering	1096
ST31 Finite Elements	1188
ST32 Fluid mechanics	1250
ST33 Computational methods in Engineering	1294

CONTENTS

Plenary lectures

Origami engineering: geometry and mechanics <i>Glaucio H. Paulino</i>	21
Nucleation and Propagation of Fracture and Healing in Elastomers: A Phase Transition Theory and Numerical Implementation <i>Oscar Lopez-Pamies</i>	22
Designing flexoelectric metamaterials through computational strain gradient engineering <i>Irene Arias</i>	23
Cell-centered Finite Volume methods for solving the Lagrangian form of gas dynamics and solid mechanics equations on unstructured grids <i>Pierre-Henri Maire</i>	24
Biomechanics of Some Soft-Tissues: Constitutive Modelling and Computational Aspects <i>José Luís Alves</i>	25
From Data-Driven modeling to Physically-Constrained Deep Learning in Predictive Continuum Physics <i>Manuel Doblaré</i>	26

Papers

Discrete element modelling of masonry structures

DEM modelling of dry stone retaining walls <i>Nathanaël Savalle, Éric Vincens and Fabian Dedecker</i>	27
Characterization of the structural behaviour of masonry prisms submitted to vertical actions using volumetric finite elements <i>Marcelo Rodrigo De Matos Pedreiro, Rogerio De Oliveira Rodrigues, Jefferson Sidney Camacho and Maicon Marino Albertini</i>	41
A Discrete Element Model for the seismic behaviour of masonry churches in central Italy <i>Francesca Gobbin, José V. Lemos and Gianmarco de Felice</i>	59
Seismic performance of the Kuño Tambo church (Peru) <i>Nuno Mendes, José V. Lemos and Sara Zanotti</i>	60
Crosswise tension resistance of walls with different bond patterns <i>Shipeng Chen and Katalin Bagi</i>	61
Manifold Learning and Discrete Element Modeling for Diagnosis of Cracks in Masonry Structures <i>Rebecca Napolitano, Wesley Reinhart, David Sroczynski and Branko Glisic</i>	62
Rigid block modelling of historic masonry structures using mathematical programming <i>Francesco Paolo Portioli</i>	63

Geotechnics and Geoengineering

Effect of advanced drainage on the stability of tunnel faces under the water table <i>Congke Yi, Salvador Senent and Rafael Jimenez</i>	64
Distinct element method simulation of rock creep behaviour <i>Jose Gregorio Gutierrez-Ch, Salvador Senent and Rafael Jimenez</i>	72
A new factor design considering socket roughness for side shear resistance prediction of rock-socketed piles <i>Jose Gregorio Gutierrez-Ch, Svetlana Melentijevic, Salvador Senent and Rafael Jimenez</i>	73
Evolution of pore pressure in a cohesive soil under cyclic loading <i>Daniel Panique Lazcano, Hernan Patiño, Rubén Galindo Aires and Claudio Olalla</i>	74
Avaliação do efeito das explosões de desmonte de rocha em barragens de betão com base num modelo numérico do maciço e barragem e comparação com resultados observados <i>Ricardo Fonseca, Jorge Pereira Gomes, José V. Lemos and Ricardo Resende</i>	91

Numerical analysis of instability failure modes of cellular steel beams in fire conditions <i>Luis Mesquita, Jaqueline Alves Silva and Paola Regina Dalcantal</i>	643
Evaluation of the Rotation Capacity of Steel Beams using Advanced Nonlinear Analysis <i>A. I. Mohabeddine, Y. W. Koudri, J. A. F. O. C. Correia and J. M. Castro</i>	644
Torsional behaviour of I-section beams with supports that restrain a single flange <i>Miguel Pedrosa Ferreira, Paulo Providência and Anísio Andrade</i>	645
Static behavior of porous functionally graded plates using layerwise approach <i>Joaquim Barbosa, Ana Mota and Amelia Loja</i>	664
Vibration Problems in Structures	
The influence of the trial function on the determination of the critical buckling load by the Rayleigh method <i>Alexandre de Macêdo Wahrhaftig and Kaique Moreira Matos Magalhães</i>	665
Mass matrix and equivalent nodal forces of the regular linear prismatic finite element <i>Marcelo Cavalcanti Silva and Rogerio De Oliveira Rodrigues</i>	676
Designing a footbridge with integrated TMD: Improvement assessment <i>Carlos Martín de la Concha Renedo, Iván Díaz Muñoz and Jaime García Palacios</i>	688
Designing multiple tuned mass dampers for multi-mode control of steel footbridges <i>Javier Fernando Jiménez-Alonso, Javier Lopez-Martinez, Jose Luis Blanco-Claraco and Andres Saez</i>	704
Influence of the soil profile on the flexible-base fundamental period of piled structures <i>Cristina Medina, Guillermo Álamo, Luis A. Padrón, Juan J. Aznárez and Orlando Maeso</i>	713
Free undamped vibration of a simply supported beam subjected to axial compression <i>Santiago Méndez-Vázquez, J. Paris, F. Navarrina, L. Navarrina and D. Gonzalez</i>	723
Mechanics of soft tissues Experimental and numerical techniques	
Virtual Reality Applied to the Study of the Male Urinary System <i>Sérgio Pinto, António André and Pedro Martins</i>	724
Comparative study of two pathological states of the male urinary system using FEM simulations <i>António André, Sérgio Pinto and Pedro Martins</i>	733
Mechanical Properties of Agarose as a Phantom for Breast Tissue <i>Ana Margarida Teixeira and Pedro Martins</i>	741
Phenomenological versus microstructural approach to model layer damage mechanical properties of thoracic and abdominal porcine aorta <i>Juan A. Peña, Miguel A. Martínez and Estefanía Peña</i>	756
Modelling atheroma plaque growth on patient-specific geometries <i>Myriam Cilla, Patricia Hernández, Miguel Ángel Martínez and Estefanía Peña</i>	757
New trends in very high order numerical methods	
Very high order finite volume scheme for one-dimensional steady-state hyperbolic equations <i>Gaspar J Machado, Stéphane Clain and Raphaël Loubère</i>	758
An implicit turbulent model with automatic dissipation adjustment and a posteriori stabilization for Large Eddy Simulation of compressible flows <i>Xesus Nogueira, Luis Ramirez and Fermín Navarrina</i>	759
Least-Squares High-order Reconstruction on Curved Boundaries for Finite Differences Schemes <i>Javier Fernández-Fidalgo, Stéphane Clain, Luis Ramirez, Ignasi Colominas and Xesús Nogueira</i>	760
An algorithm based on continuation techniques for minimization problems with highly non-linear equality constraints <i>Elisabete Alberdi Celaya, Joseba Makazaga and Ander Murua</i>	761
An Eight-Order Scheme for Convection-Diffusion Problems with Polyhedral Unstructured Grids <i>Filipe José Mendes Diogo, Duarte Manuel Silva de Albuquerque and José Carlos Fernandes Pereira</i>	762

INFLUENCIA DEL PERFIL DE SUELO SOBRE EL PERIODO FUNDAMENTAL EN BASE FLEXIBLE DE ESTRUCTURAS PILOTADAS

Cristina Medina¹, Guillermo M. Álamo¹, Luis A. Padrón¹,
Juan J. Aznárez¹, Orlando Maeso¹

1: Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
(SIANI)

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

e-mail:

{cristina.medina,guillermo.alamo,luis.padron,juanjose.aznarez,orlando.maeso}@ulpgc.es

Palabras clave: cimentaciones pilotadas, suelo estratificado, periodo en base flexible, interacción suelo-estructura

Resumen Aunque en la realidad los suelos pueden presentar propiedades variables con la profundidad, es habitual adoptar la simplificación consistente en suponer un suelo homogéneo cuando se aborda un análisis de la respuesta dinámica de estructuras soportadas por cimentaciones profundas. En este trabajo, se ha empleado un modelo numérico eficiente basado en la formulación integral del problema elástico y el uso de funciones de Green para el semiespacio estratificado para determinar el comportamiento dinámico, en términos de impedancias para los modos de vibración horizontal, de cabeceo y el modo cruzado horizontal-balanceo, de varias configuraciones de cimentaciones pilotadas considerando distintos perfiles de suelo no homogéneos. Los pilotes se modelan utilizando elementos finitos como vigas según la teoría de vigas de Timoshenko mientras que el suelo se modela como un grupo de estratos homogéneos, lineales, isotrópicos y viscoelásticos. Posteriormente, las impedancias calculadas se han utilizado para obtener el periodo fundamental en base flexible de estructuras esbeltas y no esbeltas soportadas por dichas cimentaciones mediante una metodología de subestructuración. Así, es posible determinar cómo afecta el perfil de suelo al periodo del sistema y estimar el error en el que se incurre cuando se adopta la simplificación de suponer un perfil de suelo homogéneo, el cual ha resultado ser significativo.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades del suelo en que se encuentran embebidos los pilotes de una cimentación afectan a la respuesta dinámica de la misma así como a la de la estructura que esta soporta. Muchos autores han llevado a cabo estudios en los que la cimentación se considera embebida en un semiespacio homogéneo (p.e. [1, 2, 3, 4]). Sin embargo, en la realidad los suelos suelen presentar propiedades variables con la profundidad y, en algunos casos, modelar el perfil de suelo como si se tratara de un semiespacio homogéneo puede conducir a estimaciones imprecisas de la respuesta dinámica real tanto de la cimentación como de la superestructura.

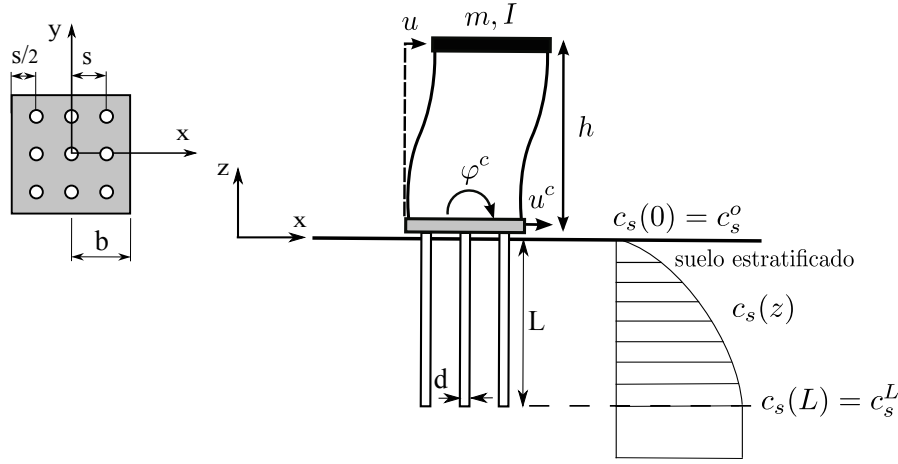
La respuesta dinámica en términos de impedancias de cimentaciones pilotadas en suelos no homogéneos ha sido analizada por diversos autores. Entre ellos se encuentran los trabajos realizados por Giannakou *et al.* [5], Rovithis *et al.* [6] y Álamo *et al.* [7] en los que se presentan impedancias de pilotes embebidos en perfiles de suelo cuyas propiedades varían siguiendo una ley exponencial.

En lo que respecta al estudio de la influencia de la rigidez de la cimentación sobre el comportamiento dinámico de la superestructura en términos de periodo, pueden encontrarse en la literatura científica diversos trabajos en los que se adopta la consideración de suelo homogéneo. Algunos ejemplos son los estudios publicados por Veletsos y Meek [8] para cimentaciones superficiales, Avilés y Pérez-Rocha [9] para cimentaciones embebidas o Maravas *et al.* [10] para cimentaciones pilotadas. Por otra parte, artículos como el publicado por Avilés y Suárez [11], en el que se analiza el comportamiento dinámico de una cimentación embebida en un estrato sobre un lecho rocoso, o el publicado por Álamo *et al.* [12], en el que se estudia la influencia de la no homogeneidad del suelo sobre la respuesta dinámica de aerogeneradores marinos cimentados sobre monopilotes, señalan que el perfil de suelo tiene una influencia significativa sobre la respuesta dinámica de la superestructura. Sin embargo, los efectos de la variabilidad de las propiedades del suelo sobre la respuesta estructural de edificios pilotados requiere aún de mayores esfuerzos de investigación.

Con el fin de contribuir a esclarecer la influencia que la no homogeneidad del suelo tiene sobre la respuesta dinámica de estructuras pilotadas, este artículo analiza los resultados en términos de periodo en base flexible correspondientes a estructuras esbeltas y no esbeltas soportadas por grupos de 3 x 3 pilotes verticales embebidos tanto en un semiespacio homogéneo como en dos perfiles diferentes de suelo no homogéneo. Estos resultados se obtienen aplicando una metodología de subestructuración que a su vez emplea las funciones de impedancia calculadas mediante un modelo numérico basado en la formulación integral del problema elástico y funciones de Green específicas para el semiespacio estratificado.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En este trabajo se aborda el estudio de la influencia que la estratigrafía del suelo tiene sobre el periodo en base flexible de estructuras a cortante que se comportan como sistemas de un solo grado de libertad en su condición de base rígida como el que se observa en la Figura 1.

**Figura 1:** Definición del problema

La estructura se modela como una masa m uniformemente distribuida en un área cuadrada, situada a la altura h de la resultante de las fuerzas de inercia para el modo de vibración objeto de estudio y sustentada por columnas sin masa inextensibles axialmente. El momento de inercia de esta masa se representa en la figura mediante la letra I . Asimismo, T representa el periodo fundamental de esta estructura en base rígida.

La cimentación que soporta la estructura está constituida por un grupo de 3×3 pilotes verticales del mismo material y con idénticas propiedades geométricas definidas por su diámetro d y su longitud L . Las cabezas de los pilotes están embebidas en un encepado rígido de espesor despreciable que restringe su movimiento. Se considera que dicho encepado no está en contacto con el suelo y que su masa y su inercia son despreciables. El semiancho del encepado b y la distancia entre centros de pilotes adyacentes s son parámetros geométricos que definen cada una de las configuraciones de grupos de pilotes objeto de análisis. Estos pilotes se encuentran embebidos en un semiespacio viscoelástico estratificado en el que la velocidad de propagación de las ondas de corte varía con la profundidad de acuerdo a la siguiente expresión:

$$c_s(z) = c_s^L \left[q + (1 - q) \frac{|z|}{L} \right]^{0.5} \quad \text{siendo} \quad q = \left(\frac{c_s^o}{c_s^L} \right)^2 \quad (1)$$

donde q es un parámetro adimensional que define la no homogeneidad de suelo y c_s^o/c_s^L es el cociente entre la velocidad de propagación de las ondas de corte en la cabeza y la punta del pilote. Tal y como se observa en la Figura 1, para puntos situados por debajo de la cota de la punta del pilote la velocidad de las ondas de corte permanece constante. Se supone la densidad ρ_s , el coeficiente de Poisson ν_s y el amortiguamiento hysterético ξ_s de suelo constantes.

Con el fin de determinar el error que se comete al modelar estos perfiles de suelo estratificado como un suelo homogéneo, los resultados obtenidos para dichos perfiles se comparan con aquellos correspondientes a un semiespacio homogéneo equivalente en el que la onda de corte invierte el mismo tiempo en recorrer la longitud del pilote. La velocidad de las ondas de corte en este caso se define como:

$$\hat{c}_s = \frac{L}{\int_0^L \frac{dz}{c_s(z)}} \quad (2)$$

El módulo de elasticidad transversal del perfil de suelo homogéneo equivalente es $\hat{\mu}_s = \hat{c}_s^2 \rho_s$, mientras que el módulo de elasticidad se define como $\hat{E}_s = \hat{\mu}_s / (2(1 + \nu_s))$.

3. METODOLOGÍA

En este trabajo, la respuesta dinámica de la cimentación se expresa en términos de funciones de impedancia que se escriben como $K_{ij} = k_{ij}(\omega) + ia_o c_{ij}(\omega)$, siendo k_{ij} y c_{ij} los coeficientes de rigidez y amortiguamiento dinámicos, respectivamente. En esta expresión, $a_o = \omega b / \hat{c}_s$ representa la frecuencia de excitación adimensional, siendo ω la frecuencia circular de la excitación. Los valores de dichas funciones de impedancia se obtienen empleando un modelo numérico [7] basado en la formulación integral del teorema de reciprocidad en elastodinámica y el uso de funciones de Green para el semiespacio estratificado. Los pilotes se modelan utilizando elementos finitos como vigas según la teoría de vigas de Timoshenko mientras que el suelo se modela como un grupo de estratos homogéneos, lineales, isotrópicos y viscoelásticos.

Una vez conocidos los valores de los coeficientes de rigidez dinámica para los modos de vibración horizontal (k_{xx}), de cabeceo ($k_{\theta\theta}$) y modo cruzado horizontal-balanceo ($k_{x\theta}$), la respuesta dinámica de la estructura en base flexible, expresada en términos del periodo fundamental no amortiguado \tilde{T} de un sistema equivalente de un grado de libertad (1GDL), se obtiene empleando un procedimiento previamente desarrollado y validado [13] que se basa en el modelo de subestructuración representado en la Figura 2a. En esta figura, el sistema objeto de estudio se modela como un sistema de tres grados de libertad (3GDL): desplazamiento horizontal de la planta u , desplazamiento horizontal del cimient u^c y giro del cimient φ^c . La equivalencia entre los dos sistemas que se muestran en la Figura 2 se establece en el rango de frecuencias en el que se produce la respuesta máxima. El ratio entre el periodo fundamental del sistema no amortiguado en base flexible y el periodo fundamental de la estructura sobre base rígida \tilde{T}/T se obtiene como el valor de la frecuencia fundamental adimensional de la estructura en base rígida (ω_n/ω) que anula el determinante del sistema. Una descripción detallada del procedimiento puede encontrarse en [13].

Los parámetros adimensionales que intervienen en el problema son: (1) la frecuencia fundamental adimensional en base rígida de la estructura ω_n/ω ; (2) el ratio de esbeltez estructural h/b ; (3) la densidad de masa relativa entre la estructura y el suelo $\delta = m/(4\rho_s b^2 h)$; (4) el parámetro de onda $\sigma = c_s T/h$; (5) el coeficiente de Poisson del suelo ν_s ; (6) el coeficiente de Poisson de los pilotes ν_p ; (7) el coeficiente de amortiguamiento del suelo ξ_s ; (8) la relación entre las densidades del suelo y los pilotes ρ_s/ρ_p ; (9) la relación entre los módulos de elasticidad de los pilotes y el suelo E_p/\hat{E}_s ; (10) la relación entre la separación entre centros de pilotes adyacentes y el diámetro de los mismos s/d ; (11) el ratio de esbeltez de los pilotes L/d ; y (12) el coeficiente de embebimiento L/b de la cimentación.

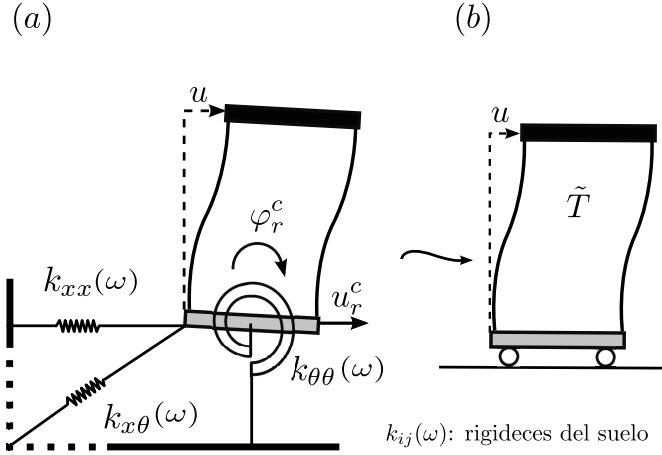


Figura 2: (a) Modelo de subestructuración (b) Sistema equivalente

4. RESULTADOS

En este trabajo la metodología descrita en la sección 3 se emplea para la obtención de resultados en términos de periodo fundamental de la estructura en base flexible correspondientes a estructuras esbeltas ($h/b = 10$) y no esbeltas ($h/b = 1$) soportadas por dos configuraciones distintas de grupos de 3×3 pilotes con ratios de esbeltez $L/d = 7.5$ y $L/d = 15$, respectivamente. En ambos casos se ha considerado un coeficiente de embebimiento de la cimentación $L/b = 2$. Asimismo, se han obtenido resultados para tres perfiles de suelo con $c_s^o/c_s^L = 0.25$, 0.5 y 1 . Los valores adoptados para los restantes parámetros adimensionales que intervienen en el problema se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de los parámetros adimensionales correspondientes a los casos de estudio.

ν_s	ξ_s	E_p/\hat{E}_s	ρ_p/ρ_s	ξ	δ	$1/\sigma$
0.4	0.05	10^3	0.7	0.05	0.15	$0 - 0.5$

La Figura 3 muestra en cada una de sus columnas valores de las rigideces dinámicas de grupos de 3×3 pilotes para los distintos modos de vibración (k_{xx} , $k_{\theta\theta}$ y $k_{\theta x}$) en función de la frecuencia adimensional $\omega d/\hat{c}_s$. La primera y la segunda fila presentan resultados correspondientes a configuraciones con un ratio de esbeltez de los pilotes $L/d = 7.5$ y $L/d = 15$ respectivamente. En cada área gráfica se han representado de forma superpuesta resultados correspondientes a tres perfiles de suelo diferentes: dos perfiles de suelo no homogéneo con $c_s^o/c_s^L = 0.25$ y $c_s^o/c_s^L = 0.5$, respectivamente; y un semiespacio homogéneo equivalente ($c_s^o/c_s^L = 1$). Se observa que los valores de la rigidez dinámica asociada al modo de vibración de cabeceo ($k_{\theta\theta}$) se incrementan a medida que aumenta la variabilidad del suelo con la profundidad. Asimismo, cabe mencionar que en el caso de la configuración de pilotes con un ratio de esbeltez $L/d = 15$ se alcanzan mayores valores de la rigidez horizontal (k_{xx}) para el semiespacio homogéneo ($c_s^o/c_s^L = 1$).

Con el fin de mostrar cómo afectan estas variaciones de la rigidez al periodo en base flexible de la estructura, se representan en la Figura 4 los resultados en términos de \tilde{T}/T correspondientes a estructuras con un ratio de esbeltez $h/b = 1$ (columna izquierda) y $h/b = 10$ (columna derecha) soportadas por las configuraciones de grupos de pilotes objeto de estudio. Al igual que en la Figura 3, en cada área gráfica se muestran de forma superpuesta curvas correspondientes a los distintos perfiles de suelo analizados. En el eje de abscisas se representa la inversa del parámetro de onda ($1/\sigma$). Se observa que en el caso de estructuras esbeltas ($h/b = 10$), el incremento de la rigidez a cabeceo, que se produce como consecuencia del incremento de la variabilidad del suelo, es el factor determinante y ocasiona una reducción del periodo fundamental de la estructura en base flexible. Sin embargo, en el caso de estructuras no esbeltas ($h/b = 1$) el factor preponderante es la rigidez horizontal y ello explica el cambio de tendencia que se observa en el caso de grupos de pilotes con $L/d = 15$ en el cual es la consideración de suelo homogéneo la que conduce a menores valores del periodo fundamental de la estructura en base flexible.

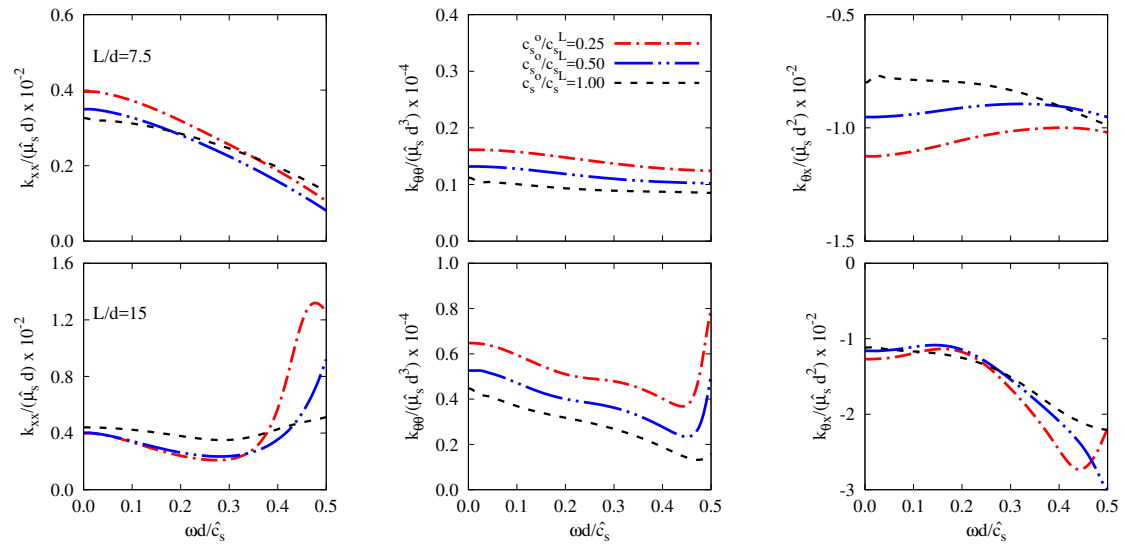


Figura 3: Rigideces dinámicas para grupos de 3×3 pilotes con $L/b = 2$ embebidos en distintos perfiles de suelo ($c_s^o/c_s^L = 0.25, 0.5$ y 1).

Por otra parte, con el ánimo de ofrecer un indicador de la magnitud del error que se comete al modelar un perfil de suelo variable con la profundidad como si se tratara de un suelo homogéneo, la Figura 5 presenta resultados en términos del ratio \tilde{T}/\tilde{T}_H entre el periodo fundamental en base flexible de la estructura en suelo estratificado y el correspondiente a un semiespacio homogéneo equivalente para los casos objeto de estudio. Se observa que las diferencias entre los resultados obtenidos para los distintos perfiles de suelo aumentan con la inversa del parámetro de onda. En el caso de estructuras esbeltas ($h/b = 10$) el periodo fundamental de la estructura en base flexible disminuye a me-

didada que aumenta la variabilidad del suelo con la profundidad. Adoptar la suposición de suelo homogéneo puede suponer sobrestimar \tilde{T} hasta en un 18 % de su valor real para las configuraciones analizadas. Por otra parte, se observa que tendencia se invierte para estructuras no esbeltas ($h/b = 1$) soportadas por las configuraciones de pilotes con $L/d = 15$ analizadas en este trabajo. En este caso, adoptar la simplificación de considerar un suelo homogéneo puede conducir a subestimar \tilde{T} hasta en un 3 % de su valor real para los casos analizados.

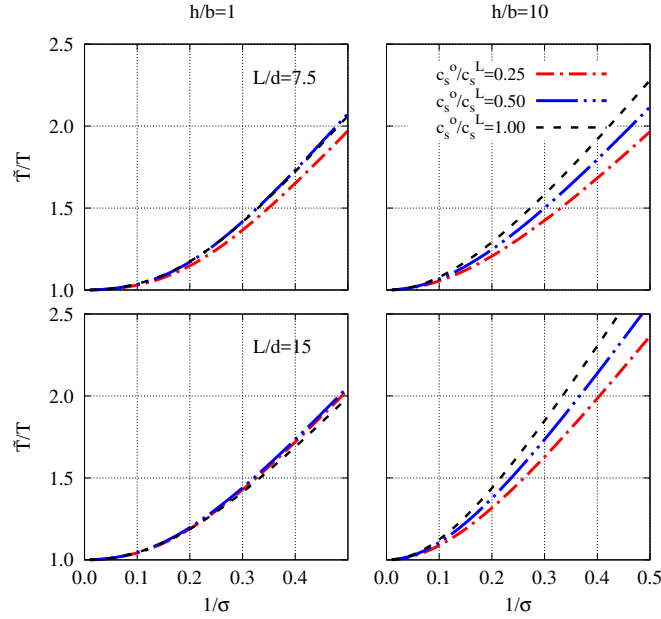


Figura 4: Ratio \tilde{T}/T entre el periodo fundamental en base flexible (\tilde{T}) y en base rígida (T) de estructuras soportadas por grupos de 3×3 pilotes con $L/b = 2$ embebidos en distintos perfiles de suelo ($c_s^o/c_s^L = 0.25, 0.5$ y 1).

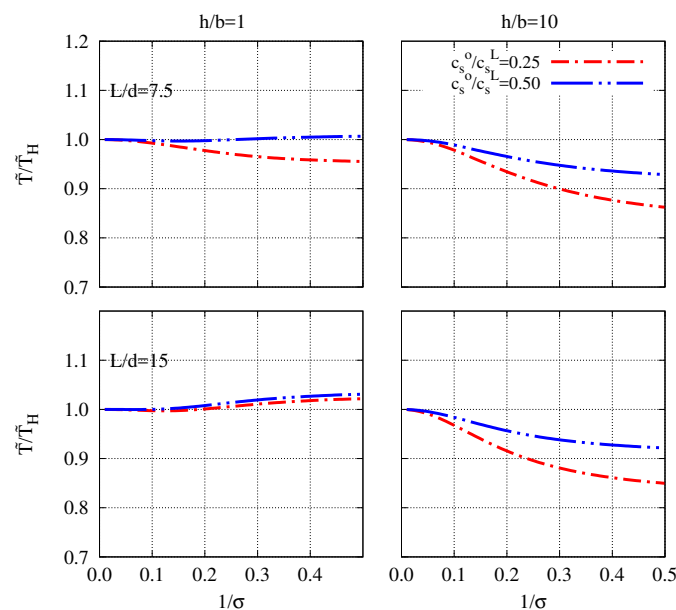


Figura 5: Ratio entre el periodo en base flexible obtenidos para perfiles de suelo no homogéneos (\tilde{T}) y el correspondiente al perfil homogéneo equivalente (\tilde{T}_H) para distintos grupos de 3×3 pilotes con $L/b = 2$.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza de qué modo afecta la estratigrafía del suelo a la respuesta dinámica en términos del periodo fundamental en base flexible de estructuras soportadas por grupos de 3×3 pilotes embebidos en distintos perfiles de suelo. Los valores de dicho periodo se han obtenido mediante un procedimiento propuesto por Medina *et al.* [13] que se basa en una metodología de subestructuración. La aplicación de esta metodología requiere de la obtención previa de los valores de las rigideces dinámicas que caracterizan el conjunto cimentación-suelo. Para ello se ha empleado un modelo numérico basado en la formulación integral del problema elástico y el uso de funciones de Green para el semiespacio estratificado [7].

A continuación se resumen las principales conclusiones derivadas del análisis de los resultados obtenidos:

- La consideración de suelo homogéneo puede conducir a resultados imprecisos en términos del periodo fundamental de la estructura en base flexible.
- Se observa una mayor influencia de la estratigrafía del suelo para el caso de estructuras esbeltas ($h/b = 10$).
- Adoptar la consideración de suelo homogéneo puede suponer subestimar o sobrestimar el periodo fundamental de la estructura en base flexible en función del ratio de esbeltez de la misma así como de la separación entre pilotes adyacentes, pudiéndose alcanzar errores hasta de un 18 % en las configuraciones analizadas.
- Las discrepancias entre los resultados obtenidos para los distintos perfiles de suelo

analizados se incrementan a medida que disminuye el parámetro de onda, lo cual implica suelos menos rígidos.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está vinculado a la financiación recibida de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y la Consejería de Economía, Industria, Comercio y Conocimiento del Gobierno de Canarias a través del proyecto de investigación CEI2018-9.

REFERENCIAS

- [1] R. Sen, T. G. Davies, P. K. Banerjee, “Dynamic analysis of piles and pile groups embedded in homogeneous soils”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. **13**(1), pp. 53–65, (1985).
- [2] S. M. Mamoon, A. M. Kaynia, P. K. Banerjee, “Frequency domain dynamic analysis of piles and pile groups”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. **116**(10), pp. 2237–2257, (1990).
- [3] L. A. Padrón, J. J. Aznárez, O. Maeso, A. Santana, “Dynamic stiffness of deep foundations with inclined piles”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. **39**(12), pp. 1343–1367, (2010).
- [4] C. Medina, L. A. Padrón, J. J. Aznárez, A. Santana, “Kinematic interaction factors of deep foundations with inclined piles”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. **43**, pp. 2035–2050, (2014).
- [5] A. Giannakou, N. Gerolymos, G. Gazetas, *On the dynamics of inclined piles*. J. Lindberg, M. Bottiau y A. F. VanTol eds. *10th international conference on piling and deep foundations, Amsterdam, 2006*, Amsterdam (2006), pp. 286–295.
- [6] E. Rovithis, G. Mylonakis, K. Pitilakis, “Dynamic stiffness and kinematic response of single piles in inhomogeneous soil”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. **11**(6), pp. 1949–1972, (2013) .
- [7] G. M. Álamo, A. E. Martínez-Castro, L. A. Padrón, J. J. Aznárez, R. Gallego, O. Maeso, “Efficient numerical model for the computation of impedance functions of inclined pile groups in layered soils”, *Engineering Structures*, Vol. **126**, pp. 379–390, (2016).
- [8] A. S. Veletsos, J. W. Meek, “Dynamic behaviour of building-foundations systems”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. **3**, pp. 121–138, (1974).
- [9] J. Avilés, L. E. Pérez-Rocha, “Evaluation of interaction effects on the system period and the system damping due to foundation embedment and layer depth”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. **15**, pp. 11–27, (1996).

- [10] A. Maravas, G. Mylonakis, D. L. Karabalis, “Simplified discrete systems for dynamic analysis of structures on footings and piles”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. **61-62**, pp. 29–39, (2014).
- [11] J. Avilés, M. Suárez, “Effective periods and dampings of building-foundation systems including seismic wave effects”, *Engineering Structures*, Vol. **24**, pp. 553–562, (2002).
- [12] G. M. Álamo, J. J. Aznárez, L. A. Padrón, A. E. Martínez-Castro, R. Gallego, O. Maeso, “Dynamic soil-structure interaction in offshore wind turbines on monopiles in layered seabed based on real data”. *Ocean Engineering*, Vol. **156**, pp. 14–24, (2018).
- [13] C. Medina, J. J. Aznárez, L. A. Padrón, O. Maeso, “Effects of soil-structure interaction on the dynamic properties and seismic response of piled structures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. **53**, pp. 160–175, (2013).

