



UGR Universidad de Granada

Organiza:



Patrocina:



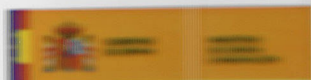
Colabora:



Biblioteca Universitaria



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Granada



4CNIS Libro de Resúmenes del 4º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica

# 4CNIS

4º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica

## LIBRO DE RESÚMENES

18-20 mayo 2011



Libro de resúmenes del cuarto  
Congreso Nacional de Ingeniería

© 2011,  
Alex Barbat  
Amadeo Benavent climent  
Edita e imprime: Copicentro S. L.  
ISBN:978-84-15261-27-8  
Depósito Legal: GR-1881/2011  
Impreso en España. Printed in Spain

Quedan rigurosamente prohibidas, bajo  
las sanciones establecidas en las leyes, la  
reproducción o almacenamiento total o  
parcial de la presente publicación,  
incluyendo el diseño de la portada, así  
como la transmisión de la misma por  
cualquiera de sus medios tanto si es  
eléctrico, como químico, mecánico,  
óptico, de grabación o bien de fotocopia,  
sin la autorización escrita de los titulares  
del copyright

**4CNIS**  
**Libro de resúmenes del Cuarto**  
**Congreso Nacional de Ingeniería**  
**Sísmica**

Editores:

Alex Barbat

Presidente de la Asociación  
Española de Ingeniería  
Sísmica

Amadeo Benavent Climent

Presidente del Comité  
Organizador del 4 Congreso  
Nacional de Ingeniería Sísmica



## Comité Organizador 4CNIS

### Presidencia

Alex H. Barbat, Presidente de la Asociación Española de Ingeniería Sísmica (AEIS)

Amadeo Benavent Climent, Presidente del Comité Organizador (UGR)

### Secretaría

Leandro Morillas, Secretario del Comité Organizador (UGR)

### Vocales

Xavier Goula Suriñach (Vicepresidente de la AEIS)

Guillermo García Jiménez (Diputación Provincial de Granada)

María Hausen Vargas (Secretaria - Tesorera de la AEIS)

### Colaboradores

Antolino Gallego (UGR)

David Escolano (UGR)

Jesús Donaire (UGR)

Alberto Escobedo (UGR)

Elena Oliver (UGR)

Ana Luisa Ramírez (UGR)

Rafael Bravo (UGR)

Juan de Mata Vico (UGR)

Ana Vela (UGR)

José Gil (UGR)

### Comité Científico 4º CNIS

Prof. Enrique Alarcón

Prof. Rafael Blázquez

Prof.<sup>a</sup> Belén Benito

Prof.<sup>a</sup> Elisa Buforn

Prof. Ramón Capote

Dr. Emilio Carreño

Prof. Rafael Gallego

Prof. Ángel García Yagüe

Prof.<sup>a</sup> María Luisa Gil

Prof. Enrique Hernández

Prof. Francisco López-Almansa

Dr. Alfonso López-Arroyo

Dr. Antonio Jesús Martín

Prof. Sergio Oller

Prof. Lluís Pujades

Prof. Pere Santanach

Prof. Carlos Sousa Oliveira

Prof. Javier Suárez

Prof. Agustín Udías

Dr. Julio Villacañas

## Presentación

Han pasado cuatro años desde el último congreso de la Asociación Española de Ingeniería Sísmica (AEIS) que tuvo lugar en Girona y ahora, se celebra el cuarto congreso en una ciudad emblemática para la Sismología e Ingeniería Sísmica española: Granada. En estos cuatro años se han sucedido terremotos devastadores como el de L'Aquila, Haití, Chile, y más recientemente el de Japón. Todos ellos, pero especialmente la enorme severidad y las trágicas consecuencias de éste último, unido al hecho de que se produzca en uno de los países más preparados frente a este tipo de eventos, pone de nuevo de manifiesto la importancia de seguir trabajando en la senda de la reducción del riesgo sísmico, y la conveniencia de foros de debate e intercambio de ideas como el que en esta ocasión nos reúne en Granada.

La AEIS tiene ya una larga tradición en la organización de eventos y congresos centrados en la Ingeniería Sísmica: el II Simposio Europeo de Ingeniería Sísmica (1969), la X Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica (1992) y el II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica (2001). A éstos hay que añadir los congresos nacionales que arrancan con el de Murcia, en abril de 1999, el de Málaga, en abril de 2003, y el de Girona, en mayo de 2007. Este cuarto congreso que celebramos en Granada es una continuación de esta tradición de 12 años reuniendo técnicos, científicos y profesionales de todo tipo, con responsabilidades en el proyecto, la construcción y la investigación, relacionados de una u otra forma con las actividades del amplio espectro multidisciplinar de la Sismología y la Ingeniería Sísmica. Este congreso, organizado por la AEIS junto con la Universidad de Granada ofrecerá el marco adecuado a todos los especialistas del mundo de la Sismología y de la Ingeniería Sísmica para el encuentro profesional, el intercambio de experiencias, la difusión de conocimientos y el debate de las ideas. Queremos hacer mención a algunos especialistas de referencia internacional que tendremos el honor de tener como ponentes invitados en las sesiones plenarias: profesores Martelli, Carvalho, Fajfar y Pujades, cuya participación saludamos especialmente. También se han preparado tres interesantes sesiones especiales dedicadas a la determinación de los parámetros nacionales del Eurocódigo 8, a los métodos probabilistas de evaluación del riesgo, y al terremoto de Haití, en los cuales van a participar investigadores y profesionales de reconocido prestigio.



Además de técnicos, científicos y profesionales, contamos con la presencia de un gran número de estudiantes de doctorado y de otros jóvenes que constituyen el futuro de la Ingeniería Sísmica española, y que tienen en este congreso una plataforma ideal no sólo para comunicar sus propios avances, sino también de aprender y de asimilar nuevos conocimientos. En esta ocasión reuniremos aproximadamente a 100 participantes y contaremos con más de 90 contribuciones. Deseamos que este congreso permita una interacción fructífera de todos los colectivos, que cree sinergias entre los interesados en la geología, sismología, ingeniería sísmológica y sísmica, riesgo sísmico, cálculo sísmico de estructuras o arquitectura, que desarrollan su actividad no solo en el proyecto, construcción e investigación sino también en la protección civil, el seguro, la enseñanza, la consultoría, etc. Damos una cordial bienvenida a Granada a todos los congresistas y agradecemos de manera especial a los autores que han aportado sus trabajos a este congreso, a los conferenciantes invitados y a los ponentes que han dedicado su esfuerzo a participar, y a todas las personas e instituciones que han apoyado y ayudado eficazmente en la celebración del Congreso.

Alex Barbat

Amadeo Benavent Climent

Presidente de la Asociación  
Española de Ingeniería  
Sísmica

Presidente del Comité  
Organizador del 4 Congreso  
Nacional de Ingeniería Sísmica

## INDICE

### PONENCIAS INVITADAS

A PRACTICE-ORIENTED METHOD FOR NONLINEAR SEISMIC ANALYSIS OF BUILDING STRUCTURES Fajfar P & Kreslin M	19
RECENT DEVELOPMENTS AND APPLICATION OF ANTI-SEISMIC SYSTEMS AND CONDITIONS FOR THEIR CORRECT USE Martelli A	20
DESIGN OF BUILDINGS ACCORDING TO EUROCODE 8 Carvalho EC	21

### PONENCIAS ORDENADAS POR TEMAS

#### PROYECTO SISMORRESISTENTE

ADAPTACIÓN DE ESPECTROS NORMATIVOS A ESPECTROS DE PROBABILIDAD UNIFORME PARA CATALUÑA <i>Valcárcel JA, Secanell R, Goula X, Susagna T &amp; Irizarry J</i>	22
ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL ESPECTRO DE RESPUESTA ELÁSTICA DE LA NORMA DE CONSTRUCCIÓN SISMORRESISTENTE NCSE-02/NCSP-07 Y LOS DE OTRAS NORMAS RECIENTES <i>Bernal A Benito B Torres Y &amp; Hermanns L</i>	23
DIMENSIONADO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS PORTICADAS DE HORMIGÓN ARMADO CON BASE EN LA RESPUESTA NO LINEAL <i>Vielma JC, Barbat AH &amp; Oller S</i>	24
ESTUDIO SÍSMICO PARA EL PROYECTO DEL NUEVO VIADUCTO DE JUN (GRANADA) <i>Jiménez JF, Gomez-Calcerrada D, Prieto C</i>	25
MÉTODO PUSHOVER EN PUENTES, COMPARACIÓN DE DISTINTAS METODOLOGÍAS EN PUENTES REALES <i>Corres Peiretti H &amp; Defant Erimbaue MF</i>	26

PROPOSAL OF DESIGN ENERGY SPECTRA BASED ON TURKISH REGISTERS	27
<i>Yazgan AU, López Almansa F &amp; Benavent-Climent A</i>	

### **REACONDICIONAMIENTO SÍSMICO**

ADECUACIÓN SISMORRESISTENTE DEL HOSPITAL ŞİŞLİ ETFAL EĞİTİM VE ARAŞTIRMA HASTANESİ, EN ESTAMBUL, TURQUÍA, USANDO AISLADORES	28
<i>Marín JR &amp; López I</i>	
ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL DE UNA ESTRUCTURA DE FABRICA CALCULADA CON EL METODO DE "CAPACITY DESIGN"	29
<i>Gugliotta G &amp; Deidda M</i>	
ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL DE UNA ESTRUCTURA PREFABRICADA CALCULADA CON EL METODO DE "CAPACITY DESIGN"	30
<i>Deidda M &amp; Gugliotta G</i>	
COMPARACIÓN PROBABILISTA ENTRE EL ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO INCREMENTAL DE EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	31
<i>Vargas YF, Pujades LG, Barbat A H &amp; Hurtado JE</i>	
COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICIOS CON MUROS DELGADOS DE HORMIGÓN. APLICACIÓN A ZONAS DE ALTA SISMICIDAD DE PERÚ	32
<i>López Almansa F &amp; Gonzáles Fernández HF</i>	
COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN COMPUESTAS POR FORJADOS RETICULARES CON Y SIN DISIPADORES DE ENERGÍA.	33
<i>Donaire-Ávila J, Benavent-Climent A &amp; Escobedo A</i>	
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SISMORRESISTENTE DE EDIFICIOS DE HORMIGÓN CON VIGAS PLANAS	34
<i>Domínguez DJ, López Almansa F &amp; Benavent Climent A</i>	
OPTIMIZACIÓN DE LA FIABILIDAD SISMO RESISTENTE DE LOS EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO REHABILITADOS	35
<i>Bezzazi M, Parron Vera MA, Rubio Cintas MD, El Ghoulbzouri A &amp; Khamlich A</i>	

POSIBILIDADES DE REACONDICIONAMIENTO SÍSMICO EN ESTRUCTURAS PORTICADAS CON MUROS DE FÁBRICA	36
---------------------------------------------------------------------------------------------------	----

*Ramírez-Márquez AL & Benavent-Climent A*

PROTEGER EL PASADO PROYECTANDO EL FUTURO SISTEMAS DE CONTINUIDAD PARA REHABILITACIÓN	37
-----------------------------------------------------------------------------------------	----

*López-Arquillo JD*

PROYECTOS DE REFUERZO ESTRUCTURAL DE COLEGIOS Y HOSPITALES EN ESTAMBUL	38
---------------------------------------------------------------------------	----

*López I & Marín R*

REFUERZO EN LOS NUDOS DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO CON PERFILES METÁLICOS COMPLETAMENTE EMBEBIDOS	39
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

*Montava I, González A, Irlés R & Pomares JC*

REHABILITACIÓN SÍSMICA DE UN EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO DE 23 NIVELES EN TLATELOLCO, HISTÓRICO Y EMBLEMÁTICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO	40
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

*Ávila JA, Torres JC, Loera S, Alcocer SM & Meli, R*

RELACIONES BENEFICIO COSTO PROBABILISTAS DE REHABILITACIÓN SÍSMICA	41
-----------------------------------------------------------------------	----

*Mora M, Ordaz M, Yamin L & Cardona O*

UN MÉTODO PARA EL ANÁLISIS SHAKEDOWN DE PÓRTICOS EN HORMIGÓN ARMADO	42
------------------------------------------------------------------------	----

*Petrolo AS*

### **ESTRUCTURAS CON SISTEMAS DE CONTROL**

AISLAMIENTO SÍSMICO: CRITERIOS DE DISEÑO Y EVALUACIONES ECONÓMICAS	43
-----------------------------------------------------------------------	----

*Satta A, Clemente P & Buffarini G*

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA INESTABILIDAD POR PANDEO DE DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO WPD	44
---------------------------------------------------------------------------------------	----

*Oliver-Saiz E & Benavent-Climent A*

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE ESTRUCTURAS PORTICADAS CON DISIPADORES HISTERÉTICOS SOMETIDAS A SISMO	45
------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

*Morillas L, Escolano-Margarit D & Benavent-Climent A*



LA NORMA EUROPEA SOBRE LOS DISPOSITIVOS ANTISISMICOS <i>Medeot R</i>	46
PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA DE ESTRUCTURAS CON DISIPADORES MEDIANTE PROCEDIMIENTOS ESTÁTICOS NO LINEALES <i>Escolano-Margarit D, Morillas L &amp; Benavent-Climent A</i>	47
<b>VULNERABILIDAD Y EVALUACIÓN DE DAÑOS</b>	
ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DEL GRUPO DE VIVIENDAS VIRGEN DE LA FUENSANTA EN VALENCIA <i>Guardiola A &amp; Basset L.</i>	48
ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE UN ÍNDICE DE VULNERABILIDAD <i>Escobedo A, Benavent-Climent A &amp; Donaire-Ávila J</i>	49
ASIGNACIÓN DE CURVAS DE CAPACIDAD Y FRAGILIDAD A LAS TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES TÍPICAS DEL SURESTE DE ESPAÑA <i>Quirós LE, Torres Y, Erduran E, Benito B &amp; Navarro M</i>	50
ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES DEL CENTRO HISTÓRICO DE TAPACHULA, CHIAPAS (MÉXICO) <i>Ruiz A, Aguilar J &amp; Vidal F</i>	51
EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL DISTRITO 2- L'EIXAMPLE DE LA CIUDAD DE VALENCIA <i>Basset L &amp; Guardiola A</i>	52
IMPACTO DEL TERREMOTO DE NIIGATA-CHUETSU-OKI DEL 16.07.2007 EN LA REVALUACIÓN SÍSMICA DE CN KASHIWAZAKI-KARIWA <i>Sánchez-Cabañero JG, Jiménez Juan A</i>	53
MODELIZACIÓN DE UN EDIFICIO DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA CARACTERÍSTICO DEL DISTRITO DEL EIXAMPLE DE BARCELONA, ESPAÑA <i>Avila-Haro J, Drigo RG, Pujades LG &amp; Barbat A</i>	54
RIESGO SÍSMICO DE LOS EDIFICIOS AGREGADOS EN LA CIUDAD DE BARCELONA (ESPAÑA) <i>Drigo RG, Avila-Haro JA, Pujades LG &amp; Barbat A</i>	55

THE CASE OF HAITI. IMPACT ANALYSIS: IDENTIFICATION OF CRITERIA AND DESCRIPTORS <i>Ferreira MA, Oliveira CS &amp; Mota de Sá</i>	56
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

---

**MÉTODOS NUMÉRICOS**


---

ANÁLISIS Y DISEÑO ELASTOPLÁSTICO POR MÉTODOS MATRICIALES DE ESTRUCTURAS DE BARRAS PLANAS Y ESPACIALES <i>Chica FM &amp; Gallego R</i>	57
DETECCIÓN NUMÉRICA DE DAÑOS ESTRUCTURALES: APLICACIÓN A LA EVALUACIÓN SÍSMICA EN RANGO NO LINEAL DE UNA CONSTRUCCIÓN MEDIEVAL DE OBRA DE FÁBRICA Y MORTERO DE CAL <i>Pineda P, Robador MD &amp; Gil MA</i>	58
FACTOR MUTIPLICADOR COMPLETO DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD SOMETIDO A CARGA ARMÓNICA <i>Carbonell Márquez JF, Gil Martín LM, Hernández Montes E &amp; Aschheim M</i>	59
SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS POR MEDIO DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS <i>Bravo R &amp; Pérez-Aparicio JL</i>	60

---

**SISMOLOGÍA Y DINÁMICA DE SUELOS**


---

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE SITIO EN LA CIUDAD DE GRANADA (SUR DE ESPAÑA) A PARTIR DE MEDIDAS DE RUIDO AMBIENTAL <i>Navarro M, García-Jérez A, Vidal F, Feriche M, Enomoto T, Azañón JM &amp; Alguacil G</i>	61
ANÁLISIS SÍSMICO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA CONSIDERANDO EFECTOS DE INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO ESTRUCTURA MEDIANTE EL SOFTWARE SAP2000 <i>Zamora D &amp; Gallego R</i>	62



APLICACION DE CUATRO MÉTODOS MATEMÁTICOS DE AGREGACIÓN DE JUICIOS DE EXPERTOS A LA ESTIMACIÓN DE LA ATENUACIÓN SISMICA EN DOS EMPLAZAMIENTOS DE LA PENINSULA IBERICA <i>Quecedo JI &amp; Samartín A</i>	63
CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE SITIO EN LA ATENUACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS SÍSMICOS FUERTES EN LA PENÍNSULA IBÉRICA E ISLAS BALEARES <i>Núñez A, Rueda JJ &amp; Mezcuca J</i>	64
CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL SUELO DE LAS ESTACIONES SÍSMICAS DE LLÍVIA (NE DE ESPAÑA) <i>Macau A., Figueras S, Benjumea B &amp; Domènech G</i>	65
EFFECTOS LOCALES DEL TERREMOTO PROFUNDO DE GRANADA DEL 11 ABRIL DE 2010 Y MW=6.3 <i>Alguacil G, Vidal F &amp; Feriche M</i>	66
FALLAS ACTIVAS Y SISMICIDAD EN LAS PARTES ALTAS DE LA CIUDAD DE GRANADA: COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA FORMACIÓN ALHAMBRA <i>Azañón JM, Rodríguez-Peces MJ, García-Mayordomo J &amp; Justo-Alpañés JL de</i>	67
IMPEDANCIAS DINÁMICAS DE CIMENTACIONES EMBEBIDAS EN UN SEMIESPACIO 3D VISCOELÁSTICO MULTICAPA MEDIANTE TÉCNICAS DE ELEMENTOS DE CONTORNO <i>Faris IH, Martínez-Castro AE &amp; Gallego R</i>	68
INFLUENCIA DEL TIPO DE ONDA Y ÁNGULO DE INCIDENCIA EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE CIMENTACIONES PROFUNDAS Y ESTRUCTURAS PILOTADAS <i>Zarzalejos JM, Aznárez JJ, Padrón LA &amp; Maeso O</i>	69
METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE ESPECTRO DE FUENTE PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LEYES DE ATENUACIÓN ESPECTRALES A PARTIR DE REGISTROS LOCALES <i>Bernal G, Ordaz M, Salgado M, Yamín L &amp; Cardona O</i>	70

SOIL-STRUCTURE INTERACTION IN THE TOKAMAK BUILDING OF ITER - INFLUENCE OF THE SEISMIC WAVE PATTERN <i>Beltrán F, Combescure D &amp; Vaz-Romero A</i>	71
SUSCEPTIBILIDAD A LICUEFACCIÓN EN LA VEGA DE GRANADA (ESPAÑA) <i>Valverde-Palacios I, Chacón J, Valverde-Espinosa I, Vidal F &amp; Irigaray C</i>	72
<b>PELIGROSIDAD Y RIESGO SISMICO</b>	
ANÁLISIS DE BENEFICIO COSTO DE LA MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE LAS ESCUELAS DE LA REGIÓN ANDINA Y DE CENTRO AMÉRICA <i>Valcárcel JA, Mora MG, Cardona OD, Pujades LG, Barbat AH &amp; Bernal GA</i>	73
ANÁLISIS DE LA GESTIÓN, PREVENCIÓN Y REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ÁREA EUROMEDITERRÁNEA <i>Vidal F &amp; Vidal MD</i>	74
CARACTERIZACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA ENFOCADA A ESTUDIOS DE RIESGO SÍSMICO A ESCALA URBANA. APLICACIONES EN ALMERÍA Y ALHAMA DE GRANADA. <i>Gaspar-Escribano J M, Rivas-Medina A, Navarro M &amp; Benito B</i>	75
CONTRIBUCIÓN A LOS ESTUDIOS DE RIESGO SÍSMICO A ESCALA MUNICIPAL EN CATALUÑA <i>Goula X, Valcárcel JA, Pujades LG, Barbat AH, Susagna T, Irizarry J, Lantada N, Hermosilla S, Font M &amp; Gasulla N</i>	76
CONTRIBUCIONES RECIENTES DE LA GEOLOGÍA AL ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ESPAÑA <i>García-Mayordomo J, Insua Arévalo JM, Jiménez-Díaz A, Álvarez-Gómez JA, Rodríguez-Peces MJ, Martín-Alfageme S, Pérez-López R, Martínez-Díaz JJ, Rodríguez-Pascua MA, Masana E, Perea H, Moreno X, González A, Lafuente P, Azañón JM, Martín-González F, Giner-Robles J, Vilanova S, Nemser ES, Cabral J &amp; Fonseca JFBD</i>	77

CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS HÍBRIDA PARA LA REPRESENTACIÓN DEL RIESGO <i>Velásquez CA, Cardona OD, Yamin LE, Mora MG &amp; Barbat AH</i>	78
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SEGURO DE RIESGO SÍSMICO PARA CUBRIR LOS EDIFICIOS PRIVADOS A TRAVÉS DE UNA ESTRATEGIA DE SUBSIDIO CRUZADO <i>Marulanda MC, Cardona OD, Mora MG &amp; Barbat AH</i>	79
ENFOQUE INTEGRAL PARA LA EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO (CAPRA): INICIATIVA INTERNACIONAL PARA LA EFECTIVIDAD DE LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE <i>Cardona OD, Ordaz MG, Reinoso E, Yamín LE &amp; Barbat AH</i>	80
EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ESPAÑA PARA APLICACIONES RELACIONADAS CON LA SEGURIDAD NUCLEAR. RESULTADOS PRELIMINARES <i>Benito B, Gaspar-Escribano JM, Rivas Medina A, Martínez-Díaz JJ, Rodríguez O &amp; Ramírez MS</i>	81
EVALUACION DEL RIESGO SÍSMICO EN NAVARRA HACIENDO USO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA DEFINICIÓN DEL PLAN DE EMERGENCIAS AUTONÓMICO <i>Rivas-Medina A, Benito B, Gaspar-Escribano JM &amp; Murphy P</i>	82
EVALUACION DEL RIESGO SISMICO: UN MODELO BASADO EN LA TEORIA DE CONJUNTOS DIFUSOS <i>Carreño ML, Cardona OD &amp; Barbat AH</i>	83
NUEVO ESTUDIO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN NAVARRA <i>Gaspar-Escribano JM, Benito B, Rivas-Medina A, Martínez-Díaz JJ</i>	84
PELIGROSIDAD SÍSMICA EN LA PENÍNSULA IBÉRICA <i>Crespo MJ, Martínez F &amp; Martí J</i>	85
SIRIUS, SEISMIC RISK INDICATOR IN URBAN SPACE <i>Mota de Sá F, Oliveira CS &amp; Ferreira MA</i>	86

SISMO-HAITÍ: PROYECTO DE COOPERACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD Y EL RIESGO SÍSMICO EN HAITÍ <i>Torres Y, Benito B, Belizaire D &amp; Grupo de trabajo Sismo-Haití</i>	87
VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO A ESCALA MUNICIPAL PARA LA BAHÍA DE CÁDIZ <i>Irizarry J, Murphy P &amp; Goula X</i>	88
<b>ESCENARIOS Y EVENTOS SÍSMICOS</b>	
CARACTERIZACIÓN DE ESCENARIOS DE RIESGO A NIVEL MUNICIPAL, APLICACIONES EN EL SUR DE ESPAÑA <i>Benito B, Navarro M, Murphy P, Gaspar-Escribano JM, Navarro D, Rivas Medina A, Torres Y, Quirós LE &amp; Dominguez S</i>	89
CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE EN EL EMPLAZAMIENTO DE LA PRESA DE ITOIZ <i>Rivas-Medina A, Santoyo MA, Luzón F, Benito B, Gaspar-Escribano JM &amp; García-Jerez A</i>	90
CARACTERIZACIÓN MULTIFRACTAL DE LA SISMICIDAD DEL ÁREA IBERO-MAGREBÍ: DIMENSIONES FRACTALES Y PARÁMETRO $b$ <i>López Casado C, Henares Romero J, Badal J, Peláez JA &amp; Sanz de Galdeano C</i>	91
DETERMINACIÓN DE LAS COTAS DE INUNDACIÓN DEL TSUNAMI DE 1755 EN CÁDIZ Y SU APLICACIÓN A UN ESTUDIO DETERMINISTA PARA UN ESCENARIO SIMILAR <i>Murphy P, Irizarry J &amp; Goula X</i>	92
ESTUDIO DE LA SERIES SÍSMICAS OCURRIDAS EN 2010 EN LA COSTA ALMERIENSE <i>Rivas-Medina A, Martínez-Díaz JJ, Benito B &amp; Gaspar-Escribano JM</i>	93
GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO EN UNA ZONA TRANSFRONTERIZA DEL PIRINEO <i>Monfort D, Lantada N, Goula X, Barbat A, Negulescu C, Pujades L, Susagna T, Valcarcel J &amp; Rodriguez J</i>	94



INFLUENCIA DEL SUELO Y DE LA VULNERABILIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES EN LA ESTIMACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS EN GRANADA (ESPAÑA) <i>Feriche M, Vidal F, Alguacil G &amp; Navarro M</i>	95	CREACIÓN DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE DATOS ACCELEROMÉTRICOS A ESCALA EUROPEA <i>Godey S, Frobert L, Guéguen P, Péquegnat C, Jacquot R, Roca A, Goula X, Susagna T, Oliveira CS, Papaioannou C, Clinton J &amp; Zulfikar C</i>	103
MAPA TRANSFRONTERIZO DEL MOVIMIENTO DEL SUELO ("SHAKE MAP") PARA TERREMOTOS EN LOS PIRINEOS <i>Nus E, Bertil D, Jara JA, Colas B, Auclair S, Susagna T, Calvet M &amp; Cabañas L</i>	96	EFFECTOS ARQUEOSISMOLÓGICOS DEL TERREMOTO DE MÁLAGA DE 09/10/1680 EN EL SUR DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA <i>Peláez JA, Moreno Rosa A, Sánchez Gómez M &amp; Mellado García I</i>	104
PARÁMETROS DE MOVIMIENTO INTENSO Y SU RELACIÓN CON LA INTENSIDAD MACROSÍSMICA EN EL ÁREA EURO-MEDITERRÁNEA <i>Olea B, Alguacil G, Vidal F &amp; Feriche M</i>	97	EFFECTOS Y MEDIDAS PREVENTIVAS EN EL TERREMOTO DE 1806 DE SANTA FÉ (GRANADA) <i>Vidal F, Espinar M, Morcillo JD, Navarro M &amp; Aranda C</i>	105
SELECCIÓN DE ECUACIONES PREDICTIVAS DE PGA, PGV Y PSA PARA LOS PIRINEOS <i>Nus E, Bertil D, Susagna T, Calvet M &amp; Cabañas L</i>	98	ESTIMACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN Y LA MAGNITUD DE TERREMOTOS PRE-INSTRUMENTALES A PARTIR DE ANÁLISIS RETROSPECTIVOS DE INESTABILIDADES DE LADERA: EL CASO DEL DESLIZAMIENTO DE GÜEVÉJAR (GRANADA) <i>Rodríguez-Peces MJ, García-Mayordomo J, Azañón JM, Insua Arévalo JM &amp; Jiménez Pintor J</i>	106
<b>SISMO HISTÓRICO</b>			
ANÁLISIS DE LA DEFORMACION SÍSMICA EN YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS Y EDIFICIOS HISTÓRICOS: APLICACIÓN AL ESTUDIO DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA <i>Giner-Robles JL, Silva PG, Pérez-López R, Rodríguez Pascua MA, Bardají T, Lario J &amp; Garduño-Monroy VH</i>	99	ESTUDIO PRELIMINAR DE LA ESTABILIDAD EN CONDICIONES DINÁMICAS DEL DESLIZAMIENTO DE BÀLITX (SIERRA DE TRAMUNTANA, MALLORCA) <i>Rodríguez-Peces MJ, Mateos RM, Azañón JM &amp; García-Mayordomo J</i>	107
APLICACIÓN DE UN ANÁLISIS PBEE MULTINIVEL A ZONA SÍSMICA EN ESPAÑA <i>Catalán Goñi A</i>	100	INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DINÁMICAS EN EL DISEÑO DE MEDIDAS DE ESTABILIZACIÓN DE LADERAS: EL CASO DEL DESLIZAMIENTO DE DIEZMA (GRANADA) <i>Rodríguez-Peces MJ, Azañón JM, García-Mayordomo J, Troncoso E &amp; Tsige M</i>	108
ARCHIVO ONLINE DE DATOS MACROSÍSMICOS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA <i>Roca A, Locati M, Susagna T, Fleeta J, Pujol J, Batlló J, Valero JF, Martínez-Solares JM, Cruz J, Alves P, Gómez Capera AA &amp; Stucchi M</i>	101	RED DE ACELERÓGRAFOS DE CATALUÑA <i>Susagna T, Jara JA, Carreño E, Alcalde JM &amp; Goula X</i>	109
COMIENZOS DE LA SISMOLOGÍA Y DE LA INGENIERÍA SISMORRESISTENTE EN ESPAÑA: LOS ESTUDIOS DE LOS TERREMOTOS ANDALUCES DEL SIGLO XIX <i>Sáez Pérez MP, Burgos Núñez A &amp; Olmo García JC</i>	102	UN CATÁLOGO DE TERREMOTOS (856-2008) UNIFICADO Y POISSONIANO DEL NORTE DE ARGELIA <i>Peláez JA, Hamdache M, Talbi A, Ureña MA, López Casado C &amp; García Hernández MT</i>	110



## IMPEDANCIAS DINÁMICAS DE CIMENTACIONES EMBEBIDAS EN UN SEMIESPACIO 3D VISCOELÁSTICO MULTICAPA MEDIANTE TÉCNICAS DE ELEMENTOS DE CONTORNO



**Autor(es): I. H. Faris<sup>1</sup>, A. E. Martínez-Castro<sup>2</sup> y R. Gallego<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Dpto. Mecánica de Estructuras e I. H., Universidad de Granada, inas@ugr.es

<sup>2</sup> Dpto. Mecánica de Estructuras e I. H., UGR, amcastro@ugr.es

<sup>3</sup> Dpto. Mecánica de Estructuras e I. H., UGR, gallego@ugr.es

### RESUMEN

El cálculo de impedancias dinámicas de las cimentaciones permite realizar de forma relativamente simple el análisis dinámico estructural teniendo en cuenta el efecto de interacción suelo-estructura, cuando este es relevante. Existen soluciones teóricas para algunos casos simples y manuales que tabulan otros casos con geometría relativamente más compleja. Sin embargo, un caso especialmente relevante y donde apenas existen soluciones en la literatura es el de una cimentación sobre un suelo estratificado, por la complejidad del problema de propagación de ondas asociado. Otro factor que no ha recibido atención en este campo es el del efecto de las singularidades tensionales asociadas al contacto entre el suelo y la cimentación, considerada infinitamente rígida. En esta comunicación se presenta una metodología basada en el método de los elementos de contorno (MEC) que, por una parte, utiliza una solución fundamental dinámica del semiespacio estratificado, lo que reduce al mínimo el esfuerzo de modelización del sistema cimentación-suelo, y por otra recoge el comportamiento tensional singular a través de elementos especiales de singularidad cualesquiera, lo que prácticamente elimina la dependencia de la malla en el cálculo de las impedancias. Se resuelven varios casos de importancia práctica y los resultados se presentan para varias configuraciones en función de parámetros adimensionales lo que permite que futuros investigadores o ingenieros incorporen de forma sencilla las impedancias dinámicas de estos cimientos en sus modelos.

*Palabras clave: Impedancias Dinámicas*

### SUMMARY

The calculation of dynamic impedance of foundations can achieve a relatively simple structural dynamic analysis, taking into account the effect of soil-structure interaction, when it is relevant. There are theoretical solutions for some simple cases and tabulated manuals for other cases with relatively more complex geometry. However, a particularly important case and where there are very few solutions in the literature is the foundation on layered soil, because of the complexity of the problem of wave propagation associated. Another factor that has not received attention in this field, is the effect of tensional singularities associated to the contact problem between the soil and the foundation, considered infinitely rigid.

In this paper we show a methodology based on the method of BEM, which on one hand, uses a dynamic fundamental solution of stratified half-space, that minimizes the effort modeling foundation-soil system, and on the other collects singular tension behavior through special elements of any singularity, which practically eliminates the mesh dependence in the calculation of impedances. In this paper, several cases of practical importance and the results are presented and solved for several configurations in terms of dimensionless parameters. This allows to researchers and engineers in the future, to incorporate in a simple manner the dynamic impedances of the foundation in their models.

*Keywords: Dynamic Impedance*

## INFLUENCIA DEL TIPO DE ONDA Y ÁNGULO DE INCIDENCIA EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE CIMENTACIONES PROFUNDAS Y ESTRUCTURAS PILOTADAS



**J.M. Zarzalejos, J.J. Aznárez, L.A. Padrón y O. Maeso**

Instituto Universitario SIANI, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Edif. Central del Parque Científico, Campus Universitario de Tafira, 35017

Las Palmas de Gran Canaria, Spain

jmarzarzalejos@siani.es, jjaznarez@siani.es, lpadron@siani.es, omaeso@siani.es

### RESUMEN

La respuesta dinámica de cimentaciones profundas y de estructuras pilotadas ha sido un tema extensamente tratado. Aún así, sigue siendo necesario mejorar el nivel de comprensión del problema. Cabe citar en este punto la influencia de la dirección de propagación de las ondas que definen la excitación. Esta dirección se supone habitualmente vertical y sólo algunos trabajos consideran su variación (ver, por ejemplo, [1,2]).

En este trabajo se estudia la influencia del tipo y ángulo de incidencia de las ondas sísmicas sobre la respuesta dinámica de cimentaciones profundas y de estructuras pilotadas. Para ello, se hace uso de un modelo numérico directo [3] que permite modelar de manera conjunta suelo, cimentación y superestructura, así como la incidencia de ondas de Rayleigh, P, SV y SH con un ángulo de incidencia completamente general.

Se presentan diversos resultados en términos de esfuerzos internos en pilotes y deflexiones laterales de la superestructura. Se muestra cómo el ángulo de incidencia de la onda tiene una influencia notable sobre la respuesta estructural. Además, y en general, el ángulo de incidencia vertical no corresponde con la respuesta estructural más desfavorable.

*Palabras clave: Dinámica de estructuras, interacción suelo-estructura, ángulo de incidencia*

### SUMMARY

The dynamic response of deep foundations and piled structures has been a topic deeply studied by many authors. However, improvements in the comprehension of some aspects of the problem are still needed. One of these aspects is the influence of the direction of propagation of the waves defining the excitation, which is usually taken as vertical. Only a small amount of works take into account the variation of this direction (see, e.g., [1,2]).

In this work, the influence on the dynamic response of deep foundations and piled structures of both the type of the incident seismic waves and their angle of incidence is studied. A direct numerical model [3] which models in a combined way soil, foundation and superstructure is used. Such a model is also able to take into account obliquely incident P, SV, SH and Rayleigh seismic waves.

Different results in terms of internal stresses on piles and lateral deflections of the superstructure are presented. It is shown that the angle of incidence has a strong influence on the structural response. It is also shown that, in general, the vertical incidence of the waves is not the most unfavourable situation.

*Keywords: Structure dynamics, soil-structure interaction, angle of incidence*

# INFLUENCIA DEL TIPO DE ONDA Y ÁNGULO DE INCIDENCIA EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE CIMENTACIONES PROFUNDAS Y ESTRUCTURAS PILOTADAS



**J.M. Zarzalejos, J.J. Aznárez, L.A. Padrón y O. Maeso**

Instituto Universitario SIANI, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
Edif. Central del Parque Científico, Campus Universitario de Tafira, 35017  
Las Palmas de Gran Canaria, Spain

[jmzarzalejos@siani.es](mailto:jmzarzalejos@siani.es), [jjaznarez@siani.es](mailto:jjaznarez@siani.es), [lpadron@siani.es](mailto:lpadron@siani.es), [omaeso@siani.es](mailto:omaeso@siani.es)

## RESUMEN

La respuesta dinámica de cimentaciones profundas y de estructuras pilotadas ha sido un tema extensamente tratado. Aún así, sigue siendo necesario mejorar el nivel de comprensión del problema. Cabe citar en este punto la influencia de la dirección de propagación de las ondas que definen la excitación. Esta dirección se supone habitualmente vertical y sólo algunos trabajos consideran su variación (ver, por ejemplo, [1,2]).

En este trabajo se estudia la influencia del tipo y ángulo de incidencia de las ondas sísmicas sobre la respuesta dinámica de cimentaciones profundas y de estructuras pilotadas. Para ello, se hace uso de un modelo numérico directo [3] que permite modelar de manera conjunta suelo, cimentación y superestructura, así como la incidencia de ondas de Rayleigh, P, SV y SH con un ángulo de incidencia completamente general.

Se presentan diversos resultados en términos de esfuerzos internos en pilotes y deflexiones laterales de la superestructura. Se muestra cómo el ángulo de incidencia de la onda tiene una influencia notable sobre la respuesta estructural. Además, y en general, el ángulo de incidencia vertical no corresponde con la respuesta estructural más desfavorable.

*Palabras clave: Dinámica de estructuras, interacción suelo-estructura, ángulo de incidencia*

## SUMMARY

The dynamic response of deep foundations and piled structures has been a topic deeply studied by many authors. However, improvements in the comprehension of some aspects of the problem are still needed. One of these aspects is the influence of the direction of propagation of the waves defining the excitation, which is usually taken as vertical. Only a small amount of works take into account the variation of this direction (see, e.g., [1,2]).

In this work, the influence on the dynamic response of deep foundations and piled structures of both the type of the incident seismic waves and their angle of incidence is studied. A direct numerical model [3] which models in a combined way soil, foundation and superstructure is used. Such a model is also able to take into account obliquely incident P, SV, SH and Rayleigh seismic waves.

Different results in terms of internal stresses on piles and lateral deflections of the superstructure are presented. It is shown that the angle of incidence has a strong influence on the structural response. It is also shown that, in general, the vertical incidence of the waves is not the most unfavourable situation.

*Keywords: Structure dynamics, soil-structure interaction, angle of incidence*

## Introducción

Este estudio se integra en una línea de trabajo que tiene por objetivo el desarrollo de modelos numéricos que permitan determinar la respuesta dinámica de estructuras de diferente tipología. En este sentido, se ha desarrollado un modelo numérico directo que permite determinar la respuesta dinámica de cimentaciones profundas y de estructuras pilotadas. Sin embargo, resulta necesario mejorar las capacidades de dicho modelo para abordar diversos aspectos del problema, como la influencia de la dirección de propagación de las ondas que definen la excitación.

El método utilizado para el tratamiento numérico de las ecuaciones del problema en el suelo es el Método de los Elementos de Contorno (MEC). Este método permite el tratamiento sencillo de regiones de geometría infinita o semi-infinita en problemas dinámicos, ya que verifica de forma implícita las condiciones de radiación. En este trabajo, todos los dominios que forman parte del terreno son discretizados haciendo uso del MEC como regiones continuas tridimensionales. La interacción dinámica entre dichas regiones se formula de manera rigurosa (equilibrio y compatibilidad), dando lugar a un sistema de ecuaciones donde las incógnitas son desplazamientos o tensiones en el contorno de las regiones. La sollicitación consiste en un tren de ondas sísmicas planas de diferente tipo (P, SH, SV y ondas de Rayleigh) y ángulo de incidencia que, partiendo desde el infinito, incide en el lugar de emplazamiento de la estructura.

## Objetivos

Este trabajo pretende estudiar, desde el punto de vista de la respuesta del encepado y de la superestructura, la influencia de la tipología de la onda incidente y su ángulo de incidencia, así como la influencia de parámetros como la configuración de la cimentación o la esbeltez de la estructura. Se tienen en cuenta ondas volumétricas de tipo P, SH y SV que se propagan a través de un medio semi-infinito y homogéneo con un ángulo de incidencia completamente genérico. Se busca, también, analizar los esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores inducidos por la acción sísmica en los pilotes, así como la sensibilidad de dichos esfuerzos ante variables como el tipo de onda y su ángulo de incidencia en relación con parámetros como la esbeltez de la estructura.

## Desarrollo del trabajo

Para el tratamiento del problema se hace uso de un modelo numérico directo, empleando el método de los elementos de contorno (MEC) en combinación con el método de los elementos finitos (MEF). El estudio se realiza en el dominio de la frecuencia. Una descripción detalla de ambos métodos, de sus aspectos numéricos, así como de su aplicación e implementación en problemas dinámicos puede hallarse en [4,5].

Una vez planteado el problema en forma integral y habiendo procedido a realizar el proceso de discretización, se realiza el acoplamiento entre el sistema de ecuaciones que surge de aplicar el método de los elementos de contorno al terreno y el que aparece al plantear las ecuaciones de movimiento de vigas, pilares y pilotes, discretizados éstos haciendo uso del método de los elementos finitos [3].

La sollicitación sísmica se introduce en la formulación teniendo en cuenta que los desplazamientos y tensiones que aparecen pueden obtenerse como superposición de los provocados por el campo incidente (ondas planas P, SH o SV en el semiespacio sin estructura con ángulo de incidencia general sobre el emplazamiento) y el campo difractado por la estructura. La aplicación de las ecuaciones del MEC sobre el campo difractado, tras algunas operaciones, permite escribir la expresión matricial que sigue para cada dominio  $\Omega$ , [3,8]:



$$H^{ss} u^s - G^{ss} p^s - \sum_{j=1}^{n_p} G^{sp_j} q^{s_j} + \sum_{j=1}^{n_p} \delta_j \Psi^{sj} F_{p_j} = H^{ss} u_I^s - G^{ss} p_I^s \quad (1)$$

En la expresión anterior,  $H^{ss}$ ,  $G^{ss}$  y  $G^{sp_j}$  son los coeficientes de influencia,  $u^s$  y  $p^s$  son los desplazamientos y tensiones del campo total,  $n_p$  es el número de pilotes del dominio,  $q^{s_j}$  son las tensiones que el suelo provoca en el pilote,  $\delta_j$  toma valor unitario si la  $j$ -ésima línea de carga contiene la punta de un pilote flotante y cero en caso contrario,  $\Psi^{sj}$  es un vector de tres componentes que representa la contribución de la fuerza axial  $F_{p_j}$  en la punta de la línea de carga  $j$ -ésima y  $u_I^s$  y  $p_I^s$  son los desplazamientos y tensiones del campo incidente en el semiespacio (conocido). En relación con estas variables, lo habitual en este tipo de estudios es suponer incidencia vertical. En este caso, las expresiones analíticas y su implementación en el código resultan sencillas (ver [3,6]). Sin embargo, es objetivo de este trabajo desarrollar una formulación que permita tener en cuenta la incidencia genérica de las ondas sísmicas que llegan al emplazamiento de la estructura que se desea estudiar. Para este fin, considérese un sistema de ejes de modo que el plano  $x_1x_2$  conforme la superficie libre del semiespacio, siendo los planos  $x_1x_3$  y  $x_2x_3$  dos planos mutuamente ortogonales y perpendiculares, también, a esa superficie libre. Así pues, el vector que define la dirección de propagación de una onda incidente con un ángulo genérico respecto a la superficie libre del semiespacio puede considerarse que forma un ángulo  $\theta_0$  en el plano  $x_2x_3$  (midiéndose respecto al eje  $x_2$  en sentido trigonométrico) y con un ángulo  $\varphi_0$  respecto al plano  $x_1x_2$  (midiéndose, en esta ocasión, respecto al eje  $x_2$  en sentido antitrigonométrico). Así, el problema genérico se puede estudiar como uno en el plano  $x_2x_3$ , siendo sencillo rotar las ecuaciones posteriormente para analizar el problema genérico.

Habida cuenta de lo comentado en el párrafo anterior, se pueden definir los vectores  $s$  y  $d$  que contengan, respectivamente, los cosenos directores de las direcciones de propagación y de los desplazamientos de las partículas que cada una de las ondas que intervienen en el problema provocan, sabiendo que ambas direcciones son ortogonales en ondas S y coincidentes en ondas P. Además, tal y como se introdujo con anterioridad, la llegada de una onda a la superficie libre del semiespacio provoca un fenómeno de reflexión que produce la propagación de dos nuevas ondas cuando incide una onda SV o P o de una única cuando la que incide es una SH (ver figura 1).

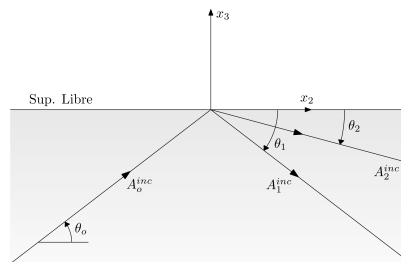


Figura 1. Representación de las ondas incidentes y reflejadas

De este modo, la componente en dirección  $i$  ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ) de los desplazamientos provocados por una onda incidente con un ángulo  $\theta_0$  en el plano  $x_2x_3$  puede obtenerse como:

$$u_i = \sum_{j=1}^n d_i^j A_j e^{-ik_j(s^{(j)} \cdot r)}$$

En esta ocasión,  $u_i$  es la componente en dirección  $i$  del desplazamiento,  $n$  es el número total de ondas (incidente y reflejada(s)),  $d_i^j$  es la componente en la dirección  $i$  del vector que contiene los cosenos directores de los desplazamientos que la onda  $j$  provoca en las partículas del medio,  $A_j$  y  $k_j$  son, respectivamente, la amplitud de la onda  $j$  y su número de onda (definido como el cociente entre la frecuencia  $\omega$  de excitación y la velocidad de propagación de la misma en el medio), mientras que  $s^{(j) \cdot r}$  representa el producto escalar del vector de la dirección de propagación de la onda  $j$  por el vector de posición del punto donde se pretenden determinar los desplazamientos. Además, la  $i$  que aparece en el exponente de la función representa a la unidad imaginaria.

Conocidos los desplazamientos de un determinado punto haciendo uso de la ecuación anterior, puede determinarse el tensor de deformaciones del mismo empleando las ecuaciones de compatibilidad y, a partir de él, el tensor de tensiones usando la ley de comportamiento del material.

Como consecuencia de la aplicación de las condiciones de contorno, es sencillo comprobar que, para cualquier onda incidente, el ángulo  $\theta_0$  en el plano  $x_2x_3$  es igual al ángulo  $\theta_1$  de la onda del mismo tipo reflejada. Asimismo, puede demostrarse que la incidencia de una onda SV con un ángulo inferior a cierto ángulo (denominado crítico), el cual es inversamente proporcional al valor de un parámetro  $\kappa$  (que representa el cociente entre la velocidad de propagación de las ondas S y la de las ondas P en el medio), provoca la reflexión de una onda de tipo SV y de una onda adicional que, si bien en el campo complejo es una onda de tipo P, en el campo real es una onda de superficie con movimientos en dos direcciones ortogonales desfasadas entre sí  $90^\circ$ . Este hecho, como se verificará posteriormente, influirá muy notablemente en el comportamiento dinámico de las estructuras analizadas.

Planteada la formulación en el plano  $x_2x_3$ , rotar las ecuaciones en torno al eje  $x_3$  se resume en multiplicar los vectores  $s$  y  $d$  por una matriz de rotación.

Con el fin de validar tanto la formulación presentada como la correspondiente implementación computacional, se han comparado resultados para distintos problemas presentados en [2,7,8], obteniéndose, en todos los casos, resultados muy satisfactorios.

Se trata en adelante el problema representado de modo simplificado en la figura 2. En él, se pretende estudiar el comportamiento de un edificio cimentado sobre pilotes, caracterizada la superestructura con un único forjado rígido soportado por pilares flexibles pero inextensibles, pudiendo representar, por tanto, un sistema que se modele directamente como un sistema de un grado de libertad (edificios de una única planta, por ejemplo) o a sistemas equivalentes que aproximen el comportamiento de una estructura multimodal según un modo de vibración específico.

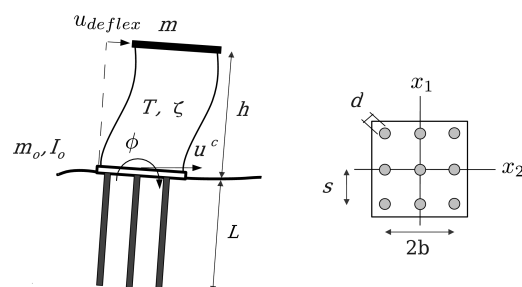


Figura 2. Definición del problema

Sin embargo, para comprender en su totalidad los resultados que se presentan, es preciso analizar, en primer lugar, la variación del módulo del desplazamiento horizontal de campo libre con el ángulo de incidencia en el plano  $x_2x_3$ . La figura 3 representa en abscisas el ángulo de incidencia, mostrando en ordenadas el cociente entre el módulo del desplazamiento horizontal de campo libre producido por la onda correspondiente con el ángulo analizado y el módulo de la amplitud de la onda incidente. En ella se demuestra que, para ondas incidentes de tipo SV o P, las variaciones existentes son muy abruptas para valores del ángulo de incidencia relativamente cercanos. En concreto, estas variaciones son particularmente bruscas en las inmediaciones del ángulo crítico cuando la onda incidente es una de tipo SV, lo que caracterizará, en gran medida, los resultados que se presenten con posterioridad. Nótese que la variación del desplazamiento horizontal de campo libre cuando la onda incidente es de tipo SH es nula, tomando, para cualquier ángulo de incidencia, valor unitario.

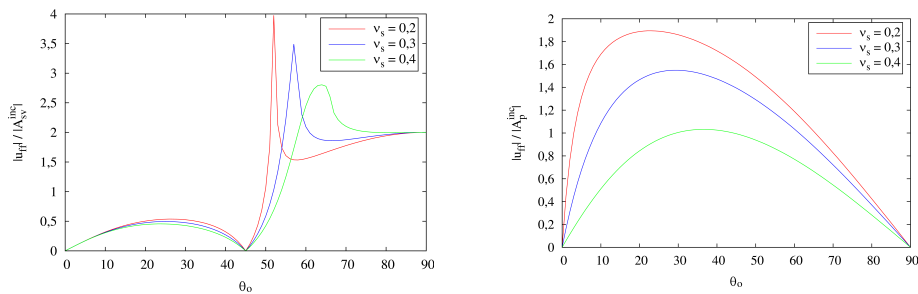


Figura 3. Variación del módulo del desplazamiento horizontal de campo libre con el ángulo de incidencia. Onda SV incidente (izquierda) y onda P incidente (derecha)

El primer conjunto de resultados, que puede observarse en la figura 4, corresponde a funciones de transferencia en desplazamientos medidos en el encepado rígido. En todos los casos, se muestra en abscisas la frecuencia adimensional (entendida como el cociente entre el producto de la frecuencia de excitación por el diámetro del pilote dividido entre la velocidad de propagación de las ondas S en el medio) y en ordenadas el cociente entre el módulo del desplazamiento horizontal y el correspondiente módulo del desplazamiento horizontal de campo libre. Se presentan resultados para dos relaciones de aspecto (cociente entre la altura del edificio y el semiancho del encepado) diferentes (2 - parte superior de la figura - y 4 - parte inferior de la misma -). Se comprueba la gran variabilidad de los resultados con el ángulo de incidencia, efecto particularmente notable cuando la onda incidente es de tipo SV.

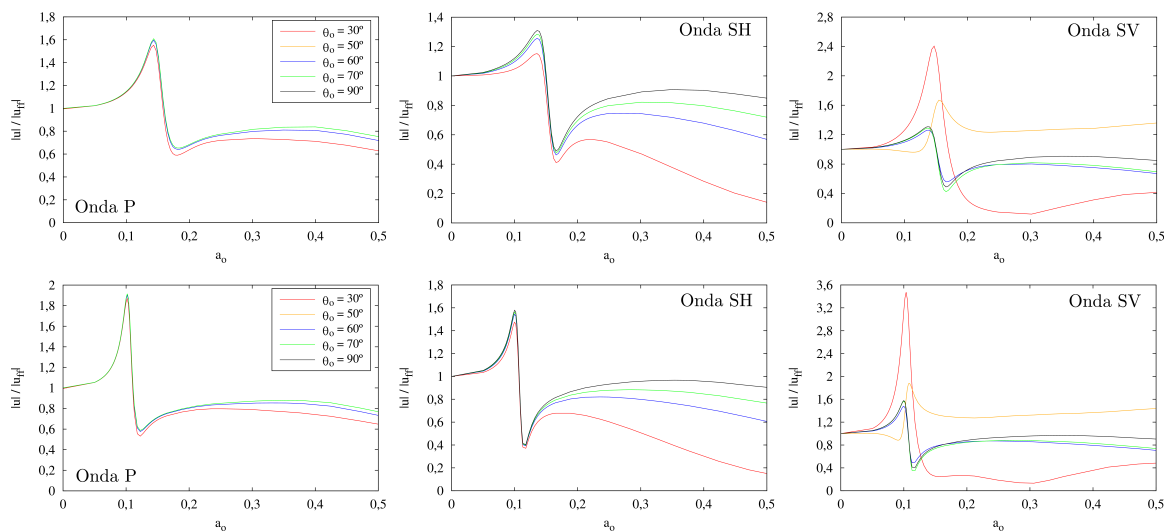


Figura 4. Funciones de transferencia en el encepado. Relaciones  $h/b = 2$  (arriba) y  $h/b = 4$  (abajo)



Los resultados de la figura 5 representan la deflexión lateral del edificio (deformación lateral del edificio, eliminando de ésta los movimientos como sólido rígido). Se muestra en abscisas la frecuencia adimensional y en ordenadas el cociente entre la deflexión lateral del edificio y el correspondiente módulo del desplazamiento horizontal de campo libre. Se presentan resultados para las dos relaciones de aspecto mostradas con anterioridad, es decir, 2 (parte superior de la figura) y 4 (parte inferior de la misma), poniéndose de manifiesto la gran variabilidad que se presenta cuando la onda que incide es de tipo SV.

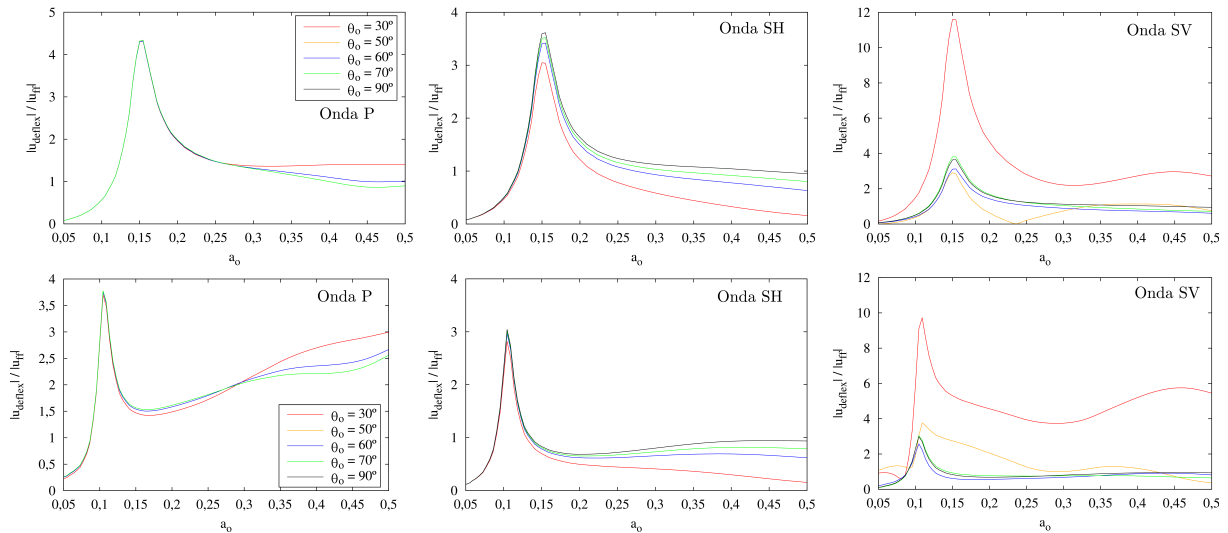


Figura 5. Deflexión lateral del edificio. Relaciones de aspecto  $h/b = 2$  (arriba) y  $h/b = 4$  (abajo)

Otro aspecto analizado es la evolución en frecuencia de los esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores que induce el sismo en los pilotes de la cimentación. De esta manera, se reproducen en la figura 6 algunos resultados obtenidos en la cabeza de cuatro de los pilotes del grupo de  $3 \times 3$  analizado para las mismas relaciones de aspecto que en el caso anterior. Se estudian esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores para pilotes sometidos a ondas SV con diferentes ángulos de incidencia. Los resultados se presentan con la frecuencia adimensional en abscisas y el módulo del esfuerzo correspondiente adimensionalizado haciendo uso de las propiedades del pilote y del módulo del desplazamiento horizontal de campo libre en ordenadas.

Las propiedades mecánicas y geométricas de cimentación y suelo empleados en los análisis cuyos resultados se presentan se definen mediante el coeficiente de amortiguamiento histerético del terreno (0,05), la relación entre el módulo de elasticidad del pilote y el del suelo (100), el cociente entre las densidades del suelo y el pilote (0,7), la esbeltez del pilote (cociente entre su longitud y su diámetro, de valor 15), el coeficiente de Poisson del suelo (0,4, que implica que el ángulo crítico es de  $65,9^\circ$ ) y del pilote (0,25) y la relación entre la separación entre ejes de los pilotes y su diámetro (5). En lo que se refiere a la definición del comportamiento dinámico de la superestructura, los parámetros son las relaciones de aspecto ( $h/b$ , de valor 2 y 4), el cociente entre las rigideces de la estructura y del suelo (expresable como  $h/(T \cdot c_s)$ , con valor 0,3 y siendo  $T$  el período fundamental en base rígida de la superestructura) y el coeficiente de amortiguamiento histerético de la estructura (0,05). Como parámetros adicionales de interés se tiene que el momento de inercia del encepado se toma como un 5% del factor  $m \cdot h^2$ , siendo  $m$  la masa de la superestructura, un valor para la relación entre las masas de la superestructura y la masa vibrante aproximada del suelo ( $m/(4 \rho b^2 h)$ , siendo  $b$  el semiancho del encepado) de 0,2 y una relación entre la masa de la cimentación y de la estructura de 0,25. Los valores de los tres últimos parámetros se consideran representativos de tipologías estructurales habituales.

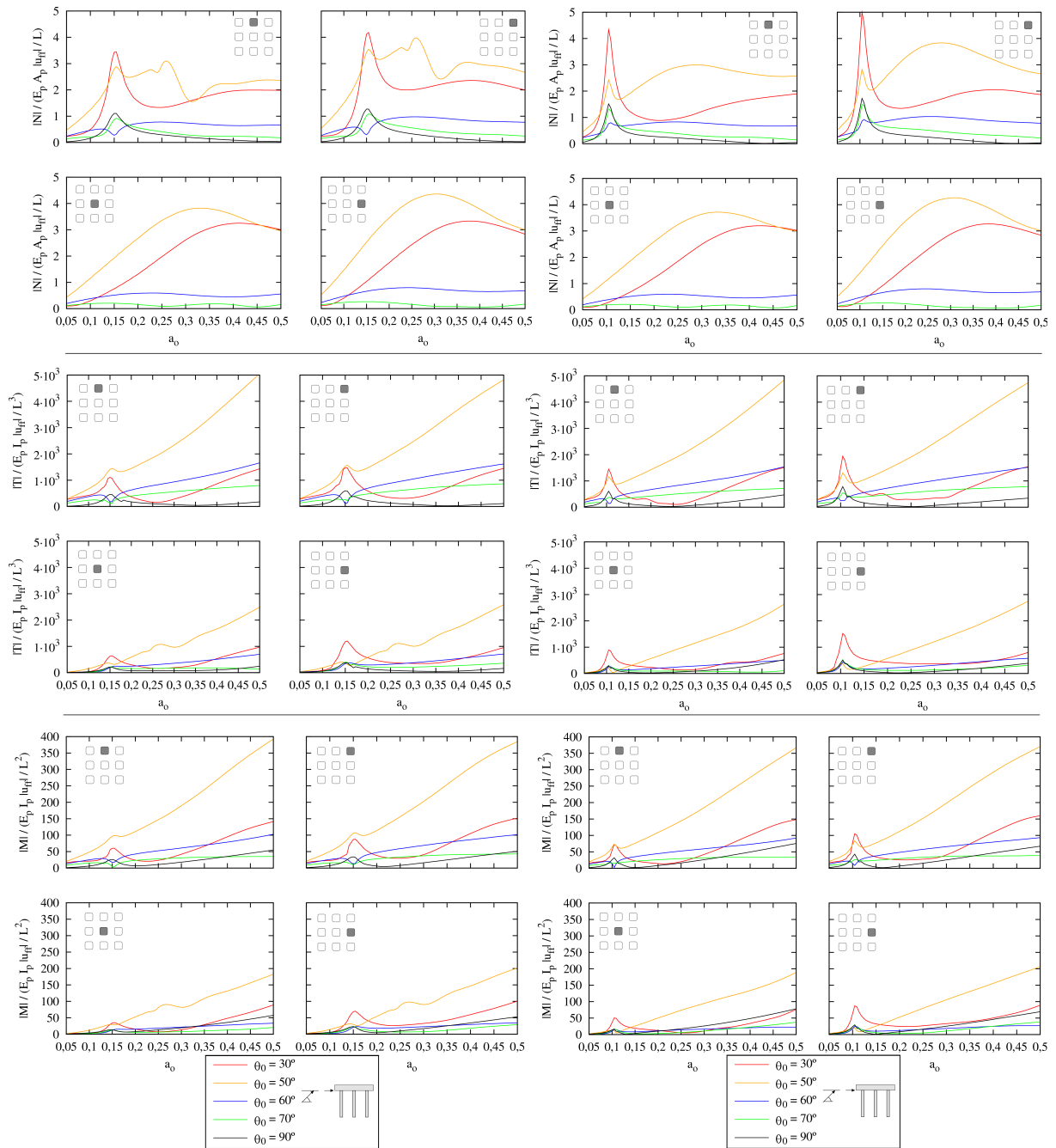


Figura 6. Esfuerzos en pilotes. Onda SV incidente. Esfuerzo axial (arriba), esfuerzo cortante (centro) y momento flector (abajo). Relaciones de aspecto  $h/b = 2$  (izquierda) y  $h/b = 4$  (derecha). Representación de esfuerzos en los pilotes central, central superior, central derecho y derecho superior del grupo de pilotes (indicado por el pilote sombreado en el diagrama mostrado en cada gráfico)

## Conclusiones

A lo largo del presente trabajo se ha estudiado la influencia del tipo de onda y ángulo de incidencia en la respuesta de encepados de pilotes y superestructuras. Para ello, se han analizado las funciones de transferencia en desplazamientos en el encepado rígido de un edificio modelado como un sistema de un grado de libertad cimentado en un grupo de 3x3 pilotes, así como la deflexión lateral que el edificio experimenta al ser sometido a ondas P, SH y SV con incidencia genérica y los esfuerzos que se inducen en los pilotes. Se analizan dos relaciones entre la altura de la superestructura y el semiancho del encepado diferentes, observándose, en todos los casos, que el ángulo de incidencia tiene una importancia determinante en el comportamiento de cimentaciones pilotadas, siendo este efecto particularmente notable en ondas incidentes de tipo SV. En este sentido, existe una gran diferencia entre los desplazamientos y esfuerzos producidos por ondas incidentes de igual magnitud pero con ángulos de incidencia cercanos o inferiores al crítico.

Como conclusión final, cabe destacar que se puede verificar que la hipótesis mayoritariamente empleada de incidencia vertical no tiene por qué ser la produzca situaciones más desfavorables tanto en cimentaciones como en superestructuras, de modo que el estado del arte actual debe evolucionar hacia modelos que consideren tanto el tipo de onda como el ángulo de incidencia de la misma como parámetros de importancia de cara a la cuantificación de la respuesta estructural real.

## Referencias:

- [1] S.M. Mamoon, S. Ahmad, *Seismic response of piles to obliquely incident SH, SV and P waves*. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 116(2), 186-204, 1990.
- [2] A.M. Kaynia, M. Novak, *Response of pile foundations to Rayleigh waves and obliquely incident body waves*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, 303-318, 1992.
- [3] L.A. Padrón, J.J. Aznárez, O. Maeso, *3-D boundary element - finite element method for the dynamic analysis of piled buildings*. Engineering Analysis with Boundary Elements, 35(3), 465-477, 2011.
- [4] J. Domínguez, *Boundary elements in dynamics*. Computational Mechanics Publications & Elsevier Applied Science, Southampton, NY, 1993.
- [5] O. C. Zienkiewicz. *El método de los elementos finitos*. CIMNE. 2004.
- [6] J. D. Achenbach, *Wave propagation in elastic solids*. North-Holland, Amsterdam, 1973.
- [7] O. Maeso, J. J. Aznárez y F. García. *Dynamic impedances of piles and groups of piles in saturated soils*. Comput Struct, 83, 769-782, 2005.
- [8] L. A. Padrón. *Numerical model for the dynamic analysis of pile foundations*. Tesis doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 2009.