



Fundada en 1985 por  
Eugenio Oñate y Juan Carlos Heinrich

Publicación de la Universitat Politècnica de Catalunya

© CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA [2017].

Tanto esta revista como las contribuciones individuales que contiene están bajo la protección de las leyes de copyright, y los siguientes términos y condiciones se aplican a su uso, además de los términos de cualquier licencia Creative Commons que figure en cada artículo concreto:

**Fotocopiar.** Se pueden fotocopiar artículos individuales para uso personal según lo permitido por las leyes de copyright. No se requiere permiso para fotocopiar los artículos publicados bajo la licencia CC BY ni para fotocopiar con fines no comerciales en el caso de otras licencias de uso aplicadas por el editor. Se requiere permiso de la editorial y el pago de una tasa para todas las demás fotocopias (en este caso, diríjase a CEDRO [www.cedro.org]).

**Productos derivados.** Los usuarios pueden reproducir tablas de contenido o preparar listas de artículos, incluyendo resúmenes de circulación interna dentro de sus instituciones o empresas. A parte de los artículos publicados bajo la licencia CC BY, se requiere autorización de la editorial para la reventa. En el caso de artículos publicados bajo una licencia CC BY-NC-ND, se requiere autorización de la editorial para todos los demás trabajos derivados, incluyendo compilaciones y traducciones.

**Almacenamiento o uso.** Excepto lo indicado anteriormente, o según lo establecido en la licencia de uso correspondiente, ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada en sistemas de recuperación o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, grabación o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito del editor.

**Derechos de autor.** El autor o autores pueden tener derechos adicionales en sus artículos según lo establecido en su acuerdo con el editor (más información en <http://www.elsevier.com/authorsrights>).

**Nota.** Ni Elsevier España, S.L.U. ni el CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA tendrán responsabilidad alguna por las lesiones y/o daños sobre personas o bienes que sean el resultado de presuntas declaraciones difamatorias, violaciones de derechos de propiedad intelectual, industrial o privacidad, responsabilidad por producto o negligencia. Tampoco asumirán responsabilidad alguna por la aplicación o utilización de los métodos, productos, instrucciones o ideas descritos en el presente material.

Aunque el material publicitario se ajusta a los estándares éticos, su inclusión en esta publicación no constituye garantía ni refrendo alguno de la calidad o valor de dicho producto, ni de las afirmaciones realizadas por su fabricante.

**Coordinadora de edición:**  
M. Jesús Samper, [www.cimne.com/rimni](http://www.cimne.com/rimni)

ISSN 0213-1315

Publicación trimestral (4 números al año)  
[www.elsevier.es/rimni](http://www.elsevier.es/rimni)



Avda. Josep Tarradellas,  
20-30, 1º  
08029 Barcelona (España)  
Zurbano, 76 4º izda.  
28010 Madrid (España)

ELSEVIER

Miembro de la Asociación de Prensa Profesional.

**Protección de datos:**  
Elsevier España, S.L.U. declara cumplir lo dispuesto por la Ley orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal.

**Tarifa de suscripción anual a la revista impresa**

(IVA no incluido)  
Personas físicas: 100 euros  
Instituciones: 200 euros

**Suscripciones y consultas:**  
RIMNI

Gran Capitán, s/n,  
Edificio C1 Campus Norte UPC  
08034 Barcelona (España)  
Teléfono: 934 016 037

Correo electrónico:  
[rimni@cimne.upc.edu](mailto:rimni@cimne.upc.edu)  
[www.cimne.com/rimni](http://www.cimne.com/rimni)

Impresa en España

Esta publicación se imprime en papel no ácido.

This publication is printed in acid-free paper

Depósito legal: B-8.118-1985

## EDITORES

### EUGENIO OÑATE

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), Univ. Politècnica de Catalunya, Barcelona, ESPAÑA

### SERGIO R. IDELSOHN

- Univ. Nacional del Litoral, Santa Fe, ARGENTINA
- ICREA en el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), Barcelona, ESPAÑA

## EDITORES ASOCIADOS

### ALEX H. BARBAT

E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. de Cataluña, Barcelona, ESPAÑA

### MANUEL DOBLARÉ

Centro Politécnico Superior  
Univ. de Zaragoza, Zaragoza, ESPAÑA

### CARLOS A. MOTA SOARES

Instituto Superior Técnico  
Univ. Técnica de Lisboa, Lisboa, PORTUGAL

### ALVARO COUTINHO

Programa de Engenharia Civil, COPPE/  
Univ. Federal do Rio de Janeiro, BRASIL

### JOSÉ MARÍA GOICOLEA

E.T.S. Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politécnica de Madrid, Madrid, ESPAÑA

### JAVIER OLIVER

E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. de Cataluña, Barcelona, ESPAÑA

### FRANCISCO CHINESTA

Dept. of Computational Mechanics  
Ecole Centrale de Nantes, Nantes, FRANCE

### ANTONIO HUERTA

E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. de Cataluña, Barcelona, ESPAÑA

### BENJAMÍN SUÁREZ

E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. de Cataluña, Barcelona, ESPAÑA

## EDITORES DE HONOR

### EDUARDO DE ARANTES E OLIVEIRA

Instituto Superior Técnico  
Univ. Técnica de Lisboa, Lisboa, PORTUGAL

### MANUEL CASTELEIRO

E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politécnica de A Coruña, ESPAÑA

### JUAN CARLOS HEINRICH

Dept. of Mechanical Engineering  
Univ. of New Mexico, Albuquerque, USA

Anteriores Editores de Honor:

### O.C. ZIENKIEWICZ†

Univ. of Swansea, UK

### J.H. ARGYRIS†

Univ. of Stuttgart, GERMANY

## COMITÉ EDITORIAL

### CARLOS AGELET DE SARACIBAR

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### RAMÓN CODINA

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### PAULO LYRA

Univ. Federal de Pernambuco  
Recife, BRASIL

### ENRIQUE ALARCÓN

E.T.S. de Ingenieros Industriales  
Univ. Politécnica Madrid, ESPAÑA

### RAFAEL CORREA

Fac. Ciencias Físicas y Matemáticas  
Univ. de Chile, Santiago, CHILE

### GUILLERMO MARSHALL

Fac. Ciencias Exactas y Naturales  
Univ. de Buenos Aires, ARGENTINA

### EDUARDO ALONSO

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### MARCELA CRUCHAGA

Dpto. de Ing. Mecánica, Univ. de  
Santiago de Chile, CHILE

### FRANCISCO MICHAVILA

E.T.S. de Ing. de Minas, Univ.  
Politéc. Madrid, ESPAÑA

### JOSÉ ALVES

COPPE, Univ. Federal de Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, BRASIL

### J.M.A. CÉSAR DE SÁ

Inst. Eng. Mecânica, Faculdade de  
Eng. Univ. do Porto, PORTUGAL

### JUAN MIQUEL CANET

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### PILAR ARIZA

E.T.S. de Ing. Industriales  
Univ. de Sevilla, ESPAÑA

### ELÍAS CUETO

Centro Politécnico Superior  
Univ. de Zaragoza, ESPAÑA

### FERMÍN NAVARRINA

E.T.S. de Ing. de Caminos, Univ.  
de la Coruña, ESPAÑA

### FRANCISCO ARMERO

Dept. of Civil and Environmental Eng.  
Univ. of California at Berkeley, USA

### MICHELE CHIUMENTI

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### SERGIO OLLER

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### MARINO ARROYO

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### PEDRO DÍEZ

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### FEDERICO PARÍS

E.T.S. Ingenieros Industriales  
Univ. de Sevilla, ESPAÑA

### MIGUEL ÁNGEL ASTIZ

E.T.S. Ing. de Caminos  
Univ. Politéc. de Madrid, ESPAÑA

### JOSÉ DOMÍNGUEZ ABASCAL

E.T.S. Ingenieros Industriales  
Univ. de Sevilla, ESPAÑA

### MANUEL PASTOR

E.T.S. Ing. Caminos, Univ. Politéc.  
de Madrid, ESPAÑA

### GUSTAVO AYALA

Inst. Ing., Univ. Nac. Autónoma de  
México, MÉXICO

### EDUARDO N. DVORKIN

Simulación y Tecnología  
Buenos Aires, ARGENTINA

### JAUME PERAIRE

Dept. Aeronautics & Astronautics  
Mass. Inst. Tech., Cambridge, USA

### ESTEVAM B. DE LAS CASAS

Dept. Eng. Estruturas, Univ. Federal  
Minas Gerais, Belo Horizonte, BRASIL

### GUILLERMO ETSE

Laboratorio de Estructuras  
Univ. Nac. de Tucumán, ARGENTINA

### FRANCO PERAZZO

Dpto. Mecánica, Univ. Téc. Federico  
Santa María, Valparaíso, CHILE

### ALFREDO BERMÚDEZ DE CASTRO

Dpto. Matemática Aplicada  
Univ. Santiago Compostela, ESPAÑA

### RUI M. FARIA

Faculdade de Engenharia da Univ.  
de Porto, PORTUGAL

### JOSÉ CARLOS PEREIRA

Instituto Superior Técnico  
Universidade Técnica de Lisboa,  
PORTUGAL

### JAVIER BONET

School of Engineering  
Swansea University, UK

### RAUL A. FEIJÓO

Lab. Nacional de Computação  
Científica, Rio de Janeiro, BRASIL

### JOSÉ LUIS PÉREZ APARICIO

E.T.S. de Ingenieros del Diseño  
Universidad Politécnica de Valencia  
ESPAÑA

### SALVADOR BOTELLO

Facultad de Ingeniería Civil  
Univ. de Guanajuato, MÉXICO

### CARLOS A. FELIPPA

Dept. of Aerospace Eng. Sciences  
Univ. of Colorado at Boulder, USA

### PAULO PIMENTA

Universidade Politécnica de São  
Paulo, BRASIL

### GABRIEL BUGEDA

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### RAFAEL GALLEGO

E.T.S. de Ing. de Caminos, Univ.  
Politéc. de Granada, ESPAÑA

### ANTONIO RODRÍGUEZ

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### GUSTAVO BUSCAGLIA

Inst. Ciências Mat. e Computação  
Univ. de São Paulo, BRASIL

### JAVIER GARCÍA DE JALÓN

E.T.S. de Ingenieros Industriales  
Univ. Politéc. de Madrid, ESPAÑA

### IGNACIO ROMERO

E.T.S. Ingenieros Industriales  
Universidad Politécnica de Madrid,  
ESPAÑA

### BEGOÑA CALVO

Centro Politécnico Superior  
Univ. de Zaragoza, ESPAÑA

### ANTONIO GENS

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### VITORIANO RUAS

Laboratoire de Modélisation en Mécanique,  
Université Pierre et Marie Curie  
Paris, FRANCIA

### ALBERTO CARDONA

CIMEC - INTEC, Univ. Nacional del  
Litoral, Santa Fe, ARGENTINA

### LUIS A. GODOY

Dpto. de Estructuras, Univ. Nacional  
de Córdoba, ARGENTINA

### ADELIA SEQUEIRA

Instituto Superior Técnico  
Universidade Técnica de Lisboa,  
PORTUGAL

### JESÚS CARRERA

Consejo Sup. Investigaciones  
Científicas, IDAEA, Barcelona, ESPAÑA

### MIGUEL A. GUTIÉRREZ

Mech., Maritime and Materials Eng.  
TU Delft, NETHERLANDS

### MARIO STORTI

CIMEC - INTEC  
Universidad Nacional del Litoral  
Santa Fe, ARGENTINA

### DIEGO CELENTANO

Escuela Ingeniería, Pontificia Univ.  
Católica de Chile, Santiago, CHILE

### ISMAEL HERRERA

Inst. Geofísica, Univ. Nac. Autónoma  
de México, MÉXICO

### JOÃO TEIXEIRA DE FREITAS

Instituto Superior Técnico  
Universidade Técnica de Lisboa  
PORTUGAL

### MIGUEL CERROLAZA

Facultad Ingeniería, Univ. Central  
de Venezuela, Caracas, VENEZUELA

### JORGE HURTADO

Fac. Ing. y Arquitectura, Univ. Nac. de  
Colombia, Manizales, COLOMBIA

### MIGUEL CERVERA

E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos  
Univ. Politéc. Cataluña, ESPAÑA

### RAINALD LÖHNER

Dept. of Comp. and Data Sciences  
George Mason Univ., Fairfax, VA, USA