

# AIMETA 2005



**XVII CONGRESSO AIMETA**

**di Meccanica Teorica e Applicata**



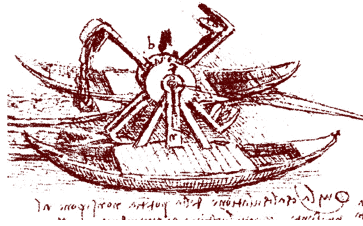
**Firenze, 11-15 Settembre 2005**

Firenze  
University  
Press

ATTI  
- 19 -

## ATTI

1. *Il controllo terminologico delle risorse elettroniche in rete: tavola rotonda, Firenze 27 gennaio 2000*, a cura di Paola Capitani, 2001
2. *Commemorazione di Michele Della Corte*, a cura di Laura Della Corte, 2001
3. *Disturbi del comportamento alimentare: dagli stili di vita alla patologia*, a cura di Corrado D'Agostini, 2002
4. *Proceedings of the third International Workshop of the IFIP WG5.7 Special interest group on Advanced techniques in production planning & control : 24-25 February 2000, Florence, Italy*, edited by Marco Garetti, MarioTucci, 2002
5. *DC-2002: Metadata for E-Communities: Supporting Diversity And Convergence 2002: Proceedings of the International Conference on Dublin Core and Metadata for e-Communities, 2002, October 13-17, 2002, Florence, Italy*, organized by Associazione Italiana Biblioteche [et al.], 2002
6. *Scholarly Communication and Academic Presses: Proceedings of the International Conference, 22 March 2001, University of Florence, Italy*, edited by Anna Maria Tammaro, 2002
7. *Recenti acquisizioni nei disturbi del comportamento alimentare*, a cura di Alessandro Casini, Calogero Surrenti, 2003
8. *Proceedings of Physmod 2003 International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena*, edited by Giampaolo Manfredi e Daniele Contini, 2003
9. *Public Administration, Competitiveness and Sustainable Development*, edited by Gregorio Arena, Mario P. Chiti, 2003
10. *Authority control: definizioni ed esperienze internazionali: atti del convegno internazionale, Firenze, 10-12 febbraio 2003*, a cura di Mauro Guerrini e Barbara B. Tillet; con la collaborazione di Lucia Sardo, 2003
11. *Le tesi di laurea nelle biblioteche di architettura*, a cura di Serena Sangiorgi, 2003
12. *Models and analysis of vocal emissions for biomedical applications: 3rd international workshop: december 10-12, 2003 : Firenze, Italy*, a cura di Claudia Manfredi, 2004
13. *Statistical Modelling. Proceedings of the 19th International Workshop on Statistical Modelling: Florence (Italy) 4-8 july, 2004*, edited by Annibale Biggeri, Emanuele Dreassi, Corrado Lagazio, Marco Marchi, 2004
14. *Studi per l'insegnamento delle lingue europee : atti della prima e seconda giornata di studio (Firenze, 2002-2003)*, a cura di Maria Carlota Nicolás Martínez, Scott Staton, 2004.
15. *L'Archivio E-prints dell'Università di Firenze: prospettive locali e nazionali. Atti del convegno (Firenze, 10 febbraio 2004)*, a cura di Patrizia Cotoneschi, 2004
16. *TRIZ Future Conference 2004. Florence, 3-5 November 2004*, edited by Gaetano Cascini, 2004
17. *Mobbing e modernità : la violenza morale sul lavoro osservata da diverse angolature per coglierne il senso, definirne i confini. Punti di vista a confronto. Atti del Convegno Firenze, 20 aprile 2004*, a cura di Aldo Mancuso, 2004
18. *Lo spazio sociale europeo. Atti del convegno internazionale di studi Fiesole (Firenze), 10-11 ottobre 2003*, a cura di Laura Leonardi, Antonio Varsori, 2005



# **AIMETA 2005**

## **Atti del XVII Congresso dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata**

**Firenze, 11-15 settembre 2005**

*a cura di*

Claudio Borri  
Luca Facchini  
Giorgio Federici  
Mario Primicerio

Firenze University Press  
2005

AIMETA 2005 : atti del XVII Congresso dell'Associazione italiana di meccanica teorica e applicata : Firenze, 11-15 settembre 2005 / a cura di Claudio Borri, Luca Facchini, Giorgio Federici, Mario Primicerio. - Firenze, Firenze university press, 2005 (Atti, 19)

<http://digital.casalini.it/8884533139>

Stampa a richiesta disponibile su <http://epress.unifi.it>

ISBN 88-8453-313-9 (online)

ISBN 88-8453-314-7 (print)

531 (ed. 20)

Meccanica-Congressi-Firenze-2005

#### *Avvertenza ai lettori*

All'attento lettore non sfuggirà un certo grado di disomogeneità nell'aspetto dei sommari raccolti in questo Volume. I curatori si scusano di tale difformità, causata dalla difficoltà di accedere ai files di tipo "pdf" per modifiche di formato.

La richiesta di files in formato "pdf" è stata, del resto, la naturale conseguenza di due esigenze: la prima è quella di garantire al massimo l'inalterabilità del contenuto dei sommari e dei lavori che ci sono pervenuti, la seconda è quella di scegliere un formato di facile impiego e che fosse indipendente dal software utilizzabile per la redazione dei lavori stessi.

© 2005 Firenze University Press

Università degli Studi di Firenze  
Firenze University Press  
Borgo Albizi, 28, 50122 Firenze, Italy  
<http://epress.unifi.it/>

*Printed in Italy*

# XVII Congresso AIMETA di Meccanica Teorica e Applicata

## **Comitato Scientifico:**

Gianni Bartoli (Università degli Studi di Firenze)  
Davide Bigoni (Università degli Studi di Trento)  
Guido Borino (Università degli Studi di Palermo)  
Ennio Carnevale (Università degli Studi di Firenze)  
Alberto Corigliano (Politecnico di Milano)  
Massimiliano Lucchesi (Università degli Studi di Firenze)  
Paolo Luchini (Università degli Studi di Salerno)  
Aleramo Lucifredi (Università degli Studi di Genova)  
Angelo Luongo (Università degli Studi di l'Aquila)  
Ettore Pennestri (Università degli Studi di Roma 'Tor Vergata')  
Mario Primicerio, *Presidente* (Università degli Studi di Firenze)  
Terenziano Raparelli (Università degli Studi di l'Aquila)  
Paolo Rissone (Università degli Studi di Firenze)  
Giampiero Spiga (Università degli Studi di Parma)

## **Comitato Organizzatore:**

Franco Angotti  
Ignazio Becchi  
Claudio Borri, *Presidente*  
Silvia Briccoli Bati  
Carlo Cinquini, *Segretario AIMETA*  
Paolo Citti  
Luca Facchini, *Segretario*  
Giorgio Federici, *Tesoriere*  
Giovanni Frosali  
Francesco Martelli  
Paolo Toni  
Giovanni Vannucchi  
Andrea Vignoli

## **Segreteria del Congresso:**

Gabriella Montagnani  
Chiara Serpieri  
Veronika Sustik  
Ufficio Relazioni Esterne  
Facoltà di Ingegneria  
Università degli Studi di Firenze  
Via di S. Marta, 3  
50139 Firenze  
Tel: +39 055 4796491  
Fax: +39 055 4796544  
E-mail: [aimeta2005@ing.unifi.it](mailto:aimeta2005@ing.unifi.it)

**L'AIMETA**, Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata, costituita nel 1966, riunisce i cultori della Meccanica nei suoi vari indirizzi: Meccanica Generale, Meccanica dei fluidi, Meccanica delle macchine, Meccanica dei solidi e Meccanica delle strutture.

Attraverso Congressi e incontri e con la rivista Meccanica, l'Associazione si propone di stabilire contatti fra ricercatori che operano nei diversi indirizzi, favorendo la collaborazione ed il confronto fra conoscenze ed esperienze diverse.

**Consiglio Direttivo dell' AIMETA:**

Giuliano Augusti (*Vice-presidente*), Roberto Bassani, Gianfranco Capriz (*Past-President*), Carlo Cinquini (*Segretario*), Mario di Paola, Angelo Morro (*Presidente*), Maurizio Pandolfi (*Tesoriere*).

Il XVII Congresso AIMETA di Meccanica Teorica e Applicata si è svolto con il patrocinio di:

AIMETA - Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata

Comune di Firenze

CRIACIV - Centro di Ricerca Interuniversitario di Aerodinamica delle Costruzioni e Ingegneria del vento

Facoltà di Ingegneria di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Civile

Istituto e Museo di Storia della Scienza

Università degli Studi di Firenze

ed è stato realizzato grazie al contributo di:



**SAVITRANSPORT**

*Università degli Studi di Firenze*

# Indice

Nota introduttiva di *Claudio Borri*

XXV

## KEYNOTE LECTURES

<i>Dimensional Response Analysis of Yielding Structures under Near Source Ground Motions</i>	3
Nicos Makris	
<i>On the Relationship between Gear Dynamics and Surface Wear</i>	4
Ahmet Kahraman	

Lunedì 12 settembre

---

## ST1 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: ELEMENTI FINITI

<i>Metodi misti per l'ottimizzazione topologica con vincoli sugli sforzi e materiali incomprimibili</i>	7
Carlo Cinquini, Matteo Bruggi, Paolo Venini	
<i>Mixed Finite Elements for Piezoelectric Plates based on Unified Formulation</i>	8
Erasmus Carrera, Marco Boscolo, Christian Fagiano, Alessandro Robaldo, Michele D'Ottavio	
<i>An Efficient Quadrilateral Finite Element for Reissner-Mindlin Plates</i>	9
Stefano de Miranda, Francesco Ubertini	
<i>Regularization of the Boundary Integral Formulation for Unconstrained Contours</i>	10
Francesco Freddi, Gianni Royer-Carfagni	
<i>Modellazione di assemblaggi di pannelli mediante decomposizione del dominio ed analisi BEM</i>	11
Leonardo Leonetti, Maurizio Aristodemo	

## ST2 – MECCANICA DELLE STRUTTURE

<i>Murature in vetro strutturale. Una proposta per una passerella ad arco a Venezia</i>	12
Gianni Royer-Carfagni, Mirko Silvestri	
<i>Axis-Symmetrical Solutions for n-ply Functionally Graded Circular Cylinders: Application to Optical Fibre Sensors</i>	13
Massimiliano Fraldi, Federico Carannante, Luciano Nunziante	
<i>Progetto ottimale di strutture discrete con vincoli sulla deformazione plastica</i>	14
Francesco Giambanco, Luigi Palizzolo, Alessandra Caffarelli	



<i>Curve di maggiorazione dell'errore per l'analisi sismica di oscillatori elasto-plastici attraverso il modello rigido-plastico</i>	15
Maria Cristina Porcu, Giorgio Carta	
<i>Caratterizzazione di un dispositivo magnetoreologico mediante prove sperimentali</i>	16
Michela Basili, Maurizio De Angelis, Emanuele Renzi	
<b>MM1 – MECCANICA DELLE MACCHINE: INGRANAGGI</b>	
<i>Sull'enumerazione di meccanismi a vite</i>	17
Massimo Cavacece, Ettore Pennestri, Leonardo Vita	
<i>Analisi delle curvature di ruote dentate mediante un nuovo approccio</i>	18
Francesca Di Puccio, Marco Gabiccini, Massimo Guiggiani	
<i>An Algorithm for the Generation of the Pitch Surfaces of Skew-Gears</i>	19
Giorgio Figliolini, Jorge Angeles	
<i>Danneggiamento superficiale nelle ruote dentate: studio teorico sperimentale</i>	20
Roberto Bassani, Enrico Ciulli, Enrico Manfredi, Giovanni Pugliese, Alessandro Polacco	
<i>Effetti di accoppiamento tra vibrazioni flessionali e torsionali in macchine rotanti in presenza di trasmissioni ad ingranaggi</i>	21
Paolo Pennacchi, Andrea Vania	
<i>Sul rendimento dei rotismi dei differenziali per autoveicoli</i>	22
Ettore Pennestri, Roberto Stefanelli, Pier Paolo Valentini, Leonardo Vita	
<b>MM2 – MECCANICA DELLE MACCHINE</b>	
<i>A Unified Model for Metal and Dry Hybrid V-belt CVTs</i>	23
Giuseppe Carbone, Luigi Mangialardi, Leonardo Soria, Giacomo Mantriota	
<i>Progetto preliminare di trasmissioni CVT con due vie in parallelo</i>	24
Alberto Beccari, Marco Cammalleri	
<i>Studio di una macchina semiautomatica per la legatura sul campo degli ortaggi a foglia larga</i>	25
Mario M. Foglia, Angelo Gentile, Giulio Reina	
<i>A Vision-based Cutting System for Fennel Postharvest Processing</i>	26
Mario Foglia, Angelo Gentile, Annalisa Milella, Giulio Reina	
<i>Identificazione sperimentale dei coefficienti dinamici di uno smorzatore a squeeze-film magnetoreologico</i>	27
Costantino Carmignani, Paola Forte, Paolo Badalassi	
<i>Diagnosi ed identificazione di un disallineamento di un giunto in una macchina rotante reale</i>	28
Paolo Pennacchi, Andrea Vania	
<b>SO1 – MECCANICA DEI SOLIDI: DINAMICA E STABILITÀ</b>	
<i>The Dynamic Behaviour of Solids in Incremental Nonlinear Elasticity: Perturbations and Integral Equations</i>	29
Davide Bigoni, Domenico Capuani	
<i>On the Dynamic Response of Flexible Walls Retaining a Dissipative, Dried or Fluid-saturated Porous Media</i>	30
Luca Lanzoni, Enrico Radi, Antonio Tralli	
<i>A Homogenized Model for Dynamic Analysis and Vibration Control of Piezoactuated Rotationally Periodic Structures</i>	31
Paolo Bisegna, Giovanni Caruso	

<i>Softening and Snap-back Instability in Superplastic Deformation</i>	32
Marco Paggi, Giorgio Zavarise, Alberto Carpinteri	
<i>Stability of Material Interfaces</i>	33
Massimiliano Gei	
<i>On the Possibility of Shear Driven Taylor-like Instabilities in Nonlinear Elastostatics</i>	34
Roger Fosdick, Pilade Foti, Salvatore Marzano	
<b>ST3 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: ELEMENTI FINITI</b>	
<i>Analisi ad elementi di contorno di travi a sezione mista soggette a taglio e torsione</i>	35
Daniele Gaspari, Maurizio Aristodemo	
<i>Integrazione a variabili complesse nella costruzione di modelli ad elementi di contorno simmetrici di lastre di Kirchhoff</i>	36
Mirko Mazza, Maurizio Aristodemo	
<i>Weak Coupling of the Symmetric Galerkin BEM with FEM</i>	37
Roberta Springhetti, Massimiliano Margonari, Giorgio Novati	
<i>A Total Lagrangian Co-rotational FE Formulation for Large Displacements in Shells</i>	38
Salvatore Lopez	
<i>Piastra di Kirchhoff con l'impiego del metodo simmetrico degli elementi di contorno</i>	39
Vincenza Milana, Teotista Panzeca, Maria Salerno	
<b>ST4 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: COMPOSITI</b>	
<i>Analysis of Composite SMA Laminates Using a Multiscale Approach</i>	40
Sonia Marfia, Elio Sacco	
<i>Modello di interfaccia bifase per la descrizione dei fenomeni di decoesione nei materiali compositi</i>	41
Alessia Cottone, Tiziana Turetta, Giuseppe Giambanco	
<i>Comportamento viscoso di profili pultrusi in materiale composito</i>	42
Marina Bottoni, Claudio Mazzotti, Marco Savoia	
<i>Intralaminar and Interlaminar Damage in Composite Material Structures</i>	43
Domenico Bruno, Fabrizio Greco, Paolo Lonetti	
<b>MM3 – MECCANICA DELLE MACCHINE: CONTATTO</b>	
<i>Un modello numerico per la previsione degli effetti dell'usura in coppie rotoidali con gioco</i>	44
Alessandro Tasora, Edzeario Prati, Marco Silvestri	
<i>Strisciamento tra rotore e statore - Parte 1: evidenze sperimentali di ingobbamenti termici</i>	45
Nicolò Bachschmid, Paolo Pennacchi, Andrea Vania	
<i>Strisciamento tra rotore e statore - Parte 2: sviluppo del modello delle vibrazioni a spirale ed applicazione ad una macchina industriale</i>	46
Nicolò Bachschmid, Paolo Pennacchi, Andrea Vania	
<i>Super-hydrorepellence of a Corrugated Surface</i>	47
Giuseppe Carbone, Luigi Mangialardi	
<i>Influenza dell'interazione dinamica di contatto pantografo catenaria sull'usura della linea</i>	48
Stefano Bruni, Andrea Collina, Giuseppe Bucca, Stefano Melzi	
<i>The Shakedown Limit under Rolling and Sliding Contact: What Happens if Variable Loads are Applied?</i>	49
Hernan Juan Desimone	

#### **MM4 – MECCANICA DELLE MACCHINE**

<i>Soluzione analitica per serie di un collegamento a forcilla e spinotto</i>	50
Antonio Strozzi, Andrea Baldini, Matteo Giacomini, Stefano Rivasi, Roberto Rosi	
<i>Inarcamento delle cinghie di trasmissione nei rami liberi. Influenza sul pre-tensionamento e sulla potenza limite</i>	51
Francesco Sorge	
<i>Analisi quantitativa di sperimentazioni su anelli radiali: caratteristiche del distacco al variare dei polimeri</i>	52
Marco Silvestri, Edzeario Prati, Alessandro Tasora	
<i>Simulazione numerica per il virtual testing di caschi per motocicletta</i>	53
Mirella Aiello, Ugo Galvanetto, Lorenzo Iannucci	
<i>Elastic Behaviour of Shafts Affected by Slightly Helicoidal Cracks</i>	54
Nicolò Bachschmid, Ezio Tanzi	
<i>Dynamic Characteristics of Tilting 4-pad Journal Bearing</i>	55
Sobhy M. Ghoneam, Stanislaw Strzelecki	

#### **SO2 – MECCANICA DEI SOLIDI: COMPOSITI**

<i>Analisi del distacco fibra-matrice nei compositi unidirezionali viscoelastici con microstruttura periodica</i>	56
Andrea Caporale, Raimondo Luciano	
<i>Space-time Multiscale FE Simulations of Dynamic Composite Delamination</i>	57
Stefano Mariani, Anna Pandolfi, Raffaella Pavani	
<i>Calibration of Composite Constitutive Laws by a Sigma-point Kalman Filter</i>	58
Stefano Mariani, Alberto Corigliano, Aldo Ghisi	
<i>Simulazione con l'uso di elementi di interfaccia di propagazione di cricche dovuta a fatica</i>	59
Ugo Galvanetto, Paul Robinson	

Martedì 13 settembre

---

#### **ST6 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: ANALISI E IDENTIFICAZIONE DEL DANNO E DELLA FRATTURA**

<i>Influenza dell'errore strumentale sull'identificazione del danno in travi elastiche</i>	63
Salvatore Caddemi, Annalisa Greco, Antonino Morassi	
<i>A Coupled Stress and Energy Fracture Criterion Based on Discrete Crack Advancement</i>	64
Pietro Cornetti, Nicola Pugno, Alberto Carpinteri	
<i>Delamination Failure in Curved Laminates</i>	65
Domenico Bruno, Rodolfo Carpino, Paolo Nevone Blasi	
<i>Un nuovo metodo di identificazione del danneggiamento basato sulla 'proper orthogonal decomposition'</i>	66
Ugo Galvanetto, George Violaris	

#### **ST7 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: STABILITÀ**

<i>Esonenti di Lyapunov per sistemi impulsivi: frontiere di stabilità e transizione al caos</i>	67
Anna Sinopoli, Alessio Ageno	

<i>Analisi di affidabilità di strutture con parametri meccanici variabili attraverso il metodo della superficie di risposta</i>	68
Barbara Ferracuti, Marco Savoia	
<i>Un modello monodimensionale per l'analisi della biforcazione flessotorsionale di travi di spessore sottile</i>	69
Giuseppe C. Ruta, M. Pignataro, Nicola Luigi Rizzi	
<i>Stability Control Analysis of a M-DOF System</i>	70
Mario Pasquino, Francesco Fabbrocino, Mariano Modano, Michele Brigante	
<i>Buckling of Tensioned or Compressed Cracked Thin Plates</i>	71
Roberto Brighenti	
<b>MM7 – MECCANICA DELLE MACCHINE: MULTIBODY</b>	
<i>Un nuovo metodo del semplice per il problema di complementarità lineare mista in sistemi multibody con vincoli unilateri</i>	72
Alessandro Tasora, Elisabetta Manconi, Marco Silvestri	
<i>Metodologie multibody per l'analisi della stabilità di marcia di un veicolo ferroviario</i>	73
Andrea Rindi, Monica Malvezzi, Luca Pugi, Dario Vannucci, Federico Gherardi, Mario Romani, Dario Spinelli	
<i>Esperienze numeriche sulla formulazione multibody di Udwadia-Kalaba</i>	74
Domenico de Falco, Ettore Pennestri, Leonardo Vita	
<i>Impiego di tecniche multibody per il miglioramento della sicurezza degli operatori di carrelli a forche</i>	75
Luigi Mangialardi, Leonardo Soria	
<b>MM8 – MECCANICA DELLE MACCHINE: ROBOTICA</b>	
<i>Sbavatura robotizzata di manufatti di forma incognita mediante controllo ibrido forza/velocità</i>	76
Giacomo Ziliani, Giovanni Legnani, Antonio Visioli	
<i>Meccanismo ibrido per il supporto alla visione stereoscopica in ambiente sottomarino</i>	77
Matteo Zoppi, Luca Bruzzone, Aazir Khan, Rezia M. Molfino	
<i>Progetto di un'originale interfaccia aptica con attuatori ridondanti</i>	78
Paolo Righettini, Hermes Giberti, Steven Chatterton	
<i>Il programma di ricerca MiniPaR: minirobotica parallela per applicazioni speciali</i>	79
Rezia M. Molfino, Massimo Callegari, Rodolfo Faglia, Carlo Ferraresi, Rosario Sinatra	
<b>SO4 – MECCANICA DEI SOLIDI: NANOSTRUTTURE</b>	
<i>Strengths of Boron Nanowires and Carbon Nanotubes</i>	80
Lorenzo Calabri, Weiqiang Ding, Xinqi Chen, Kevin Kohlhaas, Nicola Pugno, Rodney Ruoff	
<i>Fracture Strength of Nanostructures</i>	81
Nicola Pugno, Rodney Ruoff	
<i>Modello analitico per prove di nanoindentazione in film sottili</i>	82
Roberta Sburlati	
<i>Un approccio agli elementi finiti alla indentazione di film sottili</i>	83
Guido Borino, Francesco Scarpulla, Francesco Parrinello	
<b>ST5 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: ANALISI E IDENTIFICAZIONE DEL DANNO</b>	
<i>Identificazione di difetti da prove di conducibilità elettrica</i>	84
Antonio Bilotta, Giovanni Formica, Antonino Morassi, Emilio Turco	

<i>Spatial Wavelet Analysis of Statically-loaded Euler-Bernoulli Damaged Beams</i>	85
Giuseppe Failla, Adolfo Santini, Massimiliano Pappaticò	
<i>Crack Localisation in a Large-sized R.C. Beam Through the Acoustic Emission Technique</i>	86
Giuseppe Lacidogna, Gianni Niccolini, Alberto Carpinteri	
<i>Identificazione del danno in cavi sospesi attraverso misure dinamiche</i>	87
Marco Lepidi, Fabrizio Vestroni, Vincenzo Gattulli	
<i>Health Monitoring of Beam Structures Based on Finite Element Models and Dynamic Test Data</i>	88
Maria Nilde Cerri, Fabrizio Vestroni, Stefano Vidoli	
<i>Damage Detection in Bending Beams Through Brillouin Distributed Optical Fibre Sensor</i>	89
Massimiliano Fraldi, Vincenzo Minutolo, Federico Carannante	
<i>Una procedura per l'identificazione del danno in travi elastiche da prove statiche</i>	90
Salvatore Caddemi, Antonino Morassi	

#### **MM5 – MECCANICA DELLE MACCHINE: VEICOLI**

<i>Experimental Modal Analysis of Two-wheeled Vehicles. Prediction of the Response to Road Unevenness</i>	91
Alberto Doria, Davide Fabris, Massimo Maso	
<i>L'influenza dei fattori ambientali nei coefficienti di scalatura per le Magic Formula di Pacejka</i>	92
Federico Cheli, Francesco Braghin, Emiliano Giangiulio, Edoardo Sabbioni	
<i>Modellazione integrata della dinamica dell'autoveicolo e della powertrain</i>	93
Federico Cheli, Marco Pedrinelli, Andrea Zorzutti	
<i>Effetti dell'interazione dinamica ruota-rotaiia sulla formazione di usura ondulatoria sul binario</i>	94
Bruno Pizzigoni, Paolo Belforte, Andrea Collina	
<i>Sulla verifica sperimentale di sospensioni semi-attive in ambito motociclistico</i>	96
Paolo Righettini, Steven Chatterton, Hermes Giberti	
<i>Un modello numerico per l'analisi della dinamica di marcia e delle sollecitazioni sui componenti di un veicolo ferroviario</i>	97
Stefano Alfi, Roberto Corradi, Alan Facchinetti, Luca Niro	
<i>Indagine sperimentale e numerica sull'emissione di rumore al contatto ruota-rotaiia</i>	98
Stefano Bruni, Francesco Ripamonti, Daniele Rocchi	
<i>Effect of Soil Elastic Foundation on the Chosen Motions of Single-bucket Excavator</i>	99
Zygmunt Towarek, Stanislaw Strzelecki	

#### **MM6 – MECCANICA DELLE MACCHINE: ROBOTICA**

<i>Regional 3R Spatial Manipulators: A New Method to Characterise the Jointspace Partition Induced by Singularities</i>	100
Davide Paganelli	
<i>Cheope: A New Hybrid Redundant Reconfigurable Manipulator for Surgical Applications</i>	101
Diego Tosi, Giovanni Legnani, Nicola Pedrocchi, Paolo Righettini, Hermes Giberti	
<i>Analisi funzionale del master per teleoperazione a cordini WiRo-6.3</i>	102
Carlo Ferraresi, Stefano Pastorelli, Francesco Pescarmona, Marco Paoloni	
<i>Un manipolatore parallelo isotropo disaccoppiato a 6 gradi di libertà</i>	103
Giovanni Legnani, Diego Tosi, Irene Fassi	
<i>Progetto di un Robot PKM a tre GdL traslazionali pneumatico</i>	104
Hermes Giberti, Paolo Righettini, Steven Chatterton	

<i>Analisi della manipolabilità del robot industriale Tricept</i>	105
Massimo Callegari, Matteo Palpacelli, Marco Principi	
<i>Ottimizzazione della strategia di movimentazione di un robot seriale ridondante tramite un algoritmo genetico</i>	106
Alberto Borboni, Roberto Bussola, Rodolfo Faglia, Diego Tosi	
<b>SO3 – MECCANICA DEI SOLIDI: LEGAMI COSTITUTIVI</b>	
<i>Domini elasto-plastici non convessi in materiali incruditi stabili alla Drucker</i>	107
Andrea Paglietti, Giorgio Carta, Maria Cristina Porcu	
<i>Consequences of Rate-dependence in the Plastic Behaviour of Materials</i>	108
Fabio De Angelis	
<i>Numerical Tests on an Optimal Integration Scheme for the von-Mises Plasticity Model Based on Exponential Maps</i>	109
Edoardo Artioli, Ferdinando Auricchio, Lourenço Beirão da Veiga	
<i>Compatibilità termodinamica della Legge costitutiva anisotropa per materiali policristallini e incompressibili</i>	110
Francesco dell’Isola, Nicoletta Ianiro, Luca Placidi	
<i>Ottimizzazione topologica per solidi micropolari</i>	111
Marco Rovati, Daniele Veber, Alberto Taliercio	
<i>Modulo di Poisson negativo in solidi anisotropi</i>	112
Antonio Cazzani, Marco Rovati	
<i>Mechanical Properties of Monofilament Technical Textiles: An Analytical Model</i>	113
Valter Carvelli, Carlo Poggi	
<b>GE1 – MECCANICA GENERALE</b>	
<i>A Fast Multipole Implementation of the Mixed Velocity-traction Approach for the Analysis of MEMS</i>	114
Attilio Frangi, Arturo Di Gioia, Giorgio Novati	
<i>Modelling Harmonic and Subharmonic Generation Using an Interaction Box Formalism</i>	115
Federico Bosia, Nicola Pugno, Alberto Carpinteri	
<i>Dual Inertia Operator in the Rigid Body Dynamics</i>	116
Mauro Benati, Angelo Morro	
<i>Messa a punto di modelli per lo studio della dinamica della racchetta da tennis con particolare riguardo all’influenza delle tecniche di incordatura</i>	117
Federico Casolo, Michele Camposaragna, Matteo Cocetta	
<i>Rotorcraft Aerodynamic Coefficients Estimation Using Artificial Neural Networks</i>	118
Nicola de Divitiis	
<i>Iterative learning control per la contornatura di geometrie incognite con manipolatori industriali</i>	119
Giacomo Ziliani, Nicola Pedrocchi, Giovanni Legnani, Alberto Omodei, Antonio Visioli	
<i>Classi di simmetria in elasticità piana</i>	120
Sandra Forte	
<b>ST8 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: MURATURE</b>	
<i>Delimitazioni agli elementi finiti del moltiplicatore di collasso di archi murari interagenti con il riempimento</i>	121
Andrea Cavicchi	
<i>Modelli 2D con microstruttura per pannelli di muratura in 3D</i>	122
Antonella Cecchi, Nicola Luigi Rizzi	

<i>Un modello a danneggiamento anisotropo per la muratura storica</i>	123
Chiara Calderini, Sergio Lagomarsino	
<i>Un metodo numerico per l'analisi strutturale di cupole in muratura: la chiesa di S. Maria Maddalena a Morano Calabro</i>	124
Katia Bernardeschi, Francesco Paolo Cecati, Cristina Padovani, Giuseppe Pasquinelli	
<i>Analisi non lineari di pannelli murari con elementi finiti equilibrati</i>	125
Enrico Papa, Alberto Taliercio, Adolfo Zavelani Rossi	
<i>Modelli continui 1D di sistemi di blocchi in forma di archi e piattabande</i>	126
Nicola Luigi Rizzi, Valerio Varano	
<b>ST9 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: FRP</b>	
<i>Debonding Problems in Beams Strengthened with Composite Materials: An Analytical and Numerical Study</i>	127
Rodolfo Carpino, Fabrizio Greco, Paolo Lonetti	
<i>Delamination in FRP-strengthened Structures: Acoustic Emission Monitoring and Numerical Modeling</i>	128
Giuseppe Lacidogna, Marco Paggi, Alberto Carpinteri	
<i>Influenza della deformabilità tagliante sulla statica di profili compositi pultrusi</i>	129
Luciano Feo, Geminiano Mancusi, Francesco Ascione	
<i>Modelli agli elementi finiti per travi di parete sottile deformabili a taglio e torsione</i>	130
Fabio Minghini, Ferdinando Laudiero, Nerio Tullini	
<i>Indagine sperimentale sul comportamento viscoso di laminati pultrusi in fibra di carbonio</i>	131
Francesco Ascione, Valentino Paolo Berardi, Luciano Feo, Antonella Giordano	
<b>MM9 – MECCANICA DELLE MACCHINE: CAMME E LUBRIFICAZIONE</b>	
<i>Investigation on Journal Bearings in Atypical Working Conditions</i>	132
Roberto Bassani, Enrico Ciulli, Bruno Piccigallo	
<i>Lubricated Non-conformal Contacts under Steady-state and Transient Conditions</i>	133
Roberto Bassani, Enrico Ciulli, Kenred Stadler, Matteo Carli	
<i>Dinamica di meccanismi a camma veloci azionati da motori in corrente continua</i>	134
Giovanni Incerti, Monica Tiboni, Marco Ceccarelli, Giuseppe Carbone	
<i>Progetto di un banco prova per lo studio della lubrificazione elastoidrodinamica di profili a contatto</i>	135
Hermes Giberti, Paolo Righettini, Steven Chatterton	
<i>Diagnostica di meccanismi a camma mediante l'impiego di reti neurali artificiali</i>	136
Monica Tiboni, Giovanni Incerti	
<i>Synthesis of Unconventional Cam-follower Mechanisms</i>	137
Roberto Strada, Vittorio Lorenzi, Riccardo Riva, Bruno Zappa	
<i>Analisi delle prestazioni di sistemi di trasmissione a camme con dispositivi di richiamo pneumatici</i>	138
Stefano Pastorelli, Andrea Almondo, Massimo Sorli	
<b>SO5 – MECCANICA DEI SOLIDI: MECCANICA DELLA FRATTURA</b>	
<i>Boundary Integral Fracture Analysis and Hypersingular Evaluation</i>	139
Alberto Salvadori, Ahn-Vu Phan, Leonard Gray	
<i>La modellazione della prova di pullout. Carico limite e propagazione della frattura</i>	140
Antonio Gesualdo, Federico Guarracino, Luciano Nunziante	

<i>Numerical Analysis of Cohesive Crack propagation in Functionally Graded Materials</i>	141
Claudia Comi, Stefano Mariani	
<i>Atomistic Simulations versus Analytical Approaches in Fracture</i>	142
Mariella Ippolito, Alessandro Mattoni, Luciano Colombo, Nicola Pugno, Alberto Carpinteri	
<i>Optimum Shape of a Patch Repair for Cracked Plates</i>	143
Roberto Brighenti, Andrea Carpinteri, Sabrina Vantadori	
<i>L'evoluzione della frattura nei materiali fragili non coesivi con l'impiego del metodo simmetrico degli elementi di contorno</i>	144
Teotista Panzeca, Filippo Cucco, Silvio Terravecchia, Liborio Zito	
<b>GE2 – MECCANICA GENERALE</b>	
<i>Guided Wave Features in Absorbing Waveguide with Arbitrary Cross-section</i>	145
Alessandro Marzani, Ivan Bartoli, Francesco Lanza di Scalea, Erasmo Viola	
<i>Wave Propagation in Dissipative Linear Thermoelasticity</i>	146
Angelo Morro, Giacomo Caviglia	
<i>On the Use of Analogies in Deriving Variational Formulations for Initial-value Mechanical Problems</i>	147
Angelo Carini, Anna Feriani,, Osvaldo De Donato	
<i>On the Reynolds Equation for Linearized Models of Boltzmann Operator</i>	148
Carlo Cercignani, Maria Lampis, Silvia Lorenzani	
<i>Non-stationary Viscoelastic Surface Waves in the Stroh Formalism</i>	149
Maurizio Romeo	
<i>Some Considerations on a RBF Formulation for Planar FE</i>	150
Paolo Biagini, Luca Facchini	
<b>MINI SIMPOSIO – AERODINAMICA DEI FLUSSI SEPARATI E DEI CORPI TOZZI</b>	
<i>U-RANS Simulations around Bluff Bodies</i>	153
Claudio Marongiu, Pier Luigi Vitagliano, Francesco Capizzano, Pietro Catalano	
<i>On the Capabilities of CFD for the Aerodynamic Design of High Performance Cars</i>	154
Giovanni Lombardi	
<i>Characterization of the Velocity Fluctuations in the Wake of a Triangular Prism of Moderate Aspect-ratio</i>	155
Guido Buresti, Giacomo Valerio Iungo	
<i>Toward a Reliable Usage of Indicial Functions in the Practice of Bridge Design: Numerical Issues and Implementation Details</i>	156
Luca Salvatori, Claudio Borri	
<i>Generalized Föppl Curves</i>	157
Luca Zannetti	
<i>Transient Dynamics Model of the Flow Past a Confined Square Cylinder</i>	158
Marcelo Buffoni, Bernardo Galletti, Angelo Iollo	
<b>MINI SIMPOSIO – STOCHASTIC MECHANICS IN STRUCTURAL ENGINEERING APPLICATIONS</b>	
<i>Analisi dinamica di sistemi non-smooth sottoposti ad input stocastico. Un approccio preliminare</i>	159
Anna Sinopoli, Alessio Ageno	
<i>Proper Orthogonal Decomposition of Dynamic Loads on Structures</i>	160
Francesco Ricciardelli	



<i>Recent Developments on Methods of Uncertain Structure Static Analysis</i>	161
Giovanni Falsone	
<i>Fractional Moments of Non-linear Systems under Lévy White Noise Processes</i>	162
Giulio Cottone, Mario Di Paola	
<i>RBF – Galerkin Approach for the Dynamics of Simple Disordered Masonry Structures</i>	163
Luca Facchini, Michele Betti, Paolo Biagini, Andrea Vignoli	
<i>Reliability Assessment of Complex Structural Systems</i>	164
Marcello Ciampoli	
<i>Random Vibrations of Uncertain Linearly Elastic Trusses</i>	165
Antonina Pirrotta, Roberta Santoro, Massimiliano Zingales	
<i>Aeroelastic Stability of Long Span Bridges under Turbulent Wind</i>	166
Vincenzo Sepe, Marcello Vasta	
<i>Role of Indicical Parameters on Aeroelastic Response of Rectangular Cylinders</i>	167
Carlotta Costa, Claudio Borri	
<i>Analisi dinamica deterministica ed aleatoria di oscillatori che percorrono travi su suolo viscoelastico</i>	168
Giuseppe Muscolino, Alessandro Palmeri	

Mercoledì 14 settembre

---

#### **ST11 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: DINAMICA E VIBRAZIONI**

<i>Multi-modal Passive Electric Control of Mechanical Vibrations through Distributed Piezoelectric Transducers and Electric Networks: Results and Perspectives</i>	171
Francesco dell’Isola, Corrado Maurini, Maurizio Porfiri, Stefano Vidoli	
<i>An Active Vibration Isolation System for a Three-dimensional Equipment Structures</i>	172
Mario Pasquino, Francesco Fabbrocino, Mariano Modano, Michele Brigante	
<i>Prove dinamiche su strutture adiacenti controllate con dispositivi magnetoreologici (MR)</i>	173
Maurizio De Angelis, Giancarlo Fraraccio, Vincenzo Ciampi, Michela Basili, Nicola Ranieri, Mariano Ciucci	
<i>A Numerical Model for the Nonlinear Dynamics of a Semi-infinite Beam on Unilateral Winkler Soil</i>	174
Giovanni Lancioni, Stefano Lenci, Massimo Callegari	

#### **MM11 – MECCANICA DELLE MACCHINE: SIMULAZIONE**

<i>Metodologia di modellazione di valvole a due vie con elevata dinamica</i>	175
Stefano Pastorelli, Massimo Sorli, Giorgio Figliolini, Pierluigi Rea	
<i>Allestimento e strumentazione di un simulatore innovativo per allenamento su kayak</i>	176
Giovanni Mimmi, Carlo Rottenbacher, Andrea Negri, Manuel Regazzoni	
<i>Progettazione e simulazione di un pantografo ferroviario dotato di sistemi di asservimento</i>	177
Luca Pugi, Benedetto Allotta, Andrea Rindi, Mirko Rinchi, Riccardo Cheli	
<i>Sperimentazione e simulazione HIL di cambi e trasmissioni automobilistiche</i>	178
Benedetto Allotta, Luca Pugi, Susanna Papini, Duccio Carloni	

#### **SO7 – MECCANICA DEI SOLIDI**

<i>Triggering of Dry Snow Slab Avalanches and a New Concept of Active Protection</i>	179
Bernardino M. Chiaia, Pietro Cornetti, Barbara Frigo, Alessandro Luisi	

<i>Robust Fluid-Solid Interfacing Algorithms with Application to Turbomachinery Aeroelastic Computations</i>	180
Enrico Gambini, Francesco Poli, Andrea Rindi, Claudia Schipani	
<i>A Micromechanical Material Model for the Numerical Simulation of the Human Cornea</i>	181
Giorgio Fotia, Federico Manganiello, Anna Pandolfi	
<i>Recent Advances in the Analysis of Mechanically Driven Mass Diffusion in Elastic Solids</i>	182
Stefano de Miranda, Luisa Molari, Francesco Ubertini	
 <b>MF2 – MECCANICA DEI FLUIDI: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS</b>	
<i>Simulazione numerica LES dell'effetto del raffreddamento in mare</i>	183
Filippo Maria Denaro, Giuliano De Stefano, Daniele Iudicone, Vincenzo Botte	
<i>Accuracy Estimates for Interpolating Numerical Solutions of Hyperbolic Differential Problems</i>	184
Gianluca Argentini	
<i>Simulazione numerica del flusso oscillante su una parete scabra</i>	185
Francesco Fornarelli, Giovanna Vittori	
<i>Transizione in un flusso pulsante all'interno di un condotto di sezione circolare</i>	186
Raffaella Tuzi, Paolo Blondeaux	
 <b>ST10 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: DINAMICA</b>	
<i>Short Pulse Loading of Circular Plates: Regular and Chaotic Dynamic Elastic-plastic Responses</i>	187
Andrea Bassi, Giovanni Bono, Angelo Carini, Anna Feriani, Paul S. Symonds	
<i>Non-smooth Dynamics of Oscillators with Frictional Contacts: Analyses and Experiments</i>	188
Paolo Casini, Oliviero Giannini, Fabrizio Vestroni	
<i>Comportamento dinamico dei cavi sotto l'azione del vento: modelli numerici e prove sperimentali</i>	189
Federico Cluni	
<i>Dinamica libera e forzata di una trave elastica 3D inizialmente curva</i>	190
Daniele Zulli, Rocco Alaggio, Francesco Benedettini	
<i>On the Dynamics of Three-coupled Periodic Mechanical Models</i>	192
Francesco Romeo, Achille Paolone	
<i>Linear and Non-linear Elastodynamics of Non-shallow Cables</i>	193
Walter Lacarbonara, Achille Paolone, Fabrizio Vestroni	
 <b>MM10 – MECCANICA DELLE MACCHINE: VEICOLI</b>	
<i>Modellazione dei sistemi di trazione integrale e della loro influenza sulla dinamica del veicolo</i>	194
Mauro Velardocchia, Aldo Sorniotti, Andrea Morgando	
<i>Modellazione dei componenti di impianti frenanti idraulici</i>	195
Mauro Velardocchia, Aldo Sorniotti, Andrea Morgando	
<i>Progetto di una logica VDC con ipotesi di linearità - Parte 1: Simulazione</i>	196
Mauro Velardocchia, Aldo Sorniotti, Andrea Morgando	
<i>Progetto di una logica VDC con ipotesi di linearità - Parte 2: Sperimentazione</i>	197
Mauro Velardocchia, Aldo Sorniotti, Andrea Morgando	
<i>Un dispositivo per la misura per applicazioni in campo automobilistico</i>	198
Federico Casolo, Michele Camposaragna, Barbara Cattaneo, Simone Cinquemani, Giovanni Legnani	

<i>Logica di controllo della sterzata attiva per l'impostazione handling di un veicolo stradale</i>	199
Federico Cheli, Stefano Melzi, Edoardo Sabbioni	
<i>Metodologia per la valutazione della percorribilità di marcia in assenza e in presenza di vento su ponte e su veicolo</i>	200
Andrea Collina, Elisabetta Leo, Ferruccio Resta, Gisella Tomasini	
<i>Modello numerico del sistema sterzante di un veicolo con asservimento idraulico</i>	201
Federico Cheli, Stefano Melzi, Edoardo Sabbioni, Andrea Zuin	
<b>SO6 – MECCANICA DEI SOLIDI: SOLUZIONI ANALITICHE</b>	
<i>Gli studi sull'elasticità di Enrico Betti</i>	202
Daniilo Capecchi, Giuseppe C. Ruta, Rossana Tazzioli	
<i>Fundamental Solutions in the Theory of Thermomicropolar Elastic Solids</i>	203
Ludovico Nappa, Simona De Cicco, Maria Lippiello	
<i>Un problema dell'equilibrio elastico per un materiale granulare</i>	204
Luigi La Ragione	
<i>Inhomogeneous Elastostatic Solutions Constructed from Stress and Displacement-associated Homogeneous Solutions</i>	205
Massimiliano Fraldi, Stephen C. Cowin	
<i>Relaxed Solutions in Two-dimensional Models</i>	206
Michele Buonsanti	
<i>On the Application of a General Solution Procedure for Plane Stress Isotropic Plasticity</i>	207
Nunziante Valoroso, Luciano Rosati, Roberto Serpieri	
<i>Local Energy Minimizers in Incompressible Elasticity</i>	208
Gianpietro Del Piero, Raffaella Rizzoni	
<b>MF1 – MECCANICA DEI FLUIDI: TURBOLENZA</b>	
<i>Analisi SO(3) delle leggi di scala in un flusso di shear omogeneo</i>	209
Boris Jacob, Paolo Gualtieri, Carlo Massimo Casciola	
<i>Small Scale Localization in the Simulation of a Turbulent Jet at <math>M = 5</math></i>	210
Daniela Tordella, Michele Iovieno	
<i>Effetto dei polimeri sui flussi d'energia in turbolenza di parete</i>	211
Elisabetta De Angelis, Nicoletta Marati, Carlo Massimo Casciola, Renzo Piva	
<i>Turbulent Thermal Convection over Non-flat Surfaces</i>	212
Giuseppe Stringano, Roberto Verzicco, Giuseppe Pascazio	
<i>Analisi statistica della struttura della turbolenza in un canale idraulico a superficie libera</i>	213
Guido Troiani, Angelo Olivieri	
<i>Flow Field Development of an Axisymmetric Synthetic Jet</i>	214
Gaetano Iuso, Gaetano M. Di Cicca, Raffaele Donelli	
<i>A Statistical Method for Turbulence</i>	215
Amilcare Pozzi, Renato Tognaccini, Daniele Guida	
<b>ST12 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: MURATURE</b>	
<i>Analisi di pannelli murari mediante una formulazione FEM di tipo misto</i>	216
Antonio Bilotta, Marialaura Malena, Raffaele Casciaro, Antonio Domenico Lanzo	
<i>Un modello omogeneo per pareti in muratura con struttura non periodica</i>	217
Federico Cluni, Vittorio Gusella	

<i>A Simple Homogenized Micro Mechanical Model for the Analysis at the Collapse of Out-of-plane Loaded Masonry Walls</i>	218
Gabriele Milani, Paulo Lourenço, Antonio Tralli	
<i>Una strategia multivivello per l'analisi non lineare di pannelli murari</i>	219
Sandro Brasile, Raffaele Casciaro, Giovanni Formica	
<i>The Spherical Asperity Interface Model for the Numerical Analysis of Blocky Structures</i>	220
Giuseppe Fileccia Scimemi, Santi Rizzo, Giuseppe Giambanco	
<b>MM12 – MECCANICA DELLE MACCHINE: BIOMECCANICA E SOSPENSIONE MAGNETICA</b>	
<i>Dinamica magneto-elastica del Levitron</i>	221
Elvio Bonisoli, Cristiana Delprete, Alessandro Vigliani	
<i>Modello e analisi della stabilità di una sospensione magnetica passiva</i>	222
Elvio Bonisoli, Cristiana Delprete, Alessandro Vigliani	
<i>Analisi delle componenti tri-assiali della forza ai pedali durante la pedalata in un ciclo-ergometro innovativo</i>	223
Giovanni Mimmi, Lucia Frosini, Carlo Rottenbacher, Andrea Negri, Manuel Regazzoni	
<i>Identificazione del sistema mano-braccio di un pilota di un veicolo a due ruote tramite manopola strumentata</i>	224
Alessandro Bechi, Francesca Di Puccio, Paola Forte	
<i>Technical and Economical Problems in a Passive Maglev Train</i>	225
Roberto Bassani, Enrico Ciulli, Antonino Musolino, Rocco Rizzo	
<i>On the Limits of the Articular Surface Approximation of the Human Knee Passive Motion Models</i>	226
Andrea Ottoboni, Vincenzo Parenti Castelli, Alberto Leardini	
<b>MM13 – MECCANICA DELLE MACCHINE: DINAMICA</b>	
<i>Comportamento non lineare di un albero con cuscinetti lubrificati</i>	227
Furio Vatta, Alessandro Vigliani	
<i>Dinamica non lineare di un giroscopio MEMS</i>	228
Francesco Braghin, Elisabetta Leo, Ferruccio Resta	
<i>Non Linear Dynamics of Spur Gears</i>	229
Francesco Pellicano, Marcello Faggioni, Giorgio Bonori	
<i>Sulla risposta in frequenza di sistemi meccanici con dissipazione non lineare</i>	230
Francesco Sorge	
<i>Studio di problemi vibro-acustici nelle pompe centrifughe per impiego automobilistico</i>	231
Riccardo Adamini, Massimo Antonini, Roberto Bussola, Rodolfo Faglia, Edoardo Piana, Monica Tiboni	
<i>Vibrazioni torsionali in alberi rotanti causati da cricche trasversali</i>	232
Nicolò Bachschmid, Paolo Pennacchi, Ezio Tanzi	
<b>SO8 – MECCANICA DEI SOLIDI: ELEMENTI FINITI E SOLIDI NON RESISTENTI A TRAZIONE</b>	
<i>BEM Simulations over Unbounded Domains</i>	233
Alberto Salvadori, Angelo Carini, Anna Feriani, Alessandra Aimi, Mauro Diligenti	
<i>Omogeneizzazione di murature storiche</i>	234
Antonio Gesualdo, Luciano Nunziantè	
<i>A Fast Gauss Transform Algorithm for the Finite Element Solution of Nonlocal Integral Models</i>	235
Elena Benvenuti, Antonio Tralli	

<i>Verifica di un criterio di rottura unificato per muratura e conglomerato da prove su calcestruzzo iperconfinato con FC</i>	236
Lionello Bortolotti, Silvia Carta, Daniela Cireddu	
<i>Stati di sforzo singolari per solidi non resistenti a trazione</i>	237
Massimiliano Lucchesi, Miroslav Šilhavy, Nicola Zani	
<i>A Class of Mixed Finite Elements for 2D Problems with General Non Linear Material Models</i>	238
Roberta Grimaldi, Daniela Addressi, Vincenzo Ciampi	
<b>MF3 – MECCANICA DEI FLUIDI</b>	
<i>Stabilità del flusso potenziale bidimensionale in prossimità del bordo di una superficie libera</i>	239
Paolo Luchini, Amilcare Pozzi	
<i>Simulazione numerica dell'interazione fluido-struttura con la tecnica lagrangiana SPH</i>	240
Carla Antoci, Mario Gallati, Stefano Sibilla	
<i>Analisi di stabilità e simulazione numerica diretta di flussi reagenti</i>	241
Francesco Salvatore, Francesco Picano, Paolo Gualtieri, Carlo Massimo Casciola	
<i>Meccanismo di formazione degli streaks</i>	242
Gabriele Gigli, Paolo Orlandi	
<i>Model of Air Entrainment in Central Jet Vertical Dropshafts in Ordinary Working Conditions</i>	243
Luca Ciaravino, Guelfo Pulci Doria	
<i>Leaky Waves in Spatial Stability Analysis</i>	244
Jan O. Pralits, Paolo Luchini	
<i>On the Irregular Evolution of the Self-similar Start-up Vortex</i>	245
Renato Tognaccini, Paolo Luchini	
<b>ST13 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: STOCASTICA</b>	
<i>Analisi limite elastica di strutture con resistenze aleatorie sotto azioni dinamiche campionate</i>	246
Salvatore Benfratello, Francesco Giambanco	
<i>Risposta esatta di strutture a parametri incerti soggette ad azioni deterministiche</i>	247
Giovanni Falsone, Gabriele Ferro	
<i>Identification of Multi Degree of Freedom Civil Systems under Base Lateral Random Forces by Using Potential Models</i>	248
Salvatore Benfratello, Liborio Cavaleri, Giacomo Navarra	
<i>Probabilistic Analysis of Uncertain Bernoulli-Euler Beams via Virtual Distortion Method</i>	249
Massimiliano Zingales	
<i>Utilizzo di tecniche possibilistiche nella meccanica delle strutture</i>	250
Stefano Gabriele, Fabio Brancaleoni, Claudio Valente	
<i>A Variational Approach for the Numerical Treatment of Convex Structural MDOF Systems under Stochastic Loading</i>	251
Michele Betti, Claudio Borri	
<b>MM14 – MECCANICA DELLE MACCHINE: SIMULAZIONE</b>	
<i>Sviluppo di uno strumento di simulazione per la valutazione della maneggevolezza di veicoli a due ruote</i>	252
Francesca Di Puccio, Paola Forte, Francesco Frenzo, Massimo Guiggiani, Walter Schiavi, Claudio Limone	

<i>A Dynamic Model for an Internal Combustion Engine Full-floating Piston Pin in Lubricated Conditions</i>	253
Marco Spuria, Dominique Bonneau, Yoann Le Baratoux, Pier Gabriele Molari	
<i>Nuovo algoritmo di simulazione dinamica per motori ultrasonici</i>	254
Simone Pirrotta, Rosario Sinatra, Alberto Meschini	
<i>Development of a Flight Simulator: Motion Cueing Algorithms</i>	255
Stefano Mauro, Giuliana Mattiazzo, Stefano Pastorelli, Massimo Sorli	
<i>Development of a Flight Simulator: Structure and Motion Platform</i>	256
Giuliana Mattiazzo, Stefano Mauro, Stefano Pastorelli, Massimo Sorli	
<b>MM15 – MECCANICA DELLE MACCHINE: ANALISI E CONTROLLO DELLE VIBRAZIONI</b>	
<i>Algoritmi per la blind source separation (BSS) di sorgenti vibrazionali nei sistemi meccanici</i>	257
Aleramo Lucifredi, Paolo Silvestri, Andrea Vaccari	
<i>Analisi bivariata di dati complessi di vibrazione: applicazione al monitoraggio di macchine rotanti</i>	258
Paolo Pennacchi, Andrea Vania	
<i>Calcolo dello sbilanciamento magnetico nelle macchine rotanti elettriche</i>	259
Paolo Pennacchi, Lucia Frosini	
<i>Analisi teorico sperimentale per la messa a punto di un modello di una macchina lavatrice</i>	260
Federico Cheli, Ferruccio Resta, Marco Belloli, Alessandro Tosi	
<i>Bilanciamento statico di manipolatore parallelo mediante pantografo</i>	261
Andrea Russo, Rosario Sinatra, Michele Lagagnina, Fengfeng Xi	
<b>SO9 – MECCANICA DEI SOLIDI: ANALISI E IDENTIFICAZIONE DEL DANNEGGIAMENTO</b>	
<i>An Elastic Interface Model with Nonlocal Integral Damaging Effects</i>	262
Guido Borino, Boris Failla	
<i>Damage in Domains and Interfaces</i>	263
Francesco Freddi, Michel Frémond	
<i>Simulazione di prove di adesione mediante un modello d'interfaccia a danno anisotropo</i>	264
Ilaria Monetto	
<i>Eddy Current-based Experimental Analysis to Investigate the Mechanism of Damage in Ductile Materials</i>	265
Michele Buonsanti, Domenico Costantino, Mario Versaci	
<i>Un approccio alle equazioni integrali applicato all'analisi non locale del danno</i>	266
Vincenzo Mallardo, Claudio Alessandri	
<b>MF4 – MECCANICA DEI FLUIDI: BIOFLUIDODINAMICA</b>	
<i>Numerical Simulations of the Flow in a Mechanical Heart Valve</i>	267
Antonio Cristallo, Roberto Verzicco, Elias Balaras	
<i>On the Left Ventricle Fluid Dynamics</i>	268
Federico Domenichini, Gianni Pedrizzetti	
<i>Studio sperimentale di un modello da laboratorio del ventricolo umano</i>	269
Giorgio Querzoli, Antonio Cenedese, Zaccaria Del Prete	
<i>Moto pulsante di liquidi pseudoplastici</i>	270
Irene Daprà, Giambattista Scarpi	

<i>Dynamics of the Vitreous Humour During Saccadic Eye Movements</i>	271
Chiara Cafferata, Rodolfo Repetto, Alessandro Stocchino	

**MINISIMPOSIO – NANOTECHNOLOGIES: BUILDING UP STRUCTURES AT THE NANO AND MESO-SCALES**

<i>Annullare i coefficienti di dilatazione termica dei laminati in composito: ottimizzazione con il metodo polare-genetico</i>	275
Angela Vincenti, Paolo Vannucci	
<i>Elasto-optic Properties of PbWO<sub>4</sub> by Means of Laser Techniques</i>	276
F. Daví	
<i>Computation of Strained Epitaxial Growth by Kinetic Monte Carlo</i>	278
Giovanni Russo, Peter Smereka	
<i>Numerical Analysis of Interface Problems</i>	279
Giulio Alfano, Luciano Rosati	
<i>Non-local Structural Interfaces</i>	280
Katia Bertoldi, Davide Bigoni, Walter J. Drugan	
<i>Macroscopic Effects of Atomic Modes in Quasicrystals</i>	281
Massimiliano Gei, Paolo Maria Mariano	
<i>The Polar Method as a Tool for the Analysis and Design of Plane Anisotropic Problems</i>	282
Paolo Vannucci	
<i>Nano-pores in Thermoelastic Materials</i>	283
Lucia Fiorino, Pasquale Giovine	
<i>Formulazioni deboli miste per solidi piani con microstrutture</i>	284
Paolo Venini, Matteo Bruggi	
<i>On-chip Tests for the Mechanical Characterization of Polysilicon at the Micro-scale</i>	285
Fabrizio Cacchione, Alberto Corigliano, Biagio De Masi, Caterina Riva	
<i>Dissipation-function Based Modeling of Shape Memory Effects</i>	286
Davide Bernardini, Thomas J. Pence	
<i>Flutter Instability in Elastoplastic Solids with Nonassociative Flow Rule: A Dynamical Interpretation</i>	287
Davide Bigoni, Andrea Piccolroaz, John R. Willis	

Giovedì 15 settembre

**ST14 – MECCANICA DELLE STRUTTURE**

<i>Subcritical Crack Propagation in Concrete Structures</i>	291
Fabrizio Barpi, Silvio Valente	
<i>A Variational Approach to Limit Analysis in Elastic Plastic Beams</i>	292
Giovanni Buratti, Gianni Royer-Carfagni	
<i>Comportamento di lastre di vetro stratificato</i>	293
Silvia Briccoli Bati, Giovanna Ranocchiali, Cristina Reale, Luisa Rovero	
<i>Valutazione della sicurezza di grandi dighe mediante analisi globale inversa e reti neurali artificiali</i>	294
Giulio Maier, Roberto Fedele, Bartosz Miller	
<i>Interazione fra fluido e struttura nell'analisi sismica di dighe in calcestruzzo</i>	295
Guido Borino, Francesco Parrinello	
<i>Algorithms for the Evaluation of the Ultimate Flexural Limit State of RC Sections</i>	296
Luciano Rosati	

**ST15 – MECCANICA DELLE STRUTTURE**

<i>Un modello lineare di trave curva per l'analisi delle oscillazioni galoppanti di cavi sospesi</i>	297
Angelo Luongo, Daniele Zulli, Giuseppe Piccardo	
<i>A Constitutive Model for Nonhomogeneous Nonlocal Elastic Material</i>	298
Aurora Pisano, Paolo Fuschi, Castrenze Poliziotto	
<i>Caratterizzazione di proprietà meccaniche e di stati tensionali con prove locali in situ e reti neurali artificiali</i>	299
Giulio Maier, Roberto Fedele	
<i>Identificazione di parametri costitutivi con durometro, calco, simulazione ed analisi inversa</i>	300
Enzo Josef Chiarullo, Massimiliano Bocciarelli, Gabriella Bolzon, Giulio Maier	
<i>Un approccio continuo all'analisi di stabilità aeroelastica di cavi sospesi in risonanza interna 1:2</i>	301
Angelo Luongo, Giuseppe Piccardo	
<i>Nanodynamics: Resonance of Boron Nanowires</i>	302
Lorenzo Calabri, Weiqiang Ding, Xinqi Chen, Kevin Kohlhaas, Nicola Pugno, Rodney Ruoff	
<i>Identificazione dei parametri autoregressivi di un modello ARMA vettoriale attraverso algoritmi evolutivi</i>	303
Loris Vincenzi, Marco Savoia	
<i>Nanotube Based NEMS</i>	304
Nicola Pugno	

**SO10 – MECCANICA DEI SOLIDI**

<i>Indentation Size Effect in Poly-crystalline Materials: A Fractal Geometry Interpretation</i>	305
Alberto Carpinteri, Simone Puzzi	
<i>Detection of a Rigid Inclusion in an Elastic Body by Boundary Measurements</i>	306
Antonino Morassi, Edi Rosset	
<i>Non-Isothermal Shear Band Localization in Finite-Deformation Crystal Plasticity</i>	307
Daniele Rosato, Christian Miehe, Antonio DeSimone	
<i>Analisi sperimentale del legno strutturale antico</i>	308
Mario Rosario Migliore, Felicita Ramundo, Giorgio Frunzio	
<i>Some Thoughts on the Motive Power of Chemical Transformations</i>	309
Roger Fosdick, Gianni Royer-Carfagni	
<i>Acoustic Emission Due to Compression of Brittle Materials: Friction vs Frictionless Boundary Condition</i>	310
Giuseppe Lacidogna, Nicola Pugno, Alberto Carpinteri	
<i>Multi-material Junctions with Functionally Graded Materials</i>	311
Marco Paggi, Alberto Carpinteri	
<i>Cyclic Micro-slip and Energy Dissipation on Elastic Rough Interfaces</i>	312
Mauro Borri-Brunetto, Stefano Invernizzi, Marco Paggi, Alberto Carpinteri	

**INDICI**

Indice degli Autori	315
Indice delle Keywords	319





## Nota introduttiva

Il XVII Congresso Nazionale dell'AIMETA torna a Firenze dopo 27 anni dal suo esordio nella nostra città e presso l'Università di Firenze. Nel 1978 fu la neonata Facoltà di Ingegneria ad organizzare il Convegno, sotto la guida di G. Augusti (con G. Sestini Presidente dell'Associazione). Oggi è ancora tale Facoltà, oramai nella sua piena "maturità giovanile", e quindi assai affermata e riconosciuta anche a livello internazionale, ad ospitare la comunità italiana di ricercatori ed esperti nelle scienze meccaniche.

Il presente volume riunisce l'impressionante quantità di contributi selezionati e raggruppati nei vari settori classici della meccanica teorica ed applicata, e provenienti da una vastissima comunità scientifica: a tutti gli Autori va il sincero ringraziamento del Comitato Organizzatore del Convegno. A tali settori classici si sono aggiunti temi di valenza interdisciplinare di notevole interesse e di alto contenuto innovativo: per questi sono stati proposti dei Minisimposi organizzati e coordinati dai promotori, ai quali desidero esprimere un particolare e sentito grazie.

Il Convegno, aperto da una relazione generale di indirizzo storico del Prof. P. Galluzzi, Direttore dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze, prosegue con una tavola rotonda iniziale in sessione plenaria, sul tema molto "intrigante": *Quale futuro per la Meccanica o quale Meccanica per il futuro?*, con la partecipazione di esperti di alto rango nei vari settori.

Il volume è articolato secondo 52 sessioni (plenarie e parallele) e contiene 290 lavori scientifici, i quali spesso riflettono una cooperazione internazionale.

Anche a nome dell'intero Comitato Organizzatore, desidero esprimere il sentito ringraziamento alla Facoltà (al Preside F. Angotti in particolare per il supporto all'organizzazione), a tutti i membri del Comitato Scientifico ed al suo Presidente, M. Primicerio, per il grande lavoro di selezione e di indirizzo scientifico che è stato prezioso per gli organizzatori. Uno specifico riconoscimento intendo rivolgere ai colleghi L. Facchini (Segretario) e G. Federici (Tesoriere), che hanno sostenuto il grave carico dell'organizzazione del programma del Convegno.

All'intera Segreteria (G. Montagnani, C. Serpieri, V. Sustik) un enorme "grazie" per il competente ed appassionato aiuto prestato.

Infine, ritengo doveroso ringraziare il nostro "Publisher", la Firenze University Press, in particolare la D.ssa C. Bullo, per la comprensione, il sostegno e l'aiuto qualificato al nostro lavoro ed i generosi sponsors di questo volume per il loro importante contributo finanziario.

Benvenuti a Firenze e benvenuti all'AIMETA 2005, con un augurio speciale di buona lettura.

*Claudio Borri, Prof. Ing., Dr.-Ing. h.c.  
Presidente del Comitato Organizzatore*



## Keynote Lectures

---

- Dimensional Response Analysis of Yielding Structures under Near Source Ground Motions* 3  
N. Makris
- On the Relationship between Gear Dynamics and Surface Wear* 4  
A. Kahraman



# Dimensional response analysis of yielding structures under near source ground motions

Nicos Makris

*Department of Civil Engineering, Structural Engineering Division*

*GR-26500 Patras, Greece*

*E-mail: nmakris@upatras.gr*

In this lecture a new way of estimating the inelastic response of yielding structures with behavior that can be approximated with the elastoplastic idealization is introduced. The proposed approach emerges from formal dimensional analysis and is liberated from the response of the elastic system.

With the proposed approach the normalized inelastic displacement is the function of only two (2) dimensionless parameters rather than three (3) parameters which are involved with the traditional approach where the inelastic response is associated with the elastic-system response.

The application of the proposed method hinges upon the existence of a distinct time scale and a length scale that characterize the most energetic component of the ground shaking. Such time and length scales emerge naturally from the distinguishable pulses which dominate a wide class of strong earthquake records; they are directly related with the rise time and slip velocity of faulting, and can be formally extracted with validated mathematical models published in the literature.

The most decisive feature of this work is that the inelastic response curves that result with the proposed approach assume similar shapes for different values of the normalized yield displacement. Because of this similarity the paper proposes a single inelastic response curve which offers directly the maximum inelastic displacement of the structure given the energetic pulse period and pulse amplitude of the ground shaking.

# On the relationship between gear dynamics and surface wear

Ahmet Kahraman

*Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA*

*E-mail: kahraman.1@osu.edu*

*Keywords:* gear dynamics, gear wear

In this study, two different dynamic models, a finite elements-based deformable-body model and a simplified discrete model, and a surface wear model are incorporated to study the interaction of surface wear and gear dynamic response. The proposed dynamic gear wear model includes both the influence of worn surface profiles on dynamic tooth forces and transmission error and the influence of dynamic tooth forces on wear profiles. This paper first introduces two dynamic models and a wear model separately. It then provides comparisons to dynamics and quasi-static wear experiments for validation of the models. The dynamics and wear models are then combined to study the interaction of wear and dynamics in linear and nonlinear response regimes. At the end, preliminary simulation results are provided to demonstrate the influence of dynamic effects on wear and the wear on the dynamic response of the system.

*Curriculum vitae:* Ahmet Kahraman is an Associate Professor of Mechanical Engineering at the Ohio State University. He received his Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Ohio State in 1990. From 1990 to 1999, he worked for General Motors as a senior research scientist, staff project engineer and Manager of Advanced Gear Systems Group at their Powertrain Group. In 1999, Dr. Kahraman moved to academia and formed Center for Gear Research at the University of Toledo, before moving to Ohio State in August 2003. His research focuses on several areas of power transmission and gearing including gear system design and analysis, gear and transmission dynamics, gear lubrication and efficiency, wear and fatigue life prediction, and test methodologies. Within last six years, he received in nearly \$2.5M in external funds from sponsors including GM, Borg Warner, Sikorsky, Bell Helicopter, Boeing, Saab, American Axle, NASA and OAI. He served as a consultant for several companies such as GM, John Deere, GE, Borg Warner, Eaton and Visteon. He authored 70 papers on gear research. He has supervised more than 30 research assistants. He is the chairman-elect of the ASME PTG Committee and was the Associate Editor of ASME Journal of Mechanical Design. He is a member of ASME, STLE and SAE.

# Lunedì 12 settembre

---

ST1 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: ELEMENTI FINITI	7
ST2 – MECCANICA DELLE STRUTTURE	12
MM1 – MECCANICA DELLE MACCHINE: INGRANAGGI	17
MM2 – MECCANICA DELLE MACCHINE	23
SO1 – MECCANICA DEI SOLIDI: DINAMICA E STABILITÀ	29
ST3 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: ELEMENTI FINITI	35
ST4 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: COMPOSITI	40
MM3 – MECCANICA DELLE MACCHINE: CONTATTO	44
MM4 – MECCANICA DELLE MACCHINE	50
SO2 – MECCANICA DEI SOLIDI: COMPOSITI	56





# Metodi misti per l'ottimizzazione topologica con vincoli sugli sforzi e materiali incomprimibili

Carlo Cinquini, Matteo Bruggi, Paolo Venini

*Dipartimento di Meccanica Strutturale, Università di Pavia, Italia*

*E-mail: {cinquini,matteo.bruggi,paolo.venini}@unipv.it*

*Parole chiave:* ottimizzazione topologica, elementi finiti misti, calcolo numerico

**SOMMARIO:** Vengono presentate alcune formulazioni per l'ottimizzazione topologica di sistemi piani basate su metodi agli elementi finiti misti. La motivazione principale risiede nella relativa semplicità con cui possono in tal modo essere imposti vincoli locali sugli sforzi agenti, vantaggio fondamentale rispetto ai metodi di letteratura basati su formulazioni agli spostamenti, che prescindono in generale dal valore dello sforzo locale. In più, una delle due formulazioni duali proposte è esente da locking nel caso di materiali incomprimibili consentendone così l'analisi e l'ottimizzazione, caratteristica questa non condivisa da alcuno dei metodi presenti in letteratura. Alcune simulazioni numeriche concludono il presente lavoro.

## *Riferimenti bibliografici:*

- Bendsoe M.P., Kikuchi N. (1988), "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71, pagg. 197-224.
- Brezzi F., Fortin M. (1991), *Mixed and Hybrid Finite Element Methods*, Springer, New York.
- Duysinx P., Bendsoe M.P., (1998), "Topology Optimization of Continuum Structures with Local Stress Constraints", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 43, pagg. 1453-1478.
- Nascimbene R., Venini P., (2002), "A new locking-free equilibrium mixed element for plane elasticity with continuous displacement interpolation", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191, pagg. 1843-1860.
- Rovati M., Veber D., Venini P., (2004), "Ottimizzazione Topologica in Presenza di Vincoli Locali sugli Sforzi", Atti XV Congresso Italiano di Meccanica Computazionale, GIMC 04', Genova.
- Sigmund O., (2001), "A 99 line topology optimization code written in MATLAB", *Struct. Multidisc. Optim.*, 21, pagg. 120-127.
- Venini P., Nascimbene R., (2003), "A new fixed-point algorithm for hardening plasticity based on nonlinear mixed variational inequalities", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 57, pagg. 83-102.

Carlo Cinquini    Professore Ordinario  
Matteo Bruggi    Dottorando  
Paolo Venini     Professore Associato

# Mixed Finite Elements for Piezoelectric Plates based on Unified Formulation

*Erasmus Carrera*<sup>1</sup>, *Marco Boscolo*, *Christian Fagiano*, *Alessandro Robaldo*,  
CASSEM Group<sup>2</sup>, Aerospace Department, Politecnico di Torino,  
E-mail: erasmo.carrera@polito.it

*Michele D'Ottavio*

Institute for Statics and Dynamics, University of Stuttgart, Germany  
E-mail: dottavio@isd.uni-stuttgart.de

*Keywords:* Finite Element, Mixed Methods, Piezoelectric Plates.

Smart systems are the candidate for next generation structures of aerospace vehicles as well as for some advanced products of automotive and ship industries. Piezoelectric materials are the most used in that framework. These materials are characterized by the so called 'direct' and 'inverse effect': an applied electrical potential induces mechanical stresses and vice-versa. In many of the recent applications, piezoelectric layers are employed in conjunction with composites layered structures. A smart structure is in this case obtained by embedding piezo-layers (sensors and/or actuators) in multilayered composite ones. The electro-mechanical modeling of multilayered structures embedding piezo layers is the subject of the present work. Classical theories already developed for traditional plates and shells can lead to large errors when applied to multilayered cases. Amendments are requested to these theories for an accurate evaluation of both electrical and mechanical response of these structures. Recent works have shown the suitability of Reissner Mixed Variational Theorem (RMVT). Furthermore, the Unified Formulation (UF) that has been developed by the first Author in earlier works and recently detailed in [1], permits the implementation of a large variety of two-dimensional modelings. By referring to the UF along with recent authors' findings, this paper extends the RMVT to coupled piezo-electric problems. Finite plate elements are developed in the linear elastodynamic case. The constitutive equations suitable for the RMVT applications are those derived by D'Ottavio and Kröplin in [2].

## References

- [1] Carrera E , 2003, *Theories and Finite Elements for multilayered plates and shells: A Unified compact Formulation with numerical assessment and benchmarking*. Archives of Computational Methods in Engineering, State of the art reviews, vol 10, pp 215-296
- [2] D'Ottavio M, Kröplin B, 2004, *An Extension of Reissner Mixed Variational Theorem to Piezoelectric Laminates*. submitted

<sup>1</sup>Corresponding author:Erasmus Carrera, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino, Italy

<sup>2</sup>CASSEM is a STREP EU project on Composite and Adaptive Structures: Simulation, Experimentation and Modeling.

# An efficient quadrilateral finite element for Reissner-Mindlin plates

Stefano de Miranda

*DISTART, University of Bologna, Italy*

*E-mail: stefano.demiranda@mail.ing.unibo.it*

Francesco Ubertini

*DISTART, University of Bologna, Italy*

*E-mail: francesco.ubertini@unibo.it*

*Keywords:* shear deformable plates, hybrid stress finite elements, linked interpolation, shear locking

This paper focuses on designing an efficient quadrilateral finite element for the analysis of Reissner-Mindlin plates with the following features: (1) it has four nodes, with three degrees of freedom per node, and involves only compatible displacement functions, (2) it is locking-free, (3) it passes all the patch tests, (4) it is readily implementable into existing finite element codes, being the resultant discrete equations in the standard form of assumed displacement finite elements.

With this in mind, the following steps have been taken. Motivated by the good results obtained using mixed formulations (see for example the recent paper by Zhang et al. (2004)), a mixed variational approach involving stresses and displacements as independent variables is adopted. Stress parameters are eliminated at the element level, so that requirements (1) and (4) can be met. However, in order to fulfill also requirements (2) and (3), special attention is devoted to the selection of displacement and stress approximations. As regard displacements, the so called linked interpolation for the transverse displacement field (Tessler & Hughes (1983), Auricchio & Taylor (1994)) is employed. The use of linking functions goes towards avoiding locking effects in thin-plate situations but does not suffice, in general, to remove such deficiency, since it accommodates the lack of consistency of the shear strains on the element boundary but not in its interior. Here, this drawback is circumvented by resorting to the hybrid stress approach. Assumed stresses are a priori constrained to satisfy the equilibrium equations within each element, so that the Hellinger-Reissner functional reduces to a hybrid functional which involves displacements acting on element boundaries only. This makes fully effective the linked interpolation and permits to meet both requirements (2) and (3). The stress approximation, chosen based on a rational approach in the spirit of the work by Yuan et al. (1993), is coordinate invariant, has the minimum number of stress modes and has been proved to yield a rank sufficient stiffness matrix.

The resulting element is stable, accurate, relatively insensitive to geometry distortions, easily implementable into existing finite element codes and computationally efficient.

## *References*

- Auricchio, F. & Taylor, R.L. 1994. A shear deformable plate element with an exact thin limit. *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.* 118:393-412.
- Tessler, A. & Hughes, T.J.R. 1983. An improved treatment of transverse shear in the Mindlin-type four-node quadrilateral element. *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.* 39:311-335.
- Yuan, K.Y., Huang, Y.S. & Pian, T.H.H. 1993. New strategy for assumed stresses for 4-node hybrid stress membrane element. *Int. J. Num. Meth. Engng.* 36:1747-1773.
- Zhang, C., Zhang, N., Song, Q. & Di, S. 2004. A 4-noded hybrid stress element with optimized stress for moderately thick and thin shallow shells. *Finite Elem. Analysis Design*; 40:691-709.

# Regularization of the boundary integral formulation for unconstrained contours

Francesco Freddi

*Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura, Università di Parma*  
E-mail: [freddi@nemo.unipr.it](mailto:freddi@nemo.unipr.it)

Gianni Royer-Carfagni

*Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura, Università di Parma*  
E-mail: [gianni.royer@unipr.it](mailto:gianni.royer@unipr.it)

*Keywords:* Symmetric-Galerkin BEM, unconstrained contours, uniqueness, rigid body motion.

The elastic solution in unconstrained bodies is defined up to an *infinitesimal* rigid body displacement (IRBD). In a numerical approach, the resulting stiffness matrix is inevitably singular, but this difficulty is traditionally solved by restraining the boundary with statically-determined constraints, conceived of in such a way that the elastic deformation of the boundary does not induce any constraint reaction but the IRBD is prevented. Problems are enhanced in the symmetric boundary integral formulation, especially in bodies with disjoint contours. If the boundary conditions on a whole connected boundary-component (CBC) are of the Neumann type, only comes the traction BIE into play for that contour. But this equation remains satisfied by the addition of any IRBD to the displacement field of that CBC, even if some other boundary portions are constrained. For, SG-BEM solutions can only be defined up to the IRBD of unconstrained CBCs, i.e., SG-BEM formulation itself is *insensitive* to the *relative* IRBD of disjoint contours. This inconvenience is not present in the elasticity theory, where compatibility with the material deformation uniquely determines the relative motion of the CBCs.

Here, a method is proposed where the singularity of the resulting pseudo-stiffness matrix is removed without introducing artificial constraints. The procedure uses an idea by Vêrchery (1990), originally proposed to regularize the equilibrium matrix of statically undetermined structures, and here adapted to the SG-BEM. Automatically-generated terms are added to the original pseudo-stiffness matrix while preserving its symmetry. The resulting system is no more singular, but its (unique) solution may differ from the true elastic solution in the IRBDs of the floating contours, which are recovered *a posteriori* using the displacement BIE. The advantages of the method are illustrated in representative examples.

## *References:*

Vêrchery, G. (1990), Régularisation du système de l'équilibre des structures élastiques discrètes, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 311, Série II, pp. 585-589.

*Curriculum vitae:* F. Freddi, born in 1975, received his civil engineering degree from the University of Parma in 2000, and his Ph.D. from the University of Bologna in 2004. He is presently post-doc associate in the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées in Paris. Gianni Royer-Carfagni is Professor of Scienza delle Costruzioni in the School of Architecture of the University of Parma.

# Modellazione di assemblaggi di pannelli mediante decomposizione del dominio ed analisi BEM

Leonardo Leonetti

*Dipartimento di Strutture, Facoltà di Ingegneria, Università della Calabria, Rende (CS)*

*E-mail: leonardo.leonetti@labmec.unical.it*

Maurizio Aristodemo

*Dipartimento di Strutture, Facoltà di Ingegneria, Università della Calabria, Rende (CS)*

*E-mail: aristodemo@labmec.unical.it*

*Parole chiave:* Decomposizione del dominio, elementi di contorno, elasticità piana.

I sistemi strutturali complessi possono essere suddivisi in regioni, caratterizzate da omogenee caratteristiche geometriche e meccaniche. La loro analisi può essere affrontata, in alternativa alle tecniche basate sull'assemblaggio globale del sistema, attraverso i metodi di decomposizione del dominio, che usano le risposte strutturali delle singole regioni per costruire la soluzione agendo iterativamente sulle variabili localizzate alle interfacce tra le regioni. Seguendo questa via è possibile, usando algoritmi di calcolo parallelo, sfruttare le notevoli risorse a basso costo rese disponibili dai cluster di calcolatori. Questo approccio è stato seguito da numerosi ricercatori che hanno proposto una serie di varianti per imporre le condizioni di continuità della soluzione nelle linee di interfaccia e per guidare il processo di rilassamento [1]. Un quadro di questi lavori, riguardanti essenzialmente problemi di potenziale, è presentato in [2] e [3].

Questo lavoro riguarda l'analisi elastica di strutture composte dall'assemblaggio di elementi bidimensionali modellati come stati elastici piani. Viene sviluppato un metodo di soluzione basato sull'imposizione in forma integrale delle condizioni di equilibrio alle interfacce tra le diverse regioni, formulate come problema di minimo. Il problema è vincolato dal soddisfacimento delle equazioni che impongono, attraverso la discretizzazione ad elementi di contorno, la soluzione del problema elastico e delle condizioni al contorno sulle singole regioni. L'algoritmo di minimizzazione è basato sulla tecnica del gradiente coniugato, valutando il gradiente della funzione obiettivo attraverso la soluzione di un problema aggiunto, definito sulle singole regioni, che richiede un basso costo computazionale. Il comportamento locale delle singole regioni è analizzato attraverso una discretizzazione ad elementi di contorno, resa efficiente dalla scelta di interpolazioni B-spline e dall'uso sistematico dell'integrazione analitica dei coefficienti del sistema.

Il lavoro contiene la formulazione del problema, con la suddivisione in regioni e la definizione del problema di minimo, la discussione dell'algoritmo di minimizzazione, con gli aspetti computazionali coinvolti, e alcuni test sulle prestazioni del metodo.

## *Riferimenti bibliografici:*

[1] Meric R.A., 2000, *Domain decomposition for Laplace's equation*, Comm. Numer. Meth. Engng, vol.16, pagg. 454-557.

[2] Rice J.R., Tsompanopoulou P., Vavalis E.A., 2000, *Interface relaxation methods for elliptic equations*, Appl. Numer. Math., vol.32, pagg. 219-245.

[3] Elleithy W.M., Tanaka M., 2003, *Interface relaxation algorithms for BEM-BEM coupling and FEM-BEM coupling*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., vol.192, pagg. 2977-2992.

# Murature in vetro strutturale. Una proposta per una passerella ad arco a Venezia

Gianni Royer-Carfagni

*Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura, Università di Parma*

*E-mail: gianni.royer@unipr.it*

Mirko Silvestri

*Ingegnere, EMBT Arquitectes Associats, Barcellona*

*E-mail: mirko.silvestri@gmail.com*

*Keywords:* Vetro strutturale, ponti ad arco, murature in vetro, duttilità, strain softening.

Il vetro può raggiungere notevoli resistenze meccaniche a compressione, ma la sua fragilità intrinseca ne rende difficile l'uso in ambito strutturale, ove la capacità di adattamento plastico è un requisito essenziale. Per aumentarne la duttilità, si è studiato un sistema composito formato da "mattoni" in vetro float, stratificato e non, collegati fra loro con commenti di resine epossidiche fotoindurenti. La "muratura in vetro" così ottenuta è resa plastica al pari della muratura ordinaria in laterizio dai possibili adattamenti dei commenti di "malta epossidica". Prove di compressione sono state effettuate sul pacchetto portante, formato da mattonelle di vetro ordinario e/o stratificato (con PVB), solidarizzate con ricorsi di resine o impilate a secco. I test sui cubi "a secco" hanno evidenziato resistenze a compressione dell'ordine dei 200 MPa, accompagnate però da un'estrema fragilità caratterizzata da una rottura "esplosiva". Se i mattoni sono di vetro stratificato con PVB, la resistenza a compressione è dell'ordine dei 100 MPa, ma aumenta anche la duttilità con un ben marcato ramo *strain-softening*. La capacità di adattamento plastico e la duttilità aumentano notevolmente se i mattoni di vetro sono solidarizzati con commenti di resina epossidica. Nel comportamento post-critico svolge un ruolo fondamentale l'azione di frettaggio dovuta al materiale interposto (resina e/o PVB).

Ispirandosi anche a un recente progetto di Santiago Calatrava, la buona resistenza a compressione e l'ottenuta duttilità sono state combinate nello studio di fattibilità di una passerella pedonale ad arco incastrato, di circa 50 metri di luce, per l'attraversamento del Canal Grande in sostituzione dell'attuale Ponte dell'Accademia. Rispetto alla soluzione di Calatrava, che affianca agli elementi in vetro una struttura principale portante in acciaio, questa proposta si distingue per la concezione del vetro come materiale completamente autonomo nella sua funzione statica, nella quale i pochi inserti metallici svolgono al più un ruolo accessorio di collegamento. Da un punto di vista teorico, è stata confermata la possibilità pratica di realizzare ponti pedonali ad arco in vetro per l'attraversamento di medie luci. Naturalmente lo studio non è da considerarsi esaustivo, ma attraverso la trasparenza del materiale si intravedono chiare possibilità di sviluppo per future soluzioni innovative.

*Curriculum vitae:* Mirko Silvestri, vincitore del premio di laurea OICE nel 2004, ha svolto ricerche sul vetro strutturale presso l'Università di Parma ed è attualmente impiegato presso lo studio EMBT Arquitectes Associats di Barcellona. Gianni Royer-Carfagni insegna Scienza delle Costruzioni presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Parma.

# Axis-Symmetrical Solutions for $n$ -plies Functionally Graded Circular Cylinders: Application to Optical Fibre Sensors

Massimiliano Fraldi

*Faculty of Engineering, University of Napoli "Federico II", Italy*  
*E-mail: fraldi@unina.it*

Federico Carannante

*Faculty of Engineering, University of Napoli "Federico II", Italy*  
*E-mail: gacarann@libero.it*

Luciano Nunziante

*Faculty of Engineering, University of Napoli "Federico II", Italy*  
*E-mail: nunsci@unina.it*

*Keywords:* functionally graded materials, optical fibre sensor, elastic solutions

**SUMMARY:** In the framework of the Theory of Elasticity, Functionally Graded Materials, FGM, are mostly treated as non-homogeneous materials with material constants that vary continuously or in a piece-wise continuous manner along one spatial direction. In particular, cylindrical shells are often used as basic structural components in engineering applications. The present work show an analytical approach to find exact elastic solutions for FGMs, constituted by  $n$  cylindrical hollow homogeneous phases and a central core. The assumption of axis-symmetrical boundary conditions yields to construct a mathematical strategy based on a power series expansion of the Love's bi-harmonic scalar function  $\chi^{(i)}(r, x_3)$  for each  $i$ -th phase and then imposing the continuity conditions on displacements and stresses at the interfaces. By following this way, the system of differential equations was analytically solved in *cascade* to produce a set of linear and algebraic equations. Moreover, the attained solutions are utilized for studying the mechanical behaviour of the interaction between *optical fibres*, coating and support, in case these fibres are attached to structures in order to determine continuous profiles of strain measurements. This one is a problem today posed by the advances in importance of the elastic equilibrium experimental techniques of modern monitoring.



# Progetto ottimale di strutture discrete con vincoli sulla deformazione plastica

Francesco Giambanco, Luigi Palizzolo, Alessandra Caffarelli  
Università degli Studi di Palermo  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica  
Viale delle Scienze, 90128 – Palermo – Italia  
fgiamban@diseg.unipa.it , palizzol@diseg.unipa.it , alecaffa@msn.com

Parole chiave: progetto ottimale, adattamento elastico, plasticità alternata, delimitazioni, duttilità.

## SOMMARIO

Recentemente è stata proposta [1] una nuova formulazione del problema di progetto ottimale di strutture elastoplastiche, discretizzate in elementi finiti, soggette ad una combinazione di carichi fissi e ciclici, applicati in modo quasi statico ed amplificati da diversi valori dei moltiplicatori, con lo scopo di caratterizzare la risposta stazionaria della struttura sia in condizioni di normale esercizio che in condizioni di carico eccezionale. La formulazione non considera la storia di carico che conduce le azioni al loro valore finale né la risposta strutturale durante la fase transitoria.

I progetti ottimali ottenuti adottando tale formulazione mostrano, in fase stazionaria, alcune interessanti caratteristiche: la struttura esibisce un comportamento elastico in condizioni di carico di esercizio, è esposta ad adattamento plastico in condizioni di carico eccezionali e, infine, è scongiurato il raggiungimento del collasso incrementale e/o istantaneo. Inoltre, è stato possibile ottenere strutture caratterizzate da una grande quantità di dissipazione plastica, essendo comunque nulla l'accumulazione plastica nel ciclo, ed, ancora, attraverso tale formulazione è possibile limitare l'entità di una qualunque misura della deformazione plastica che si genera durante la fase stazionaria in alcuni elementi opportunamente scelti. Tali buone caratteristiche non sono, però, sufficienti a scongiurare il pericolo che qualche elemento durante la fase transitoria esibisca delle deformazioni plastiche non compatibili con i suoi limiti di duttilità ovvero con i requisiti di funzionalità strutturale. D'altra parte la formulazione proposta tiene conto in maniera esplicita dei carichi che caratterizzano la fase stazionaria mentre non viene presa in considerazione la storia dei carichi in fase transitoria né le conseguenti eventuali deformazioni plastiche.

Obiettivo del presente lavoro è quello di proporre una nuova formulazione del problema di progetto di minimo volume precedentemente descritto, che prevede l'introduzione di prefissati limiti sulle deformazioni plastiche che si generano anche durante il transitorio, indipendentemente dall'effettiva storia dei carichi. Le applicazioni numeriche elaborate mostrano risultati interessanti e confermano le aspettative teoriche della formulazione.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Giambanco F., Palizzolo L., Caffarelli A., "Computational procedures for plastic shakedown design of structures", *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*, **28** (5), 317-329 (2004).

## CURRICULA VITAE

Francesco Giambanco, Professore Ordinario di Scienza delle Costruzioni, Facoltà di Architettura.

Attività di ricerca: analisi elastoplastica, ottimizzazione strutturale, tecniche di delimitazione.

Luigi Palizzolo, Professore Associato di Scienza delle Costruzioni, Facoltà di Architettura.

Attività di ricerca: analisi elastoplastica, ottimizzazione strutturale, tecniche di delimitazione.

Alessandra Caffarelli, Dottore di Ricerca in Ingegneria delle Strutture.

Attività di ricerca: ottimizzazione strutturale, tecniche di delimitazione.

# Curve di maggiorazione dell'errore per l'analisi sismica di oscillatori elasto-plastici attraverso il modello rigido-plastico

Maria Cristina Porcu\*

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Cagliari, Italy*

*E-mail: mcporcu@unica.it*

Giorgio Carta\*\*

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Cagliari, Italy*

*E-mail: gcarta@unica.it*

*Keywords: analisi sismica, modello rigido-plastico, maggiorazione errore*

I massimi spostamenti plastici di strutture duttili soggette a forti sollecitazioni sismiche possono essere valutati attraverso un modello rigido-plastico, con notevoli vantaggi legati alla maggiore semplicità di questo modello rispetto a quello elasto-plastico. Come è stato dimostrato in Paglietti e Porcu (2001) il modello rigido-plastico dipende, infatti, per un dato terremoto, solo dal rapporto

$F_y/M$  tra la forza al limite elastico e la massa dell'oscillatore. Tale modello, però, fornisce quasi sempre una stima in difetto dei massimi spostamenti plastici di un oscillatore elasto-plastico e ciò può comportare, in certi casi, errori assoluti elevati. Per poter utilizzare il modello rigido-plastico anche in tali casi, venne proposta in Paglietti e Porcu (2001) una formula per la maggiorazione degli errori assoluti. Tale formula, che risulta piuttosto complessa, dipende, oltre che dalle caratteristiche dell'oscillatore elasto-plastico, anche da un parametro  $\Delta t$ , che ha le dimensioni di tempo e che può essere determinato solo attraverso prove numerico-sperimentali.

Nel presente lavoro sono stati determinati i valori del parametro  $\Delta t$  al variare della violenza del terremoto e del rapporto  $F_y/M$ . Tali valori sono stati ricavati attraverso una serie di prove numeriche su modelli rigido-plastici ed elasto-plastici, considerando 76 terremoti e determinando per ciascuno di essi la differenza tra gli spostamenti plastici massimi dei due modelli in funzione del rapporto  $F_y/M$  e del periodo proprio  $T$  dell'oscillatore elasto-plastico. I risultati ottenuti hanno condotto ad una modifica migliorativa della formula succitata e hanno consentito di costruire delle curve di maggiorazione dell'errore assoluto dalle quali si determina agevolmente la correzione da apportare al massimo spostamento del modello rigido-plastico per stimare in modo cautelativo il massimo spostamento plastico di un oscillatore elasto-plastico. Tali curve si applicano a terremoti di diversa violenza ed oscillatori elasto-plastici qualsiasi. Per tale motivo, esse rappresentano un efficace strumento pratico per la verifica sismica degli oscillatori elasto-plastici.

## *Riferimenti Bibliografici:*

Paglietti, A., Porcu, M.C. 2001. *Rigid-plastic approximation to predict plastic motion under strong earthquakes*, J. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 30, pagg.115-126.

\* PhD, Ricercatore Settore Scienza delle Costruzioni

\*\* Laureato, Dottorando in Ingegneria Strutturale

# Caratterizzazione di un dispositivo magnetoreologico mediante prove sperimentali

Michela Basili

*Facoltà di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Italia  
E-mail: michela.basili@uniroma1.it*

Maurizio De Angelis

*Facoltà di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Italia  
E-mail: maurizio.deangelis@uniroma1.it*

Emanuele Renzi

*Facoltà di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Italia  
E-mail: emanuele.renzi@uniroma1.it*

*Keywords:* controllo strutturale semi attivo, dispositivi magnetoreologici, sperimentazione.

Tra le diverse tecnologie innovative del *Controllo Strutturale*, Housner et al. 1997, in questo studio si affronta quella del controllo *Semi Attivo*, che si attua per mezzo della modificazione, in tempo reale e sulla base di un algoritmo di controllo, delle caratteristiche meccaniche di opportuni dispositivi, i quali interagiscono *passivamente* con il resto della struttura.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di caratterizzare meccanicamente un dispositivo semi attivo magnetoreologico mediante prove sperimentali. La sperimentazione è stata svolta presso il laboratorio di Materiali e Strutture del Dip. di Ingegneria Strutturale e Geotecnica della facoltà di Ingegneria di Roma “La Sapienza”, su di un dispositivo semiattivo prodotto dalla Lord Corporation, (modello RD-1005-3). I test sono stati svolti su due configurazioni: la N. 1, costituita dal solo dispositivo e la N. 2, costituita dal dispositivo in serie ad un elemento elastico. Con i dati sperimentali ottenuti, è stata eseguita l'identificazione di due modelli opportunamente selezionati, ricavando le leggi di variazione dei parametri costitutivi dipendenti dal voltaggio. Rispettivamente il modello di Bingham permette, grazie alla sua semplicità, un facile utilizzo in sistemi più complessi, d'altra parte non è capace di cogliere taluni aspetti tipici del comportamento sperimentale, ben interpretati dal secondo modello di Bouc-Wen modificato, che tuttavia risulta maggiormente complesso a causa dell'elevato numero di parametri che lo definiscono. Infine, sono state fornite indicazioni sul reale funzionamento dell'algoritmo di controllo utilizzato e tempi di ritardo elettrici del dispositivo.

## *References:*

G.W.Housner, L.A.Bergman, T.K.Caughey, A.G.Chassiakos, R.O.Claus, S.F.Masri, R.E.Skelton, T.T.Soong, B.F.Spencer, J.T.P.Jao Sept. 1997. *Structural Control: Past, Present and Future*, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 9, 897-971.

*Curriculum vitae:* Michela Basili, laureata in Ingegneria civile nel 2003, è al secondo anno di Dottorato in Ingegneria delle Strutture presso l'Università degli Studi di Roma “La Sapienza”.

# Sull'enumerazione di meccanismi a vite

M. Cavacece

Università di Cassino, Cassino  
E-mail:cavacece@unicas.it

E. Pennestrì

Università di Roma Tor Vergata, Roma  
E-mail:pennestri@mec.uniroma2.it

L. Vita

Università di Roma Tor Vergata, Roma  
E-mail:vita@ing.uniroma2.it

*Keywords:* Number synthesis, Enumeration of mechanisms, Screw mechanisms

L'analisi della struttura cinematica dei meccanismi costituisce un importante settore di ricerca, soprattutto ai fini dell'individuazione sistematica di innovative soluzioni costruttive. In epoca moderna, è a F. Reuleaux che si deve l'impostazione su basi scientifiche del problema dell'analisi della struttura cinematica dei meccanismi, della loro rappresentazione in forma schematica, nonché della rispettiva enumerazione.

Nel presente articolo la tecnica di enumerazione proposta da R. Kraus [2, 3], apparentemente poco nota sia a livello accademico che industriale, viene modificata per applicarla alle catene cinematiche con parametro  $\lambda$  di mobilità ridotto. La tecnica fu originariamente impostata così da consentire un'enumerazione manuale di catene cinematiche. Ciò è comprensibile poiché agli inizi degli anni '50, epoca in cui furono pubblicati i testi citati, non erano diffusamente disponibili mezzi di calcolo automatico. Tuttavia, la generalità della trattazione non ne soffre affatto, per cui, grazie ad opportune modifiche, può essere impiegata anche nell'impostazione di metodologie di enumerazione di catene cinematiche etichettate fondate sull'impiego di procedure computerizzate.

Con riferimento al problema di cui al titolo del presente lavoro, si osserva che i risultati dell'enumerazione di meccanismi a vite costituiti da 3 membri, originariamente presentati da W. Jahr, sono stati più recentemente riportati anche da P.W. Jensen.

Richiamata la tecnica di enumerazione di Kraus valida per meccanismi spaziali e piani, si procede all'enumerazione di catene cinematiche a 4 e 5 membri ad un g.d.l. in cui siano presenti coppie elicoidali, problema che non sembra sia stato affrontato in maniera sistematica. Per la verifica dell'isomorfismo tra catene cinematiche ci si è avvalsi del noto criterio del polinomio caratteristico (e.g. [1]), applicato però ad una matrice delle adiacenze i cui elementi contengono le informazioni circa la natura delle coppie cinematiche presenti. Una volta individuate le catene cinematiche si sono enumerati i meccanismi non isomorfi che da queste discendono. L'assenza di isomorfismo tra inversioni cinematiche di una medesima catena cinematica è stata verificata tramite il test di Mruthyunjaya e Raghavan [4].

La metodologia presentata è valida per l'enumerazione di catene cinematiche e meccanismi caratterizzati da parametro di mobilità  $\lambda = 2$ . A tale categoria appartengono i meccanismi con membri animati da moto piano ed in cui siano presenti coppie cinematiche rotoidali, prismatiche ed elicoidali.

L'enumerazione qui descritta ha condotto alla definizione di meccanismi la maggior parte dei quali non erano noti in letteratura.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Di Benedetto, A., Pennestrì, E., *Introduzione alla Cinematica dei Meccanismi*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, vol.I, 1993.
- [2] Kraus, R., *Getriebelehre*, Verlag Technik, Berlin 1951.
- [3] Kraus, R., *Gründlagen des Systematischen Getriebeaufbaus*, Verlag Technik, Berlin 1952.
- [4] Mruthyunjaya, T.S., Raghavan, M.R., *Computer-Aided Analysis of the Structure of Kinematic Chains, Mechanism and Machine Theory*, vol.19, 1984, pp.357-368.

# Analisi delle curvature di ruote dentate mediante un nuovo approccio

Francesca Di Puccio, Marco Gabiccini, Massimo Guiggiani

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, Università di Pisa, Italia*

*E-mail: dipuccio@ing.unipi.it, m.gabiccini@ing.unipi.it, guiggiani@ing.unipi.it*

*Keywords:* Teoria dell'ingranamento, Analisi delle Curvature, Ruote Spiroconiche, Face-milling

Lo studio delle curvature di una superficie è un aspetto classico e consolidato della geometria differenziale; tuttavia, la sua applicazione alle ruote dentate non è immediata, in quanto le equazioni della superficie della ruota generata sono disponibili generalmente come un sistema piuttosto complesso, costituito da una famiglia di superfici e dall'*equation of meshing*. Sono stati pertanto cercati approcci alternativi (generalmente di tipo cinematico) per l'analisi delle curvature degli ingranaggi, tra cui quello proposto dal Prof. F.Litvin (Litvin 1989 e 2004) è senza dubbio il più conosciuto. In un recente lavoro (Di Puccio et al., 2005) gli autori hanno rielaborato la teoria dell'ingranamento facendo uso di un nuovo approccio che sfrutta i vettori anziché le loro componenti; evitando così la sequenza di sistemi di riferimento utilizzata in altri metodi si è ottenuta una formulazione più compatta e più semplice. Il presente studio propone l'applicazione di questo nuovo approccio all'analisi delle curvature di una ruota generata con macchine utensili a controllo numerico di ultima generazione, denominate UMC (Universal Motion Concept). Tali macchine consentono una ampia generalità del moto di generazione, descritto come un moto spaziale con assi mobili sia per l'utensile che per lo sbozzato, con rapporto di trasmissione non costante, trattato solo in pochi studi in letteratura e con metodi molto diversi (screw, matrici). Per descrivere più fedelmente il movimento dell'utensile con le UMC, si è considerata la possibilità di variare la posizione dell'asse di rotazione rispetto al pignone in funzione del parametro di moto.

Viene inoltre presentata una applicazione dell'approccio proposto all'analisi della rettificazione di ruote spiroconiche con il processo detto di *face-milling*. La semplificazione della trattazione teorica ha consentito tempi di calcolo 200 volte più rapidi per l'analisi delle curvature basata sul metodo proposto rispetto a quella fatta con il metodo tradizionale, entrambi implementati in un codice *Mathematica*.

## *References:*

Litvin, F. L., *Theory of Gearing*, NASA Reference Publication 1212, 1989.

Litvin, F.L., *Gear Geometry and Applied Theory*, PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, 2004.

Di Puccio, F., Gabiccini, M., Guiggiani, M., Alternative formulation of the theory of gearing, *Mechanism and Machine Theory*, 40(5):613–637, 2005.

*Curriculum vitae:* Massimo Guiggiani (Professore ordinario di Meccanica Applicata), Francesca Di Puccio (ricercatrice di Meccanica Applicata) e Marco Gabiccini (dottorando di ricerca in Ingegneria Meccanica) da alcuni anni costituiscono un gruppo di ricerca nel settore ingranaggi, in particolare per aspetti legati alla generazione e all'analisi del contatto. Il gruppo, di cui fa parte anche Alessio Artoni (dottorando di ricerca in Ingegneria Meccanica), collabora attivamente con Avio S.p.A.

# An algorithm for the generation of the pitch surfaces of skew-gears

Giorgio Figliolini

*DiMSAT, University of Cassino, Italy*

*E-mail: figliolini@unicas.it*

Jorge Angeles

*Dept. of Mechanical Engineering & CIM, McGill University, Canada*

*E-mail: angeles@cim.mcgill.ca*

*Keywords:* Skew-gears, dual algebra, kinematics, screw motion, pitch surfaces

Skew-gears allow the transmission of motion between skew axes and, hence, the transmission between parallel or intersecting axes become particular cases. The synthesis of skew gears is a very complex task and few results can be found in literature.

This paper deals with the synthesis of any pair of external and internal skew gears, which is formulated through the application of the dual algebra and the Principle of Transference. The spatial motion of the Euclidean space is transferred in the dual space in order to obtain a simplified spherical motion, as for common bevel gears. Thus, the relative screw motion is analyzed by determining the position of the instant screw axis and the angular and sliding velocities. The hyperboloid pitch surfaces of the driving and driven gears are synthesized and several examples regarding circular and non-circular skew-gears are shown.

## *References:*

1. Figliolini G., Angeles J. 1999. *On the geometry of the kinematic synthesis of spatial gears with skew axes*, XIV Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica ed Applicata, Como, Meccanica delle Macchine - Paper No.31.
2. Angeles J. 1994. *The Application of dual algebra to kinematic analysis*, In J. Angeles and E. Zakhariiev Editors, Computational Methods in Mechanisms, Kluwer Academic Publishers, pp.101-108.
3. Figliolini G., Angeles J. 2003. *The synthesis of elliptical gears generated by shaper-cutters*, ASME Journal of Mechanical Design, 125 (4), pp. 793-801.
4. Figliolini G., Migliozi P., 2004. *Synthesis of the pitch cones of N-lobed elliptical bevel gears*, 28<sup>th</sup> ASME Biennial Mechanisms and Robotics Conference, Salt Lake City, Utah (USA), DETC2004-57378.

*Curriculum vitae:* Giorgio Figliolini è professore associato di Meccanica Applicata alle Macchine presso l'Università di Cassino dove svolge attività didattica e di ricerca in diversi settori della Meccanica delle Macchine e dell'Automazione Industriale.

# Danneggiamento superficiale nelle ruote dentate: studio teorico-sperimentale

Roberto Bassani, Enrico Ciulli, Enrico Manfredi, Giovanni Pugliese

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione, Università di Pisa, Italia*

*E-mail: bassani@ing.unipi.it, ciulli@ing.unipi.it, e.manfredi@ing.unipi.it, g.pugliese@ing.unipi.it*

Alessandro Polacco

*Avio-Propulsione Aerospaziale S.p.A., Rivalta (To), Italia*

*E-mail: alessandro.polacco@aviogroup.com*

*Keywords:* usura, ruote dentate, rugosità superficiale, sperimentazione, codici numerici

Il presente articolo nasce da una collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione (DIMNP) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa ed Avio-Propulsione Aerospaziale S.p.A. su varie attività di ricerca riguardanti diverse problematiche connesse con la progettazione di trasmissioni per impiego aerospaziale. Parte di questa collaborazione è stata focalizzata sulla modellazione del contatto tra i denti di ruote ingrananti e sullo sviluppo di metodologie innovative per la previsione di fenomeni di usura come il *macro-micropitting* e lo *scuffing*. Durante il corso delle prove effettuate presso il Centro Ricerche Trasmissioni Meccaniche a tecnologia avanzata (CRTM) attivo presso il DIMNP sono stati analizzati i fianchi attivi dei denti di alcune coppie di ruote, al fine di studiare l'evolversi del loro stato superficiale nel corso delle prove e di poter identificare eventuali danneggiamenti superficiali. I dati raccolti sono stati utilizzati per mettere a punto dei modelli numerici per lo studio dell'ingranamento tra ruote dentate. È stata anche effettuata una descrizione qualitativa e quantitativa dei danneggiamenti e sono stati discussi i risultati ottenuti.

## *Bibliografia:*

Amorena, M., et al. 2004. *Experimental analysis of spur gear surface damage*, Proceedings of ICEM12 - 12th International Conference on Experimental Mechanics.

Polacco, A., et al. 2004. *Investigation on thermal distress and scuffing failure under micro EHL conditions*, Proc. IUTAM Symposium on Elastohydrodynamics and Microelastohydrodynamics.

*Roberto Bassani* è Professore Ordinario di Meccanica Applicata alle Macchine all'Università di Pisa. Principale attività di ricerca: tribologia (lubrificazione, attrito e usura).

*Enrico Ciulli* è Professore di Meccanica Applicata alle Macchine all'Università di Pisa. Principale attività di ricerca: tribologia (in particolare attrito e lubrificazione).

*Enrico Manfredi* è Professore Ordinario di Costruzioni di Macchine all'Università di Pisa dove svolge attività di ricerca sulla resistenza a fatica dei materiali e dei componenti meccanici.

*Alessandro Polacco* è Allievo Dottorando in Ingegneria Meccanica presso l'Università di Pisa. Attività di ricerca: problemi tribologici di coppie non conformi. Dal 2004 lavora in Avio-Prop. Aersp.

*Giovanni Pugliese* è Allievo Dottorando in Ingegneria Meccanica presso l'Università di Pisa dove svolge attività di ricerca sulla progettazione di ingranaggi cilindrici.

# Effetti di accoppiamento tra vibrazioni flessionali e torsionali in macchine rotanti in presenza di trasmissioni ad ingranaggi

Paolo Pennacchi

*Politecnico di Milano, Dip. di Meccanica, Via La Masa 34, 20156 Milano*

*E-mail: paolo.pennacchi@polimi.it*

Andrea Vania

*Politecnico di Milano, Dip. di Meccanica, Via La Masa 34, 20156 Milano*

*E-mail: andrea.vania@polimi.it*

*Keywords:* macchine rotanti, trasmissioni ad ingranaggi, vibrazioni torsionali, diagnostica

La presenza di trasmissioni ad ingranaggi nella linea d'alberi di macchine rotanti comporta l'accoppiamento tra le vibrazioni radiali e quelle torsionali. Nel caso di alberi montati su cuscinetti a strisciamento la presenza di inevitabili disallineamenti e sbilanciamenti residui della macchina può causare delle elevate vibrazioni radiali. Gli effetti di accoppiamento causati da una trasmissione ad ingranaggi può quindi comportare delle vibrazioni torsionali non trascurabili [1-3].

Nel presente lavoro sono illustrati alcuni risultati ottenuti con un modello di simulazione che ha consentito di studiare le vibrazioni radiali e torsionali associate agli ordini di armonica più bassi (1 x giro, 2 x giro), ossia le componenti armoniche delle vibrazioni che possono essere causate dai guasti più frequenti che si verificano nelle macchine rotanti. Il modello utilizzato è risultato anche molto efficace per effettuare delle analisi di sensibilità del comportamento dinamico del sistema al variare di alcuni parametri meccanici e geometrici delle trasmissioni ad ingranaggi e dei cuscinetti

## *Bibliografia:*

- 1 Bard C., Remond D., Play D. 1995. *Comparison of Experimental Measurement and Numerical Calculation of Gear Transmission Error Under Various Dynamic Conditions*, 9<sup>th</sup> IFToMM World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milan, Italy, Vol. 1, pp. 595-591.
- 2 Du S., Randall R.B. 1998 *Prediction and Measurement of Dynamic Gear Transmission Error*, 5<sup>th</sup> Int. IFToMM Conf. on Rotor Dynamics, Darmstadt, Germany, pp. 323-337.
- 3 ia S., Howard I., Wang J. 2002 *The Dynamic Modelling of Multiple Pairs of Gears in Mesh Including Friction and Geometrical Errors*, 6<sup>th</sup> Int. IFToMM Conf. on Rotor Dynamics, Sydney, Australia, pp. 698-705.

*Curriculum vitae:* Paolo Pennacchi, professore associato di Meccanica Applicata alle Macchine presso il Politecnico di Milano. I settori di ricerca sono: vibrazioni meccaniche, dinamica dei rotori, diagnostica, monitoraggio, identificazione dei sistemi meccanici, cinematica, biomeccanica.



# Sul rendimento dei rotismi dei differenziali per autoveicoli

Ettore Pennestrì

Roberto Stefanelli\*

Pier Paolo Valentini

Leonardo Vita

*Università di Roma Tor Vergata, Dip.to Ing. Meccanica, Via del Politecnico, 1 – 00133 Roma*

*\* Autore di riferimento: e-mail stefanelli@ing.uniroma2.it*

*Parole chiave:* differenziale autobloccante, rendimento meccanico.

Viene presentata un'analisi parametrica del rendimento meccanico per diverse tipologie di differenziale per autoveicoli.

Com'è noto, il differenziale è il dispositivo usato per trasferire la coppia motrice, resa disponibile dal cambio di velocità di un autoveicolo, alle ruote motrici permettendo, nel contempo, la libera rotazione delle stesse, mentre il veicolo percorre una traiettoria curvilinea. Esistono diverse tipologie di differenziale: open, completamente bloccabile e self-locking. Il differenziale di tipo open (montato su assale) fornisce la stessa coppia motrice alle due ruote: la capacità di trazione è quindi condizionata dalla ruota con minore aderenza. Nel differenziale bloccabile è possibile trasferire tutta la coppia motrice alla ruota con migliore aderenza, ma con l'introduzione di un effetto sottosterzante del veicolo. Il differenziale autobloccante unisce le doti di guidabilità dell'open con quelle di trazione del bloccabile.

Si può dimostrare che un differenziale genera uno sbilanciamento delle coppie disponibili alle ruote motrici pari alla coppia  $C_f$ . Nel differenziale open tale coppia è trascurabile. Nel differenziale self-locking, invece, è inserito un dispositivo atto a generare una coppia  $C_f$  confrontabile con quella in ingresso. Tale dispositivo dissipa potenza generando una diminuzione del rendimento. Lo studio del rendimento del differenziale di tipo open è condotto secondo quanto proposto da [Pennestrì, Valentini, 2001] e trascurando la potenza persa per attrito nelle coppie rotoidali. Per lo studio del rendimento del differenziale self-locking tipo ZF® gli autori hanno utilizzato l'analisi dinamica presentata da [Greco, 2003] opportunamente modificata per considerare gli effetti dell'accelerazione laterale del veicolo sul rendimento. Per la stima del rendimento del differenziale Torsen® gli autori propongono un originale modello, basato sull'analisi dinamica presentata da [Scoscini, 2004].

## *Bibliografia:*

- Greco, G. (2003), "Analisi di alcune Tipologie di Differenziali Autobloccanti e loro effetti sulla Dinamica del Veicolo", tesi di laurea, Università di Pisa.
- Pennestrì, E., Valentini P.P. (2001), "A Review of Formulas for the Mechanical Efficiency Analysis of Two Degrees-of-Freedom Epicyclic Gear Trains", *Journal of Mechanical Design*, Vol 125, N.3, pagg. 602-608.
- Scoscini, R., 2004, "Analisi e Modellazione Numerica di un Differenziale di tipo Torsen®", tesi di laurea, Università di Roma.

# A unified model for metal and dry hybrid V-belt CVTs

Giuseppe Carbone, Luigi Mangialardi, Leonardo Soria  
*I Facoltà di Ingegneria, Politecnico di BARI, Italy*  
*E-mail: carbone@poliba.it, lmm@poliba.it, soria@poliba.it*

Giacomo Mantriota  
*II Facoltà di Ingegneria, Politecnico di BARI, Italy*  
*E-mail: mantriota@poliba.it*

*Keywords:* CVT, shifting dynamics, metal and dry hybrid V-belt, continuously variable transmission.

In this paper a unified treatment is proposed to describe *metal* and *dry hybrid V-belt CVTs* in steady and transient running conditions. A one-dimensional model of the belt is proposed, which takes into account the influence of belt longitudinal stiffness on the mechanics of the variator, whereas the transversal compliance is shown to be negligible. The local groove width is not constant due to elastic deformation of the pulleys and clearance between the moving pulley and the rotating shaft. The particular shape of the deformed pulley is described on the basis of the Sattler model (1999) who showed that the variation of the groove angle and of the local groove width of the pulley can be easily described by simple trigonometric formulas. Friction forces are modeled on the basis of the Coulomb friction hypothesis. In particular the model is able to predict the variator dynamics in non self-locking conditions, i.e. when the Coulomb friction coefficient  $\mu$  is lower than the tangent of pulley half-opening angle  $\beta$  ( $\mu < \tan \beta$ ).

The authors show that belt deformations have an influence on CVT mechanical behavior, which is not so significant in comparison to that of the pulley bending and tilting. In particular, in the case of metal belt, also the longitudinal stiffness of the belt can be neglected; whereas this is not true in the case of dry hybrid belt.

## *References:*

- Carbone G., Mangialardi L., Mantriota G., Soria L., 2005, *A unified treatment of V-belt CVT mechanics*, in writing.
- Carbone G., Mangialardi L., Mantriota G., 2005, *The influence of pulley deformation on the shifting mechanism of metal belt CVT*, ASME Journal of Mechanical Design, 127, 103-113.
- Carbone G., Mangialardi L., Mantriota G., Soria L., 2004, *Performance of a City Bus equipped with a Toroidal Traction Drive*, IASME Transactions, vol. 1 (1), pp. 16-23.
- Carbone G., Mangialardi L., Mantriota G., 2002, *Fuel Consumption of a Mid Class Vehicle with Infinitely Variable Transmission*, SAE Journal of Engines 110 (3), pp. 2474-2483.
- Sattler H., 1999, *Efficiency of Metal Chain and V-Belt CVT*, Proc. CVT '99 Congress, Eindhoven, The Netherlands, pp. 99-104.
- Miyazawa T., Kuwabara S., Fujii T., Nonaka K., 1999, *Study on transmitting mechanisms for CVT using a dry hybrid V-belt: numerical simulation of transmitting forces and pulley thrusts at steady and transitional states*, JSAE Review, Vol. 20 (1), pp. 61-66.

# Progetto preliminare di trasmissioni CVT con due vie in parallelo

Alberto Beccari

*Dipartimento di Meccanica, Università di Palermo, Italia*

*E-mail: beccari@dima.unipa.it*

Marco Cammalleri

*Dipartimento di Meccanica, Università di Palermo, Italia*

*E-mail: cammalleri@dima.unipa.it*

Parole chiave: CVT, doppia via, trasmissioni meccaniche.

In questo lavoro si mostra come il funzionamento di una trasmissione di potenza meccanica attraverso due vie in parallelo, di cui una dotata di variatore di velocità angolare, dipenda direttamente, piuttosto che dai parametri costruttivi della trasmissione medesima, da altre grandezze, qui definite aperture  $A$ ,  $A_v$ ,  $A_i$ , rappresentative rispettivamente:

- del campo di variazione del rapporto di trasmissione complessivo della trasmissione CVT che si vuole realizzare;
- del campo di variazione del rapporto di trasmissione del variatore che si ha a disposizione per realizzarla;
- del campo di variazione della velocità angolare dell'albero di ingresso del variatore.

Per data terna di valori  $A$ ,  $A_v$ ,  $A_i$  risulta cinematicamente indifferente il collegamento scelto fra il portatreno, il solare e la corona dei rotismi epicicloidali ai vari rami della trasmissione e se questi collegamenti siano effettuati direttamente con giunti o mediante riduttori a rapporto fisso. Possono cioè realizzarsi molteplici soluzioni costruttivamente differenti ma cinematicamente affatto equivalenti e soprattutto “viste” dal variatore nel medesimo modo. Si potrà scegliere dunque quella di più facile realizzazione.

## *Curriculum vitae di Alberto Beccari*

Nato a Bologna il 27 Febbraio 1942. Laureato in ingegneria meccanica presso il Politecnico di Torino nel 1966. Professore universitario straordinario dal 1980, quindi ordinario presso la Facoltà di Ingegneria dell'Ateneo di Palermo, SSD Ing-Ind/08 Macchine. Direttore dell'Istituto di Macchine della medesima Facoltà dal 1982 al 1998. Direttore del Dipartimento di Meccanica e Aeronautica della medesima Facoltà nel triennio 2000-2002.

## *Curriculum vitae di Marco Cammalleri*

Nato a Gela (CL) il 28/05/71. Maturità Classica nell'a.s. 1989/90. Laurea in Ingegneria Meccanica nell'a.a. 1996/97 presso l'Università di Palermo. Collaboratore del DIMA di Palermo negli a.a. 1998/99 e 1999/00. Contratto di tutorato con la Facoltà di Ingegneria di Palermo nell'a.a. 1999/00. Ricercatore per il SSD Ing-Ind./13 Meccanica Applicata alle Macchine dal 01/07/2000. Professore affidatario di Meccanica Applicata alle Macchine presso la Facoltà di Ingegneria di Palermo dall'a.a. 2001/02.

# Studio di una macchina semiautomatica per la legatura sul campo degli ortaggi a foglia larga

Mario M. Foglia

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale, Politecnico di Bari, Italia*

*E-mail: mm.foglia@poliba.it*

Angelo Gentile

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale, Politecnico di Bari, Italia*

*E-mail: agentile@poliba.it*

Giulio Reina

*Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università di Lecce, Italia*

*E-mail: giulio.reina@unile.it*

*Keywords:* progettazione funzionale, macchine agricole, automazione agricola, macchine agevolatrici

**SOMMARIO:** Nel presente lavoro si riporta l'attività svolta nel settore delle macchine agricole dedicate alla lavorazione sul campo, da effettuare prima della raccolta, di alcune piante a foglia larga, come indivia e lattuga. Attualmente, queste colture, soprattutto qualora prodotte in grandi quantitativi, sono sottoposte ad un processo di legatura, detto imbiancamento, durante la fase di maturazione sul campo. Tale trattamento consente un miglioramento del sapore del prodotto oltre ad un controllo del periodo di maturazione. In alcuni casi, si procede a due fasi successive di legatura. Per coltivazioni intensive, la legatura è effettuata ancor oggi, manualmente a mezzo di elastici. Esclusivamente per piccoli appezzamenti di produzione, le piante sono legate utilizzando corde di raffia o plastica.

Il lavoro qui riportato presenta la fase di studio preliminare e di progettazione di un carrello manuale con dispositivo elettro-meccanico per la legatura semiautomatica delle piante a foglia larga. Il progetto ha considerato come caratteristiche i costi di realizzazione e di esercizio del macchinari. Saranno descritti alcuni particolari progettuali per la macchina.

## *Bibliografia:*

Kanemitsu M., Yamamoto K., Shibano Y., Goto Y., Suzuki M. 1993. *Development of a Chinese Cabbage Harvester (Part I)*, JSAM, 55-5, 133-140.

Sistler F.E. 1987. *Robotics and Intelligent Machines in Agriculture*. IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-3 (1): 3-6.

Jongen W. 2002. *Fruit and Vegetable Processing - Improving Quality*, Woodhead Publishing.

Srivastava A K, Goering C E, Rohrbach R P. 2000. *Engineering Principles of Agricultural Machines*, American Society of Agricultural Engineers, Michigan, ISBN 0-929355-33-4.

Witney B. 1988. *Choosing and Using Farm Machines*, Longman, ISBN 0- 582-45600-2.

Waldron K.J. and Kinzel G.L. 2004. *Kinematics, Dynamics and Design of Machinery*, John Wiley & Sons.

# A Vision-based Cutting System for Fennel Postharvest Processing

Mario Foglia, Angelo Gentile, Annalisa Milella

*Department of Management and Mechanical Engineering, Politecnico of Bari, Italy*

*E-mail: mm.foglia@poliba.it, agentile@poliba.it, milella@poliba.it*

Giulio Reina

*Department of Innovation Engineering, University of Lecce, Italy*

*E-mail: giulio.reina@unile.it*

**Keywords:** Machine Vision, Agricultural Robotics, Vegetable Identification, Postharvest processing

**SUMMARY:** In the last few years automated and intelligent systems have been increasingly adopted in agriculture in order to improve productivity and efficiency. Computer Vision plays a critical role in this field. This paper describes recent and current work at the Politecnico of Bari in collaboration with the University of Lecce in the field of automation of postharvest processes of vegetables with high market value and production rate. Specifically, a vision-based system is described for the automated cutting of harvested fennel. The functional design of the cutting mechanism is described, based on two asynchronous fourbar linkages, which allow to perform a double cut of the fennel in order to remove parts of the plant unfit for the market, i.e. root and leafy parts. The locations of the cutting lines along the plant are provided by a real-time vision-based module, which exploits intelligent color filtering. We call the visual algorithm the Fennel Visual Identification (FVI). Detailed experiments are described in order to assess the performances of the visual algorithms in terms of accuracy, repeatability and robustness to lighting conditions and noises. It is shown that the proposed system could be potentially applied to automate the cutting process of fennel in order to improve quality and efficiency.

## *References:*

- [1] Edan Y., and Rogozin V. 1992. *Robotic Melon Harvesting: Prototype and Field Tests*, ASAE Paper No. 94-3073, ASAE St. Joseph, MI 49085.
- [2] Nagata M. and CAO Q. 1998. *Study on Grade Judgment of Fruit Vegetables Using Machine Vision*, Japan Agricultural Research Quarterly, Vol. 32 No.4.
- [3] Åstrand B. and Baerveldt A. 2002. *An Agricultural Mobile Robot with Vision-Based Perception for Mechanical Weed Control*, Autonomous Robots, 13, pp. 21-35.
- [4] Chen Y.-R., Chao K., Kim M.S. 200. *Machine Vision Technology for Agricultural Applications*, Computers and Electronics in Agriculture, 36: 173-191.
- [5] Milella A., Reina G., Foglia M., and Gentile A. 2004. *Computer Vision Applications in Agricultural Robotics*. 11th IEEE Inter. Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Macau.

# Identificazione sperimentale dei coefficienti dinamici di uno smorzatore a squeeze-film magnetoreologico

Costantino Carmignani, Paola Forte, Paolo Badalassi

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, Università di Pisa, Italia*

*E-mail: carmi@ing.unipi.it, p.forte@ing.unipi.it, badapaolo@libero.it*

*Parole chiave:* identificazione sperimentale, funzioni modulanti, smorzatore magnetoreologico, dinamica dei rotori

Negli ultimi anni c'è stata una crescente attenzione nei confronti dei fluidi magnetoreologici (MR), che reagiscono ai campi magnetici con variazioni di viscosità e rigidità, per la loro applicazione in dispositivi semi-attivi anche nel campo del controllo delle vibrazioni. Presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione dell'Università di Pisa è stato realizzato uno smorzatore a squeeze-film MR per alberi rotanti, controllabile attivamente agendo sul campo magnetico che attraversa il meato fluido. Un controllo di tipo classico presuppone tuttavia la completa conoscenza del modello dinamico dello smorzatore e la sua validazione sperimentale. E' stata quindi progettata un'apparecchiatura, interfacciata con il banco prova esistente, finalizzata a validare il modello teorico dello smorzatore e identificarne i relativi parametri, al variare della frequenza di eccitazione e dell'intensità della corrente. Il sistema di misura è costituito da trasduttori di spostamento e da una cella di carico triassiale montata tra smorzatore e basamento in modo da misurare direttamente le forze esercitate dal meato sull'albero. Sulla base della misura di tali forze e della risposta dinamica del rotore all'applicazione di una forza rotante sincrona, dovuta allo sbilanciamento, è possibile determinare i coefficienti dinamici di rigidità, smorzamento e massa aggiunta. I primi risultati mostrano la particolare importanza, nel campo di funzionamento considerato, dei coefficienti di rigidità e smorzamento diretti.

## *Riferimenti bibliografici:*

Balestrino A., Landi A., Sani L. 2000. *Parameter identification of continuous systems with multiple input time delays via modulating functions*, IEE Proc. D, Contr. Theory Appl., Vol.147:19-27.

Carmignani C., et al. 2003. *Controllo vibrazionale semi-attivo di un rotore flessibile tramite smorzatore a squeeze-film magnetoreologico*, Proc.AIAS 2003, Salerno, Italy, Vol.CD: 1-10.

Kim K.-J., Lee C.-W. 2004. *Design and modeling of semi-active squeeze film damper using magnetorheological fluid*, 7th Int. Conf. on Motion and Vibration Control, Vol.CD:1-11.

*Curriculum vitae:* C.Carmignani è professore ordinario di Costruzione di Macchine, autore di più di 100 pubblicazioni focalizzate principalmente su elementi finiti, materiali e dinamica strutturale su cui ha pubblicato anche un libro di testo.

P.Forte è professore associato di Costruzione di Macchine, autrice di circa 70 pubblicazioni principalmente sulla dinamica dei rotori.

P.Badalassi si è laureato nel 2005 in Ingegneria Informatica a Pisa, discutendo una tesi sul controllo semi-attivo di un rotore mediante smorzatore magnetoreologico.

# Diagnosi ed identificazione di un disallineamento di un giunto in una macchina rotante reale

Paolo Pennacchi

*Politecnico di Milano, Dip. di Meccanica, Via La Masa 34, 20156 Milano*

*E-mail: paolo.pennacchi@polimi.it*

Andrea Vania

*Politecnico di Milano, Dip. di Meccanica, Via La Masa 34, 20156 Milano*

*E-mail: andrea.vania@polimi.it*

*Keywords:* macchine rotanti, vibrazioni, diagnostica, identificazione di guasti.

Il presente lavoro illustra l'applicazione di metodologie diagnostiche basate sull'uso di modelli matematici di simulazione aventi come obiettivo l'identificazione di guasti in macchine rotanti e la predizione del comportamento vibratorio. In generale, la tecnica di identificazione dei guasti utilizzata, così come molte altre documentate in letteratura, consentono di simulare gli effetti dei malfunzionamenti più comuni tramite opportuni sistemi di eccitazioni equivalenti applicate ad alcuni dei nodi del modello ad elementi finiti della linea d'alberi della macchina. Il contenuto armonico e la tipologia delle eccitazioni equivalenti dipende dalle caratteristiche del guasto ipotizzato.

L'identificazione del guasto, della sua entità e della sua posizione assiale lungo la linea d'alberi può essere ottenuta minimizzando l'errore tra le vibrazioni misurate a diverse velocità di rotazione e le corrispondenti vibrazioni fornite dal modello di simulazione [1,2].

Le potenzialità della metodologia utilizzata sono state convalidate mediante l'analisi delle vibrazioni sperimentali di un impianto di cogenerazione da 50 MW che era soggetto ad un disallineamento. I buoni risultati che sono stati ottenuti attraverso questa indagine dimostrano che le tecniche più avanzate di Condition Monitoring e di Fault Symptom Analysis possono essere integrate da metodologie diagnostiche basate sull'uso di modelli matematici di simulazione allo scopo di garantire una più completa analisi dello stato di salute delle macchine e di fornire alcune importanti informazioni diagnostiche richieste dall'attuazione di politiche di manutenzione predittiva.

## *Bibliografia:*

- 1 Platz, R., Markert, R., *Fault Models for On-line Identification of Malfunctions in Rotor Systems*, Proc. of the 4<sup>th</sup> Int. Conference on Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, 2001, Compiègne (France), 2001, pp. 435-446.
- 2 Bachschmid, N., Pennacchi, P., Vania, A., *Identification of Multiple Faults in Rotor Systems*, "Journal of Sound and Vibration", 2002, Vol. 254, No.2, pp. 327-366.

*Curriculum vitae:* Paolo Pennacchi, professore associato di Meccanica Applicata alle Macchine presso il Politecnico di Milano. I settori di ricerca sono: vibrazioni meccaniche, dinamica dei rotori, diagnostica, monitoraggio, identificazione dei sistemi meccanici, cinematica, biomeccanica.

# The dynamic behaviour of solids in incremental nonlinear elasticity: perturbations and integral equations

Davide Bigoni

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università di Trento, Italy*

*E-mail: bigoni@ing.unitn.it*

Domenico Capuani

*Dipartimento di Architettura, Università di Ferrara, Italy*

*E-mail: d.capuani@unife.it*

*Keywords:* nonlinear elasticity, pre-stressed solids, singular fundamental solution, shear bands

The dynamic behaviour of pre-stressed, elastic orthotropic and incompressible materials is considered in the time-harmonic regime. In the Biot [1965] constitutive framework, infinite-body, dynamic Green's functions and boundary integral equations for incremental displacements and in-plane incremental hydrostatic stress, have been obtained by the authors (Bigoni and Capuani, 2005) for small isochoric and two-dimensional deformation superimposed upon a given nonlinear elastic and homogeneous strain. A perturbation in terms of a pulsating dipole can be therefore obtained and employed to analyse material instabilities arising near the boundary of ellipticity loss.

Results presented in the present work provide a basis for the analysis of propagation of dynamic disturbances near the boundary of loss of ellipticity. Depending on the level of pre-stress and anisotropy, wave patterns are shown to emerge, with focussing of signals in the direction of shear bands. Varying the direction of the dynamic perturbation excites different wave patterns, which tend to degenerate to families of plane waves parallel to the shear bands, when the elliptic boundary is approached.

Another possibility related to the finding of a Green's function is the formulation of a boundary element technique for the solution of incremental boundary value problems. For quasi-static deformation, this technique was proved to possess certain advantages related for instance to the treatment of the incompressibility constraint with respect to other numerical techniques, such as finite element methods. Now the development of the technique in dynamics requires the finding of new boundary integral equations. While the integral equation for incremental displacements does not formally change with respect to the quasi-static case, a generalization of the integral representation for incremental in-plane hydrostatic stress has been obtained by Bigoni and Capuani (2005). The reader is referred to this paper for the framework of equations.

## *References:*

Bigoni D., Capuani D. (2005), "Time-harmonic Green's function and boundary integral formulation for incremental nonlinear elasticity: dynamics of wave patterns and shear bands", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **53**, 1163-1187.



# On the dynamic response of flexible walls retaining a dissipative, dried or fluid-saturated porous media

Luca Lanzoni

*Dipartimento di Scienze e Metodi dell'Ingegneria, Università di Modena e Reggio Emilia, Italia*

*E-mail: llanzoni@unimore.it*

Enrico Radi

*Dipartimento di Scienze e Metodi dell'Ingegneria, Università di Modena e Reggio Emilia, Italia*

*E-mail: eradi@unimore.it*

Antonio Tralli

*Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, Italia*

*E-mail: atralli@ing.unife.it*

*Keywords:* seismic analysis, dynamic response, retaining wall, viscoelasticity, poroelasticity

A simple and reliable method is presented for the seismic analysis of a flexible wall retaining a layer of a fluid-saturated viscous and poroelastic soil. A viscous version of the linear poroelastic Biot model is adopted for the description of the soil dissipative behavior. The response of the soil wall system under harmonic loadings is firstly analyzed. Then, the response to generic seismic excitation is obtained by using the method of Discrete Fourier Transform (FFT) from the superposition of the contribution of each harmonic component of the ground acceleration spectrum. The analysis of the dynamic response obtained for different wall flexibilities and mechanical soil properties, in terms of the amplitude and distribution of pressures and associated forces acting on the wall, allowed to assess the relative importance of the various parameters involved on the seismic response of the system.

The obtained solution is approximated since it does not exactly satisfy the vanishing of shear tractions and pore pressure on the free surface of the retained soil layer. However, it gives a sufficiently accurate evaluation of the dynamics pressures and total force acting on the wall. It must be remarked that only the effects of seismic excitations are considered in this work. Therefore, the obtained solution represents the sole dynamic increment consequent to the seismic excitation, which must be added to the static solution obtained under dead and gravity loads.

The analysis of the harmonic response is performed in closed form, looking at the solution of the equation of motion in the form of a linear combination of the natural modes of vibration for an infinite soil layer, which actually corresponds to a sine series decomposition. Next, the response of the soil wall system to generic seismic excitations is obtained by using the method of Discrete Fourier Transform from the superposition of the contribution of each harmonic component of the ground acceleration spectrum. In contrast with pseudostatic methods, which take into consideration just a single parameter of the seismic excitation, namely the ground peak acceleration, the proposed method is able to account also for the frequency content of the ground acceleration and for the dynamic properties and dissipative behavior of the soil.

# A homogenized model for dynamic analysis and vibration control of piezoactuated rotationally periodic structures

Paolo Bisegna<sup>a</sup> and Giovanni Caruso<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Department of Civil Engineering, University of Rome "Tor Vergata", Italy*

<sup>b</sup> *ITC-CNR, Italy*

*E-mail: g.caruso@ing.uniroma2.it*

**Keywords:** rotationally periodic structures, homogenization, vibration control, piezoelectric actuators, electric networks

Rotationally periodic structures are commonly employed in many technological applications, e.g. satellite antennae, rotors and turbine bladed-disks. The periodic arrangement of identical substructures implies that, for any eigenmode, all the substructures exhibit the same vibration amplitude with different phases. This feature can be exploited in the dynamic analysis, enabling significant simplifications (Shen, 1994). An important issue concerning rotationally periodic structures is to control their vibrations. Some traditional typologies of passive damping devices have been proposed, essentially obtained by adding frictional dampers and viscoelastic damping treatments at the local substructure level. More recently, Wang et al. (1999) proposed to employ piezoelectric actuators, which turn out to be very suitable when size and weight constraints on the controlled structure prevent from the use of the traditional actuators.

In this paper, a broadband vibration control for rotationally periodic structures, composed of many piezoactuated beams clamped to a ring basement, is investigated. It is obtained by connecting the piezoelectric actuators to purely passive periodic electric networks (Bisegna et al., 2005). A homogenization technique is employed to derive a simple analytical model of the electromechanical coupled structure, useful both for the dynamical analysis and for the design and simulation of the passive vibration control scheme. The simulation results show that the proposed passive control technique is effective for the multimodal vibration damping of rotationally periodic structures.

## *References:*

- Bisegna, P., Caruso, G. and Maceri, F. 2005. *Optimized electric networks for vibration damping of piezoactuated beams*, Journal of Sound and Vibration, in press.
- Shen, J., 1994. *Vibration of rotationally periodic structures*, Journal of Sound and Vibration, 172, 459-470.
- Tang, J. and Wang, K.W. 1999. *Vibration control of rotationally periodic structures using passive piezoelectric shunt networks and active compensation*, Journal of Vibration and Acoustics, 121, 379-390.

*Curriculum vitae:* Giovanni Caruso is graduated in Mechanical Engineering and Mathematics. He got a doctoral degree in Structural Mechanics in 2000. Presently, he is researcher at ITC-CNR. His main research interests are: modelling and vibration control of piezoactuated structures; biomathematics.

# Softening and snap-back instability in superplastic deformation

Marco Paggi

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino*

*E-mail: marco.paggi@polito.it*

Giorgio Zavarise

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino*

*E-mail: giorgio.zavarise@polito.it*

Alberto Carpinteri

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino*

*E-mail: alberto.carpinteri@polito.it*

**Keywords:** Micro-structured composites; Snap-back instability; Superplasticity; Interface debonding; Finite element method.

The mechanical behavior of micro-structured composites has been experimentally and theoretically proven to be strongly dependent on the size of the reinforcement. In other words, keeping constant the reinforcement volumetric fraction and the mechanical properties of the constituent materials, size effects on the mechanical response are observed by varying the diameter of the inclusion. From the technological point of view, an important example where this size effect is noticed is represented by superplasticity (Langdon, 1995).

Instability phenomena occurring in the microstructure of micro-structured composites are numerically investigated in this paper. To this aim, an interface constitutive law is proposed to describe both decohesion and contact at bi-material interfaces. These formulations are implemented in the FE code FEAP. Then, by applying dimensional analysis (Carpinteri, 1989), the nondimensional parameters governing the macroscopic response of the composite are identified. According to this model, transverse debonding with respect to the fiber/particle direction is simulated and the transition from snap-back instability in case of coarse inclusion diameters to a stable mechanical response for finer reinforcement is quantified. These results provide a possible quantitative explanation to the role played by the size of the reinforcement on the instability phenomena experimentally observed during superplastic deformation.

## *References:*

- Carpinteri A. 1989. Cusp catastrophe interpretation of fracture instability. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 37, 567-582.
- Langdon T.G. 1995. Mechanisms of superplastic flow. In N. Ridley ed., *Superplasticity: 60 Years after Pearson*, The Institute of Materials, London, 9-24.

*Curriculum vitae:* Marco Paggi is Post-Doctoral Research Fellow, Giorgio Zavarise is Associate Professor of Structural Mechanics and Alberto Carpinteri is the Chair of Structural Mechanics at the Politecnico di Torino.

# Stability of material interfaces

Massimiliano Gei

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università degli Studi di Trento, Italia*

*E-mail: mgei@ing.unitn.it*

*Keywords:* interface, bending stiffness, residual stress, instability.

A material interface is a surface embedded in a solid endowed with intrinsic elastic properties associated with extensibility and, possibly, bending stiffness. It shares several features with the notion of surface coating proposed by Gurtin and Murdoch [1975], extended by Steigmann and Ogden [1997] and adopted in the analysis of Gei and Ogden [2002]. The concept of material interface is particularly suitable to characterise the transition region between two bonded bodies, that is not merely a surface separating one side to another, but, rather, a real inter-phase with peculiar properties. An example may be the residual stresses that arise in bonding processes involving the use of thin films deposited between two layers or the mechanical properties of adhesive joints in composite materials.

From the viewpoint of the formulation of a mechanical boundary-value problem, a material interface requires continuity of displacements between the two sides and a jump in the traction vector that depends on the characteristic of the interface.

Stability in the sense of limits to the uniqueness of solutions to quasi-static boundary-value problems is investigated for a material interface embedded in an infinite elastic solid. The condition of instability is explicitly determined. Differently from the classical Stoneley problem, it is a polynomial in the wavenumber of the critical mode, of degree two for membrane-like interface, of degree four when bending stiffness is taken into account. Then, unstable configurations strongly depend on the relative stiffness of the interface with respect to that of the bulk materials and to the sign and intensity of residual stress. When bending stiffness is accounted for, stable configurations with compressive residual stress exist.

## *References:*

- Gei, M., Ogden, R.W. (2002), "Vibration of a surface-coated elastic block subject to bending", *Mathematics and Mechanics of Solids*, 7, 607-628.
- Gurtin, M.E., Murdoch, A.I. (1975), "A continuum theory of elastic material surfaces", *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 57, 291-323.
- Steigmann, D.J., Ogden, R.W. (1997), "Plane deformations of elastic solids with intrinsic boundary elasticity", *Proceedings of the Royal Society of London*, A453, 853-877.

# On the possibility of shear driven Taylor-like instabilities in nonlinear elastostatics

Roger Fosdick

*Department of Aerospace Engineering and Mechanics, University of Minnesota, Minneapolis, USA*

*E-mail: fosdick@aem.umn.edu*

Pilade Foti

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Bari, Italy*

*E-mail: p.foti@poliba.it*

Salvatore Marzano

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Bari, Italy*

*E-mail: s.marzano@poliba.it*

*Keywords:* nonlinear elasticity, isotropic material, bifurcation

The motivation for the present paper stems from the famous classical fluid dynamics problem for the *Taylor* instability of Couette flow. This concerns the emergence of instabilities in the flow of a viscous fluid confined between concentric cylinders rotating with different angular velocities. In particular, because of the presence of the convected acceleration term in the equations of motion, for a critical value of the differential rotating speed there appears a stacking of contrarotative cells with a consequent formation of toroidal rolls in the fluid in the gap between the cylinders.

In this work, we consider the possibility of a “Taylor-like” bifurcation from a simple shear to a periodic twist deformation when an infinitely long planar block of compressible isotropic elastic material is subjected to a relative simple shear of a critical amount at its boundaries. We emphasize in advance that for the present problem the occurrence of instabilities is due to nonlinearities in the constitutive equation, rather than the destabilizing effect of the centrifugal force as in the case of rotating fluids.

We formulate a particular mixed boundary-value problem having the simple shear deformation as a fundamental equilibrium solution and determine additional solutions of the equilibrium problem which bifurcate from the simple shear by solving the corresponding adjacent equilibrium equations. In particular, we specialize the set of possible bifurcating displacement fields to a suitable class of periodic displacements which allow us to reduce the set of partial differential equations resulting from the adjacent linearization of the basic equilibrium equations to a set of linear second order ordinary differential equations.

We consider a special strain-energy function for a homogeneous, isotropic elastic solid and show that there exists a “critical” value of the applied shear which allows for the emergence of a non-zero bifurcating periodic solution; such a field would appear essentially as a periodic twist deformation superposed upon the simple shear, with the twist taking place in planes perpendicular to the direction of primary finite shear.

*References:*

Taylor G. I. 1923. *Stability of a viscous fluid contained between two rotating cylinders*, Phil. Trans., A 223 : 289-343.

Lockett F. J., Rivlin R. S. 1968. *Stability in Couette flow of a viscoelastic fluid. Part I*, Journal de Mecanique, 7: 475-498.

# Analisi ad elementi di contorno di travi a sezione mista soggette a taglio e torsione

Daniele Gaspari

*Dipartimento di Strutture, Facoltà di Ingegneria, Università della Calabria, Rende (CS)*

*E-mail: daniele.gaspari@labmec.unical.it*

Maurizio Aristodemo

*Dipartimento di Strutture, Facoltà di Ingegneria, Università della Calabria, Rende (CS)*

*E-mail: aristodemo@labmec.unical.it*

*Parole chiave:* Sezioni miste, taglio, torsione, elementi di contorno, analisi per sottodomini.

Le tecnologie recenti utilizzano di frequente travi a sezione mista, realizzate attraverso l'accoppiamento di materiali diversi. Oltre alle classiche travi in acciaio e calcestruzzo, questa circostanza riguarda in senso più ampio la modellazione dei materiali compositi. Il problema della sola torsione per sezioni composite è stato più volte analizzato usando tecniche numeriche differenti, mentre gli effetti tangenziali dovuti a sollecitazioni di taglio, di modellazione meno immediata, non sono stati sufficientemente indagati.

Questo lavoro presenta un modello ad elementi di contorno per l'analisi di sezioni multi-materiale isotrope, sollecitate a torsione e taglio. Il problema meccanico può essere ricondotto alla ricerca di funzioni scalari, le cui condizioni al contorno coinvolgono sia il contorno esterno della sezione che l'interfaccia tra i diversi materiali. Nel caso di torsione o taglio con coefficiente di Poisson uniforme tali funzioni sono armoniche sulle singole regioni. In questi casi la distribuzione del campo scalare, con le sue derivate, consente di valutare direttamente le tensioni tangenziali e le caratteristiche elastiche globali della sezione. Più complesso è il caso di taglio su sezioni con coefficiente di Poisson disuniforme. In questo caso le funzioni scalari non sono più armoniche nelle singole regioni, la soluzione coinvolge tutte le componenti di tensione, a differenza del classico problema di Saint Venant, e al problema scalare sulla sezione è necessario accoppiare un particolare problema di deformazione piana con discontinuità di spostamento imposte alle interfacce [1].

I problemi differenziali formulati nei diversi casi sono ricondotti ad equazioni integrali sul contorno e discretizzati mediante una tecnica ad elementi di contorno. Il modello, già utilizzato dagli autori nell'analisi di sezioni omogenee ortotrope [2], utilizza una suddivisione del contorno in macroelementi indipendenti, su ognuno dei quali è usata una funzione di interpolazione B-spline. Gli integrali coinvolti sono trasferiti sul contorno, ricondotti alla combinazione di pochi integrali tipici e valutati in modo analitico. I contributi valutati sulle singole regioni sono quindi assemblati in un sistema globale, mediante una tecnica di condensazione sulle variabili di interfaccia. Dopo aver calcolato il valore dei campi scalari sulle interfacce, ottenuti dalla soluzione del sistema globale, possono essere ricavati i flussi presenti all'interfaccia, e successivamente i valori in un qualsiasi punto interno. Si possono così calcolare le tensioni tangenziali nei punti interni, oltre che valutare grandezze globali di una sezione mista, quali la rigidezza a torsione e la posizione del centro di taglio.

## *Riferimenti bibliografici:*

[1] Muskhelishvili N.I., Noordhoff 1963, *Some basic problems of the mathematical theory of elasticity*.

[2] Gaspari D., Aristodemo M., 2005, *Torsion and flexure analysis of orthotropic beams by a boundary element model*, accepted for publication in *Engineering Analysis with Boundary Elements*.

# Integrazione a variabili complesse nella costruzione di modelli ad elementi di contorno simmetrici di lastre di Kirchhoff

Mirko Mazza

*Dipartimento di Strutture, Facoltà di Ingegneria, Università della Calabria, Rende (CS)*

*E-mail: mirko.mazza@labmec.unical.it*

Maurizio Aristodemo

*Dipartimento di Strutture, Facoltà di Ingegneria, Università della Calabria, Rende (CS)*

*E-mail: aristodemo@labmec.unical.it*

*Parole chiave:* integrazione nuclei ipersingolari, lastra di Kirchhoff, elementi di contorno simmetrici

I modelli ad elementi di contorno simmetrici si basano su equazioni integrali associate a sorgenti distribuite di tipo statico e cinematico, interpolate in maniera identica alle variabili di contorno e selezionate in base alle condizioni al contorno assegnate [1]. Esse producono un sistema con matrice simmetrica i cui coefficienti derivano dall'integrazione doppia sul contorno del prodotto tra due funzioni di forma ed una soluzione fondamentale. Le principali difficoltà nella costruzione dei modelli simmetrici riguardano il calcolo di questi integrali. L'integrazione analitica in campo reale risulta complicata soprattutto nel caso di soluzioni fondamentali articolate, di funzioni di forma di ordine elevato e di domini di integrazione della sorgente e dell'effetto orientati genericamente. La singolarità delle soluzioni fondamentali nel caso di domini sovrapposti obbliga, inoltre, ad adottare tecniche di integrazione specifiche. L'uso dell'integrazione numerica richiede, comunque, la regolarizzazione analitica dei contributi singolari. Le difficoltà descritte si accentuano nell'analisi delle lastre di Kirchhoff a causa delle espressioni articolate delle soluzioni fondamentali e degli elevati ordini di singolarità presenti.

Nel presente lavoro si propone un procedimento per sviluppare l'integrazione analitica dei coefficienti che intervengono nell'analisi ad elementi di contorno simmetrici di lastre di Kirchhoff basato su una formulazione a variabili complesse [2]. A tal fine si introduce una rappresentazione nel piano complesso delle funzioni di forma e delle soluzioni fondamentali e si definiscono apposite regole di integrazione. I nuclei singolari vengono, inoltre, regolarizzati eseguendo l'integrazione su supporti contigui, impiegando funzioni di forma di adeguata continuità ed operando alcune trasformazioni di Gauss. Si perviene così a risultati analitici validi per domini genericamente orientati, sovrapposti o separati. La loro forma compatta ne rende conveniente l'impiego nella preparazione di programmi di calcolo basati sulla discretizzazione ad elementi di contorno di tipo simmetrico.

## *Riferimenti bibliografici:*

[1] Sirtori S., Maier G., Novati G., Miccoli S., 1992, A Galerkin symmetric boundary-element method in elasticity. formulation and implementation, *Int. Jour. Num. Meth. Eng.*, vol. 35, pp. 255-282.

[2] Mazza M., Aristodemo M., September 2004, A complex variables technique for evaluating double integrals in a symmetric BEM, *Seventh International Conference on Computational Structures Technology*, Lisbon, Portugal.

# Weak coupling of the symmetric Galerkin BEM with FEM

Roberta Springhetti

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università di Trento, Italia*

*E-mail: Roberta.Springhetti@ing.unitn.it*

Massimiliano Margonari

*Structural Department, EnginSoft, Bergamo, Italia*

*E-mail: m.margonari@enginsoft.it*

Giorgio Novati

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università di Trento, Italia*

*E-mail: Giorgio.Novati@ing.unitn.it*

**Keywords:** Finite elements, boundary elements, weak coupling

The finite element method (FEM) and the boundary element method (BEM) have relative benefits and limitations. For instance the FEM is well suited for inhomogeneous and anisotropic materials as well as for dealing with nonlinear behaviour at constitutive level. Linear homogeneous problems defined on unbounded domains and/or in the presence of regions of high stress concentration can be analyzed more advantageously by the BEM. There are many application contexts where a coupled BEM-FEM approach is in principle very attractive: different parts of a structure can be modelled independently by FEM and BEM methods in order to exploit the advantages of both.

Only few contributions on the BEM-FEM coupling are based on the Symmetric Galerkin BEM (the so-called SGBEM) in view of the more involved mathematical aspects of this version. Contributions on SGBEM-FEM coupling procedures which report numerical applications are quite recent, especially in 3D, since efficient numerical tools for the evaluation of the singular double surface-integrals have been developed only in the last years. While in many papers the SGBEM domains are treated as finite macro-elements, the present work adopts a direct coupling approach involving all the unknowns both from FE and BE subdomains. The matching conditions at the interface between the subdomains are enforced in a weak form both for displacements and tractions. The full relaxation of the continuity requirements allows the introduction of completely independent discretizations for BE and FE subdomains with an evident gain in flexibility in the meshing process. The coupling procedure is presented for the 2D potential problem (with a non-regularized version of the SGBEM) and 3D elasticity (the regularized approach is adopted in this case). The procedure has been numerically tested for 2D potential problems, while its implementation for 3D elastostatic problems is currently under way.

## *References:*

Frangi, A. & Novati, G. 2003. *BEM-FEM coupling for 3D fracture mechanics applications*, Comput. Mech., 32: 415-422.

Ganguly, S. et al. 2000. *Symmetric coupling of multi-zone curved Galerkin boundary elements with finite elements in elasticity*, Int. J. Numer. Meth. Eng., 48: 633-654.

Haas, M. & Kuhn G. 2003. *Mixed-dimensional, symmetric coupling of FEM and BEM* Eng. Anal. Bound. Elem., 27:575-582.

Polizzotto, C. & Zito, M. 1994. *Variational formulations for coupled BE/FE methods in elastostatics*, ZAMM, 74,11: 533-543.



# A total Lagrangian co-rotational FE formulation for large displacements in shells

Salvatore Lopez

*Dipartimento di Strutture, Università della Calabria, 87030 Rende, Italy*

*E-mail: salvatore.lopez@strutture.unical.it*

*Keywords:* co-rotational formulation, total Lagrangian description, shell finite element

Numerous nonlinear shell theories using different levels of approximations have been developed. These theories are able to model both small and large rotations. In finite rotations, however, a significant difficulty of nonlinear shell theories is associated with the incorporation of rotations into the general shell equations, since finite rotations are not commutative and therefore do not transform like vectors. Different approaches to finite rotations have been discussed in literature. In the articles of Simo and Fox and related bibliography, the problem of a complete nonlinear analysis of shell-like structures using consistent achievements in the theory of shells is addressed.

The present paper describes the formulation of a flat quadrilateral element for the numerical analysis of elastic nonlinear behaviour in shell structures. The element has four nodes with six degrees of freedom at each node. We used the displacement approach that includes shear deformation and therefore belongs to nonlinear Reissner-Mindlin type theories. The method of description is total Lagrangian with the co-rotational formulation. Then, the displacement and rotational vector fields are retained relative to a fixed reference frame. The motion of an element, besides, is decomposed into a rigid body motion followed by a pure deformation through the use of a local coordinate system which continuously translates and rotates with the element. Therefore, the necessity of special updating procedures are avoided while, assuming the pure deformation part to be small, a linear theory can be used in the local system.

We refer mainly to the articles by Pacoste for a detailed account of the main co-rotational framework and to Betsch et al. for the description of the various parametrizations used in the treatment of finite rotations and comprehensive bibliography.

Here rigid rotations are identified with the rotations of the line element, originally orthogonal to the middle plane, that must be determined in the Reissner-Mindlin approach. In plane rotation, moreover, is introduced independently by considering the drilling degree of freedom directly connected with the rotation about the local normal axis. In this approach, shear and torsional deformation energy functionals are introduced to relate the respective rigid rotations with the bending and in plane strains. A formulation is obtained where zero energy modes in the elemental stiffness matrix are removed. Then maximum attainable deformation values are not present as avoided rank-deficient tangential stiffness matrices are avoided. The introduction of drilling rotations, besides, permits the utilization of simple composition rules for the transfer of the quantities in the initial to those of the global frame.

Numerical tests which illustrate the applicability of the formulation are presented.

## *References:*

- J. Simo and D.D. Fox, *On a stress resultant geometrically exact shell model. Part I: formulation and optimal parametrization*, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 72 (1989) 267-304.
- C. Pacoste, *Co-rotational flat facet triangular elements for shell instability analyses*, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 156 (1998) 75-110.
- P. Betsch, A. Menzel and E. Stein, *On the parametrization of finite rotations in computational mechanics. A classification of concepts with application to smooth shells*, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 155 (1998) 273-305.
- K. Wisniewski, *A shell theory with independent rotations for relaxed Biot stress and rigid stretch stain*, *Comput. Mech.* 21(2) (1998) 101-122.
- C. Sansour and H. Bednarczyk, *The Cosserat surface as a shell model, theory and finite-element formulation*, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 120 (1995) 1--32.

# Piastra di Kirchhoff con l'impiego del metodo simmetrico degli elementi di contorno

Vincenza Milana, Teotista Panzeca, Maria Salerno

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Palermo, Italia*

*E-mail: panzeca@diseg.unipa.it*

*Parole chiave:* piastra di Kirchhoff , elementi di contorno, Galerkin.

Nel presente lavoro si propone un metodo di analisi elastica di una piastra sottile descritta dal modello di Kirchhoff, affrontata con la formulazione simmetrica del metodo degli elementi di contorno.

La piastra viene discretizzata lungo il contorno e sottoposta oltre che a coppie e forze distribuite sul contorno libero anche a spostamenti verticali e rotazioni sul contorno vincolato. Per la piastra oggetto di studio sono calcolati tutti i coefficienti della matrice di riferimento **A**, definita capostipite [2] e successivamente è operata una distinzione tra grandezze note ed incognite in funzione delle reali condizioni di carico e di vincolo lungo il contorno della piastra. I coefficienti di tale matrice sono ottenuti tutti in forma chiusa attraverso una doppia integrazione attraverso l'impiego di funzioni di forma di tipo quadratico per modellare le grandezze di contorno, attribuendo di volta in volta valori unitari ai parametri nodali che caratterizzano le grandezze di contorno. I nuclei degli integrali presentano singolarità del tipo  $\log r$ ,  $1/r$ ,  $1/r^2$ ,  $1/r^3$ ,  $1/r^4$ . La presenza di tali singolarità crea parecchie difficoltà computazionali e ciò si verifica quando nel nucleo degli integrali la distribuzione della causa agisce sugli elementi di contorno dove è valutato l'effetto in forma pesata.

Uno dei principali vantaggi dell'impiego di una modellazione che usa funzioni di forma di tipo quadratico consiste nel poter verificare l'esattezza degli stessi coefficienti prima di procedere alla determinazione del problema di analisi. Ciò è possibile imponendo alla piastra un moto rigido sia di semplice traslazione verticale che di rotazione attorno ad una qualsiasi retta e verificando che a causa di quel movimento non nasca nessun tipo di sforzo in  $\Omega_\infty$ . La formulazione è testata affrontando come struttura di lavoro una piastra che per semplicità viene assunta di forma quadrata, secondo diverse condizioni di carico e di vincolo, e confrontata con soluzioni ottenute in forma chiusa.

*Riferimenti bibliografici:*

1. Tottenham, H. 1979. *The boundary element method for plates and shells*, in Banerjee P.K. and Butterfield R.(eds), *Developments in Boundary Element Methods*, vol. 1, Elsevier, Amsterdam.
2. Panzeca, T., Cucco, F., Terravecchia S. 2002. *Symmetric boundary element method versus Finite Element Method*, *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*,191, 3347-3367.
3. Westphal, T. Jr, Andrä, H., Schnack, E. 2001. *Some fundamental solutions for the Kirchhoff, Reissner and Mindlin plates and a unified BEM formulation*, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 25, 129-139.

*Curricula vitae:* Teotista Panzeca professore straordinario di Scienza delle costruzioni. Vincenza Milana dottore di ricerca in Ingegneria delle strutture. Maria Salerno dottore di ricerca in Ingegneria delle strutture.

# Analysis of composite SMA laminates using a multiscale approach

Sonia Marfia

*Dipartimento di Meccanica, Strutture, A.&T., Università di Cassino*

*E-mail: marfia@unicas.it*

Elio Sacco

*Dipartimento di Meccanica, Strutture, A.&T., Università di Cassino*

*E-mail: sacco@unicas.it*

*Keywords:* Composite laminate, shape memory alloy, multiscale analysis

Layered composite SMA plates are obtained as stacking sequence of thin layers, some of which contain SMA wires. The potential applications of composite SMA laminates are several, including the control of external shape, stiffness, damage, vibration, buckling and damping properties of the structural elements. Micromechanical studies devoted to derive the overall behavior of SMA composites have been developed (Marfia and Sacco, 2005).

In the present work, a full multiscale approach is proposed in the framework of the finite element method for the problem of a composite laminate containing layers with SMA wires (Marfia, 2005). A laminate finite element is developed within the Mindlin-Reissner plate theory. The constitutive equations of the laminate are derived at each Gauss point of the mid-plane by integrating in the plate thickness the stress-strain relations of each layer. In particular, taking into account that in a typical point of a layer containing SMA wires the nonlinear mechanical response depends on the specific strain history taken place in that point, the constitutive equations are obtained performing a suitable nonlinear homogenization analysis. To this end, a full 3D SMA model is proposed to reproduce the hysteretic and temperature dependent SMA behaviour. A numerical procedure based on the backward Euler time integration algorithm is developed. Numerical examples are performed to assess the proposed model and the developed numerical procedure. Investigations on the influence of the SMA composite layers on the laminate behaviour are also reported.

## *References:*

- Marfia S., Sacco E., 2005. Micromechanics and homogenization of SMA-wire reinforced materials. *Journal of Applied Mechanics*, 72, 259-268.
- Marfia S. 2005. Micro-macro analysis of shape memory alloy composites. *International Journal of Solids and Structures*, 42, 3677-3699.

*Curriculum vitae:* Marfia is researcher of Structural Mechanics. She works in the field of the Computational Mechanics, Mechanics of Fracture and shape memory alloy materials.

*Curriculum vitae:* Sacco is professor of Structural Mechanics. He works in the field of the Computational Mechanics, Mechanics of Masonry structures and modelling of shape memory alloy materials.

# Modello di interfaccia bifase per la descrizione dei fenomeni di decoesione nei materiali compositi

Alessia Cottone, Tiziana Turetta & Giuseppe Giambanco

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Palermo, Italy*

*E-mails: acottone@diseg.unipa.it , turetta@diseg.unipa.it , ggiamb@diseg.unipa.it*

*Keywords:* delaminazione, rinforzo nella direzione dello spessore, interfacce.

Le strutture in laminato composito hanno notevoli prestazioni meccaniche in termini di rigidità e resistenza nel proprio piano e tali proprietà possono essere notevolmente compromesse dall'insorgere di difetti interlaminari. Le tecniche di produzione, l'effetto di urti accidentali o di carichi fuori piano possono far insorgere danneggiamenti localizzati tra le lamine che sono responsabili dell'insorgere di quel meccanismo di decoesione, noto col nome di delaminazione.

Una tecnica di miglioramento delle proprietà di resistenza alla delaminazione è l'utilizzo di rinforzi nella forma di cuciture e chiodature nella direzione dello spessore del laminato. Questi rinforzi legano tra loro le superfici di potenziale decoesione, aumentando così la tenacità alla frattura del laminato e cambiandone il meccanismo finale di crisi [1]-[3].

La presente memoria illustra un modello di interfaccia originale e semplice nella sua formulazione, che permette di modellare la delaminazione in presenza di rinforzi associando due fasi distinte relative all'adesivo e alla fibra. L'accoppiamento delle fasi non è a livello costitutivo ma avviene a livello delle equazioni di equilibrio. Questo modo di procedere consente di mettere insieme fasi anche con comportamenti molto diversi con una certa facilità.

Nel caso specifico per le due fasi si è scelto lo stesso comportamento meccanico basato sulla meccanica dei materiali danneggiativi. Negli studi futuri potranno essere considerati altri comportamenti come quello elasto-plastico.

I risultati del modello sono confortanti visto che nell'applicazione numerica proposta i dati ottenuti dalla simulazione sono in buon accordo con quelli sperimentali.

## *Bibliografia:*

[1] Mouritz, A.P. et al. 1997. *A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites*, Composites: Part. A 28: 979-991.

[2] Sun, X., et al. 2004. *Effect of stitch distribution on mode I delamination toughness of laminated DCB specimens*, Composites Science and Technology 64: 967-981

[3] Jain, L.K., & Mai Y.W. 1994. *On the effect of stitching on mode I delamination toughness of laminated composites*, Composites Science and Technology 51: 331-345.

# Comportamento viscoso di profili pultrusi in materiale composito

Marina Bottoni, Claudio Mazzotti, Marco Savoia\*

*DISTART – Tecnica delle costruzioni, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna*

*E-mail: marco.savoia@mail.ing.unibo.it*

*Keywords:* materiali pultrusi, viscosità, elementi finiti.

Nei profili pultrusi in materiale composito, il basso rapporto tra modulo elastico e resistenza fa sì che il dimensionamento debba essere spesso condotto con particolare riferimento alle verifiche di deformabilità piuttosto che a quelle di resistenza. Inoltre, l'elevato rapporto tra modulo di elasticità longitudinale e tangenziale può rendere la deformazione per scorrimento paragonabile a quella per flessione. Infine, il calcolo della deformabilità deve essere necessariamente condotto anche a lungo termine, tenendo cioè in conto il progredire nel tempo delle deformazioni di tipo viscoso, che interessano in particolare la matrice epossidica e in misura inferiore le fibre Mottram [1999].

Nel presente lavoro si propone un modello agli elementi finiti per l'analisi di profili pultrusi soggetti a carichi di lunga durata. Tali profili sono modellati come travi di parete sottile con sezione trasversale di forma generica. Le sezioni sono considerate infinitamente rigide nel proprio piano, il cui spostamento è definito mediante tre funzioni incognite. Adottando quindi una discretizzazione in conci e leggi di tipo parabolico per le funzioni di forma che descrivono lo spostamento lungo l'asse della trave, si giunge alla definizione di un elemento finito con 9 gradi di libertà per gli spostamenti della sezione trasversale della trave (spostamenti del centro di taglio e rotazione della sezione) e 6 gradi di libertà per ogni pannello costituente il profilo della sezione della trave.

Per quanto riguarda la legge costitutiva, viene utilizzata la teoria della solidificazione proposta da Bazant [1971], che congiuntamente con l'algoritmo esponenziale, per problemi lineari consente di scrivere le equazioni del problema in forma incrementale. Tale formulazione è adottata sia per il modulo elastico longitudinale che per il modulo tangenziale; le leggi sono calibrate utilizzando risultati ottenuti da indagini sperimentali.

## *Bibliografia:*

Mottram J.T. (1993), "Short- and long-term structural properties of pultruded beam assemblies fabricated using adhesive bonding", *Compos. Struct.*, **25**, pagg. 387-395.

Bazant, Z.P. (1971). "Numerically stable algorithm with increasing time steps for integral-type ageing creep." *Proc., 1st Int. Conf. Struct. Mech. in Reactor Tech.*, vol. 3, Paper H2/3.

*Curriculum vitae:* Marina Bottoni è dottoranda presso l'Università di Bologna. I suoi principali interessi di ricerca riguardano i materiali compositi. Claudio Mazzotti è ricercatore di tecnica delle costruzioni presso l'Università di Bologna. I suoi principali interessi di ricerca riguardano i materiali compositi e le strutture in calcestruzzo armato. Marco Savoia è Professore Ordinario di Tecnica delle costruzioni presso l'Università di Bologna, e coordinatore del Laboratorio Prove Strutture. I suoi principali interessi di ricerca riguardano l'affidabilità strutturale, i materiali compositi, le strutture in calcestruzzo armato.

# Intralaminar and interlaminar damage in composite material structures

Domenico Bruno

*Department of Structural Engineering, University of Calabria, Italy*

*E-mail: d.bruno@unical.it*

Fabrizio Greco

*Department of Structural Engineering, University of Calabria, Italy*

*E-mail: f.greco@unical.it*

Paolo Lonetti

*Department of Structural Engineering, University of Calabria, Italy*

*E-mail: lonetti@unical.it*

*Keywords:* multiscale approach, delamination, intralaminar damage, energy release rate evaluation.

Polymeric matrix composites exhibit a low resistance to damage for in-plane and out-of plane directions, due to the relatively low strength of interlaminar interfaces and the scarce tensile strength of the matrix. As a consequence, they are susceptible to damage in the form of interlaminar delamination and intralaminar cracking, when subjected to transverse loads and low-velocity impacts (Zuo Z et al, 2001). At this aim, a multiscale formulation based on both interlaminar and intralaminar damage prediction is here presented.

The theoretical model is consistent with a thermodynamic framework based on the internal variable method, where variables of multiscale typology are introduced to predict both in plane and out-of-plane damage mechanisms (Barbero & Lonetti, 2001). The model is based on both Continuum Damage Mechanics and Fracture Mechanics formulation in order to simulate homogenized distributed microcracks and finite length crack evolution, respectively (Bruno & Greco, 2001; Bruno et al, 2005). The model has been implemented by means of finite element approach, in which the constitutive equation are accurately defined non-linear integration scheme based on fully implicit backward Euler scheme is adopted. Some applications are presented in order to point out the evaluation and the interaction between in plane and out-of-plane damage mechanisms.

## *References:*

- Barbero E.J., Lonetti P. 2002. *An inelastic damage model for fiber reinforced laminates*. Journal of Composite Materials: 36 (8), 941-962,.
- Bruno, D., Greco, F. 2001. *Mixed mode delamination in plates: a refined approach*. Int J Solids Structures: 38/50-51, 9149-9177.
- D. Bruno, F. Greco, P. Lonetti. 2005 *A 3D delamination modelling technique based on plate and interface theories for laminated structures*, European Journal of Mechanics A/Solids: 24, 127-149.
- Zuo Z., Reid S.R., Soden P.D., Li S. 2001. *Mode separation of energy release rate for delamination in composite laminate using sublaminates*, Int. J. Solids Structures 38, 2597-2613.

# Un modello numerico per la previsione degli effetti dell'usura in coppie rotoidali con gioco

Alessandro Tasora, Edzeario Prati, Marco Silvestri  
*Università degli Studi di Parma, ITALY*  
*E-mail: tasora@ied.unipr.it*

*Keywords:* coppie rotoidali, gioco, contatto, previsione usura.

Con il presente lavoro s'intende proporre un metodo in grado di prevedere l'usura di coppie rotoidali con gioco per mezzo di una procedura di simulazione numerica.

Precedenti lavori hanno messo in luce la possibilità di calcolare, con buon grado di realismo, il moto reciproco delle superfici di una coppia rotoidale con gioco appartenente ad un sistema articolato. I risultati forniti dalle simulazioni numeriche sono stati confrontati con dati sperimentali ottenuti per mezzo di uno specifico banco prova dotato d'accelerometri, fornendo la prova dell'accuratezza del modello numerico.

Sulla scorta di tali risultati si è pensato pertanto di sviluppare il programma di simulazione in modo da consentire la previsione dell'andamento dell'usura delle superfici in contatto, diverso da punto a punto poiché i fenomeni d'urto e di scorrimento sono localizzati in zone preferenziali. A tal fine si è implementata una procedura di calcolo che simula vari cicli di funzionamento, a regime, del meccanismo in esame: contemporaneamente si valuta l'effetto cumulativo del lavoro d'attrito delle forze di contatto in un numero discreto di settori delle superfici. Al termine della simulazione è possibile ricavare grafici che riportano, approssimata in forma di *spline*, l'usura in funzione delle coordinate parametriche delle superfici.

I grafici con le previsioni numeriche dell'usura sono stati confrontati con numerose misure sperimentali, grazie ad un quadrilatero motorizzato appositamente costruito in modo da poter smontare facilmente la coppia rotoidale con gioco. Si è valutata l'asportazione di materiale dalle superfici in vari punti, utilizzando sia un micrometro sia un rugosimetro tridimensionale.

## *References:*

Tasora, A., Prati, E. Silvestri, M., (2003), *Implementazione di un modello per contatto intermittente nelle coppie rotoidali con gioco*, AIMETA '03, XVI Congresso Aimeta di Meccanica Teorica e Applicata, Ferrara, Italy, 2003.

Tasora, A., Prati, E., Silvestri, M., (2004), *Experimental Investigation Of Clearance Effects in a Revolute Joint*, Aimeta Tribology Conference AITC 2004, Roma, Italy, 14-17 September 2004.

*Curriculum vitae:* Alessandro Tasora s'interessa di metodi di simulazione per sistemi multibody, con particolare attenzione ai problemi di integrazione numerica, rilevamento delle collisioni, geometria computazionale, ottimizzazione, algoritmi per algebra lineare e rendering. E' autore del software di simulazione CHRONO e del programma di modellazione Revolution4D. Altre sue aree di ricerca sono la tribologia e la robotica.

# Strisciamento tra rotore e statore - Parte 1: evidenze sperimentali di ingobbamenti termici

Nicolò Bachschmid

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: nicolo.bachschmid@polimi.it*

Paolo Pennacchi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: paolo.pennacchi@polimi.it*

Andrea Vania

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: andrea.vania@polimi.it*

*Parole chiave:* dinamica dei rotori, strisciamento tra rotore e statore, ingobbamenti termici.

Le forze d'attrito dovute a strisciamenti di lieve entità tra rotore e statore nelle macchine rotanti possono provocare un ingobbamento termico dell'albero variabile nel tempo. Per questo, strisciamenti stabili ad arco parziale e totale possono indurre variazioni progressive nelle vibrazioni sincrone delle macchine rotanti. In alcuni casi possono manifestarsi delle vibrazioni a spirale sincrone, stabili o instabili (Liebich e Gasch, 1996, Kellenberger, 1980). I momenti flettenti equivalenti che provocano l'ingobbamento dell'albero possono essere valutati con un metodo di identificazione basato su modello applicato nel dominio delle frequenze. In questo lavoro sono mostrati sia i risultati ottenuti mediante l'analisi della risposta sperimentale di un'unità turbina-generatore soggetta a contatti tra rotore e statore, sia quelli ottenuti con l'identificazione delle cause dello strisciamento. Il gradiente d'incremento nel tempo dei momenti flettenti indotti dallo strisciamento ha fornito informazioni utili sulle caratteristiche termiche del sistema, che dovrebbero essere modellate mediante parametri equivalenti all'interno di una rappresentazione più sofisticata, nella quale sia le equazioni di moto sia quelle termiche dell'intera macchina vengano integrate nel dominio del tempo.

## *Bibliografia:*

Liebich, R., Gasch, R., "Spiral vibrations – modal treatment of a rotor-rub problem based on coupled structural/thermal equations", *Proc. of IMechE 6th Int. Conference on Vibrations in Rotating Machinery*, 1996, pp. 405-413.

Kellenberger, W., "Spiral vibrations due to the seal rings in turbogenerator thermally induced interactions between rotor and stator", *Journal of Mechanical Design*, Vol.2, 1980, pp. 177-184.

*Curriculum vitae:* Andrea Vania, professore associato di Meccanica Applicata alle Macchine presso il Politecnico di Milano a partire dal 1991. I settori di ricerca sono: vibrazioni meccaniche, dinamica dei rotori, diagnostica, analisi modale, monitoraggio su condizione, identificazione dei sistemi meccanici, cuscinetti lubrificati.



# Strisciamento tra rotore e statore - Parte 2: sviluppo del modello delle vibrazioni a spirale ed applicazione ad una macchina industriale

Nicolò Bachschmid

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: nicolo.bachschmid@polimi.it*

Paolo Pennacchi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: paolo.pennacchi@polimi.it*

Andrea Vania

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: andrea.vania@polimi.it*

*Parole chiave:* dinamica dei rotori, strisciamento tra rotore e statore, ingobbamenti termici.

Il modello inizialmente presentato in un precedente lavoro [1,2], e affinato nel presente per rimuovere alcuni vincoli che ne limitavano l'applicazione a macchine reali, utilizza il modello completo della macchina (albero, cuscinetti e struttura di supporto), un modello termico sofisticato ed un modello del contatto raffinato: la procedura del calcolo può quindi essere applicata anche a macchine industriali per analizzare il loro comportamento e per verificare condizioni di stabilità o instabilità. I risultati sperimentali ottenuti su un generatore da 50 MW di un impianto a ciclo combinato, sottoposto ad uno strisciamento vengono confrontati con i risultati numerici ottenuti dalla simulazione effettuata con il modello descritto, ed il discreto accordo ottenuto ha permesso di validare il modello e la procedura di calcolo suddetti.

## *Bibliografia:*

- [1] Bachschmid, N., Pennacchi, P. and Vania, A., 2001, "Spiral Vibrations Due to Rub: Numerical Analysis and Field Experiences", *Schwingungen in Rotierenden Maschinen V*, H. Irretier, R. Nordmann, H. Springer Editors, Vieweg Verlag, Braunschweig/Weisbaden, Germany, pp. 61-74.
- [2] Bachschmid, N., Pennacchi, P. and Venini, P., 2000, "Spiral Vibrations in Rotors Due to a Rub", *Proc. of IMechE-7<sup>th</sup> Int. Conf. on Vibrations in Rotating Machinery*, Nottingham, pp.249-258.

*Curriculum vitae:* Paolo Pennacchi, professore associato di Meccanica Applicata alle Macchine presso il Politecnico di Milano. I settori di ricerca sono: vibrazioni meccaniche, dinamica dei rotori, diagnostica, monitoraggio, identificazione dei sistemi meccanici, cinematica, biomeccanica.

# Super-hydrorepellence of a corrugated surface

Giuseppe Carbone

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale, Politecnico di Bari, Italy*

*E-mail: Carbone@poliba.it*

Luigi Mangialardi

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale, Politecnico di Bari, Italy*

*E-mail: Lmm@poliba.it*

*Keywords:* Wettability, hydrophobicity, adhesion, roughness, tribology

The wetting/non-wetting properties of a liquid drop in contact with a chemically hydrophobic rough surface (thermodynamic contact angle  $\theta_e > \pi/2$ ) are studied for the case of an extremely idealized rough profile: the liquid drop is considered to lie on a simple sinusoidal profile. Depending on surface geometry and pressure values, it is found that the Cassie and Wenzel states can coexist. But if the amplitude  $h$  of the substrate is sufficiently large the only possible stable state is the Cassie one, whereas if  $h$  is below a certain critical value  $h_{cr}$  a transition to the Wenzel state occurs. Since in many potential applications of such super-hydrophobic surfaces, liquid drops often collide with the substrate (e.g. vehicle windscreens), in the paper the critical drop pressure  $p_w$  is calculated at which the Cassie state is no longer stable and the liquid jumps into full contact with the substrate (Wenzel state). By analyzing the asymptotic behaviour of the systems in the limiting case of a large substrate corrugation, a simple criterion is also proposed to calculate the minimum height asperity  $h$  necessary to prevent the Wenzel state from being formed, to preserve the super-hydrophobic properties of the substrate, and, hence, to design a robust super-hydrophobic surface.

## *References:*

Carbone G., Mangialardi L. (2005): “*Hydrophobic properties of a wavy rough substrate*”, the European Physical Journal E, 16 (1), pag. 67.

Duparrè A., Flemming M., Steinert J., and Reihs K. (2001), “*Optical coatings with enhanced roughness for ultra-hydrophobic, low scatter applications*”, OIC 2001, Banff, Canada, July 15-20.

Gau H., Herminghaus S., Lenz P., Lipowsky R. (1999), “*Liquid Morphologies on Structured Surfaces: From Microchannels to Microchips*”, Science 283, pag. 46.

*Curriculum vitae:* Dr. Carbone is currently Assistant Professor of Applied Mechanics at Politecnico di Bari. His main research activities focus on micro- and nano- tribology, contact mechanics, lubrication, and continuously variable transmissions (CVT).

*Curriculum vitae:* Prof. Mangialardi is currently Full Professor of Applied Mechanics and Vehicle Dynamics at Politecnico di Bari. His main research activity is concerned with tribology both at macro- and micro- scales, vehicle dynamics and CVT transmissions.

# Influenza dell'interazione dinamica di contatto pantografo catenaria sull'usura della linea

Stefano Bruni

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: stefano.bruni@polimi.it*

Andrea Collina

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: andrea.collina@polimi.it*

Giuseppe Bucca

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: giuseppe.bucca@polimi.it*

Stefano Melzi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: stefano.melzi@polimi.it*

*Keywords:* pantografo, catenaria, simulazione numerica, usura

Il lavoro presentato indaga l'effetto dell'interazione dinamica tra pantografo e catenaria, con particolare attenzione all'usura del filo di contatto. Il principale strumento di analisi utilizzato è un codice di simulazione della dinamica di contatto pantografo-catenaria abbinato ad una legge d'usura del filo di contatto di derivazione semiempirica. I parametri di tale legge sono stati individuati attraverso un'attività di sperimentazione condotta su un banco prova striscianti full-scale realizzato presso i laboratori del Politecnico di Milano. Il modello di simulazione dell'interazione pantografo catenaria, abbinato al modello di usura del filo di contatto è stato quindi utilizzato per stimare i tassi di consumo del filo stesso e operare un confronto con rilievi sperimentali condotti in linea.

## *Curriculum vitae:*

Stefano Bruni: Professore Ordinario di Meccanica Applicata dal 2002 La sua attività di ricerca è incentrata sull'analisi e modellazione della dinamica del veicolo ferroviario e del contatto ruota-rotailaia.

Andrea Collina: Professore Ordinario di Meccanica Applicata dal 2002 La sua attività di ricerca è incentrata sulla dinamica del veicolo ferroviario

Stefano Melzi: Ricercatore in Meccanica Applicata: La sua attività di ricerca è incentrata sulla dinamica del veicolo stradale e ferroviario

Giuseppe Bucca: Dottorando di Meccanica Applicata; la sua attività di ricerca riguarda la dinamica dei sistemi meccanici con particolare riferimento al contatto pantografo-catenaria

# The shakedown limit under rolling and sliding contact: what happens if variable loads are applied?

Hernan Juan Desimone  
Tenaris Dalmine, Italy  
sidhjd@siderca.com

*Keywords: shakedown analysis, rolling contacts, residual stresses, variable loading.*

In this paper a method for the computation of residual stresses arising under two-dimensional contact is proposed and applied to the shakedown analysis under repeated rolling contacts. The method can take into account materials with a fully non-linear kinematical hardening plasticity rule.

First, the two-dimensional shakedown map is obtained for both full slip and partial slip. The results are then compared with previous work and show very good agreement. The method here proposed is not based on the application of Melan or Koiter theorems. As a result, the model gives as output not only the final response of the material (indicating if the shakedown state is achieved or not) but also the evolution of the residual stresses and strains.

In the second part of this paper, the analysis is extended to variable load conditions. In particular, two set of conditions are considered, indicating two different friction values. These conditions are imposed alternatively over the material. Surprisingly, the material does not shake down to the elastic state, although both conditions falls, if taken independently one for another, below the shakedown limit. The reason for this behaviour and its important implications on rolling contact fatigue damage are then discussed.

*This paper is based on the PhD Thesis:*

Mechanical damage under rolling and sliding repeated contacts:  
Residual stresses, forward flow, shakedown, high cycle fatigue and influence of defects.

*The thesis was developed at Politecnico di Milano and approved on June 10 2005. The thesis has received the LODE.*

Brief CV: Dr. Hernán Desimone has received the Degree on Mechanical Engineering in 1994, at the University of Mar del Plata, Argentina. Since 1997 he is part of the Tenaris Group. In June 2005 he has received the PhD at Politecnico di Milano, Italia. He has written more than 40 papers in international journals and conferences.

# Soluzione analitica per serie di un collegamento a forcilla e spinotto

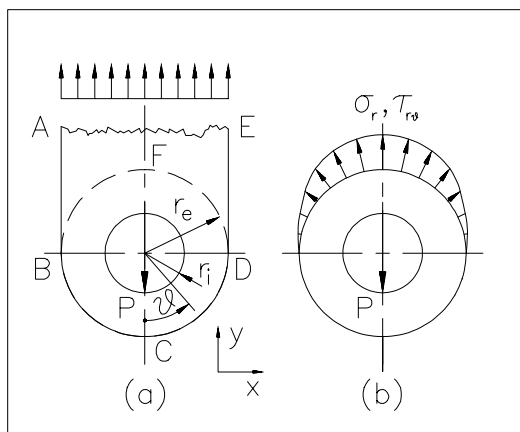
Antonio Strozzi, Andrea Baldini, Matteo Giacomini, Stefano Rivasi, Roberto Rosi

Facoltà di Ingegneria, Università di Modena e Reggio Emilia

E-mail: [astrozzi@unimo.it](mailto:astrozzi@unimo.it), [abaldini@unimo.it](mailto:abaldini@unimo.it), [mgiacomini@unimo.it](mailto:mgiacomini@unimo.it), [srivasi@unimo.it](mailto:srivasi@unimo.it), [rrosi@unimo.it](mailto:rrosi@unimo.it)

**Keywords:** pin-lug connection, concentrated load, analytical series solution, stress concentrations.

Si valuta lo stato tensionale in un collegamento a forcilla e spinotto soggetto ad un caricamento longitudinale, dove la geometria della forcilla viene assunta rettangolare ad estremità semicircolare. La forcilla viene descritta come problema piano, e si applica al foro della forcilla una forza concentrata longitudinale, la quale simula la presenza di un alto gioco iniziale tra spinotto e foro della forcilla. La forcilla viene parzialmente assimilata ad un anello, modellato tramite una soluzione per serie di Fourier, dove le differenze di geometria tra forcilla ed anello vengono colmate conferendo alla soluzione per serie un certo grado di duttilità che permette di adattare la soluzione anulare alla geometria effettiva. Si presentano infine alcuni risultati numerici agli Elementi Finiti ed agli Elemento di Contorno, al fine di valutare il campo di validità della soluzione analitica.



## Bibliografia:

Wang, G.S. *Stress analysis for a lug under various conditions*. J. Strain Analysis, 1994, 29, 7-16.

Aslam, A., Sekhon, G.S. and Kumar, R. *Elastic analysis of a pin loaded lug*. J. Aircraft, 2004, 41, 365-371.

Cosmi, F. *Studio di lastre forate mediante il metodo delle Celle*. XII AIMETA Congress, Brescia, 13-15/11/2000, CD-ROM support.

Mitchell, J.H. *On the direct determination of stress in an elastic solid, with application to the theory of plates*. Proc. London Math. Soc., 1899, 31, 100-124.

Soutas-Little, R.W. *Elasticity*. 1973 (Dover, N.Y.).

Barber, J.R. *Elasticity*. 2002 (Kluwer, London).

Ciavarella, M. and Decuzzi, P. *The state of stress induced by the plane frictionless cylindrical contact. I. The case of elastic similarity*. Int. J. Solids Structures, 2001, 38, 4507-4523.

Timoshenko, S. and Goodier, J.N. *Theory of elasticity*. 1970 (McGraw-Hill, N.Y.)

Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger, S. *Theory of plates and shells*, 1959 (McGraw-Hill, London).

Lanczos, C. *Applied Analysis*. 1988 (Dover, N.Y.).

# Inarcamento delle cinghie di trasmissione nei rami liberi. Influenza sul pre-tensionamento e sulla potenza limite

Francesco Sorge

*Dipartimento di Meccanica, Università di Palermo*

*Posta elettronica: [sorge@dima.unipa.it](mailto:sorge@dima.unipa.it)*

*Parole chiave:* trasmissioni a cinghia, rigidità flessionale, influenza del taglio.

Il modello convenzionale dell'inarcamento elastico delle cinghie di trasmissione nei tratti liberi tra le pulegge e le comuni formule d'uso pratico non considerano che, nelle moderne trasmissioni a cinghia, il pre-tensionamento può essere alquanto basso ed il rapporto tra interasse e lunghezza della cinghia può essere relativamente alto, e ciò spesso in presenza di una notevole asimmetria tra le pulegge, quantizzabile con la differenza dei raggi d'avvolgimento. Pertanto, la curvatura della linea elastica nel ramo libero non tende ad un valore asintotico nullo allontanandosi dal contatto, come comunemente si assume, ma varia tra le curvature d'avvolgimento sulle pulegge alle due estremità, raggiungendo il minimo approssimativamente nel punto in cui il taglio si annulla. Il fenomeno poi è complicato dalle deformazioni prodotte dallo sforzo di taglio, che vengono comunemente ignorate ma che sono imprescindibili nell'analisi del raccordo tra il ramo libero e quello avvolto: si pensi che la curvatura è variabile nel primo e costante nel secondo (si ipotizzano cinghie piane di piccolo spessore), con la conseguenza che la teoria della flessione semplice di Navier-Bernoulli comporterebbe necessariamente una discontinuità del taglio, incompatibile con l'assenza di forze trasversali concentrate.

Nella presente analisi si considerano tutti questi effetti. Si formula l'equazione della linea elastica in maniera tale da tener conto della rigidità alla flessione ed al taglio, si integra detta equazione lungo ciascun ramo libero e si raccordano le soluzioni dei rami liberi con quelle sugli archi d'avvolgimento, ove la curvatura è costante. In sintesi, imponendo la continuità delle sollecitazioni e delle deformazioni, l'equilibrio delle pulegge e dei rami liberi e la congruenza dell'allungamento complessivo della cinghia con la distribuzione degli sforzi di tensione, si ottiene un modello teorico completo della trasmissione che permette di calcolare tutte le incognite: le caratteristiche di sollecitazione (tensione, taglio e momento) lungo il percorso della cinghia ed i quattro angoli di perdita di contatto, in entrata ed in uscita delle pulegge.

I risultati confermano sostanzialmente la prevista riduzione delle perdite di contatto rispetto alla teoria convenzionale, a vantaggio di un maggior margine di sicurezza nei riguardi dello scorrimento globale. Evidenziano inoltre che, per data geometria di progetto della trasmissione e lunghezza della cinghia, l'inarcamento comporta un incremento del tensionamento complessivo della cinghia stessa.

*Curriculum vitae dell'autore:* Professore straordinario di Meccanica Applicata alle Macchine presso l'Università di Palermo. Attività di ricerca su trasmissioni meccaniche, meccanismi, vibrazioni, lubrificazione, tribologia, turbomacchine. Memorie su riviste nazionali ed internazionali, interventi in congressi nazionali ed internazionali.

# Analisi quantitativa di sperimentazioni su anelli radiali: caratteristiche del distacco al variare dei polimeri

Marco Silvestri, Edzeario Prati, Alessandro Tasora

*Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Parma, Italy*

*E-mail: silve@ied.unipr.it, prati@ied.unipr.it, tasora@ied.unipr.it*

*Keywords:* viscoelasticità, anelli di tenuta, fluoroelastomero, edge detection

Il contenimento dei fluidi lubrificanti e la protezione da agenti inquinanti esterni (polvere, impurità) costituiscono due problematiche estremamente comuni nella meccanica delle macchine. In passato l'interesse nello studio di queste problematiche è stato legato soprattutto alla identificazione delle condizioni che possono portare ad un cedimento degli organi di tenuta e di conseguenza al danneggiamento degli organi meccanici coinvolti.

Recentemente, anche per effetto di norme tecniche e legislative, si può riscontrare un rinnovato interesse per il problema del contenimento di fluidi inquinanti, non solo in caso di rottura del sistema ma anche durante il normale funzionamento, in relazione all'impatto ambientale determinato da eventuali perdite.

Allo scopo di misurare le caratteristiche del distacco tra labbro ed albero che possono condurre a perdite di lubrificante è stato realizzato un banco di prova che utilizza le tecniche della visione industriale e, in particolare, si è implementato un apposito tool di *edge detection* con risoluzione sub-pixel. Le prove sono state condotte sia su componenti in NBR, così da poter essere confrontate con studi precedenti, sia con tenute in FPM.

I risultati mostrano un legame tra la temperatura del lubrificante e la frequenza della sollecitazione che determina il distacco del labbro dall'albero. Tale legame si ripete al variare dei parametri considerati ed è in accordo con le simulazioni numeriche condotte in precedenza.

La misura dell'ampiezza dell'arco del distacco fornisce risultati con un soddisfacente grado di ripetibilità. La misura della distanza massima tra labbro ed albero in direzione radiale non è al momento ricavabile a causa della insufficiente retroilluminazione della zona di indagine. La soluzione di questo problema costituisce, insieme all'estensione del metodo ad altre famiglie di materiali di interesse industriale, lo sviluppo al momento prevedibile di questa ricerca.

## *References:*

Silvestri, M. et al. 2004. *Dynamic Seals Behaviour under Effect of Radial Vibration*, Proceedings of 14<sup>th</sup> International Colloquium Tribology, Stuttgart, Germany: 1247-1254.

*Curriculum vitae:* Marco Silvestri ha lavorato nei settori di ricerca e sviluppo di Computes s.r.l. (CAD/CAM), Tecnomec s.r.l. (automazioni per salumifici) e ViciVision s.r.l. (visione industriale). Dal 2002 è ricercatore presso l'Università di Parma, dove tiene i corsi di Meccanica degli Azionamenti e Regolazione e Controllo dei Sistemi Meccanici. Studia soluzioni meccatroniche basate su leggi di moto speciali, macchine automatiche innovative, sperimentazioni e simulazioni di problemi di tribologia.

# Simulazione numerica per il virtual testing di caschi per motocicletta

Mirella Aiello

*Dipartimento Arte Scienza e Tecnica del Costruire, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria Italy*

Ugo Galvanetto e Lorenzo Iannucci

*Department of Aeronautics, South Kensington Campus, Imperial College London, SW7 2AZ, UK  
E-mail: mirella.aiello@unirc.it*

*Parole chiave:* impatto, casco, virtual test

Il principale obiettivo del presente lavoro è la simulazione di prove di impatto di un casco per motocicletta disponibile in commercio. La definizione del modello consente, quindi, lo sviluppo di uno strumento di progetto virtuale di fondamentale importanza per migliorare le caratteristiche del casco stesso.

Le proprietà meccaniche del guscio e dell'imbottitura di protezione sono definite mediante valori verosimili trovati in letteratura e sono successivamente modificate per tener conto delle temperature di condizionamento, cui ogni casco viene sottoposto.

La simulazione numerica delle prove di impatto sul casco è eseguita usando uno specifico codice agli elementi finiti Ls-dyna3D, nel quale le caratteristiche meccaniche dei componenti il casco vengono definite mediante appropriati modelli del materiale. Le prove numeriche e sperimentali sono eseguite con riferimento alle disposizioni dettate dalla Normativa Europea ECE 22-05.

I risultati ottenuti dimostrano la possibilità di simulare accuratamente le prove di impatto e suggeriscono che sarà probabilmente possibile introdurre la tecnica della simulazione numerica nei processi produttivi dei caschi.

*Riferimenti:*

1. JO. Hallquist, LS-DYNA 970 User's Manual. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2000
2. ECE Regulation 22.05, Uniform provisions concerning the approval of protective helmets and of their visors for drivers and passengers of motorcycles and mopeds, Geneva, 1995.

*Curriculum vitae:* Mirella Aiello svolge il dottorato di ricerca in Ingegneria dei materiali e delle strutture presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Ha svolto attività di ricerca presso il Department of Aeronautics dell'Imperial College di Londra dove si è occupata di modellazione di caschi in composito di motocicletta.



# Elastic behaviour of shafts affected by slightly helicoidal cracks

Nicolò Bachschmid

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 34, 20156 Milano*

*E-mail: nicolo.bachschmid@polimi.it*

Ezio Tanzi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 34, 20156 Milano*

*E-mail: ezio.tanzi@mecc.polimi.it*

*Keywords: crack, helicoidal*

The static elastic behaviour of a slant or helicoidal cracked shaft has been analysed by means of a 3D non-linear model, calculating deflections in different load conditions. This kind of crack can develop in rotating shafts loaded by huge torsion and bending loads. The results are compared to those of the more common transverse planar crack. The peculiarity of the behaviour of shafts affected by slightly helicoidal cracks, which will reflect also in the dynamical behaviour of rotating cracked shafts, are emphasized.

A slightly helicoidal crack had developed in the shaft of a steam turbine of a huge turbo-generator in a nuclear power plant, therefore the interest in analysing the behaviour of shafts affected by this type of cracks has developed.

The crack which is studied in this paper has developed along a helicoidal path with an angle of  $6^\circ$  only on the outer surface of the shaft. In order to study the behaviour of the shaft affected by a slight helicoidal crack a reduced scale model specimen has been designed, suitable to be used also for laboratory experimental tests. This research has been performed in the frame of a cooperation with EDF R&D Department Analyses Mécaniques et Acoustique.

Different rotating loads have been applied to one end of the cracked specimen clamped at its other end, and the so called breathing behaviour (the opening and closing mechanism) and deflections have been evaluated for the different angular positions of the loads with respect to the crack. The effect of the applied constant torque combined to the rotating bending load (assuming a reference system fixed on the rotating shaft), which are responsible for generating the helicoidal crack, is analysed in detail, by evaluating the deflections according to the 6 degrees of freedom.

*Curriculum vitae:* N. Bachschmid, full professor of Applied Mechanics since 1986, is actually teaching “Regolazione, Dinamica e Diagnostica delle Macchine Rotanti” , “Controllo del Rumore” and “Meccanica delle Vibrazioni” and directs the course in Mechanical Engineering at the Faculty of Industrial Engineering of the Politecnico di Milano, authors more than 70 papers on Vibrations, Rotordynamics and Diagnostics, has been and is coordinator of several funded researches on Rotordynamics and is actually chair of the Subcommittee Diagnostics of the IFToMM Committee Rotordynamics.

# Dynamic characteristics of tilting 4-pad journal bearing

Sobhy M. Ghoneam ,

*Mechanical Design & Production Engineering Department, Menoufya University*

*Shebin-el-kom, Egypt,*

*E-mail:ghoneam22000@yahoo.com*

Stanislaw Strzelecki

*Department of Machine Design, Lodz University of Technology, Lodz, Poland*

*E-mail: strzelec@pkm1.p.lodz.pl*

**Keywords:** hydrodynamic lubrication, , tilting –pad journal bearing, dynamic characteristics

Trends towards higher speeds of operation and for increased performance of turbomachinery has aroused much interest in the subject of bearing influenced rotor dynamics. The dynamic characteristics, which are determined by the stiffness and damping coefficients of the bearing are of concern to bearing designers and users of turbomachinery, since stability limits of the bearing could be approached, and the bearing or the bearing system can undergo failure.

The journal bearing systems of high speed rotating machinery apply the radial tilting-pad journal bearings. The journal peripheral speed reaches 220 m/s and the determination of both static and dynamic characteristics of system rotor-bearings, critical speeds, response of system on the dynamic load as well as stability of rotor are very important.

The literature contains a vast amount of information, e.g. Lund, Klumpp, Strzelecki, on the design, modelling, and dynamic performance of tilting pad journal bearing. Many application guidelines and computer programs have been developed and are generally available to aid design selection and evaluation.

The paper introduces the results of theoretical calculations of the dynamic characteristics of tilting 4-pad journal bearing. The geometry, Reynolds', energy and viscosity equations that allow for obtaining the oil film pressure and temperature, oil film resultant force are the grounds for the dynamic characteristics of bearing. The dynamic characteristics were determined in the range of assumed bearing length to diameter ratio, relative clearance and pad relative clearance.

## *References*

Lund, J.W., 1964, Spring and Damping Coefficients for the Tilting Pad Journal Bearing, *Trans. ASLE*, 7. 342-352.

Strzelecki S., 2002, Dynamic Characteristics of Tilting 5-Pads Journal Bearing at Asymmetric Support of Pads. *Proc. of the 6th International Conference on Rotor Dynamics*. September 30 to October 3, 2002. Sydney, Australia. Vol. II. 807 - 814.

*Curriculum vitae:* Sobhy M. Ghoneam graduated Mechanical Design & Production Engineering Department, Menoufya University in Egypt. Main fields of activity are rotor dynamics and tribology.

Stanislaw Strzelecki graduated Lodz University of Technology, Department of Mechanical Engineering in Poland. Main field of scientific activity are high speed journal bearings with stationary segments as well as tilting- pad.

# Analisi del distacco fibra-matrice nei compositi unidirezionali viscoelastici con microstruttura periodica

Andrea Caporale, Raimondo Luciano  
*DiMSAT, Università di Cassino, Italia*  
*E-mail: a.caporale@unicas.it, luciano@unicas.it*

*Parole chiave:* materiali compositi, omogeneizzazione, debonding, viscoelasticità, elementi finiti

Negli ultimi anni l'uso dei materiali compositi con matrice polimerica viscoelastica è notevolmente aumentato. In letteratura sono presenti numerosi metodi per omogeneizzare compositi viscoelastici lineari (Luciano e Barbero [1995]), che non sono applicabili in presenza di non linearità, quali danno, scollamento, eccetera. Anche il problema del legame non perfetto tra fibra e matrice è stato studiato da numerosi autori (Ghosh *et al.* [2000]).

Nel presente lavoro, il metodo degli elementi finiti è utilizzato per studiare il comportamento micromeccanico omogeneizzato di un composito unidirezionale con matrice viscoelastica lineare legata in modo non perfetto alle fibre, i.e. il campo degli spostamenti ha un salto in corrispondenza dell'interfaccia fibra-matrice. Il comportamento del composito risulta viscoelastico non lineare a causa del distacco delle fibre dalla matrice. La microstruttura periodica del composito preso in considerazione consente di determinarne il comportamento omogeneizzato tramite lo studio della cella unitaria (CU), soggetta ad opportune condizioni al contorno. Le analisi numeriche sono condotte sulla mezza CU e le corrispondenti condizioni al contorno costituiscono l'estensione al caso tridimensionale di quelle proposte da Taliercio e Coruzzi [1999] valide per analisi con spostamenti solo nel piano perpendicolare alle fibre. Nei compositi considerati, il primo distacco tra fibra e matrice è seguito da un brusca caduta della rigidità e della resistenza del composito cui corrisponde lo scollamento istantaneo di una estesa porzione dell'interfaccia. Nelle simulazioni numeriche una macro-deformazione è applicata con velocità costante sulla mezza CU e sono determinati gli involuppi delle macro-deformazioni corrispondenti al primo distacco (IPD). I risultati mostrano che gli IPD sono notevolmente influenzati dal rilassamento del modulo di taglio della matrice, mentre gli effetti sugli IPD del rilassamento del modulo volumetrico sono trascurabili quando la macro-deformazione è applicata con una velocità relativamente alta. Inoltre, quando il modulo volumetrico e quello di taglio hanno identiche leggi di rilassamento, gli involuppi delle macro-tensioni di primo distacco non subiscono variazioni significative rispetto a quelli del composito con costituenti elastici lineari.

## *Bibliografia:*

- Ghosh, S., Ling, Y., Majumdar, B. & Kim, R. 2000. *Interfacial debonding analysis in multiple fiber-reinforced composites*. *Mechanics of Materials*, 32: 561-591.
- Luciano, R. & Barbero, E.J. 1995. *Analytical expressions for the relaxation moduli of linear viscoelastic composites with periodic microstructure*. *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, 62: 786-793.
- Taliercio, A. & Coruzzi, R. 1999. *Mechanical behaviour of brittle matrix composites: a homogenization approach*. *Int. J. Solids Structures*, 36: 3591-3615.

# Space-time multiscale FE simulations of dynamic composite delamination

Stefano Mariani<sup>1</sup>, Anna Pandolfi<sup>2</sup>

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano*

Raffaella Pavani<sup>3</sup>

*Dipartimento di Matematica "Francesco Brioschi", Politecnico di Milano*

*E-mail: <sup>1</sup>stefano.mariani@polimi.it, <sup>2</sup>anna.pandolfi@polimi.it, <sup>3</sup>raffaella.pavani@polimi.it*

*Keywords:* composites, nonlinear dynamics, multiscale analysis

Layered composites failure typically involves debonding at the resin-enriched interphases between laminae. Such phases are usually narrow enough, so that their width can be disregarded when compared to the whole laminate thickness. Interfacial (i.e., referring to a zero thickness layer) constitutive laws are often formulated to simulate delamination growth.

In order to accurately capture the delamination growth, we adopt a coupled space-time multiscale integration algorithm (E and Engquist. 2003, Mariani et al. 2005). The main features of the proposed approach are: i) a fine spatial discretization in the process zone, where the evolution of cohesive tractions demands a detailed description; ii) a high-order time integration algorithm.

Results concerning mode I delamination testify the good performance of the employed multiscale approach.

## *References*

E, W., and Engquist, B. 2003. The heterogeneous multiscale methods. *Communications in Mathematical Sciences*, 1, 87-132.

Mariani, S., Pandolfi, A., and Pavani, R. 2005. Coupled space-time multiscale simulations of dynamic delamination tests". *Materials Science*, in press.

## *Curriculum vitae:*

Stefano Mariani received the M.S. degree (cum laude) in Civil Engineering and the Ph.D. degree in Structural Engineering from the Politecnico di Milano in 1995 and 1999, respectively. He is currently Assistant Professor at the Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano.

Anna Pandolfi received the M.S. degree (cum laude) in Civil Engineering in 1984. She is Associate Professor in Structural Mechanics at the Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano.

Raffaella Pavani graduated in Mathematics (with full marks), was industrial researcher for twelve years in the field of Applied Mathematics. In 1990 she entered the academic career, as Assistant Professor of Numerical Analysis; at the present she is Associate Professor at the Department of Mathematics, Politecnico di Milano.

# Calibration of composite constitutive laws by a sigma-point Kalman filter

Stefano Mariani<sup>1</sup>, Alberto Corigliano<sup>2</sup> and Aldo Ghisi<sup>3</sup>

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano*

*E-mail: <sup>1</sup>stefano.mariani@polimi.it, <sup>2</sup>alberto.corigliano@polimi.it, <sup>3</sup>aldo.ghisi@polimi.it*

*Keywords:* composites, nonlinear dynamics, parameter identification, Kalman filter

A major failure mode in layered composites is caused by the nucleation and propagation of interlaminar cracks. This process can be modeled by assuming that: the layers are elastic; the progressive interlaminar decohesion is driven by softening interface constitutive laws (Alfano and Crisfield 2001; Corigliano 2003). The calibration of the constitutive model is here achieved through the recently proposed sigma-point, or unscented Kalman filter (Julier, Uhlmann and Durrant-Whyte 2000). The main features of this nonlinear filter are: it does not require the computation of the gradient of the constitutive equations; the statistics of the system state variables (model parameters and nodal displacements) are accurately propagated in time up to the third-order.

The main purpose of the present study is to evaluate the performance of the sigma-point Kalman filter for real-time identification of unknown interface properties and of the failing surface, by exploiting only free-surface measurements.

## *References*

Alfano, G., and Crisfield, M.A. 2001. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50, 1701–1736.

Corigliano, A. 2003. *Damage and Fracture Mechanics Techniques for Composite Structures*. Chapter 9 of *Comprehensive Structural Integrity*, edited by I. Milne, R.O. Ritchie, and B. Karihaloo, Volume 3, 459–539. Elsevier Science.

Julier, S., Uhlmann, J., and Durrant-Whyte, H.F. 2000. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45, 477–482.

## *Curriculum vitae:*

Stefano Mariani received the M.S. degree (cum laude) in Civil Engineering and the Ph.D. degree in Structural Engineering from the Politecnico di Milano in 1995 and 1999, respectively. He is currently Assistant Professor at the Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano.

Alberto Corigliano received the M.S. degree in 1988 (cum laude) in Civil Engineering from the Politecnico di Milano, where from 1991 to 1998 he has been Assistant Professor and from 1998 to 2002 Associate Professor. He is now Full Professor at the Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano.

Aldo Ghisi received the M.S. degree in Civil Engineering and the Ph.D. degree in Structural Engineering from the Politecnico di Milano in 1999 and 2005, respectively. He is currently a collaborator at the Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano.

# Simulazione con l'uso di elementi di interfaccia di propagazione di cricche dovuta a fatica

Ugo Galvanetto e Paul Robinson

*Department of Aeronautics, Imperial College London, UK*

*E-mail: u.galvanetto@imperial.ac.uk*

*Keywords:* delaminazione, fatica, materiali compositi

Si presenta una nuova tecnica computazionale per la simulazione della propagazione di cricche in materiali compositi sottoposti a carichi ciclici. Le strutture composite sono spesso formate da strati che sono incollati fra loro nel processo di cura. La delaminazione è la separazione fra tali strati e può essere causata da effetti di bordo, urti o altre cause di consistenti tensioni interlaminari. La crescita della delaminazione, che può causare il collasso strutturale, può essere rappresentata usando metodi basati sulla Meccanica della frattura elastica lineare (LEFM). Un approccio alternativo per simulare il processo di delaminazione è basato sul Cohesive-Zone Model (CZM) che ipotizza l'esistenza di una zona all'apice dell'area delaminata dove le tensioni non sono nulle e possono avvenire spostamenti relativi. Questo modello combina principi della LEFM e della meccanica del danneggiamento ed è applicato con successo alle simulazioni numeriche per mezzo di un particolare tipo di elemento finito: l'elemento di interfaccia. L'uso di elementi di interfaccia per l'analisi della delaminazione in strutture composite è stato ampiamente documentato, per esempio da Crisfield et al. [2001]. Comunque, tali formulazioni non considerano la crescita della delaminazione dovuta a carico ciclico. Nel presente studio l'elemento di interfaccia proposto da Crisfield e collaboratori è stato ulteriormente sviluppato per permettere la propagazione di cricche dovuta alla fatica.

Alcune ipotesi sono introdotte per semplificare le procedure di calcolo. Il carico ciclico, sia esso una forza o uno spostamento, è sinusoidale ed oscilla fra zero ed un valore massimo costante. Il carico applicato numericamente verrà considerato costante ed uguale al valore massimo durante il ciclo, analogamente lo spostamento relativo calcolato all'interfaccia sarà considerato come l'inviluppo della sua variazione nel tempo, Peerlings et al. [2000]. Inoltre il modello non prevede lo sviluppo di deformazioni permanenti e il valore minimo di deformazioni, tensioni e spostamenti relativi all'interfaccia è zero. L'incremento infinitesimo della variabile danneggiamento è suddiviso in due contributi, uno dovuto all'incremento dell'ampiezza dello spostamento relativo e il secondo all'incremento del numero dei cicli.

## *References:*

- Alfano G., Crisfield M.A. (2001) 'Finite element interface models for delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues'. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **50**, 1701-1736.
- Peerlings R. H. J., Brekelmans W.A.M., de Borst R., Geers M.G.D. (2000) 'Gradient-enhanced damage modelling of high-cyclic fatigue.' *Int. J. of Numer. Meth. Engng.*, **49**, 1547-1569.

*Curriculum vitae di UG:* Laurea in Ingegneria Civile, PhD in Meccanica Strutturale, attualmente Senior Lecturer nel Department of Aeronautics, Imperial College London.



## Martedì 13 settembre

---

ST6 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: ANALISI E IDENTIFICAZIONE DEL DANNO E DELLA FRATTURA	63
ST7 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: STABILITÀ	67
MM7 – MECCANICA DELLE MACCHINE: MULTIBODY	72
MM8 – MECCANICA DELLE MACCHINE: ROBOTICA	76
SO4 – MECCANICA DEI SOLIDI: NANOSTRUTTURE	80
ST5 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: ANALISI E IDENTIFICAZIONE DEL DANNO	84
MM5 – MECCANICA DELLE MACCHINE: VEICOLI	91
MM6 – MECCANICA DELLE MACCHINE: ROBOTICA	100
SO3 – MECCANICA DEI SOLIDI: LEGAMI COSTITUTIVI	107
GE1 – MECCANICA GENERALE	114
ST8 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: MURATURE	121
ST9 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: FRP	127
MM9 – MECCANICA DELLE MACCHINE: CAMME E LUBRIFICAZIONE	132
SO5 – MECCANICA DEI SOLIDI: MECCANICA DELLA FRATTURA	139
GE2 – MECCANICA GENERALE	145





# Influenza dell'errore strumentale sull'identificazione del danno in travi elastiche

Salvatore Caddemi, Annalisa Greco

*Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università degli Studi di Catania, Italy*

*E-mail: scaddemi@dica.unict.it, E-mail: agreco@dica.unict.it*

Antonino Morassi

*Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università degli Studi di Udine, Italy*

*E-mail: antonino.morassi@uniud.it*

*Keywords:* identificazione, danneggiamento, travi elastiche, errori strumentali

La maggior parte delle tecniche proposte in letteratura per l'identificazione del danno strutturale si basa sull'esecuzione di prove non distruttive che comportano l'acquisizione della risposta strutturale in regime statico o dinamico. Mentre la misura sperimentale delle variazioni della risposta rispetto al sistema integro è al giorno d'oggi relativamente semplice, la sua interpretazione a scopi diagnostici conduce ad una classe di problemi inversi che sono tuttora oggetto di studi e che solo in contesti piuttosto semplici hanno trovato una sistemazione teorica soddisfacente. In questo lavoro l'attenzione è rivolta all'impiego di misure di tipo statico per la localizzazione di danni concentrati in travi elastiche ad asse rettilineo. In letteratura sono disponibili svariate procedure diagnostiche di tipo statico che richiedono l'implementazione di metodi risolutivi di tipo numerico. L'influenza dell'errore strumentale sulle procedure diagnostiche in queste circostanze può essere condotto esclusivamente mediante simulazioni di Monte Carlo. Come conseguenza, gli studi parametrici sono molto onerosi dal punto di vista computazionale e danno scarse indicazioni sulle condizioni da imporre sui dati al fine di minimizzare l'influenza dell'errore strumentale sui risultati dell'identificazione. Recentemente è stata proposta una procedura per l'identificazione di danni concentrati in travi rettilinee da misure statiche che ha consentito di ottenere soluzioni esplicite in termini di posizione ed intensità del danno (Caddemi e Morassi, 2004). In questo lavoro si valuta l'influenza dell'errore strumentale sull'identificazione del danno facendo uso della soluzione esplicita fornita da Caddemi e Morassi. L'errore strumentale è modellato mediante variabili aleatorie sovrapposte alle misure di spostamento esatte. Vengono determinate le espressioni esplicite del valor medio e della deviazione standard normalizzati degli errori commessi sulla posizione e sull'intensità del danno. Sulla base di queste espressioni esplicite viene condotto uno studio parametrico per individuare quali condizioni sulle misure di spostamento statico consentono di minimizzare l'influenza dell'errore strumentale sui risultati dell'identificazione del danno.

## *Bibliografia:*

Caddemi S. and Morassi A. 2004. *Crack detection in elastic beams by static measurements*, sottomesso per la pubblicazione.

*Curriculum vitae:* Annalisa Greco. Professore associato settore scientifico disciplinare ICAR 08 presso la facoltà d'Ingegneria dell'Università di Catania. E' titolare del corso di Scienza delle Costruzioni per il corso di laurea triennale in Ing. Civile e tiene per supplenza il corso di Analisi anelastica delle strutture per il corso di laurea specialistica in ingegneria delle strutture.

# A coupled stress and energy fracture criterion based on discrete crack advancement

Pietro Cornetti, Nicola Pugno, Alberto Carpinteri

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: [pietro.cornetti@polito.it](mailto:pietro.cornetti@polito.it), [nicola.pugno@polito.it](mailto:nicola.pugno@polito.it), [alberto.carpinteri@polito.it](mailto:alberto.carpinteri@polito.it)*

*Keywords:* finite fracture mechanics, fracture toughness, size effect

Aim of the present paper is to introduce a new failure criterion in the framework of Finite Fracture Mechanics. Criteria assuming that failure of quasi-brittle materials is affected by the stresses acting at a finite distance from the crack tip are widely used inside the Scientific Community (e.g. Carpinteri & Pugno (2005)). These approaches, in addition to some others, can be grouped together under the general term of Theory of Critical Distances, in which linear-elastic analysis is combined with a material-dependent critical length parameter. The relevant length parameter is assumed to be a material constant: it generally approximates a microstructural length in the material such as the grain size.

On the other hand, the novelty of the present approach relies on the assumption that this finite distance (i.e. the finite crack extension) is not a material constant but a structural parameter. Its value is determined by a condition of consistency of both energy and stress approaches. In this case, the relevant length parameter can be associated with the size of the damage zone at failure. In order to check its soundness, an application of the present criterion to the strength prediction for three point bending tests is performed and a comparison with experimental data by Karihaloo et al. (2003) on high strength concrete beams is shown.

## *References:*

Carpinteri A., Pugno N. 2005. *Fracture instability and limit strength conditions in structures with re-entrant corners*, Engineering Fracture Mechanics, 72, 1254-1267.

Karihaloo B.L., Abdalla H.M., Xiao Q.Z. 2003. *Size effect in concrete beams*, Engineering Fracture Mechanics, 70, 979-993.

*Curriculum vitae:* Dr. Pietro Cornetti and Dr. Nicola Pugno are Assistant Professors of Structural Mechanics. Dr. Alberto Carpinteri is Chair of Structural Mechanics.

# Delamination failure in curved laminates

Domenico Bruno

*Department of Structural Engineering, University of Calabria, Via P.Bucci, 87036, Cosenza, Italy*  
d.bruno@unical.it

Rodolfo Carpino

*Department of Structural Engineering, University of Calabria, Via P.Bucci, 87036, Cosenza, Italy*  
r.carpino@strutture.unical.it

Paolo Nevone Blasi

*Department of Structural Engineering, University of Calabria, Via P.Bucci, 87036, Cosenza, Italy*  
p.nevone@strutture.unical.it

*Keywords:* curved laminated, delamination, interface, energy release rate, mode partition.

An improved technique for the analysis of interlaminar crack growth in laminated curved beams subjected to mixed-mode loading conditions is here described. By using a multi-layer curved beam model and curved interface elements leads to model the structure as a succession of first-order shear deformable beams joined by adhesive interfaces. The interface containing the crack is simulated by means of a damageable linear interfacial constitutive law which involves two stiffness coefficients. The total energy release rate and its individual mode components are obtained when the stiffnesses, considered as penalty parameters, approach infinity. Results are obtained by using an accurate numerical integration procedure able to deal with stress singularities at the crack tip. Comparisons with results available from literature obtained by using solid finite elements show the accuracy of the proposed model and numerical examples demonstrate the capability of the method to take into account the influence of curvature and of transverse shear deformability.

## *References:*

- Baldacci R, 1983. *Scienza delle Costruzioni* vol.2. UTET, Torino, Italy (in italian).
- Bruno D, Greco F, Lonetti P, 2003. *A coupled Interface-multilayer approach for mixed mode delamination and contact analysis in laminated composites*. Int. J. Solids Structures 40, 7245-7268.
- Bruno D, Greco F. *Mixed mode delamination In plates: a refined approach*. International Journal Solids Structures 2001; 38/50-51:9149-9177.
- Jones RM, 1975. *Mechanics of Composite Materials*. Scripta: Washington, DC.
- Lu, T.J., Xia, Z.C., Hutchinson, J.W., 1994. *Delamination of beams under transverse shear and bending*. Materials Science and Engineering A188,:103–112.
- Münch A, Ousset Y, 2002. *Numerical simulation of delamination growth in curved interfaces*. Computer Methods Applied Mechanics Engineering 191, 2045-2067.
- Raju IS, 1987. *Calculation of strain-energy release rates with higher order and singular finite elements*. Eng. Fracture Mech. 28, 251-274.
- Rybicki EF, Kanninen MF, 1977. *A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral*. Eng. Fracture Mech. 9, 931-938.

# Un nuovo metodo di identificazione del danneggiamento basato sulla 'proper orthogonal decomposition'

Ugo Galvanetto e George Violaris

*Department of Aeronautics, Imperial College London, UK*

*E-mail: u.galvanetto@imperial.ac.uk*

*Keywords:* danneggiamento strutturale, vibrazioni, proper orthogonal decomposition

Si presenta una nuova idea per scoprire e localizzare il danneggiamento di strutture con l'applicazione di concetti derivati dalla teoria della Proper Orthogonal Decomposition (POD). L'idea è verificata per mezzo di simulazioni numeriche che forniscono risultati promettenti. Il presente lavoro costituisce l'inizio di una ricerca che prevede l'applicazione sperimentale delle nuove idee proposte.

Strutture in diversi campi dell'ingegneria, civile, meccanica, aeronautica, ... sono in continuo esercizio nonostante il loro invecchiamento e la conseguente possibilità di aumento del danneggiamento. Il danneggiamento strutturale è solitamente definito dal confronto fra due stati del sistema, dei quali uno è lo stato iniziale non danneggiato e l'altro lo stato corrente di cui si vuole conoscere la possibile condizione di danneggiamento. Con i termini 'non-destructive testing' (NDT) si indica la possibilità di esaminare l'integrità di una struttura con una tecnica che non rischi di danneggiare ulteriormente la struttura stessa e che solitamente è usata per individuare difetti concentrati.

Le variazioni delle proprietà vibrazionali di una struttura possono costituire un'indicazione non distruttiva della presenza di danneggiamento ottenibile in modo globale, Doebling et al. [1990]. Il presente lavoro descrive l'idea di caratterizzare le proprietà vibrazionali di una struttura, e quindi le loro variazioni, per mezzo della POD. La POD si sta affermando come un efficace strumento nello studio della dinamica strutturale e delle vibrazioni. La POD è particolarmente conveniente quando è applicata a sistemi lineari. Infatti in Kerschen et al. [2002] è stato dimostrato che la risposta ad una forzante armonica di una sistema lineare è descritta compiutamente da un singolo POM. L'idea fondamentale del presente lavoro è quella di calcolare il Proper Orthogonal Mode (POM) dominante di una trave sottoposta a vibrazioni armoniche nei due stati integro e danneggiato, e di inferire la presenza e la posizione del danneggiamento dalle variazioni di tale POM.

## *References:*

Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B. and Shevitz D. (1990) '*Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics*', Technical report LA-13070, Los Alamos National Laboratories, Los Alamos, NM.

Kerschen G. and Golinval J.C. (2002) '*Physical interpretation of the proper orthogonal modes using the singular value decomposition*', *J.Sound Vib.*, **249**, pagg. 849-865.

*Curriculum vitae di UG:* Laurea in Ingegneria Civile, PhD in Meccanica Strutturale, attualmente Senior Lecturer nel Department of Aeronautics, Imperial College London.

# Esponenti di Lyapunov per sistemi impulsivi: frontiere di stabilità e transizione al caos

Anna Sinopoli, Alessio Ageno

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Via Gramsci 53, 00195 Roma (Italy)*

*E-mail: anna.sinopoli@uniroma1.it*

*Keywords:* Esponenti di Lyapunov, dinamica discontinua, stabilità orbitale.

In questo lavoro alcune tecniche - recentemente sviluppate per valutare sia analiticamente sia numericamente le caratteristiche di stabilità di sistemi dinamici discontinui – sono usate per qualificare le risposte in zone prossime a comportamenti caotici. Il problema analizzato è quello delle oscillazioni senza scorrimento del blocco semplicemente appoggiato su una frontiera mobile. Nonostante tale problema sia stato oggetto di numerose ricerche durante gli ultimi decenni, la dinamica di tale sistema è così complessa da poter essere assunta come emblematica di temi emergenti in dinamica non lineare: il carattere unilaterale del contatto, l'attrito secco alla Coulomb e soprattutto gli urti rendono il sistema ibrido (Leine [4]), perché caratterizzato da fasi sia continue sia discontinue. L'analisi di stabilità della risposta dinamica richiede pertanto l'estensione e l'opportuno adattamento degli strumenti tipici delle procedure variazionali dell'analisi perturbativa; ci si riferisce in particolare alla necessità di ridefinire lo Jacobiano del sistema in modo da tener conto delle discontinuità dovute agli urti. In questo lavoro, la teoria generale sviluppata da Müller [5] è utilizzata ed adattata per la valutazione degli esponenti di Lyapunov a cavallo delle discontinuità, introducendo il trattamento sia analitico sia numerico della cosiddetta “saltation” matrix. E' stato allora possibile sia adattare l'algoritmo numerico per integrare le equazioni esatte del moto, sia ottenere soluzioni in forma chiusa del corrispondente problema approssimato (lineare a tratti) assumendo ipotesi meno restrittive di quelle tipiche della letteratura (Hogan [2]). Le frontiere delle regioni di stabilità di particolari soluzioni periodiche - ottenute con il metodo analitico approssimato - sono state utilizzate per guidare la scelta dei valori dei parametri utili a localizzare, per la soluzione numerica esatta, le regioni in cui si possono manifestare biforcazioni: tra queste particolarmente interessanti appaiono le sequenze di risposte caratterizzate da raddoppiamento di periodo e transizione al caos.

## *References:*

1. Sinopoli, A., “Unilaterality and Dry Friction: A Geometric Formulation for Two-dimensional Rigid Body Dynamics”, *Non Linear Dynamics*, 1997, Vol. 12(4), pp. 343-366.
2. Hogan, S. J., “On the dynamics of rigid-block motion under harmonic forcing”, *Proc. R. Soc. Lond.*, A425, 1989, pp. 441-476.
3. Ageno, A., Sinopoli, A., “Lyapunov’s exponents for non-smooth dynamics with impacts: Stability analysis of the rocking block”, *Non-Smooth Dynamical Systems: Recent Trends and Perspectives*, Special Issue of the *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2002 (Accepted for publication).
4. Leine, R. I., *Bifurcations in Discontinuous Mechanical Systems of Filippov-Type*, 2000, The Universiteitsdrukkerij TU Eindhoven, The Netherlands.
5. Müller, P. C., “Calculation of Lyapunov exponents for Dynamic systems with discontinuities”, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 5 (9), 1995, pp. 1671-1681.

# Analisi di affidabilità di strutture con parametri meccanici variabili attraverso il metodo della superficie di risposta

Barbara Ferracuti\*, Marco Savoia

*DISTART – Tecnica delle costruzioni, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna*

*E-mail: barbara.ferracuti@mail.ing.unibo.it*

*Keywords:* affidabilità, superficie di risposta, campo aleatorio, monte carlo, elementi finiti

Nel presente lavoro, si studia l'affidabilità di elementi strutturali nei quali alcune caratteristiche meccaniche (quali ad esempio la resistenza) siano definibili come campi aleatori sul dominio dell'elemento, con valore assegnato della distribuzione di probabilità e della lunghezza di correlazione (Vanmarcke [1988]). Il sistema strutturale oggetto di studio è un pilastro in calcestruzzo armato incastrato alla base e soggetto all'estremo libero ad uno sforzo normale eccentrico ed una forza orizzontale. L'eccentricità del carico verticale, la forza orizzontale ed il valore medio della resistenza a compressione sono considerati variabili aleatorie con distribuzione gaussiana. Al contrario, la variazione della resistenza nell'elemento strutturale è definita per mezzo di un campo aleatorio.

Il comportamento della struttura è stato determinato con il metodo della superficie di risposta al secondo ordine: un'espressione, polinomiale di secondo grado nel caso in esame, che descrive la risposta della struttura in funzione delle grandezze aleatorie principali (Khuri and Cornell [1996]).

In presenza di parametri dipendenti dallo spazio, le variabili aleatorie da cui dipende la risposta vengono partizionate in due sottovettori, il primo contenente le variabili più rilevanti, da tenere in conto esplicitamente, ed il secondo tutte le altre variabili. Le variabili non esplicite sono nel caso in esame parametri meccanici che presentano una variabilità spaziale sulla struttura, come ad esempio la variazione della resistenza a compressione del calcestruzzo rispetto al suo valore medio.

L'efficacia del procedimento consiste nel caratterizzare la risposta della struttura tramite un numero limitato di analisi numeriche.

Si è infine definita una superficie di stato limite in funzione della superficie di risposta, prefissando la domanda della struttura. Dalla curva di stato limite è determinata la probabilità di collasso della struttura o curva di fragilità mediante convoluzione. Sono stati confrontati i risultati ottenuti con metodi Monte Carlo, FORM e SORM.

## Bibliografia

Khuri, A.I., Cornell, J.A. 1996. *Response Surfaces: Design and Analyses*. M. Dekker Inc., New York.  
Vanmarcke, E. 1988. *Random Fields, analysis and synthesis*, The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England.

*Curriculum vitae:* Barbara Ferracuti è dottoranda presso l'Università di Bologna. I suoi principali interessi di ricerca riguardano l'affidabilità delle strutture e strutture rinforzate con materiali compositi. Marco Savoia è Professore Ordinario di Tecnica delle costruzioni presso l'Università di Bologna, e coordinatore del Laboratorio Prove Strutture. I suoi principali interessi di ricerca riguardano l'affidabilità strutturale, i materiali compositi, le strutture in calcestruzzo armato.

# Un modello monodimensionale per l'analisi della biforcazione flesso-torsionale di travi di spessore sottile

G. C. Ruta, M. Pignataro

*Dipartimento di ingegneria strutturale e geotecnica, Università "La Sapienza", Italia;  
E-mail: marcello.pignataro@uniroma1.it, giuseppe.ruta@uniroma1.it*

N. L. Rizzi

*Dipartimento di strutture, Università Roma Tre, Italia;  
E-mail: nlr@uniroma3.it*

*Parole chiave:* travi di spessore sottile, modelli monodimensionali, biforcazione flesso-torsionale

Un aspetto assai interessante della instabilità delle strutture in campo elastico è rappresentato dalla biforcazione flesso-torsionale delle travi cosiddette di spessore sottile. Sono stati presentati numerosi lavori sull'argomento, sia dal punto di vista della modellazione che dal punto di vista della ricerca di soluzioni numeriche per problemi standard. La maggior parte dei lavori di modellazione ottiene per la trave modelli monodimensionali tramite procedure di proiezione da modelli più ricchi dal punto di vista della descrizione geometrica.

Gli autori hanno considerato un modello monodimensionale *diretto*, la cui cinematica consiste nel piazzamento dei punti dell'asse, nella rotazione delle sezioni, inizialmente piane, ed in una misura sommaria dell'ingobbamento di queste. Misure opportune di deformazione vengono introdotte per differenza tra un trasporto generico ed uno rigido. La potenza meccanica è definita come un funzionale lineare dei descrittori cinematici e delle loro approssimazioni prime (ci si limita, cioè, ad una teoria meccanica di grado uno); le azioni meccaniche per il modello emergono come duali dei campi di velocità e delle loro derivate: in particolare, il bitaglio ed il bimomento risultano le azioni che spendono potenza sul descrittore sommario dell'ingobbamento e sulla sua derivata, rispettivamente. Basandosi sul bilancio della potenza, ovvero sull'invarianza della medesima per sovrapposizione di atti di moto rigido, argomenti standard di localizzazione forniscono le equazioni locali di bilancio meccanico per il modello. Sulla scia di quanto presente in letteratura, sembra naturale postulare i vincoli interni di indeformabilità allo scorrimento angolare e di diretta proporzionalità tra misura sommaria d'ingobbamento e curvatura torsionale.

In lavori precedenti, gli autori hanno adottato prescrizioni costitutive iperelastiche non lineari per la formulazione del problema di campo in termini di componenti di spostamento; per ragioni di semplicità, ci si è limitati all'esame di travi con sezioni simmetriche. In questo contributo, si cerca di arricchire le suddette prescrizioni costitutive in modo da rendere conto di geometrie non simmetriche delle sezioni. Si presentano alcuni risultati di biforcazione flesso-torsionale per casi semplici, mostrando che si recuperano alcuni risultati presenti in letteratura.

## *Riferimenti bibliografici:*

- Rizzi N., Tatone A. 1996. *Nonstandard models for thin-walled beams with a view to applications*, Journal of Applied Mechanics vol. 63, pp. 399-403.
- Pignataro M., Ruta G. C. 2002. *Coupled instabilities in thin-walled beams: a qualitative approach*, European Journal of Mechanics A/Solids vol. 22, pp. 139-149.
- Pignataro M., Rizzi N. L., Ruta G. C. 2004. *Buckling and post-buckling in a two-bar frame: a qualitative approach*, 4th int. conf. on coupled instabilities in metal structures (CIMS 2004), pp. 337--346, V. Gioncu, M. Pignataro, J. Rondal eds., ESA, Roma.



# Stability Control Analysis of a M-DOF system

Mario Pasquino

*Faculty of Engineering, University of Naples Federico II, Italy*

*E-mail: pasquino@unina.it*

Francesco Fabbrocino

*Faculty of Engineering, University of Naples Federico II, Italy*

*E-mail: frfabbro@unina.it*

Mariano Modano, Michele Brigante

*Faculty of Engineering, University of Naples Federico II, Italy*

*Keywords: m-dof system control, piezoelectric actuators and sensors, vibrations active control*

This paper presents a theoretical study about active vibration isolation system to be implemented with piezoelectric actuators and sensors which can be advantageous in many engineering applications, particularly in the area of vibration control and earthquake protection systems. A design method of coupling control system for *m-dof* systems is proposed. It shows that collocation control of rigid system responses with an infinite gain are the same as perfect feedback control using the base velocity reference input. The control strategy used is decentralised velocity feedback control, where each of the four actuators is operated independently by feeding back the equipment absolute velocity response at the same location. The particular feature of this control configuration is that, although one end of the actuators is collocated with the sensors, the control system is not a collocation control. This is because the actuators are installed between the equipment and the base structure for the convenience of practical implementation, and thus the actuators excite the base structure as well as the equipment. Because of this, when the flexible base structure is strongly coupled with the mounted equipment, the established theory for collocation control is not directly applicable.

## *References:*

A. Tylikowski, 2003, *Stabilization of Parametric Vibrations of a Non-linear Continuous System*, *Meccanica* 38: 659-668.

Kevin Poulin, Rimas Veicaitis, 2002, *Vibration of Stiffened Composite Panels with Smart Materials*, 15 th ASCE Engineering Mechanics Conference Columbia University, New York.

Pasquino M., Fabbrocino F., 2001, *Teoria e tecnica del Controllo Attivo e Passivo di Sistemi Strutturali*, CUEN, Napoli, Italy.

*Curriculum vitae:* M. Pasquino is full professor of Structural Engineering and head of the Department of Structural Engineering, authors of 70 publications on structural optimization, composite materials, active and semi-active vibration control and thin walled structures; M. Brigante is researcher; F. Fabbrocino is PhD; M. Modano is PhD.

# Buckling of tensioned or compressed cracked thin plates

Roberto Brighenti

*Department of Civil Engineering, Environment and Architecture, University of Parma, Italy*

*E-mail: brigh@unipr.it*

*Keywords:* Buckling, Wrinkling, Cracked tensioned plates, Fracture Mechanics

It is a common practical observation that thin plates can easily undergo to buckling collapse under membrane loading; this mode of failure usually prevail over strength failure when plate's thickness is sufficiently small. It should be pointed out that even for plates under tension loading, the buckling phenomena can takes place: it becomes a quite important occurrence particularly in structures where the presence of cracks or holes is involved. In these situations tensioned plates can easily buckle, showing complex wrinkling deflection patterns in compressed regions around such defects.

The use of thin-walled high-strength panels in many technical fields - such as aerospace, mechanical, power industries, civil engineering applications and so on - is nowadays quite common and in order to evaluate the corresponding safety levels, many researches has been carried out in the last decades in order to quantitatively describe the buckling mode of failure in compression (Wang et al., 1994; Matsunaga, 1997) or in tension (Friedl et al.1986) for such structures. Few studies have been carried out to evaluate the influence of cracks on the buckling load in compressed or tensioned plates (Markström et al., 1980; Riks et al., 1992; Vafai et al., 2002).

In the present paper, Finite Element (FE) analyses are performed to determine the critical load multiplier - both in compression and in tension - of variously cracked rectangular elastic thin plates; in particular the effects of the cracks' length and orientation and the Poisson coefficient of the plate's material (which is made to range between 0.1 and 0.49) is considered.

Moreover a simplified and approximate theoretical approach is proposed to estimate tensile critical buckling stress for cracked panels containing cracks normal to the loading direction. The obtained numerical and analytical results are graphically summarised (in dimensionless form) and compared; some interesting conclusions are finally drawn.

## *References:*

- Friedl N, Rammerstorfer FG, Fischer FD, Buckling of stretched strips. *Comput. Struct.* 2000; 78: 185-190.  
Markström K, Storåkers B. Buckling of cracked members under tension. *Int. J. Solids Struct.* 1980;16:217-229.  
Matsunaga H. Buckling instabilities of thick elastic plates subjected to in-plane stresses. *Comput. Struct.* 1997; 62: 205-214.  
Riks E, Rankin CC, Brogan FA. The buckling behavior of a central crack in a plate under tension. *Engng Fract Mech* 1992; 43: 529-547.  
Wang CM, Xiang Y, Kitipornchai SK, Liew M. Buckling solutions for Mindlin plates of various shapes. *Engng Struct.* 1994; 16: 119-127.

*Curriculum vitae:* Dr. Ing. Brighenti Roberto, laureato in ing. Civile presso l'Univ. di Parma, Dottore di Ricerca in Meccanica delle Strutture presso Univ. di Bologna, ricercatore di Scienza delle Costruzioni dal 1998 presso la Fac. di Ing. dell'Univ. di Parma. Membro dell'Editorial Board della rivista scientifica Internazionale *International Journal of Fatigue* dal 2001.

# Un nuovo metodo del simplesso per il problema di complementarità lineare mista in sistemi multibody con vincoli unilateri

Alessandro Tasora, Elisabetta Manconi, Marco Silvestri  
*Università degli Studi di Parma, ITALY*  
*E-mail: tasora@ied.unipr.it*

*Keywords:* Complementarità, MLCP, metodo del simplesso, multibody, vincoli unilateri.

Le procedure d'integrazione numerica per l'analisi dinamica di sistemi multibody richiedono la soluzione delle accelerazioni incognite ad istanti discreti di tempo. Le disequazioni corrispondenti ai vincoli unilateri implicano la necessità di risolvere un problema di complementarità lineare misto (MLCP) il quale, possedendo una complessità di classe *NP-hard*, comporta gravi ricadute in termini di scarsa efficienza computazionale quando i vincoli unilateri sono numerosi. Per tale ragione, in generale, gli attuali codici multibody non sono in grado di trattare efficacemente problemi con centinaia o migliaia di vincoli unilateri.

In questo lavoro si propone una variante del metodo del simplesso di Dantzig in grado di sfruttare la sparsità delle matrici di massa e delle matrici jacobiane dei sistemi multibody, al fine di poter calcolare le accelerazioni incognite con poche iterazioni di complessità generalmente  $O(n)$ , in luogo della complessità  $O(n^3)$  solitamente richiesta nelle iterazioni del metodo originale.

Le matrici vengono memorizzate con un particolare metodo orientato alla massima efficienza computazionale ed alla minore occupazione di memoria. È stato ideato un particolare tipo di decomposizione incrementale che non altera la simmetria della matrice di stato ogni volta che si aggiorna una base, come succederebbe adottando la fattorizzazione incrementale di Golub-Bartels.

L'introduzione dell'attrito statico nei problemi 3D comporta un passaggio al problema MNLCP (complementarità mista non-lineare), che tuttavia può essere risolto tramite una versione modificata dell'algoritmo qui proposto.

Il nuovo algoritmo è stato implementato nel codice multibody *CHRONO*, con il quale sono stati svolti test che ne dimostrano l'efficienza computazionale e la robustezza.

## *References:*

Anitescu, M., Potra, F.A., (2002), *Time-stepping schemes for stiff multi-rigid-body dynamics with contact and friction*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 55(7):753–784  
Baraff, D., (1994), *Fast contact force computation for nonpenetrating rigid bodies*. Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), 28:23–34, 1994

*Curriculum vitae:* Alessandro Tasora si interessa di metodi di simulazione per sistemi multibody, con particolare attenzione ai problemi di integrazione numerica, rilevamento delle collisioni, geometria computazionale, ottimizzazione, algoritmi per algebra lineare e rendering. È autore del software di simulazione *CHRONO* e del programma di modellazione *Revolution4D*. Altre sue aree di ricerca sono la tribologia e la robotica.

# Metodologie multibody per l'analisi della stabilità di marcia di un veicolo ferroviario

Andrea Rindi, Monica Malvezzi, Luca Pugi, Dario Vannucci

*Dipartimento di Energetica, Facoltà di Ingegneria, Università di Firenze, Firenze, Italia*

Federico Gherardi, Mario Romani, Dario Spinelli

*Research & Engineering Dept., ANSALDOBREDA, Pistoia, Italia*

*E-mail: rindi@mapp1.de.unifi.it*

*Keywords:* stabilità di marcia, multibody analysis

Nella moderna progettazione ferroviaria coesistono le necessità di incrementare sia lo standard di sicurezza del veicolo che la sua velocità operativa. La soluzione di un problema di questo tipo passa necessariamente attraverso la determinazione della velocità critica del veicolo ferroviario già in fase di sviluppo, attraverso strumenti di prototipazione virtuale quali ad esempio i software di simulazione multibody.

In questo ambito risulta di fondamentale importanza la collaborazione tra realtà produttive affermate come il gruppo ANSALDOBREDA ed enti di ricerca e formazione come l'università di Firenze ed in particolare il corso di laurea di ingegneria dei trasporti di Pistoia.

Nel presente lavoro si analizza attraverso simulazioni multibody come le prestazioni in termini di stabilità di marcia di un veicolo ferroviario noto possano essere influenzate da diversi parametri caratteristici dell'armamento della linea e dell'accoppiamento ruota rotaia. In particolare è stato sviluppato un modello del rotabile e della linea ed è stata verificata la sensibilità del sistema rispetto alla variazione dei profili delle superfici di rotolamento di ruota e rotaia con particolare attenzione allo stato di usura ed alla presenza di eventuali difetti di posa della linea sia per quanto riguarda grandezze geometriche caratteristiche, quali ad esempio lo scartamento, sia per quanto riguarda la presenza di corrugazioni e/o altri difetti superficiali modellati sottoforma di irregolarità analitiche di binario.

L'intento non è quello di derivare equazioni matematiche atte a descrivere i moti anomali del veicolo (per altro già ampiamente documentate in letteratura) ma piuttosto proporre una metodologia operativa per individuare la velocità critica attraverso strumenti della prototipazione virtuale e contemporaneamente analizzare la riduzione di questa velocità durante la vita del veicolo a causa dell'usura dei profili ruota.

Tali metodologie sono state applicate allo studio ed alla simulazione di un veicolo ferroviario esistente (Metro Copenhagen). Il modello realizzato in ambiente Simpack™ è stato confrontato con un analogo modello sviluppato in ambiente Adams Rail™.

I risultati delle simulazioni effettuate hanno trovato conferma rispetto alle misure sperimentali disponibili ed hanno evidenziato l'opportunità e l'utilità di utilizzare in maniera sistematica strumenti di simulazione multibody non solo in fase di progettazione di nuovi veicoli ma anche come un potente strumento per la verifica e l'ottimizzazione del comportamento di soluzioni esistenti.

# Esperienze numeriche sulla formulazione multibody di Udwadia-Kalaba

Domenico de Falco

Dip. di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, II Università di Napoli, Aversa

E-mail: domenico.defalco@unina2.it

Ettore Pennestrì, Leonardo Vita

Dip. di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata, Roma

**Keywords:** Multibody dynamics, Gauss principle, Jourdain principle

Avvalendosi del principio del vincolo minimo di Gauss, Udwadia e Kalaba hanno recentemente proposto una formulazione multibody che offre numerosi vantaggi, soprattutto sotto il profilo computazionale. In particolare, tra le principali caratteristiche della formulazione multibody in argomento ricordiamo la deduzione delle equazioni del moto sotto forma di un sistema costituito da equazioni differenziali ordinarie, anche qualora venga impiegato un insieme di coordinate sovrabbondanti per descrivere la cinematica dei corpi del sistema.

La formulazione è alternativa ad altre quali, ad esempio, quelle fondate sull'impiego della decomposizione SVD, della decomposizione QR o sul partizionamento delle coordinate. Poiché una fase significativa della formulazione richiede il calcolo di una matrice pseudoinversa, scopo del presente lavoro è quello di valutare l'influenza che vari metodi di calcolo della matrice pseudoinversa hanno sull'efficienza numerica e l'affidabilità della formulazione medesima. La Figura 1 riassume i tempi di calcolo delle simulazioni condotte avvalendosi dei seguenti metodi per il calcolo della matrice pseudoinversa: SVD, Varga, Greville, soluzione ai minimi quadrati con fattorizzazione QR di Householder, soluzione ai minimi quadrati con fattorizzazione QR di Gram-Schmidt. I vari metodi sono stati analizzati in funzione della precisione nell'integrazione numerica, ovvero della variabile TOL.

In particolare il confronto effettuato ha messo in evidenza la superiorità del metodo di Greville per affidabilità e velocità di esecuzione. Il metodo di Varga è invece risultato inefficiente, mentre altri test numerici non riportati nel lavoro, hanno mostrato una superiorità del metodo SVD qualora il numero delle righe (colonne) della matrice da invertire è superiore al centinaio.

**References:**

Udwadia, F.E., Kalaba, R.E., *Analytical Dynamics - A New Approach*, Cambridge University Press, 1996.

Ara Arabyan, Fei Wu, An Improved Formulation for Constrained Mechanical Systems, *Multibody System Dynamics*, vol.2, 1998, pp.49-69.

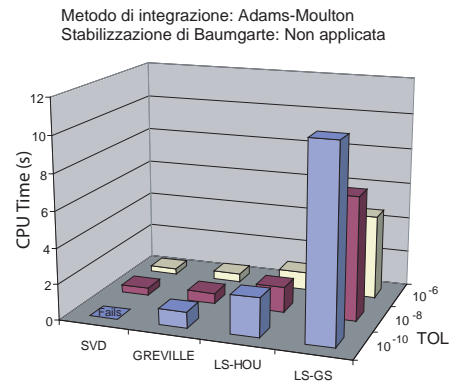


Figura 1: Efficienza computazionale dei vari metodi

# Impiego di tecniche multibody per il miglioramento della sicurezza degli operatori di carrelli a forche

Luigi Mangialardi, Leonardo Soria

*I Facoltà di Ingegneria, Politecnico di BARI, Italy*

*E-mail: lmm@poliba.it, soria@poliba.it*

*Keywords:* multibody system analysis, carrelli elevatori a forche, roll over, tip over, danno biologico

L'elevato rischio per la sicurezza e la salute degli operatori legato alla perdita di stabilità dei carrelli elevatori a forche, ha causato negli ultimi anni in Italia e in Europa numerosi incidenti, molti dei quali mortali. In genere tali incidenti sono il risultato di manovre, condotte in modo non ortodosso, che sfociano nella perdita di stabilità del mezzo, con il rischio consistente che il conducente rimanga schiacciato tra la struttura del carrello ed il suolo.

Il presente lavoro ha lo scopo di analizzare, dal punto di vista biomeccanico, la funzionalità di diversi sistemi di trattenimento al posto di guida per conducenti di carrello elevatore, atti a scongiurare tale pericolo; le prestazioni dei vari dispositivi considerati vengono giudicate sulla base della severità delle lesioni prodottesi a carico dell'operatore. L'analisi viene condotta attraverso la simulazione dell'evento accidentale ottenuta mediante il solutore Multibody-FEM MADYMO (TNO Automotive), ideato e sviluppato per l'infortunistica stradale, che in questa sede è invece, in modo del tutto originale, dedicato allo studio della dinamica di un tipico infortunio sul lavoro.

L'analisi così condotta, permette di assegnare a ciascuna delle configurazioni esaminate parametri biomeccanici di funzionalità al fine di pervenire ad una scelta consapevole delle soluzioni da adottare.

## *Riferimenti bibliografici:*

EURONCAP (2004). *Assessment protocol and biomechanical limit*.

TNO Automotive (2003). *MADYMO V6.1, Theory, Reference and Database Manuals*.

ISPESL (2002). *Linee guida – Adeguamento dei carrelli elevatori in riferimento al rischio di perdita accidentale di stabilità*, Dipartimento di Tecnologie di Sicurezza.

ISPESL (2001). *Sicurezza dei carrelli industriali – Rischi da rovesciamento accidentale: adeguamento e stato dell'arte*, Dipartimento di Tecnologie di Sicurezza.

Ambrósio J. A. C. Editor (2001). *Crashworthiness. Energy Management and Occupant Protection – CISM – Vol. n. 423*, SpringerWienNewYork.

Eppinger R., Sun E., Kuppa S., Saul R. (2000). *Supplement: Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive restraint Systems II*, NHTSA.

Eppinger R., Sun E., Bandak F., Haffner M., Khaewpong N., Maltese M., Kuppa S., Nguyen T., Takhounts E., Tannous R., Zhang A., Saul R. (1999). *Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive restraint Systems II*, NHTSA.

Kleinberger M., Eppinger R., Sun E., Kuppa S., Saul R. (1998). *Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive restraint Systems*, NHTSA.

# Sbavatura robotizzata di manufatti di forma incognita mediante controllo ibrido forza/velocità

Giacomo Ziliani , Giovanni Legnani

*Dip. Ing. Meccanica, Univ. di Brescia Via Branza 38, 25123 Brescia, Italy*

*E-mail: giacomo.ziliani@ing.unibs.it, giovanni.legnani@ing.unibs.it*

Antonio Visioli

*Dip. Elettronica per l'Automazione, Univ. di Brescia, Via Branza 38, 25123 Brescia, Italy*

*E-mail: antonio.visioli@ing.unibs.it*

*Keywords:* sbavatura, contour tracking, controllo di forza, robot industriali.

In questo lavoro viene descritto l'originale metodologia robotizzata sviluppata per sbavare manufatti piani dalla geometria incognita.

Un robot industriale, dotato di sensore di forza, ricerca nello spazio di lavoro il pezzo da sbavare. La presenza viene identificata tramite il sensore di forza che rileva il contatto. Il robot non conosce la forma del pezzo. Dopo avere identificato la presenza del manufatto il robot attiva la fresa e comincia a percorrere il profilo mantenendo un'opportuna forza di contatto tra pezzo ed utensile. L'algoritmo di controllo è ibrido forza/velocità con compensazione delle forze di lavorazione dell'utensile. Una approfondita fase sperimentale supporta l'approccio adottato. Filmati su <http://robotics.ing.unibs.it>

## *References:*

G. Duelen, H. Munch, D. Surdilovic, j. Timm, "Automated force control schemes for robotic deburring: development and experimental evaluation", Proc. Int. Conf. On Industrial electronics, Control, instrumentation, and Automation San Diego (CA), pp. 912-917.

F. Jatta, R. Adamini, A. Visioli, G. Legnani. *Hybrid force/velocity robot contour tracking: an experimental analysis of friction compensation strategies*. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pag. 1723-1728, maggio 2002.

F. Jatta, G. Legnani, A. Visioli. *Hybrid force/velocity control of industrial manipulators with elastic transmissions*. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intell. Robots and Systems, Las Vegas, pag. 3278-3281, 2003.

## *Curriculum vitae:*

Giacomo Ziliani: Ingegnere meccanico, dottorando in Meccanica Applicata. si interessa di robotica industriale, controllo di forza, e biomeccanica.

Giovanni Legnani: Ingegnere Elettronico, Dottore di ricerca in Meccanica Applicata, Prof. Ordinario del SSD Mec. App. alle Macchine. Interessi in robotica industriale, automazione e biomeccanica.

Antonio Visioli: Ingegnere Elettronico, Dottore di ricerca in Meccanica Applicata, Prof. Associato di Controlli Automatici. Si interessa di controlli automatici, robotica e automazione.

# Meccanismo ibrido per il supporto alla visione stereoscopica in ambiente sottomarino

Matteo Zoppi, Luca Bruzzone, Aazir Khan, Rezia M. Molfino  
*PMARlab, Dept. of Mechanics and Machine Design, University of Genova, Italy*  
*E-mail: zoppi@dimec.unige.it*

*Keywords:* meccanismi paralleli, robotica sottomarina, visione artificiale

Nel 2003 si è concluso il progetto di ricerca europeo SBC, *Sub Bottom Cutter*, mirato allo sviluppo di un sistema robotico sottomarino per alte profondità da impiegare nello smantellamento di impianti di estrazione petrolifera offshore. Per limitare l'impatto ambientale, nelle operazioni di smantellamento è necessario segare i piloni di sostegno sotto il livello del fondo marino utilizzando una tecnologia che limiti la quantità di materiale di fondale sollevata e dispersa in acqua. Il sistema robotico SBC esegue il taglio immergendo nel materiale di fondale ai lati del pilone i due rebbi cavi di una forca mobile, fra i quali è teso e fatto scorrere un cavo diamantato.

Il posizionamento di SBC fronte al pilone deve essere effettuato da una imbarcazione di appoggio per mezzo di cavi di sospensione. Questa manovra è molto delicata soprattutto in acque profonde e in caso di mare agitato. Lo sviluppo del sistema SBC sta proseguendo oltre il termine del progetto con l'obiettivo di sviluppare un robot capace di spostarsi sul fondo marino, che possa essere guidato in teleoperazione in prossimità di un pilone da segare e proceda poi autonomamente al posizionamento fronte al pilone e alle successive operazioni di taglio.

La fase critica è ancora l'avvicinamento al pilone, che deve essere accurato per il successo del taglio. Per procedere autonomamente, il robot deve conoscere la sua posizione in 3D rispetto al fusto del pilone. Per lo spazio disponibile e la architettura particolare della forca si pensa di alloggiare al centro di essa un sistema di visione stereoscopica ad un solo punto di vista. Questa memoria descrive il meccanismo parallelo ibrido a tre gradi di libertà sviluppato per sostenere e muovere opportunamente la telecamera di questo sistema di visione.

Il meccanismo ha due gradi di libertà rotazionali ed uno traslazionale. Le due mobilità rotazionali sono attorno ad un punto fisso a telaio. La traslazione è in direzione radiale. La geometria del meccanismo è scelta per disaccoppiare una delle due rotazioni. La scelta di un meccanismo parallelo per questa applicazione è vantaggiosa per la possibilità di operare a membri immersi con basse resistenze idrodinamiche; il volume stagno necessario è ridotto all'alloggiamento degli attuatori e della telecamera con un generale vantaggio in acque profonde.

*Curriculum vitae:* Matteo Zoppi si è laureato in ingegneria meccanica alla Università di Genova nel 2000 e dottorato in Meccanica e Costruzione delle Macchine nel 2004 con la tesi "High dynamics parallel mechanisms: contributions to force transmission and singularity analysis". Dal giugno 2005 è ricercatore al Dipartimento di Meccanica e Costruzione delle Macchine della Università di Genova.



# Progetto di un'originale interfaccia aptica con attuatori ridondanti

Paolo Righettini

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: paolo.righettini@polimi.it*

Hermes Giberti

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: hermes.giberti@polimi.it*

Steven Chatterton

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: chatterton@mech.polimi.it*

*Keywords:* Interfaccia aptica, attuatori ridondanti, cinematica parallela, destrezza.

In questo lavoro viene presentata un'originale interfaccia aptica attiva a tre gradi di libertà caratterizzata da una struttura cinematica ridondante. Si propone la sintesi topologica e cinematica dell'interfaccia aptica con l'obiettivo di accostare ad elevate prestazioni nella riproduzione degli input di forza, un elevato valore del rapporto fra il volume di lavoro garantito ed il volume di lavoro occupato dalla struttura. Alla definizione dello schema cinematico e quindi delle equazioni della cinematica inversa e diretta, segue un'ottimizzazione delle dimensioni e della geometria dei vari link, al fine di massimizzare sia le prestazioni del meccanismo che il volume di lavoro. Infine sarà presentato il modello dinamico implementato per la definizione della taglia degli attuatori ed il dimensionamento della struttura, a partire dalle specifiche dinamiche di progetto.

## *Riferimenti bibliografici*

C. Gosselin, J. Angeles (1991), *A global performances index for kinematic optimization of robotic manipulators*, ASME Journal Mechanical Design, vol. 113, No. 3, pagg. 220-226.

P. Righettini, A. Tasora, H. Giberti (2002), *Mechatronic design of a 3-DOF parallel translational manipulator*, 11th Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, 30 June - 2 July 2002, Balatonfured - Hungary.

M. Bergamasco, B. Allota, L. Bisio, L. Ferretti (1992), *An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications*, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pagg. 1449-1454.

## *Curriculum vitae:*

*Paolo Righettini*, Ingegnere Meccanico, Prof. Associato del SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo della robotica, macchine a cinematica parallela e mecatronica.

*Steven Chatterton*, Ingegnere Meccanico, Ricercatore SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo della robotica e nel progetto di macchine automatiche.

*Hermes Giberti*, Ingegnere Meccanico, Dottore di Ricerca in Meccanica Applicata, Ricercatore del SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo dell'automazione industriale e dei sistemi di controllo.

# Il programma di ricerca MiniPaR: minirobotica parallela per applicazioni speciali

Rezia M. Molfino

*Dipartimento di Meccanica e Costruzione delle Macchine, Università degli Studi di Genova, Italia*

*E-mail: molfino@dimec.unige.it*

Massimo Callegari

*Dipartimento di Meccanica, Università Politecnica delle Marche, Italia*

*E-mail: m.callegari@univpm.it*

Rodolfo Faglia

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Brescia, Italia*

*E-mail: rfaglia@bsing.ing.unibs.it*

Carlo Ferraresi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: carlo.ferraresi@polito.it*

Rosario Sinatra

*Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Università degli Studi di Catania, Italia*

*E-mail: rsinatra@diim.unict.it*

*Parole chiave:* minirobotica, robotica parallela

Il programma MiniPaR, finanziato dal MIUR in ambito COFIN2003, è dedicato alla ricerca su mini-robot per applicazioni speciali. Ad esso partecipano cinque unità di ricerca, appartenenti alle università di Brescia, Catania, Genova, Politecnica delle Marche e al Politecnico di Torino.

Il settore della robotica per mini, milli, micro-operazioni assume oggi crescente importanza per le numerose classi di applicazione e per le attuali concrete opportunità tecnologiche di realizzazione. L'utilizzo in tale campo di macchine a catena cinematica chiusa permette di esaltare nella scala mini le proprietà peculiari della robotica parallela, offrendo soluzioni compatte, leggere, rigide e precise.

La riduzione di scala presenta però particolari problematiche, che spesso devono essere risolte introducendo soluzioni tecnologiche diverse rispetto alla robotica tradizionale; ad esempio, l'utilizzo di giunti flessibili in sostituzione dei tradizionali giunti a coppie coniugate per eliminare i fenomeni di stick-slip, oppure l'attuazione a fili.

Nel programma MiniPaR le unità di ricerca hanno sviluppato mini-manipolatori paralleli per differenti applicazioni di cui sono attualmente in fase di realizzazione e sperimentazione i prototipi. Ognuno di questi sottoprogetti è stato sviluppato sotto la supervisione di una unità di ricerca; inoltre le varie unità hanno svolto trasversalmente in base alle loro competenze attività di ricerca su particolari tematiche teoriche, quali l'ottimizzazione dinamica e la calibrazione, in modo aumentare la sinergia del programma.

# Strengths of boron nanowires and carbon nanotubes

Lorenzo Calabri

*Department of Mechanics and Industrial Technology (DMTI), Università di Firenze, Italy*

*E-mail: lorenzo.calabri@unifi.it*

Weiqliang Ding, Xinqi Chen, Kevin Kohlhaas

*Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, IL, USA*

*E-mail: w-ding@northwestern.edu, xchen@northwestern.edu, k-kohlhaas@northwestern.edu*

Nicola Pugno

*Department of Structural Engineering and Geotechnics, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: nicola.pugno@polito.it*

Rodney Ruoff

*Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, IL, USA*

*E-mail: r-ruoff@northwestern.edu*

**Keywords:** nanowires; nanotubes; experiments; mechanical properties; quantized fracture mechanics

One-dimensional nanostructures such as crystalline boron (B) nanowires (NWs), or multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), have attracted attention in part due to their promise in sensing, materials reinforcement, and nanoelectronics. Crystalline B NWs have been synthesized by the CVD method with preformed metal catalyst particles (Otten et al. [2002]). They have *p*-type semiconductor behavior, and show rectification. MWCNTs were produced by the arc-grown procedure (MER Corp, Tucson, AZ USA). A newly developed and rapid electron beam induced deposition method was used to clamp the NWs or MWCNTs and test them in tension inside an SEM with a home-built nanomanipulator. High resolution-SEM images were acquired at each loading step, and two independent methods of analysis for each image were used to obtain the corresponding tensile load. The NW/MWCNT geometries were measured by TEM after the tests. The stress *vs* strain, Young's modulus, and tensile strength of the B NWs and MWCNTs, were obtained through data analysis. The strength measurements strongly suggest the presence of defects in these nanostructures. The experimental evidence is discussed in terms of Quantized Fracture Mechanics (Pugno and Ruoff [2004]).

## *References:*

Pugno, N. & Ruoff, R. S. 2004. *Quantized Fracture Mechanics*, Philosophical Magazine, 84(27), pp. 2829-2845.

Otten, C. J., et al. 2002. *Crystalline boron nanowires*, Journal of the American Chemical Society 124(17), pp.4564-4565.

*Curriculum vitae:* Lorenzo Calabri, Engineer and PhD student.

2004: During my Ph.D student activity, I collaborated with the "Northwestern University" (Chicago,IL,USA), working in their labs as a member of the prof. Ruoff group.

2004-2005: During my Ph.D student activity, we've opened a Nanotechnology Lab (LIN – Laboratory of industrial Nanotechnology)

# Fracture strength of nanostructures

N. Pugno

*Department of Structural Engineering and Geotechnics, Politecnico di Torino, Italy;  
nicola.pugno@polito.it*

R. Ruoff

*Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, IL, USA;  
r-ruoff@northwestern.edu*

*Keywords:* nanostructures, nanotubes, strength, quantized fracture mechanics

A new approach based on energy quanta, Quantized Fracture Mechanics (QFM), is presented that modifies continuum-based fracture mechanics and is useful for predicting the strength (also) of nanostructures. Fracture of tiny systems with a given geometry and type of loading occurs at quantized stresses that are well predicted by QFM. Strengths predicted by QFM for defective carbon nanotubes containing cracks and holes are compared with experimental results and fully quantum mechanics or molecular mechanics/dynamics simulations. The fracture quantum is simply assumed to be equal to the distance between two adjacent (broken) chemical bonds. For vanishing crack length, QFM predicts a finite ideal strength in agreement with Orowan's prediction.

In addition, the dynamic extension of QFM, Dynamic Quantized Fracture Mechanics (DQFM) based on action quanta, is also presented. The crack propagation is assumed as quantized in both space and time. The time quantum is related to the time needed to create a fracture quantum. DQFM is shown to include as limit cases Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM), Non Linear Fracture Mechanics (NLFM), Dynamic Fracture Mechanics (DFM) and QFM. In contrast to LEFM and DFM, QFM and DQFM have no restrictions on treating defect size and shape, and loading rates. The different fracture Modes (opening I, sliding II and tearing III), and the stability of the fracture propagations, are treated in a simple way.

Finally, a modification of the classical Weibull Statistics is presented for nanoscale applications. A comparison between nanoscale and classical Weibull Statistics applied to experimental results on fracture strength of carbon nanotubes clearly shows the effectiveness of the proposed modification. A Weibull modulus of  $\sim 3$  is, for the first time, deduced for nanotubes.

Both the deterministic and statistical analyses suggest that just a small defect can strongly reduce the strength of a nanotube, e.g., an atomic vacancy by a factor of  $\sim 20\%$ , and that few defects were responsible for the breaking of the tested nanotubes.

## *References:*

Pugno N., Ruoff R., 2004. Quantized Fracture Mechanics, *Philosophical Magazine*, 84/27, 2829-2845.

Pugno N., 2005. arxiv: cond-mat/0411556, 22 nov. 2004.

*Curricula vitae:* N. Pugno: Assistant Prof. of Structural Mechanics; R. Ruoff: Full Prof. of Mechanics.

# Modello analitico per prove di nanoindentazione in film sottili

Roberta Sburlati

*Facoltà di Ingegneria Università di Genova, Italia*

*E-mail: sburlati@diseg.unige.it*

*Keywords:* elasticity, contact mechanics, thin films, substrate effects, nanoindentation

In questo lavoro viene presentato un modello analitico atto a descrivere la risposta elastica di un film sottile soggetto all'azione di un indentatore rigido. Il problema teorico affrontato è motivato dal crescente interesse per la comprensione del comportamento meccanico dei materiali alla nanoscala con particolare riferimento ai test sperimentali di nanoindentazione utilizzati per valutare le proprietà elastiche di film sottili (Fischer-Cripps 2004).

Nella definizione del modello proposto vengono introdotte alcune ipotesi semplificative suggerite dall'assialsimmetria e dagli effetti localizzati che caratterizzano il fenomeno. Una prima ipotesi, adatta a descrivere il comportamento di film soffici, è stata quella di supporre il substrato rigido; sono state quindi considerate due condizioni ideali di interfaccia tra il film ed il substrato: la condizione di perfetta connessione e la condizione di contatto senza attrito. Una seconda ipotesi riguarda l'interazione tra il film e l'indentatore che viene descritta in termini di tensioni, applicando la distribuzione delle pressioni predetta dalla teoria del semispazio o, nel caso di film molto sottili o soffici, da teorie più raffinate che tengono conto delle forze di adesione (Li 1997, Maugis 1999).

La soluzione elastica viene ottenuta risolvendo le equazioni della teoria classica dell'elasticità attraverso l'utilizzo delle serie di Fourier Bessel (Sneddon 1966). La soluzione viene trovata in forma esplicita e la *legge di contatto* ottenuta, espressa in forma compatta, può essere utilizzata non solo per indentatori di qualsiasi forma ma anche per qualsiasi teoria che schematizzi l'interazione tra il film e l'indentatore in modo da fornire un utile supporto operativo di confronto con risultati derivanti da analisi numeriche e sperimentali (Van Landingham 2003).

## *Riferimenti bibliografici:*

Fischer-Cripps, Antony C., 2004. *Nanoindentation*, Springer.

Li, J. and Chou, T.W. 1997, *Int. J. Solids Structures*, 34, 4463-4478.

Maugis, D., 1999. *Contact, adhesion and rupture of elastic solids*, Springer.

Sneddon, I.N. 1966. *Mixed Boundary Value Problems in Potential Theory*, North Holland Publishing Company.

VanLandingham, M.R. 2003. *Review of Instrumented Indentation*, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 108, 249-265.

*Curriculum vitae:* Roberta Sburlati, Professore Associato di Scienza delle Costruzioni, svolge attività di ricerca nella meccanica dei solidi e delle strutture con particolare attenzione alle applicazioni sui materiali compositi ed avanzati. Tra i recenti argomenti di ricerca citiamo il problema del buckling in strutture laminate, lo studio dell'impatto su piastre composite sandwich, la risposta dinamica in solidi tipo-piastra e, ultimamente, lo studio degli effetti del substrato nella risposta elastica di film sottili.

# Un approccio agli elementi finiti alla indentazione di film sottili

Guido Borino, Francesco Scarpulla e Francesco Parrinello

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica Università di Palermo, Palermo.*

*CIRMAC- Centro Interdipartimentale di Ricerca sui Materiali Compositi, Palermo.*

*E-mail: borino@unipa.it, scarpulla@diseg.unipa.it, parrinel@diseg.unipa.it*

*Keywords:* nanoindentazione, film sottili, interfaccia, adesione, elementi finiti

La caratterizzazione meccanica di materiali impiegati in componenti dimensionalmente piccoli richiede specifiche tecniche sperimentali. Una delle tecniche più diffuse è la nano-indentazione. In relazione al materiale da provare, alla scala di interesse e al tipo di attrezzatura impiegata, le problematiche meccaniche coinvolte risultano varie e differenziate. L'indentazione su polimeri, metalli o silicio coinvolge effetti e problematiche molto diverse tra loro in quanto si va dal semplice contatto Hertziano lineare elastico, a indentazioni profonde collegate con elevate deformazioni (e gradienti), plasticità, danno diffuso e microfratture localizzate. Lo scenario meccanico è ulteriormente complicato quando si studia un film sottile su un substrato di un altro materiale. Esempi tipici sono film metallici o polimerici su supporti silicei. In questo caso, oltre alle proprietà dei due materiali e allo spessore del film, gioca un ruolo rilevante la zona di transizione (interfase) e lo stato di adesione tra i due materiali.

Nel presente lavoro si analizza il problema della nano-indentazione di film sottili mediante simulazioni numeriche agli elementi finiti. Si prendono in esame in dettaglio due aspetti:

1. Il contatto tra l'indentatore e la superficie del film. In particolare si sviluppano e si implementano leggi di contatto specifiche per il problema in esame.
2. I possibili effetti di decoesione e attritivi lungo l'interfaccia tra il film ed il substrato.

Il primo aspetto è legato a fenomeni di pre-adesione fra la punta dell'indentatore ed il film, ancora prima che il contatto tra i due materiali avvenga. Questo fenomeno, evidenziato sperimentalmente, viene modellato analiticamente e implementato in un modello per la zona di contatto. Il secondo aspetto è correlato alle variazioni di rigidità del film indotti dal substrato di diverso materiale e da come questo ultimo interagisce meccanicamente con il film. Il problema viene analizzato introducendo tra i due materiali una interfaccia di tipo coesivo-attritiva; il modello prevede l'introduzione di zone a coesione nulla per studiare l'effetto di difetti adesivi e di distacco tra il film ed il substrato.

Il lavoro presenta risultati numerici, volti al confronto tra le curve di forza analitiche e quelle sperimentali per prove di nano-indentazione, nonché alla caratterizzazione delle grandezze fisico-meccaniche dei materiali investigati su scala nanoscopica. La risoluzione agli elementi finiti consente inoltre di cogliere tutta una serie di dettagli sul campo deformativo e tensionale che si sviluppa nel sistema indentato. I risultati ottenuti sono un primo passo verso una analisi più complessa che tenga conto di alcuni dei molti fenomeni non lineari che si sviluppano nella prova.

*Ringraziamenti:* La ricerca è stata realizzata con il contributo finanziario del MIUR tramite il progetto PRIN-2003 "Interfacial damage failure in structural systems: Applications to civil engineering and emerging research fields".

# Identificazione di difetti da prove di conducibilità elettrica

Antonio Bilotta

*Dipartimento di Strutture, Università della Calabria, Italy*

*E-mail: abilotta@labmec.unical.it*

Giovanni Formica

*Institute of Mathematics, Helsinki University of Technology, Finland*

*E-mail: gformica@cc.hut.fi*

Antonino Morassi

*Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università degli Studi di Udine, Italy*

*E-mail: antonino.morassi@uniud.it*

Emilio Turco

*Dipartimento di Architettura e Pianificazione, Università degli Studi di Sassari, Italy*

*E-mail: emilio.turco@uniss.it*

*Keywords:* prove non distruttive, problemi inversi, determinazione del volume di inclusioni.

Il lavoro riguarda le simulazioni numeriche effettuate in relazione alla stima del volume di inclusioni incognite poste all'interno di un corpo conduttore sulla base di misure di potenziale elettrico e di densità di corrente rilevate sulla frontiera del corpo. La finalità è lo studio della sensibilità di queste stime rispetto ad alcune grandezze che entrano nella formulazione del problema inverso, quali, ad esempio, la forma dell'inclusione, il rapporto tra la conducibilità dell'inclusione e quella del materiale circostante, l'andamento della corrente applicata al bordo.

## *Riferimenti bibliografici:*

Alessandrini, G., Morassi, A., Rosset E., 2003, *Size estimates*, in G. Alessandrini and G.Uhlmann eds., "Inverse Problems: Theory and Applications", Contemporary Mathematics, 333, pp. 1–33, American Mathematical Society, Providence R.I..

Alessandrini, G., Rosset E., 1998, *The inverse conductivity problem with one measurement: bounds on the size of the unknown object*, SIAM J. Appl. Math., 58, 4, pp. 1060-1071.

Alessandrini, G., Rosset, E., Seo, J. K., 2000, *Optimal size estimates for the inverse conductivity problem with one measurement*, Proc. Amer. Math. Soc. 128, pp. 53–64.

Friedman, A., Gustafsson, B., 1987, *Identification of the conductivity coefficient in an elliptic equation*, SIAM J. Math. Anal., 18, pp. 777-787.

Friedman, A., Isakov, V., 1989, *On the uniqueness in the inverse conductivity problem with one measurement*, Indiana Univ. Math. J., 38, pp. 563-579.

Alessandrini, G., Bilotta, A., Formica, G., Morassi, A., Rosset, E., Turco, E., 2005, *Numerical size estimates of inclusions in elastic bodies*, Inverse Problems, 21, 133-151.

Alessandrini, G., Bilotta, A., Formica, G., Morassi, A., Rosset, E., Turco, E., 2004, *Evaluating the volume of a hidden inclusion in an elastic body*, inviato per la pubblicazione su Journal of computational mathematics.

# Spatial wavelet analysis of statically-loaded Euler-Bernoulli damaged beams

Giuseppe Failla

*Faculty of Engineering, University "Mediterranea" of Reggio Calabria, Italy  
E-mail: gfailla@ing.unirc.it*

Adolfo Santini

*Faculty of Engineering, University "Mediterranea" of Reggio Calabria, Italy  
E-mail: adolfo.santini@unirc.it*

Massimiliano Pappatico

*Faculty of Engineering, University "Mediterranea" of Reggio Calabria, Italy  
E-mail: massimiliano.pappatico@unirc.it*

*Keywords:* damage detection, static displacement response, wavelet analysis

## ABSTRACT

Spatial wavelet analysis is applied for damage detection in Euler-Bernoulli beams acted upon by static loads. It is known that the singularities due to damage determine local maxima in the wavelet transform (WT) modulus map of the displacement response, the amplitude of which decays asymptotically across the WT scales [1]. In most cases, however, the actual damage state of the beam cannot be correctly estimated by a straightforward visual inspection of the WT modulus map. Additional amplitude-decaying local maxima, in fact, may appear at the beam ends even if no damaged section is present therein, due to well-known boundary effects [2].

In this paper it is shown that, by applying the WT on the difference between the damaged and the undamaged beam displacement responses, for different loading conditions, boundary effects can be eliminated in the WT modulus map. The exact number of sought damage parameters can be then set for two separate optimization problems, both formulated in terms of a closed-form displacement solution recently given in the literature [3], where a damaged section is replaced by an equivalent reduced-stiffness spring. The proposed method is assessed on digitally-simulated experimental data, built via linear interpolation on a finite number of measured displacements corrupted by noise. It is seen that the WT modulus map may exhibit damage-like local maxima at undamaged sections of the beam, due to poor sampling of the displacement response and noise. Such local maxima, however, can be smoothed out by a proper number of interpolation points and performing a certain number of tests for each loading condition, depending on the noise level. In this manner, very accurate estimates are obtained for damage locations and amplitudes.

## *References:*

- [1] Hong, J.-C., et al. 2002. *Damage Detection Using the Lipschitz Exponent Estimated by the Wavelet Transform: Applications to Vibration Modes of a Beam*, International Journal of Solids and Structures, 39, 1803-1816.
- [2] Gentile, A. & Messina, A. 2003. *On the Continuous Wavelet Transforms Applied to Discrete Vibrational Data for Detecting Open Cracks in Damaged Beams*, International Journal of Solids and Structures, 40, 295-315.
- [3] Buda, G. & Caddemi, S. 2004. *Identification of Concentrated Damages in Euler-Bernoulli Beams under Static Loads*, submitted for publication on Journal of Engineering Mechanics.



# Crack localisation in a large-sized R.C. beam through the acoustic emission technique

Giuseppe Lacidogna

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino*

*E-mail: giuseppe.lacidogna@polito.it*

Gianni Niccolini

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino*

*E-mail: gianni.niccolini@polito.it*

Alberto Carpinteri

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino*

*E-mail: alberto.carpinteri@polito.it*

*Keywords:* acoustic emission, localisation, earthquakes, triangulation, least squares method

With the terms Acoustic Emission (AE) a class of phenomena is represented in which transient elastic waves are generated by the rapid release of elastic energy from sources situated inside a material. All materials generate AE during the opening and propagation of cracks produced by deformation phenomena. The elastic waves propagate through the solid towards the surface, where they can be detected by sensors. By processing the signals recorded by the sensors we can get information about the localisation and the amount of the damage in a solid. This set-up is similar to the one employed in earthquake control, where seismic waves reach the monitoring stations situated on the surface of the earth. The AE technique has the potential for performing an effective monitoring of the integrity of large-sized structures, like those in Civil Engineering, by means of a limited number of sensors. Based on this method, an original on-site application of the AE technique was conducted in order to locate the damaged zones in a carbon fibre reinforced concrete beam tested in bending.

## *References:*

Aki K., Richards P.G. 1980, *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, W.H. Freeman & Co., New York.

Carpinteri A., Lacidogna G., Pugno N. 2004. *Damage diagnosis and life-time assessment of concrete and masonry structures by an acoustic emission technique*, Proceedings of the 5th International FraMCoS Conference, Vail, Colorado, USA.

*Curriculum vitae:* G. Lacidogna Arch. Ph.D. Researcher in Structural Engineering. Member of the Italian Group on Fracture (IGF), and of the European Structural integrity Society (ESIS). Affiliated to the International Institute of Acoustic and Vibration (IIAV). Has published articles on international journals and presented papers at international conferences on creep of concrete structures, fracture mechanics and monitoring of concrete and masonry structures.

# Identificazione del danno in cavi sospesi attraverso misure dinamiche

Marco Lepidi, Fabrizio Vestroni

*Dip. di Ingegneria delle Strutture, Università di Roma "La Sapienza", Italia*

*E-mail: marco.lepidi@uniroma1.it , vestroni@uniroma1.it*

Vincenzo Gattulli

*Dip. di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno, Università di L'Aquila, Italia*

*E-mail: gattulli@ing.univaq.it*

*Parole chiave:* Cavi, Identificazione, Danno, Dinamica.

**SOMMARIO:** Il danno nei cavi in esercizio è principalmente prodotto da fenomeni di fatica e di corrosione galvanica dell'acciaio. Nel lavoro si studiano gli effetti del danno sul comportamento dinamico del cavo, attraverso la formulazione di un modello continuo monodimensionale, cinematicamente nonlineare, di cavo danneggiato. Il danno è rappresentato da una riduzione della sezione, descritta in intensità, estensione e posizione. La soluzione del problema modale trasversale rivela l'osservabilità dei soli parametri di intensità e posizione, mentre il problema longitudinale evidenzia la dipendenza delle proprietà spettrali anche dal parametro di posizione. Infine la riconosciuta sensibilità delle frequenze ai parametri descrittivi del danno consente l'applicazione di una procedura di identificazione basata sul confronto tra lo spettro previsto dal modello e quello misurato dalla risposta dei cavi in esercizio. L'efficacia della procedura è verificata attraverso l'elaborazione di dati pseudosperimentali.

*Riferimenti:*

[1] Cerri M.N., Vestroni F. (2000), *Detection of damage in beams subjected to diffused cracking*, J. Sound & Vibration 234, pp. 259-276.

*Curriculum vitae:*

Marco Lepidi è laureato in Ingegneria Civile presso L'Università di L'Aquila (Luglio 2002). È studente di dottorato in Ingegneria delle Strutture presso L'Università di Roma 'La Sapienza'. I suoi interessi di ricerca riguardano la dinamica e l'identificazione del danno dei cavi.

Fabrizio Vestroni è professore ordinario di Scienza delle Costruzioni dal 1986. Direttore del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Roma 'La Sapienza' dal 1998. È autore di circa 150 lavori (1972-) pubblicati in riviste internazionali e nazionali. Le tematiche di interesse sono relative alla dinamica nonlineari di cavi e travi, sistemi isteretici, identificazione strutturale e del danno, teoria delle strutture, controllo delle vibrazioni e ingegneria sismica.

Vincenzo Gattulli è professore associato di Scienza delle Costruzioni dal 2002. È autore di circa 80 lavori (1994-) pubblicati in riviste internazionali e nazionali. Le tematiche di interesse sono relative alla dinamica nonlineare e stabilità dell'equilibrio, controllo delle vibrazioni, identificazione e monitoraggio strutturale, affidabilità strutturale e gestione delle strutture esistenti.

# Health monitoring of beam structures based on finite element models and dynamic test data

Maria Nilde Cerri

*Dipartimento di Architettura, Costruzioni e Strutture, Università Politecnica delle Marche, Italia*

*E-mail: m.n.cerri@univpm.it*

Fabrizio Vestroni & Stefano Vidoli

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza", Italia*

*E-mail: vestroni@uniroma1.it; vidoli@uniroma1.it*

*Keywords:* beam damage, finite element damaged model, identification techniques

Structural health monitoring is a subject receiving an increasing interest in the last decades; this is due to the need of a continuous check of the structural reliability and safety. Among the variety of techniques to detect and quantify structural damage, an important position is occupied by those making use of dynamic measurements. The data that is possible to obtain from dynamic tests at low level excitations are mainly frequencies, modal shape components and modal damping. These information can be used to identify any decrease in the structural elements stiffness. In most engineering structures, in fact, the damage of a structural element can be observed as one or more cracks, whose effects on dynamic behaviour are similar to those produced by a local reduction of stiffness.

This paper addresses the detection of damage in beam-like structures, through a suitable identification technique based on a finite element approach. The stiffness reduction along the beam due to concentrated and diffused damage is described by a function, the shape of which depends on two coefficients. For a given position and severity of damage the stiffness matrix of the elements affected by damage are evaluated and the global stiffness matrix is assembled. This interpretative FE model is used to determine the dynamic frequencies; the best estimate of damage parameters is obtained by minimizing an objective function based on the error between measured and predicted response quantities. It is shown that the proposed model is able to describe the damage phenomenon due to a single crack or multiple cracks and to give a good evaluation of damage parameters. Damage identification examples, using experimental and pseudo-experimental data, are presented.

## *References:*

Vestroni, F. & Capecchi, D. 2000. *Damage detection in beam structures based on measurements of natural frequencies*, Journal of Engineering Mechanics, 126 (7), 761-768.

Cerri, M. N. & Vestroni, F. 2000. *Detection of damage in beams subjected to diffused cracking*, Journal of Sound and Vibration, 234 (2), 259-276.

Cerri, M. N. & Vestroni, F. 2003. *Identification of damage due to open cracks by changes of measured frequency*, 16<sup>th</sup> Congress of Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics, Ferrara.

Doyle, J.F. 1997. *Wave propagation in structures*, II<sup>o</sup> ed. Springer-Verlag. New York.

# Damage detection in bending beams through Brillouin distributed optical-fibre sensor

Massimiliano Fraldi

*Dipartimento di Scienza delle Costruzioni, Università di Napoli "Federico II", Italy*

*E-mail: fraldi@unina.it*

Vincenzo Minutolo

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università di Napoli, Italy*

*E-mail: vincenzo.minutolo@unina2.it*

Federico Carannante

*Dipartimento di Scienza delle Costruzioni, Università di Napoli "Federico II", Italy*

*E-mail: fraldi@unina.it*

**Keywords:** structure assessment, structure testing, distributed sensors, optical fibres.

In recent years the use of distributed optical fibre sensors for measurements of strains in beams, by means of Brillouin scattering effect, has been proposed. Several works have stressed the actual theoretical and practical difficulties connected to this kind of measurements such as mechanical characterization of optical-fibre, decay of strains in the protective coatings, spatial resolution of the Brillouin scattering, brittleness of the glass core, elastic-plastic response of the coatings, end effects, different effects of strain readings in dilatation or in contraction. A solution to each of the above cited problems would entail further research effort. However, all the works pointed out that the qualitative strain response of bending beams is clearly accounted for by distributed optical fibre sensors. In spite of the above mentioned uncertainties, the distributed nature of the sensor makes it very attractive when safety assessment of large structures such as bridges, tunnels, dams or pipes, is involved. In the present paper, the detection of defects or damages in bending beams by means of distributed optic-fibre sensors is proposed. In particular, the fibre-optics distributed sensor has been used for the measurement of deformation of a steel beam in experimental laboratory tests. Comparison of the experimentally measured strains, carried out on a damaged and an undamaged beam, revealed the presence and position of the defects present in the beam. Quality and accuracy of the measurements carried out with distributed optical fibre sensors are discussed, focusing on the applicability of identification method.

## *References*

- Bernini, R. Crocco, L. Minardo, A. Saldovieri, F. Zeni, L. (2003) *All frequency domain distributed fiber optic Brillouin sensing*. IEEE sensors journal, 3 (1), 36-43.
- Xiaoyi Bao. (2001) *Tensile and Compressive Strain Measurement in the and Field With the Distributed Brillouin Scattering Sensor*. Journal of lightwave technology, 19, (11), 1698-1704.
- Muraiama, H. Kageyama, K. Naruse, H. Shimado A. (2004) *Distributed strain sensing from damaged composite materials based on shape variation of the Brillouin spectrum*. Journal of intelligent material system and structures, 15, (1), 1539-1543.
- Sang-Hoon Kim, Jung-Ju Lee, Il-Bum Kwon (2002). *Structural monitoring of a bending beam using Brillouin distributed optical fibre sensors*. Smart Materials and Structures, 11, 396-403.

# Una procedura per l'identificazione del danno in travi elastiche da prove statiche

Salvatore Caddemi

*Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università degli Studi di Catania, Italy*

*E-mail: scaddemi@dica.unict.it*

Antonino Morassi

*Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università degli Studi di Udine, Italy*

*E-mail: antonino.morassi@uniud.it*

*Keywords: identificazione, danno, travi, prove statiche*

## SOMMARIO

In questo lavoro si determinano condizioni sufficienti per l'identificazione univoca di un danno concentrato in una trave inflessa da un numero minimo di misure statiche di spostamenti trasversali e si suggerisce una procedura diagnostica di tipo costruttivo. Il danno è simulato inserendo una molla elastica rotazionale nella sezione danneggiata. L'analisi è basata sull'espressione esplicita della variazione dello spostamento trasversale della trave  $w$  causata dal danno per una fissata distribuzione di carico. Nel caso di una trave semplicemente appoggiata alle estremità, per esempio, si prova che la misura di  $w$  in due punti dell'asse della trave che stanno rispettivamente a sinistra e a destra della sezione danneggiata consente di determinare univocamente la posizione del danno e la sua intensità. La procedura proposta, inoltre, conduce a semplici espressioni in forma chiusa dei parametri di danno. I risultati analitici sono stati confermati da una serie di simulazioni numeriche condotte su travi in acciaio intagliate.

# Experimental Modal Analysis of Two-wheeled Vehicles. Prediction of the response to road unevenness

Alberto Doria, Davide Fabris, Massimo Maso

Department of Mechanical Engineering, University of Padova, Italy

E-mail: [alberto.doria@unipd.it](mailto:alberto.doria@unipd.it)

*Keywords:* comfort, motorcycle, modal analysis

The experimental study of the vibrations of two-wheeled vehicles gives useful results when it is carried out exciting the whole vehicle through the wheels. Modal analysis techniques make it possible to identify both in-plane modes, which influence comfort, and out-of-plane modes, which influence stability and handling. Recently a new testing equipment for the study of motorcycle vibrations has been developed at the Department of Mechanical Engineering. The main component of the equipment is an hydraulic shaker, which is able to carry out sinusoidal and sweep excitation of the whole vehicle in the low frequency range. Both in-plane excitation and out-of-plane excitation can be performed.

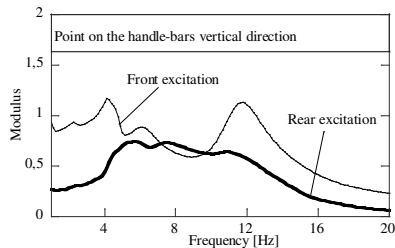


Figure 1: modulus of the measured FRFs

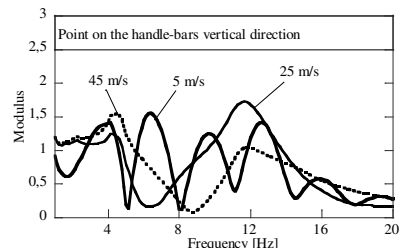


Figure 2: modulus of the predicted FRFs

The possibility of predicting by means of laboratory tests the response of a two-wheeled vehicle to road unevenness has been studied. Figure 1 shows the measured frequency response functions (FRFs) of the handle-bars in the presence of front and rear excitation. The comfort on the road is predicted combining the FRFs measured with front and rear excitation in order to take into account the wheel-base effect. It takes place because the front and the rear wheel encounter the same road disturbance with a time delay that depends on the speed and on the wheel-base. Figure 2 shows the FRFs that are predicted taking into account the wheel-base effect. The second part of the paper deals with out-of-plane excitation and highlights the presence of structural modes (dominated by the deformation of the chassis, fork or swingarm) that may affect the stability and handling of the vehicle.

## References:

Cossalter V., Doria A., Basso R., Fabris D. 2004. *Experimental Analysis of Out-of-plane Structural Vibrations of Two-wheeled Vehicles*. Shock and Vibration 11, pp 433-443

*Curriculum vitae:* Alberto Doria is associate professor of Mechanics of Machines at Padova University. Davide Fabris and Massimo Maso are Ph.D. students. They work in the field of vibrations and motorcycle dynamics.

# L'influenza dei fattori ambientali nei coefficienti di scalatura per le Magic Formula di Pacejka

Federico Cheli

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: federico.cheli@polimi.it*

Francesco Braghin

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: francesco.braghin@polimi.it*

Emiliano Giangiulio

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: emiliano.giangiulio@polimi.it*

Edoardo Sabbioni

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: edoardo.sabbioni@polimi.it*

*Keywords:* fattori di scalatura, forze di contatto pneumatico-strada, Magic Formula di Pacejka

Il presente lavoro tratta dell'influenza di fattori esterni allo pneumatico quali le condizioni di aderenza della superficie stradale, le caratteristiche della sospensione, l'irregolarità stradale, etc. sui fattori di scalatura introdotti da Pacejka all'interno del suo modello dello pneumatico denominato Magic Formula. Questi fattori di scalatura sono importanti per la stima delle forze di contatto, ma non dipendono dallo pneumatico considerato e quindi dovrebbero rimanere costanti per differenti pneumatici nelle medesime condizioni di prova. Una procedura per l'identificazione dei coefficienti di scalatura è stata implementata sulla base di prove sperimentali realizzate nell'ambito del progetto europeo VERTEC. Quindi, i fattori di scalatura ottenuti per gli diversi pneumatici sulla stessa pista di prova con il medesimo veicolo sono stati confrontati per verificare che il loro valore rimasse costante.

## *Curriculum vitae:*

Federico Cheli: Professore Ordinario di Meccanica Applicata dal 2000. L'attività scientifica è prevalentemente svolta nel campo della dinamica e della stabilità dei sistemi meccanici, con applicazione ai veicoli terrestri, alla dinamica di grandi strutture, alla dinamica dei rotori e a problemi di vibrazioni delle macchine.

Francesco Braghin: Ricercatore in Meccanica Applicata. La sua attività di ricerca riguarda il contatto pneumatico-strada, il contatto ruota-rotai e la dinamica del veicolo stradale e ferroviario.

Emiliano Giangiulio: Assegnista di ricerca. La sua attività di ricerca riguarda lo studio del controllo attivo degli autoveicoli con particolare riferimento alle tecniche Hardware In the Loop.

Edoardo Sabbioni: Dottorando di Meccanica Applicata. La sua attività di ricerca riguarda la dinamica dei veicoli stradali con particolare riferimento ai sistemi di controllo del veicolo stesso.

# Modellazione integrata della dinamica dell'autoveicolo e della powertrain

Federico Cheli

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica, Italy*

*E-mail: federico.cheli@polimi.it*

Marco Pedrinelli

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica, Italy*

*E-mail: marco.pedrinelli@polimi.it*

Andrea Zorzutti

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica, Italy*

*E-mail: andrea.zorzutti@polimi.it*

**Keywords:** simulazione handling veicolo, dinamica autoveicolo, trasmissione, trazione integrale

La simulazione del comportamento dinamico della powertrain (trasmissione) degli autoveicoli riveste notevole importanza nello sviluppo di sistemi di controllo della dinamica longitudinale e laterale del veicolo, che ottimizzano la distribuzione a terra delle forze di contatto. L'influenza della dinamica della trasmissione sul comportamento della vettura è enorme e spesso fondamentale per la stabilità del veicolo; si consideri a tal proposito l'influenza mostrata dai differenziali autobloccanti. In quest'ottica è stato sviluppato il modello di simulazione presentato in questo lavoro, unitamente alla validazione sperimentale del modello e, conseguentemente, dell'approccio metodologico seguito.

## *Curriculum vitae:*

Federico Cheli: Professore Ordinario di Meccanica Applicata dal 2000. L'attività scientifica è prevalentemente svolta nel campo della dinamica e della stabilità dei sistemi meccanici, con applicazione ai veicoli terrestri, alla dinamica di grandi strutture, alla dinamica dei rotori e a problemi di vibrazioni delle macchine.

Marco Pedrinelli: Dottorando in Ingegneria dei Sistemi Meccanici. La sua attività di ricerca riguarda la dinamica dei veicoli stradali con particolare riferimento ai sistemi di controllo del veicolo stesso e della trasmissione di potenza.

Andrea Zorzutti: Dottorando in Ingegneria dei Sistemi Meccanici. La sua attività di ricerca riguarda la dinamica dei veicoli stradali con particolare riferimento ai sistemi di controllo del veicolo stesso e della trasmissione di potenza.



# Effetti dell'interazione dinamica ruota-rotaia sulla formazione di usura ondulatoria sul binario

Bruno Pizzigoni

*Politecnico di Milano, Campus Bovisa, Via La Masa, 34, 20152 Milano*

Paolo Belforte\*, Andrea Collina

*Politecnico di Milano, Campus Bovisa, Via La Masa, 34, 20152 Milano*

## SOMMARIO

La formazione di usura ondulatoria sulle rotaie poste nelle curve di raggio stretto è un problema che affligge tutte le linee metropolitane, ed è un importante argomento di ricerca, tanto da costituire argomento di ricerche finanziate dalla Comunità Europea.

Questo fenomeno appare visivamente come un'alternanza di zone chiare e scure in corrispondenza della traccia di rotolamento della ruota sulla testa della rotaia lato interno curva, e presenta un profilo, nel piano verticale, caratterizzato da una forma prossima alla sinusoidale, con una lunghezza d'onda compresa nel campo da 2 a 20cm. Le cause di tale fenomeno, denominato nella letteratura anglosassone con il termine "*Short pitch corrugation*", e con il termine "*marezzatura*" nella terminologia ferroviaria italiana, non sono ancora ben chiarite, almeno nell'ambito sopracitato, ossia curve di raggio stretto, mentre esistono spiegazioni per la sua insorgenza sotto altre condizioni - Grassie *et al.* [1993] –.

Diversi ricercatori si sono occupati della materia, sia dal punto di vista della modellazione, sia dal punto di vista dell'interpretazione dei dati rilevati in linea. Mentre per questi due ambiti la letteratura è particolarmente ricca, pur se non si è ancora riusciti a giungere ad un'unica spiegazione in grado di interpretare completamente i diversi risultati, gli studi riportati mediante prove al banco sono relativamente pochi. In questo campo sono comunque attivi ricercatori giapponesi – Matsumoto *et al.* [2003] –.

Oggetto del presente lavoro è lo studio, sia mediante utilizzo di un apposito banco prova – Bruni *et al.* [2003] – opportunamente modificato, sia utilizzando modelli numerici, di come le caratteristiche dinamiche dell'accoppiamento ruota-rotaia incida sulla formazione di usura ondulatoria, e di quale sia il meccanismo che ne determina la lunghezza d'onda ed il tasso di crescita.

Il banco utilizzato è costituito da una ruota via, azionata da un motore elettrico, su cui poggia una sala montata, di cui è possibile impostare l'assetto in termini di posizione laterale e serpeggio, e di valore dei carichi verticali. A partire da esperienze di rilievi su linee della metropolitana, si è progettata ed implementata una modifica della ruota via (*Figura 1*), in modo da realizzare un supporto elastico dell'anello che rappresenta la rotaia, in modo da avere una risposta dinamica analoga a quella che si ha su una linea metropolitana.

\* Paolo Belforte, Paolo.belforte@polimi.it

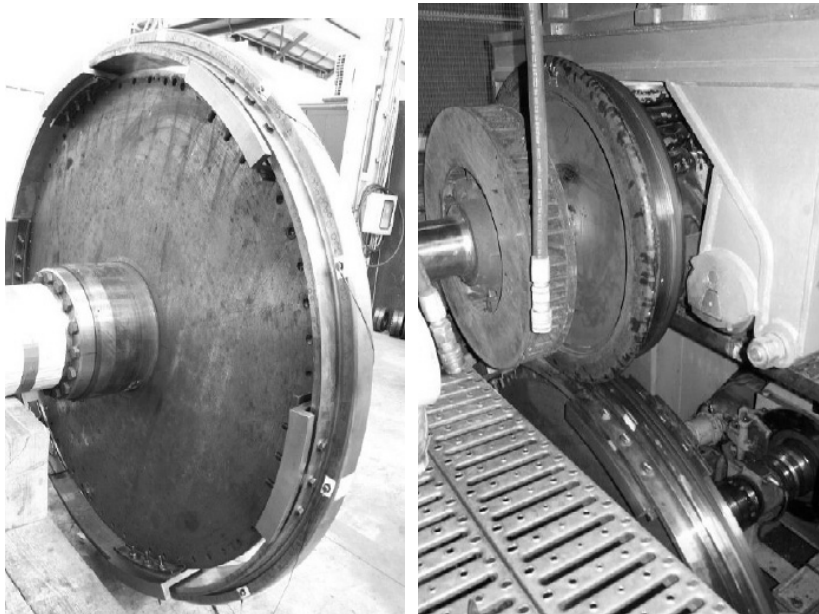


Figura 1: A sinistra: anello-roltaia su supporti elastici collegata alla ruota-via. A destra: dettaglio della macchina di prova con la sala montata (in alto) e la ruota via su supporti elastici (in basso).

Inizialmente si sono eseguiti dei test di caratterizzazione dinamica dell'anello-roltaia e della sala sia separatamente, sia accoppiati. Quindi sono stati effettuati test in cui alla sala sono state imposte delle condizioni di marcia in curva di raggio stretto (135m), corrispondenti ad una velocit  di 50km/h. Durante l'esecuzione dei due test, si   verificata l'insorgenza di usura ondulatoria sull'anello-roltaia, con lunghezza d'onda compresa tra 7 e 8cm, quindi nell'ambito delle campo caratteristico del fenomeno. La strumentazione collocata (accelerometri e captatori di spostamento di tipo laser) ha consentito di seguire l'evoluzione il fenomeno dal punto di vista quantitativo, in termini di effetti dinamici. Parallelamente la modellazione del sistema anello-roltaia, tenendo conto delle forze di contatto ruota-roltaia,   stata utilizzata per fornire una spiegazione della formazione del fenomeno, legandolo alle caratteristiche dinamiche dei componenti del sistema, al fine di trarre indicazione per prevenire o limitare il fenomeno nelle linee in esercizio.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bruni, S., Cheli, F., Resta, F.. (2001), "A model of an actively roller rig tests on full-size railway wheelset", Proc. Inst. Mech. Eng., Part F, **Vol 215**, pagg. 277-288, 2001
- Grassie, S.L., Kalousek, J. (1993), "Rail corrugation: characteristics, causes and treatments", Proc. Inst. Mech. Eng., Part F, **Vol 207**, pagg. 57-68, 1993
- Matsumoto, A., et al., (2003), "Formation mechanism and countermeasure of rail corrugation on curved track" ", Wear, **9143** (2002) 1-7

# Sulla verifica sperimentale di sospensioni semi-attive in ambito motociclistico

Paolo Righettini

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*  
*E-mail: paolo.righettini@polimi.it*

Steven Chatterton

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*  
*E-mail: chatterton@mech.polimi.it*

Hermes Giberti

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*  
*E-mail: hermes.giberti@polimi.it*

*Keywords:* Sospensioni semi-attive, banco prova, smorzatore variabile, Hardware In the Loop.

In questo articolo viene presentato il progetto meccatronico di un sistema per il test di sospensioni semi-attive posteriori di motociclette con la modalità dell'Hardware In the Loop (HIL). In questo tipo di sospensioni il fattore di smorzamento, a differenza delle sospensioni passive tradizionali, non è fisso a priori, ma può essere variato in funzione di determinate strategie di controllo dipendenti dal comportamento dinamico della motocicletta, come ad esempio il comfort e/o la maneggevolezza di guida. Come ben noto queste due caratteristiche richiedono parametri di smorzamento contrastanti; pertanto la definizione delle strategie ottimali di controllo di sospensioni semi-attive richiede lo sviluppo di un adeguato modello dinamico della motocicletta e di numerose prove sperimentali per tutte le condizioni di guida. Lo scopo del sistema proposto è lo sviluppo sia dello schema cinematico e quindi della geometria ottimale di sospensioni posteriori che delle strategie di controllo del fattore di smorzamento in presenza di reali sollecitazioni dovute sia al profilo stradale che alla dinamica della motocicletta, senza la necessità di avere a disposizione il veicolo completo, fornendo così notevoli vantaggi per quanto riguarda i tempi, i costi e la sicurezza di sviluppo di nuove soluzioni di sospensione posteriore.

## *Riferimenti bibliografici*

S-H. Hwang, S-J. Heo, H-S. Kim and K-I. Lee (1997), *Vehicle dynamic analysis and evaluation of continuously controlled semi-active suspensions using hardware-in-the-loop simulation*, *VehicleSystem Dynamics*, 27, pagg. 423-434.

V. Cossalter (1999), *Cinematica e dinamica della motocicletta*, Edizioni Progetto Padova, Padova, Italy.

## *Curriculum vitae:*

*Paolo Righettini*, Ingegnere Meccanico, Prof. Associato del SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo della robotica, macchine a cinematica parallela e meccatronica.

*Steven Chatterton*, Ingegnere Meccanico, Ricercatore SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo della robotica e nel progetto di macchine automatiche.

*Hermes Giberti*, Ingegnere Meccanico, Dottore di Ricerca in Meccanica Applicata, Ricercatore del SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo dell'automazione industriale e dei sistemi di controllo.

# Un modello numerico per l'analisi della dinamica di marcia e delle sollecitazioni sui componenti di un veicolo ferroviario

Stefano Alfi

*Politecnico di Milano – Dipartimento di Meccanica – Sezione di Meccanica dei Sistemi, Italia,*

Roberto Corradi

*Politecnico di Milano – Dipartimento di Meccanica – Sezione di Meccanica dei Sistemi, Italia.*

*E-mail: roberto.corradi@polimi.it*

Alan Facchinetti

*Politecnico di Milano – Dipartimento di Meccanica – Sezione di Meccanica dei Sistemi, Italia.*

Luca Niro

*Politecnico di Milano – Dipartimento di Meccanica – Sezione di Meccanica dei Sistemi, Italia.*

**Keywords:** modello numerico, dinamica di marcia, sicurezza di marcia, sollecitazioni di componenti ferroviari

Nel presente lavoro viene illustrata una procedura di calcolo utilizzabile, in fase di sviluppo di un nuovo veicolo ferroviario, per l'analisi dell'influenza dei principali parametri progettuali sulla dinamica di marcia e sulle sollecitazioni sui componenti. Si fa riferimento a un particolare elettrotreno a quattro casse, con architettura non convenzionale: il veicolo è dotato di due carrelli tradizionali alle estremità e di tre carrelli Jacob intermedi. I risultati presentati riguardano l'utilizzo del simulatore della dinamica di marcia del veicolo completo per un'analisi preliminare del comportamento del veicolo in rettilineo ed in curva. Inoltre, si illustrano alcune procedure di calcolo per la previsione delle prestazioni del veicolo in relazione alle normative ferroviarie riguardanti la valutazione della sicurezza di marcia e le sollecitazioni sull'armamento e la verifica delle sollecitazioni sui componenti fondamentali.

Stefano Alfi si è laureato in Ingegneria Meccanica nel 2003 presso il Politecnico di Milano. Dal marzo 2004 è studente del dottorato di ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. L'attività scientifica riguarda la dinamica, la stabilità e il controllo dei sistemi meccanici, con applicazione ai veicoli ferroviari.

Roberto Corradi si è laureato in Ingegneria Meccanica al Politecnico di Milano nel 1995 ed ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Meccanica Applicata nel 2001. Dal 2000 Ricercatore e dal 2005 Professore Associato presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. L'attività scientifica riguarda l'analisi numerica e sperimentale del comportamento dinamico e della stabilità dei sistemi meccanici, con applicazione ai veicoli terrestri, alla dinamica delle strutture, all'interazione fluido-struttura, alle vibrazioni e al controllo dei sistemi meccanici.

Alan Facchinetti si è laureato in Ingegneria Meccanica al Politecnico di Milano nel 2000 ed ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Meccanica Applicata nel 2004. Dal 2005 è Ricercatore in servizio presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. L'attività scientifica riguarda principalmente la dinamica dei veicoli ferroviari, in particolare ferrotranviari, l'interazione dinamica pantografo catenaria e la dinamica dei rotori.

Luca Niro si è laureato in Ingegneria Meccanica nell'aprile 2003 presso il Politecnico di Milano. Dal novembre 2003 è assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. L'attività scientifica riguarda la dinamica del veicolo, con particolare attenzione ai veicoli ferrotranviari e alle problematiche legate al loro esercizio.

# Indagine sperimentale e numerica sull'emissione di rumore al contatto ruota-rotaia

Stefano Bruni

*Politecnico di Milano, Dip. di Meccanica, via La Masa 34, 20136 MILANO*

*E-mail: stefano.bruni@polimi.it*

Francesco Ripamonti

*Politecnico di Milano, Dip. di Meccanica, via La Masa 34, 20136 MILANO*

*E-mail: francesco.ripamonti@polimi.it*

Daniele Rocchi

*Politecnico di Milano, Dip. di Meccanica, via La Masa 34, 20136 MILANO*

*E-mail: daniele.rocchi@polimi.it*

*Keywords:* contatto ruota-rotaia, misure rumore pass-by, array microfónico, armamenti ferroviari.

**ABSTRACT:** Il lavoro riporta alcuni risultati ottenuti nell'ambito del progetto europeo HIPERTRACK finalizzato allo studio di nuove soluzioni di armamento per la riduzione delle vibrazioni trasmesse al suolo e del rumore aereo. L'obiettivo della ricerca è lo studio delle emissioni di vibrazioni, causate dall'interazione tra il materiale rotabile e armamenti massivi su piastra in cemento armato, e di tipo "ballast". Sono state eseguite misure acustiche secondo le prescrizioni della norma EN ISO 3095 e mediante l'utilizzo di un array microfónico in grado di individuare le singole sorgenti di rumore a bordo treno caratterizzandone il livello della pressione sonora e il contenuto armonico.

In parallelo a tali indagini sperimentali è stato sviluppato un modello matematico dell'interazione ruota-rotaia e della conseguente emissione acustica. Il modello è basato su una schematizzazione a elementi finiti della ruota e (separatamente) della rotaia, e introduce le irregolarità superficiali dei due corpi a contatto come causa dell'emissione acustica.

## *Curriculum vitae:*

Stefano Bruni: Professore Ordinario di Meccanica Applicata dal 2000. L'attività scientifica è prevalentemente svolta nel campo della dinamica e della stabilità dei sistemi meccanici, con applicazione ai veicoli terrestri, alla dinamica di grandi strutture, alla dinamica dei rotori e a problemi di vibrazioni delle macchine.

Daniele Rocchi: Ricercatore in Meccanica Applicata. La sua attività di ricerca è incentrata sulla dinamica delle strutture, ingegneria del vento, acustica.

Francesco Ripamonti: Dottorando in Ingegneria dei Sistemi Meccanici. La sua attività di ricerca riguarda la dinamica delle strutture e dei veicoli ferroviari, con particolare riferimento allo studio dell'emissione acustica ad essi legata.

# Effect of soil elastic foundation on the chosen motions of single-bucket excavator

Zygmunt Towarek

*Department of Mechanics, Lodz University of Technology, Poland*

*E-mail: zytow@p.lodz.pl*

Stanislaw Strzelecki

*Department of Machine Design, Lodz University of Technology, Poland*

*E-mail: strzelec@pkml.p.lodz.pl*

**Keywords:** excavators, elastic foundation, machine dynamics

Single bucket excavators on a caterpillar chassis are universal machines working on vast open areas, most frequently, of soil foundation. They are used for the output excavation as well as for loading when the contents of the bucket is transported by the rotation of the body.

The strain of the foundation on which an excavator is standing should be considered in the analysis of the dynamics of the excavator operation since it is a significant yet little-known phenomenon, Towarek. In the case of caterpillar-chassis excavators, which – during operation – move every several cycles to a new soil foundation, frequently of the disturbed structure and increased susceptibility, taking this susceptibility of the foundation into account in a dynamic model of an excavator is essential.

The interaction of the work machine and the soil foundation is a complicated problem due to the complex and non-uniform structure of the soil. In most cases, in dynamic calculations, a three-dimensional, semi-infinite soil medium is replaced by a non-coupled discrete rheological model of one or many degrees of freedom. Although these models represent the behaviour of a loaded semi-infinite soil medium, in their structure they do not necessarily refer to its structural elements. The experimental studies during which the strain of the soil loaded with a rigid circular element was analysed show that the course of these deformations can be treated as linear over a certain range of loads, i.e. until the soil politicises. After this critical load is exceeded, the soil starts flowing and the strain rapidly increases and changes from a nearly linear into parabolic function Towarek.

Considering the above, it has been assumed that the soil fulfils Boltzman's principle of superposition, and the function of its deflection has been described by an equivalent rheological model as a Kelvin-Voigt viscoelastic body, Towarek.

## *References*

- Towarek Z., 2003, Dynamics of a single-bucket excavator on a deformable soil foundation during the digging of ground. *International Journal of Mechanical Sciences*. Nr 45, pp 1053-1076
- Towarek Z., 1999, The Function of the Rheological Soil Strain Under the Foot Supporting the Crane. *The Archive of Mechanical Engineering* Vol. XLVI, No 1, pp 5-18

*Curriculum vitae:* Zygmunt Towarek graduated Lodz University of Technology, Department of Mechanical Engineering in Poland. Main field of scientific activity is machine dynamics particularly the stability of heavy duty construction machines

Stanislaw Strzelecki graduated Lodz University of Technology, Department of Mechanical Engineering in Poland. Main field of scientific activity are high speed journal bearings with stationary segments as well as tilting- pad.

# Regional 3R spatial manipulators: a new method to characterise the jointspace partition induced by singularities

Davide Paganelli

*DIEM - Università degli Studi di Bologna,*

*E-mail: [davide.paganelli@mail.ing.unibo.it](mailto:davide.paganelli@mail.ing.unibo.it)*

*Keywords:* singularity, Morse theory, manipulators

The Jacobian matrix of a serial manipulator is the key to the study of its kinematics, because it gives a linear relationship between the velocities in the jointspace and those in the workspace. The points where the Jacobian matrix becomes singular are particularly undesirable, because it is there impossible to impose to the end-effector any arbitrary velocity vector.

A great effort has been made in the last decades for the classification of spatial 3R regional manipulators, aimed to the determination of the classes of manipulators capable of changing posture without passing through a singularity (El Omri and Wenger [1995]). However, even though a manipulator is capable of a non-singular posture change, not any posture can be changed along a singularity-free path. A tool to identify the postures that can actually be changed through a singularity-free path is still not available.

By means of a numerical procedure, this paper answers two more general questions for regional 3R serial manipulators:

- given two points in the jointspace (that might also be different postures pertaining to the same position of the end-effector), is it possible to establish whether or not there exists a singularity-free path connecting them?
- is it possible to identify and characterise the disjointed regions bounded by the singularity surfaces?

Concepts from differential topology, Morse theory in particular, are used to develop the procedure. A numerical example is proposed.

## *References:*

El Omri J. and Wenger P. 1995, *A general criterion for the identification of nonsingular posture changing 3-DOF manipulators*, Computational Kinematics, 153-162.

*Curriculum vitae:* Davide Paganelli received the degree in Mechanical Engineering from the University of Modena in 2004. Since January 2005 he is a Phd student in the Department of Applied Mechanics of the University of Bologna.

# Cheope: a new hybrid redundant reconfigurable manipulator for surgical applications

Diego Tosi, Giovanni Legnani, Nicola Pedrocchi

*Dip. Ingegneria Meccanica, Università di Brescia, Italia*

*E-mail: {diego.tosi; giovanni.legnani; nicola.pedrocchi}@ing.unibs.it*

Paolo Righettini, Hermes Giberti

*Dip. Ingegneria Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: {paolo.righettini, hermes.giberti}@polimi.it*

*Keywords:* Parallel manipulator, redundant, singularity, workspace.

In the context of the RIME project (Robot In Medical Environment, prin/Cofin 2001), Mechanical Engineering Department of the Università degli Studi di Brescia in cooperation with the Politecnico di Milano, has designed and realized an hybrid parallel-serial manipulator for intervertebral pedicle screw implantation in the spinal surgery. The prototype, named Cheope, is composed by a reconfigurable base moveable points PKM with redundant actuators carrying onto the mobile base a serial wrist with 3 dof. Parallel architecture is designed in order to can change its topology with mechanical operations. There are three main configurations for parallel structure and they are identified by the number of their dof: 3 dof, 4 dof and 3 dof with redundant actuation. The end-effector has always 5 dof (position of the TCP and orientation of the tool axis). This reconfigurability and high performances components allow to increase Cheope application field to fast pick and place, machining, surface finishing, and assembly tasks. In the paper we analyze the three different configurations solving direct and inverse kinematics, developing jacobian analysis and studying singular configurations (direct/inverse kinematic singularities and constraint singularities). Furthermore for the 3 dof redundant actuation configuration, we show as the redundant actuator allows to extend the robot workspace (helping to pass through singularities) and removing mechanical backlashes. At the end of the paper we expose some of the first experimental results.

## *References:*

Tosi D., Legnani G., Adamini R., Giberti H., Righettini P., *Design of Cheope an Hybrid Parallel-Serial Manipulator With Redundant Actuators*, 16° AIMETA Congress 9-12 Sept. 2003, Ferrara.

Zoppi M., Bruzzone L., Molfino R., Michelini R., *Constraint singularities of force Transmission in nonredundant parallel robots with less than six degrees of freedom*, Trans. ASME Journ. of Mech. Design, Sept. 2003.

## *Curriculum vitae:*

*Diego Tosi*, Ingegnere meccanico, Dottore di ricerca in Meccanica Applicata, docente di Meccanica delle Vibrazioni. Si interessa di Robotica Industriale, Azionamenti ed Automazione.

*Giovanni Legnani*, Dottore di ricerca in Meccanica Applicata, Prof. Ordinario del SSD Me. App. alle Macchine. Interessi in Robotica Industriale, Automazione e Biomeccanica.

*Nicola Pedrocchi*: Ingegnere meccanico, dottorando in Meccanica Applicata, si interessa di Robotica Industriale, Controllo di Forza, Automazione.

*Paolo Righettini*, Ingegnere Meccanico, Dottore di Ricerca in Meccanica Applicata, Prof. Associato del SSD Mec. App. alle Macchine. Si interessa di Robotica, Cinematica Parallela e Meccatronica.

*Hermes Giberti* Ingegnere Meccanico, Dottore di Ricerca in Meccanica Applicata, Ricercatore del SSD Mec. App. alle Macchine. Si interessa di Automazione Industriale e dei Sistemi di Controllo.



## Analisi funzionale del master per teleoperazione a cordini WiRo-6.3

Carlo Ferraresi, Stefano Pastorelli, Francesco Pescarmona

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: carlo.ferraresi@polito.it, stefano.pastorelli@polito.it, francesco.pescarmona@polito.it*

Marco Paoloni

*ENEA C.R. Casaccia, Roma, Italy*

*E-mail: marco.paoloni@casaccia.enea.it*

*Keywords:* teleoperazione, robot paralleli, spazi di lavoro

Il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Torino in collaborazione con l'ENEA ha concepito una struttura master per teleoperazione a sei gradi di libertà. Tale struttura deve essere comandata manualmente da un operatore, che ne impone gli spostamenti controllando conseguentemente una struttura slave remota o eventualmente virtuale. Da quest'ultima vengono rinviate informazioni relative alle forze ed ai momenti agenti sull'end-effector durante il compito svolto; tali dati sono utilizzati dal controllo del master per creare una riflessione di forze e momenti sulla mano dell'operatore. Nell'articolo si presenta una procedura analitica per la determinazione degli spazi di lavoro e si analizzano le problematiche legate alla generazione della riflessione di forza.

### *Bibliografia:*

Kawamura S., Ito K. (1993), "A new type of Master Robot for Teleoperation Using a Radial Wire Mechanism", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Yokohama, July 26-30, 1993, pp. 55-60.

Ferraresi C., Paoloni M., Pastorelli S., Pescarmona F. (2002), "A wire actuated force feed-back hand controller", International workshop on human robot interfaces: technologies and applications, Frascati (RM).

Ferraresi C., Paoloni M., Pastorelli S., Pescarmona F. (2004), "A new 6-d.o.f. parallel robotic structure actuated by wires: the WiRo-6.3", Journal of Robotic Systems, vol. 21, n. 11, Nov 2004.

(E altri articoli.)

*Curriculum vitae:* Il Prof. Carlo Ferraresi è Professore Ordinario in Meccanica Applicata alle Macchine presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Torino. Il Prof. Ferraresi ha tenuto, presso le varie sedi del Politecnico di Torino, corsi di Meccanica Applicata alle Macchine, Fondamenti di Meccanica Teorica e Applicata, Meccanica dei Robot, Meccanica Applicata ai sistemi biomedici. I principali settori di ricerca in cui opera il Prof. Ferraresi sono l'Automazione Industriale, la Robotica e la Pneumatica.

# Un Manipolatore Parallelo Isotropo Disaccoppiato a 6 Gradi di Libertà

Giovanni Legnani, Diego Tosi

*Dip. Ing. Meccanica, Univ. di Brescia, Via Branze 38, 25123 Brescia, Italy*

*E-mail: giovanni.legnani@ing.unibs.it, diego.tosi@ing.unibs.it*

Irene Fassi

*ITIA-CNR Ist. Tecnologie Industriali e Automazione CNR, V.le Lombardia 20A, 20131 Milano*

*E-mail: i.fassi@itia.cnr.it*

*Keywords:* PKM, manipolatori paralleli, isotropia, g.d.l. disaccoppiati.

Il lavoro descrive l'architettura di un manipolatore a cinematica parallela (PKM) a sei gradi di libertà che, nel centro dell'area di lavoro, è perfettamente isotropo e a gradi di libertà disaccoppiati.

Un manipolatore è definito *isotropo* se le sue proprietà cinetostatiche sono identiche in ogni direzione dello spazio di lavoro. Ad esempio se in ogni direzione esso può raggiungere lo stesso valore di velocità massima, se può esercitare la stessa forza e se ha la stessa rigidità.

Inoltre i sei gradi di libertà sono completamente *disaccoppiati* gli uni dagli altri se, assunto un riferimento cartesiano, ciascuna delle tre traslazioni e delle tre rotazioni può essere pilotata attuando il motore corrispondente e lasciando gli altri a riposo.

Dopo avere definito in maniera formale i concetti di isotropia e disaccoppiamento sulla base delle proprietà della matrice jacobiana, il lavoro descrive due possibili varianti di una nuova struttura cinematica che possiede entrambe le proprietà enunciate.

## *Bibliografia:*

*Angeles, I., and Lopez-Cajun, C. S. 1992. Kinematic isotropy and the conditioning index of serial type robotic manipulators. International Journal of Robotics Research 11(6):560-571.*

*Legnani G., Fassi I., Tosi D., Geometrical Conditions for the Design of Partial or Full Isotropic Hexapods, J. of Robotic Systems, 2005.*

*Legnani G., Robotica Industriale, CEA Casa ed. Ambrosiana, 2003.*

*Tsai K.Y., Huang K. D., The design of isotropic 6-DOF parallel manipulators using isotropy generators. Mechanism and Machine Theory, 38, (2003) 1199-1214.*

*Nappo F., Sulla assenza di un legame generale tra la velocità angolare e la caratterizzazione di uno spostamento rigido. Rendiconti di Matematica (3) Vol.3, Serie VI. 1970*

## *Curriculum vitae:*

*Giovanni Legnani.* Ingegnere elettronico, Dottore di ricerca in Meccanica Applicata, Prof. Ordinario del SSD Mec. App. alle Macchine. Interessi in Robotica Industriale, Automazione e Biomeccanica.

*Diego Tosi.* Ingegnere Meccanico, Dottore di ricerca in Meccanica Applicata, docente di Meccanica delle vibrazioni. Si interessa di robotica, azionamenti ed automazione.

*Irene Fassi.* Ingegnere meccanico, Dottoressa di ricerca in Sistemi e tecnologie di lavorazione. Ricercatrice presso ITIA-CNR. Si interessa di teoria ed applicazioni in robotica seriale e parallela.

# Progetto di un Robot PKM a tre GdL traslazionali pneumatico

Hermes Giberti

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: hermes.giberti@polimi.it*

Paolo Righettini

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: paolo.righettini@polimi.it*

Steven Chatterton

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: chatterton@mech.polimi.it*

**Keywords:** Cinematica parallela, Attuatori pneumatici, Robot, Pick and Place.

In questo lavoro viene presentato il progetto di un robot a cinematica parallela pneumatico dotato di 3 gradi di libertà. La sintesi della configurazione cinematica e della posizione degli attuatori è stata realizzata per soddisfare le *performance* richieste in termini di rigidità, di buon condizionamento cinematico e di precisione di posizionamento.

Il robot progettato (chiamato QUAD) risulta essere costituito da tre cilindri pneumatici disposti planarmente e parallelamente l'uno all'altro che movimentano dei carrelli montati su guide a ricircolo di sfere. Su tali carrelli sono vincolati tre coppie di link attraverso dei giunti appositamente realizzati per avere adeguata escursione angolare. Gli attuatori sono pilotati da valvole proporzionali in controllo di portata del tipo 5/3 mentre la posizione della slitta viene identificata attraverso degli encoder lineari magnetici. L'hardware di controllo è basato su un pc commerciale dotato di una scheda I/O industriale general purpose, il tutto comandato da un clone in real time dell'OS Linux.

## *Riferimenti bibliografici*

P. Righettini, A. Tasora, H. Giberti (2002), *An approach to multibody simulation of pneumo-mechanical systems*, 11th International Workshop on robotics in Alpe-Adria-Danube region RAAD-2002.

H.Giberti, P.Righettini (2002), *A non-linear controller for trajectory tracking of pneumatic cylinders*, 7th International Workshop on Advanced Motion Control, AMC 2002.

Merlet, J.P. (2000), *Parallel Robots*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

## *Curriculum vitae:*

*Hermes Giberti*, Ingegnere Meccanico, Dottore di Ricerca in Meccanica Applicata, Ricercatore del SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo dell'automazione industriale e dei sistemi di controllo.

*Paolo Righettini*, Ingegnere Meccanico, Prof. Associato del SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo della robotica, macchine a cinematica parallela e mecatronica.

*Steven Chatterton*, Ingegnere Meccanico, Ricercatore SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo della robotica e nel progetto di macchine automatiche.

# Analisi della manipolabilità del robot industriale Tricept

Massimo Callegari, Matteo Palpacelli, Marco Principi

*Dipartimento di Meccanica, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia*

*E-mail: m.callegari@univpm.it*

*Parole chiave:* robot, macchine a cinematica parallela, analisi cinematica, manipolabilità, Tricept

Gli autori partecipano ad un progetto di ricerca industriale che prevede l'utilizzo di un robot Comau Tricept HP1 ad architettura ibrida per effettuare lavorazioni di formatura incrementale a cinque assi, Fig. 1; questa soluzione, qualora praticabile con successo, permetterebbero di realizzare geometrie molto complesse o perfino sottosquadri, senza bisogno di movimentare il pezzo in lavorazione o cambiare l'utensile. La elevata anisotropia delle prestazioni del robot in oggetto ha però reso necessario lo sviluppo di un modello analitico delle sue prestazioni cineto-statiche; infatti le informazioni ricavabili dai manuali o da semplici calcoli, non sono comunque sufficienti a verificare *a priori* la fattibilità delle operazioni più complesse.

Basandosi su un precedente lavoro di Siciliano (1999), che aveva studiato il braccio parallelo, sono state in questo caso ricavate le relazioni cinematiche per l'intera struttura di tipo ibrido, e ne sono state caratterizzate le prestazioni statiche complessive. Dallo studio effettuato, e dalle successive prove sperimentali, si è potuto notare che il limite principale alle spinte esercitabili dal robot risiede nella limitata coppia disponibile agli assi del polso.

Si è poi realizzato un codice software che verifica la compatibilità tra le coppie erogabili dai motori del robot e le forze richieste affinché la deformazione della lamiera avvenga secondo i parametri stabiliti: le prime prove sperimentali che sono state eseguite sembrano confermare la validità dei modelli sviluppati.

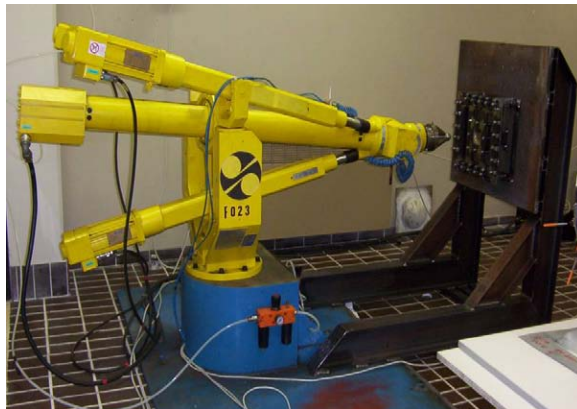


Fig. 1. Cella di lavoro per la formatura incrementale della lamiera

# Ottimizzazione della strategia di movimentazione di un robot seriale ridondante tramite un algoritmo genetico

Alberto Borboni, Roberto Bussola, Rodolfo Faglia, Diego Tosi

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Brescia, Italia*

*E-mail: alberto.borboni@ing.unibs.it, roberto.bussola@ing.unibs.it, rodolfo.faglia@ing.unibs.it, diego.tosi@ing.unibs.it*

*Parole chiave:* robot ridondante, taglio laser, pseudoinversa, ottimizzazione, algoritmi genetici

La pubblicazione espone l'applicazione di un algoritmo genetico come metodologia di scelta e ottimizzazione della strategia di movimentazione di un robot seriale ridondante impiegato nel "taglio al volo" di profilati metallici tramite raggio laser. L'uso del taglio laser, offre un elevato salto di qualità nel settore del taglio di tubi grazie alla moltitudine di miglioramenti riscontrati con l'eliminazione del rumore dovuto al cambio utensile e alla totale assenza di produzione di truciolo durante l'operazione di taglio.

Dopo una descrizione delle caratteristiche della macchina oggetto dello studio, vengono introdotte le equazioni che ne governano la cinematica e le problematiche ad esse correlate. Si espone in seguito il metodo adottato per la scelta delle leggi di moto e alcuni esempi dei risultati ottenuti. Gli ottimi risultati conseguiti hanno premiato il progetto con il primo posto in una classifica di oltre duemila lavori presentati alla fiera mondiale dell'innovazione EMO MILANO 2003.

## *Riferimenti bibliografici:*

Nakamura Y., Hanafusa H., 1987, *Optimal Redundancy Control of Robot Manipulators*, The International Journal of Robotics Research, Vol. 5. No. 4. Massachusetts Institute of Technology.

Bussola R., Faglia R., Tiboni M., 2000, *Identification by genetic algorithm of the parameters of a non-linear model for the simulation of indexing cam mechanisms dynamics*, Proceedings of ICANOV2000, Toronto, Canada.

## *Curriculum vitae:*

*Rodolfo Faglia*, Professore Ordinario di Meccanica Applicata alle Macchine, è autore di un centinaio di pubblicazioni scientifiche e didattiche riguardanti il settore della meccanica applicata e della mecatronica. E' Responsabile Scientifico di progetti nazionali e membro di comitati tecnico scientifici di diversi Congressi Internazionali

*Alberto Borboni*, Addottorato in Meccanica Applicata alle Macchine, svolge attività di ricerca grazie a diverse borse di studio, assegni di ricerca, contratti.

*Roberto Bussola*, Ricercatore in Meccanica Applicata alle Macchine, lavora nell'ambito della soft-computing e nello sviluppo di software dedicati in applicazioni nel campo dell'automazione e della robotica industriale.

*Diego Tosi*, Addottorato in Meccanica Applicata alle Macchine, svolge attività didattica e di ricerca nello studio e nello sviluppo di robot industriali.

# Domini elasto-plastici non convessi in materiali incruditi stabili alla Drucker

Andrea Paglietti <sup>1</sup>

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Cagliari, Italia*

*E-mail: paglietti@vaxca1.unica.it*

Giorgio Carta <sup>2</sup>

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Cagliari, Italia*

*E-mail: gcarta@unica.it*

Maria Cristina Porcu <sup>3</sup>

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Cagliari, Italia*

*E-mail: mcporcu@unica.it*

*Parole chiave:* plasticità, incrudimento, anisotropia limite elastico

I materiali stabili alla Drucker costituiscono la maggior parte dei materiali elasto-plastici di uso comune. Vengono così definiti poiché per essi è valido il celebre postulato di stabilità di Drucker. Una ben nota conseguenza di tale postulato è che la superficie plastica del materiale deve essere convessa. Questo comporta che devono essere convesse anche tutte le sezioni a sforzo costante di tale superficie.

Non sono rari, tuttavia, i casi in cui sperimentalmente vengono rilevate delle concavità nelle frontiere plastiche di materiali fortemente incruditi, in particolare in quelle relative a stati di sforzo piano  $\sigma$ - $\tau$  ottenuti mediante prove di trazione-torsione di tubi sottili. Eppure, nonostante la mancanza di convessità, non viene in questi casi riportata evidenza alcuna di instabilità del materiale. Probabilmente questo è il motivo per cui solitamente l'insorgere di tali concavità nella frontiera plastica viene imputata a errori sperimentali. Infatti è fortemente radicata la convinzione che le superfici limite di materiali stabili alla Drucker debbano essere convesse anche quando sono definite in un sottospazio degli sforzi. Nell'articolo verrà dimostrato che la presenza di zone di concavità nelle frontiere plastiche in tali sottospazi può essere dovuta all'anisotropia della superficie plastica, causata spesso dal processo di incrudimento subito dal materiale.

Il presente lavoro è organizzato come segue. Nella sezione 2 verrà messa in evidenza la dipendenza dalla rotazione del corpo delle superfici plastiche anisotrope. I risultati ottenuti verranno applicati, nella sezione 3, alla ben nota regola di incrudimento cinematico. Nella sezione 4 quest'ultima verrà particolarizzata al caso di stato di sforzo piano  $\sigma$ - $\tau$ . Si troverà in questo modo che, per processi di incrudimento piuttosto elevati, il materiale può esibire curve limite non convesse. Nella sezione 5, infine, verrà data la spiegazione di tale fenomeno considerando gli effetti dell'anisotropia del materiale, nonostante esso rimanga stabile secondo il postulato di Drucker.

<sup>1</sup> *Professore Ordinario*

<sup>2</sup> *Laureato, dottorando*

<sup>3</sup> *Ricercatore*

# Consequences of rate-dependence in the plastic behaviour of materials

Fabio De Angelis

*Dipartimento di Scienza delle Costruzioni,  
Università di Napoli Federico II, Italy  
e-mail: fabiodea@unina.it*

*Key words:* rate-dependent plasticity, constitutive problem, numerical algorithms

In the present paper the effects of different loading programs on the inelastic behaviour of rate-sensitive materials are analyzed. An appropriate solution scheme and a consistent tangent operator are applied which are capable to be adopted for general computational procedures.

The expression of the adopted tangent operator (De Angelis [2005]) generalizes the one presented by Simo and Taylor [1985] and it is applicable to arbitrary yield criteria by simply specializing the yield function. The advantage of this operator is the applicability to yield criteria of arbitrary type by the proper particularization of the yield function and also the applicability to different viscoplastic constitutive models by a suitable specialization of the flow function.

Numerical computations and results are reported which illustrate the rate-dependence of the constitutive model in use. In the numerical analyses the loading is performed by increasing a prescribed displacement or, conversely, by increasing the pressure. Accordingly, two non-dimensional loading program parameters are introduced for these dual cases. The significance of the loading program is thus emphasized with reference to the non-linear response of rate-dependent plastic materials.

## *References*

- [1] J.L. Chaboche and G. Cailletaud, "Integration methods for complex plastic constitutive equations", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, **133**, 125-155, (1996).
- [2] F. De Angelis, "A consistent tangent operator in hardening plasticity", to be submitted to *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, (2005).
- [3] J.W. Ju, "Consistent tangent moduli for a class of viscoplasticity", *J. Engrg. Mech.*, **116**, No. 8, 1764-1779, (1990).
- [4] J.C. Simo and R.L. Taylor, "Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity", *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg*, **48**, 101-118, (1985).

# Numerical tests on an optimal integration scheme for the von-Mises plasticity model based on exponential maps

Edoardo Artioli

*D.I.S.T.A.R.T. - Structural Mechanics, University of Bologna, Italy*

*E-mail: edoardo.artioli@mail.ing.unibo.it*

Ferdinando Auricchio

*Department of Structural Mechanics, University of Pavia, Italy*

*I.M.A.T.I. – C.N.R., Pavia, Italy*

*E-mail: auricchio@unipv.it*

Lourenço Beirão da Veiga

*Department of Mathematics “F. Enriques”, University of Milan, Italy*

*E-mail: beirao@mat.unimi.it*

**Keywords:** computational plasticity, integration algorithm, exponential map, exact integration

This paper presents a numerical method for the integration of the von-Mises elastoplastic constitutive model with isotropic and linear kinematic hardening. We propose a time continuous reformulation of the original model based on the adoption of a proper integration factor and derive a new integration scheme which makes use of exponential maps. A comparison with previous and well established algorithms, in terms of iso-error maps and pointwise mixed stress-strain loading histories, shows the main optimality characteristics of the new method.

## *References:*

Auricchio, F., Beirão da Veiga, L. 2003. *On a new integration scheme for von-Mises plasticity with linear hardening*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, **56**: 1375-1396.

Artioli, E., Auricchio, F., Beirão da Veiga, L. 2005. *Integration schemes for von-Mises plasticity models based on exponential maps: numerical investigations and theoretical considerations*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, in press.

Artioli, E., Auricchio, F., Beirão da Veiga, L. 2005. *Exponential-based integration algorithms for von-Mises plasticity with linear hardening. Part I: presentation of a novel “optimal” scheme and extensive numerical investigations*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, submitted.

## *Curricula vitae:*

Edoardo Artioli. PhD student in Structural Mechanics (D.I.S.T.A.R.T., University of Bologna).

Ferdinando Auricchio. Professor of Mechanics of Solids (Department of Structural Mechanics, University of Pavia), affiliated at the IMATI (Institute of Applied Mathematics and Information Technology, Pavia) as well as at the EUCENTRE (European Centre for Training and Research in Earthquake Engineering, Pavia). Coordinator of the GIMC (Italian Association of Computational Mechanics). Author of more than forty papers in refereed international journals and volumes.

Lourenço Beirão da Veiga. Researcher in Numerical Analysis (Department of Mathematics “F. Enriques”, University of Milan).



# Compatibilità Termodinamica della Legge Costitutiva Anisotropa per Materiali Policristallini e Incompressibili

Francesco dell'Isola<sup>(a,c)</sup>, Nicoletta Ianiro<sup>(b)</sup> e Luca Placidi<sup>(a,b,c)</sup>

<sup>a</sup>*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza"*

<sup>b</sup>*Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate, Università di Roma "La Sapienza"*

<sup>c</sup>*Laboratorio di Materiali e Strutture Intelligenti, Cisterna di Latina, Università di Roma "La Sapienza"*

E-mail: [luca.placidi@uniroma1.it](mailto:luca.placidi@uniroma1.it)

*Keywords:* Anisotropia, Termodinamica, Meccanica del Continuo, Materiali Policristallini, ODF.

Si presenta uno studio sui materiali policristallini nelle condizioni in cui è possibile modellarli come fluidi incompressibili ed estremamente viscosi. L'equazione costitutiva con cui li si vuole caratterizzare è data da una funzione che lega il tasso di deformazione  $\mathbf{D}$  con la parte deviatorica  $\mathbf{S}$  del tensore di Cauchy. L'ipotesi di isotropia è verificata solo in alcuni casi e non è sufficientemente generale. L'anisotropia è dovuta al meccanismo di deformazione a cui il materiale obbedisce, che è lo scorrimento dei piani dei cristalli nel policristallo. La distribuzione  $f$  delle orientazioni, Orientation Distribution Function (ODF), di tali cristalli determina il comportamento meccanico. In particolare solo una distribuzione uniforme è associata all'isotropia; al contrario, una distribuzione non uniforme è legata ad un comportamento anisotropo. In ultimo, si fa l'ipotesi che unico è il piano del cristallo su cui avviene lo scorrimento. Come conseguenza, i cristalli (non il policristallo !) risultano trasversalmente isotropi, e sono completamente caratterizzati dal versore  $\mathbf{n}$ .

L'equazione costitutiva, oggetto dell'analisi di questo lavoro, è stata presentata in (Placidi e Hutter, in stampa) ed è predittiva da ogni sistema di riferimento e per ogni stato di deformazione; in altre parole essa soddisfa il principio di oggettività ed è generale. In questo lavoro sarà analizzata la compatibilità termodinamica della legge anisotropa di (Placidi e Hutter, in stampa) e si presenterà una nuova e più semplice legge, la cui compatibilità termodinamica è dimostrata matematicamente (almeno nella sua formulazione nell'ambito della teoria delle miscele con continua diversità (Faria, 2001)).

## *References:*

- Jacka T.H., Budd W.F., (1989), Isotropic and anisotropic flow relations for ice dynamics, *Annals of Glaciology* **12**, pagg. 81-84.
- Placidi L., Hutter K., (in stampa), An Anisotropic Flow Law for Incompressible Polycrystalline Materials, *ZAMP*.
- Faria, S.H., (2001), Mixtures with continuous diversity: general theory and application to polymer solutions, *Continuum Mech. Thermodyn* **13**, Pagg. 91-120.

# Ottimizzazione topologica per solidi micropolari

Marco Rovati

*University of Trento, via Mesiano 77, Trento, Italy*

*E-mail: marco.rovati@ing.unitn.it*

Daniele Veber

*University of Trento, via Mesiano 77, Trento, Italy.*

*E-mail: daniele.veber@ing.unitn.it*

Alberto Taliercio

*Politecnico di Milano, P.za Leonardo da Vinci 32, Milano, Italy.*

*E-mail: alberto.taliercio@polimi.it*

*Keywords:* Ottimizzazione topologica, continui micropolari, teoria di Cosserat.

Gli approcci convenzionali della meccanica del continuo non sono in grado di considerare delle lunghezze di scala interne del materiale, tuttavia i materiali reali spesso manifestano diverse e importanti lunghezze di scala, che possono essere considerate nella formulazione di un modello realistico: materiali granulari, particolati, fibrosi, solidi cellulari e tessuti biologici. Per tener conto del comportamento meccanico del materiale e degli effetti di scala si possono utilizzare le cosiddette teorie non-locali. La teoria dell'elasticità di Cosserat incorpora rotazioni locali dei punti materiali in aggiunta agli spostamenti traslazionali; come risultato, il materiale può trasmettere alle porzioni adiacenti forze di tensione (stress) e coppie di tensione (couple stress). L'aggiunta delle coppie di tensione alla teoria classica dell'elasticità introduce una lunghezza caratteristica nelle equazioni costitutive.

Con riferimento ad un problema bidimensionale, l'obiettivo di questo lavoro è quello di ottenere una distribuzione di materiale ottima in un fissato dominio di progetto con prescritte condizioni al contorno e con riferimento al problema di minima cedevolezza strutturale. Il problema è formulato utilizzando la densità materiale come variabile di parametrizzazione del tensore costitutivo (v. Eschenauer e Olhoff, 2001). Nel lavoro si presentano svariati confronti tra diversi modelli di interpolazione materiale. In particolare viene adottato un modello SIMP modificato allo scopo di tener in opportuno conto le parti traslazionali e rotazionali del tensore costitutivo. Si presentano inoltre esempi di applicazione sia con riferimento a problemi strutturali classici che riguardanti tessuti biologici, quali tessuti ossei. Gli esempi vogliono mettere in rilievo la dipendenza delle soluzioni ottimali dalla lunghezza di scala e le differenze da analoghi problemi di ottimo in elasticità classica.

## *Riferimenti bibliografici*

Bendsøe, M.P.; Sigmund, O. (2003): *Topology Optimization– Theory, Methods and Applications*. Berlin, Heidelberg:Springer-Verlag.

Bendsøe, M.P.; Sigmund, O. (1999): *Material interpolation schemes in topology optimization*. Arch. Appl. Mech. 69,635–654.

Nowacki W. (1986): *Theory of Asymmetric Elasticity*. Pergamon Press: Oxford.

Eschenauer H.A., Olhoff N. (2001) *Topology optimization of continuum structures: a review*. Appl. Mech. Rev. Vol:54(4) 331-390.

# Modulo di Poisson negativo in solidi anisotropi

Antonio Cazzani

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università di Trento, Italia*

*E-mail: Antonio.Cazzani@ing.unitn.it*

Marco Rovati

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università di Trento, Italia*

*E-mail: Marco.Rovati@ing.unitn.it*

*Keywords: Anisotropic elasticity, Poisson's ratio, classes of elastic symmetry*

Sebbene considerazioni termodinamiche consentano al coefficiente di Poisson, sia in elasticità isotropa che anisotropa, di assumere valori anche negativi, è consuetudine considerare questa possibilità come non presente in natura. Tuttavia, pur apparendo il fenomeno contrario al senso comune, esiste una ricca letteratura ove si mostra che invece esso è relativamente comune.

Dal punto di vista teorico sono state ideate microstrutture che conducono a solidi isotropi con modulo di Poisson prossimo a -1 (Almgreen, Rothenburg, Milton, Sigmund). Si è inoltre osservato che materiali con modulo di Poisson negativo si manifestano in natura in cristalli a bassa densità, nelle zeoliti, in alcuni tessuti biologici. Inoltre la medesima proprietà si presenta in alcune schiume solide (Lakes) e in taluni polimeri (Evans).

Più recentemente si è osservato (Baughman *et al.*) che circa il 50% dei metalli cubici manifestano questa particolare proprietà.

In questo lavoro si propone una indagine sistematica nelle diverse classi di simmetria elastica allo scopo di mettere in evidenza come il fenomeno di coefficiente di Poisson negativo sia effettivamente sempre presente.

Il lavoro consiste nella determinazione analitica delle condizioni di massimo e minimo del coefficiente di Poisson per un generico solido anisotropo e i risultati vengono poi specializzati con riferimento alle diverse classi di simmetria elastica.

Vengono infine illustrati, sempre per le diverse classi di simmetria, esempi di materiali reali che manifestano il fenomeno in esame.

## *Riferimenti bibliografici:*

Baughman, R.H., Dantas, S.O., Stafstrom, S., Zakhidov A.A., Mitchell, T.B., Dobin, D.H.E. 2000. *Science*, 288, pp.2018-2022.

Baughman, R.H., Shacklette, J.M., Zakhidov, A.A., Stafstrom, S. 1998. *Nature*, 392, pp. 362-365.

Lakes, R. 1997. *Science*, 238, pp. 551.

Rovati, M. 2003. *Scripta Materialia*, 48, pp. 235-240.

Rovati, M. 2004. *Scripta Materialia*, 51, pp. 1087-1091

# Mechanical properties of monofilament technical textiles: an analytical model

Valter Carvelli, Carlo Poggi

*Department of Structural Engineering, Technical University (Politecnico) of Milan, Italy*

*e-mail: valter.carvelli@polimi.it, carlo.poggi@polimi.it*

*Keywords:* technical textile, mechanical properties, analytical model

Technical textiles are widely used in different industrial fields for applications like screen printing and filtration. Technologies originally developed in the textile industries, like weaving, braiding and knitting, are commonly used. Monofilament plain weave textiles present various attractive aspects like low fabrication costs, ease handling and high adaptability.

This paper presents an analytical model to predict the mechanical behaviour of monofilament technical textiles. The macroscopic behaviour of the textiles is predicted by a three-dimensional analytical model based on the theory of curved beam (Toniolo 1979).

The main assumption is the regular distribution of the filaments in the textile. This allows us to exploit the theoretical concepts of the homogenization theory for periodic media (see e.g. Suquet 1985).

The mechanical response of the monofilament textiles is obtained by studying a representative volume (RV) in which the assumed material periodicity is taken into account enforcing suitable kinematic boundary conditions and the interaction between filaments is implemented by elastic springs. The size of the RV is of the order of the filament diameter, i.e. 30–70  $\mu\text{m}$ .

The macroscopic behaviour of the textiles is investigated assuming the nonlinear constitutive behaviour of the filaments obtained by experimental tests.

Different monofilament textiles are considered changing the nominal fibres diameter and their distance in warp and weft directions. The analytical prediction are compared to the experimental tests results carried out in accordance to international standards (Carvelli et alii 2005)..

## References:

Toniolo G., 1979. *La teoria della matrice di trasmissione*, Masson Editori, Milano.

Suquet P., 1985. Elements of homogenization for inelastic solid mechanics, in 'Homogenization techniques for composite media', Lecture Notes in Physics 272 (Ed. by E. Sanchez-Palencia and A. Zaoui), Springer, Wien, pp. 193-278.

Carvelli V., Corazza C., Poggi C., 2005. Numerical and experimental investigation of the mechanical behaviour of monofilament technical textiles, Proceeding of the International Conference 'Fibrous Materials - XXI Century', St. Petersburg (Russia).

# A fast multipole implementation of the mixed velocity-traction approach for the analysis of MEMS

Attilio Frangi

*Dept. Structural Engineering, Politecnico di Milano*

*attilio.frangi@polimi.it*

Arturo Di Gioia, Giorgio Novati

*Department of Mechanics, University of Trento*

*Keywords:* Multipole accelerators, Stokes Flow, Damping Forces, MEMS

Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) represent an emerging technology for the production of miniaturized sensors and actuators. In many cases MEMS consist of several solid parts in relative motion at moderate/high frequencies. The prediction of the dynamic response of these systems also requires an accurate evaluation of dissipation induced by frictional forces exerted by the surrounding gas on the MEMS.

Gas dynamics at the microscale is a fascinating and timely topic which often calls for the application of several different techniques according to the working pressure of the device. Continuum models with or without boundary slip conditions apply at relatively high pressures; at lower pressures, however, when analytical and semi-analytical solutions are not available, the techniques of rarefied gas dynamics should be utilized according to the value of the Knudsen number involved.

In the present work we focus on the evaluation of damping at ambient pressure. Due to the micro-scale and to the relatively low velocities involved, a tool for the simulation of stationary incompressible Stokes flow generally matches experiments to a highly satisfactory degree. Anyway, the complexity of the structures and the need to simulate large relative motions call for the application of innovative numerical tools. Indeed, matrices produced by the classical BEM are fully populated and their storage and direct decomposition soon become prohibitive tasks. The application of iterative solvers is a possible solution. The properties of the integral formulation and the discretization method adopted directly affect the convergence speed as well as the accuracy of the procedure. Good results can be achieved only if the original integral formulation is well-posed and well-conditioned. On the contrary, the Dirichlet formulation of the exterior Stokes is known to be intrinsically ill-conditioned and this feature has hindered its successful application in commercial codes. In [1] a new formulation has been proposed, theoretically investigated and numerically implemented for small scale problems. This approach, the Mixed-Velocity-Traction (MVT) technique, basically consists in enforcing at once both velocity and traction integral equations in order to filter the large null-space associated.

In this paper, the extension of the MVT approach to large scale problems is addressed by means of Fast Multipole Methods for an efficient computation of the matrix-vector product to be performed at each iteration. This paper presents itself as a natural sequel of [1]. Several numerical examples are presented and compared with experimental results

## References

[1] Frangi A., Tausch J., "A qualification enhanced approach for the Dirichlet problem of exterior Stokes flow", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, to appear, 2005

# Modelling harmonic and subharmonic generation using an interaction-box formalism

Federico Bosia

*Dipartimento di Fisica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: federico.bosia@polito.it*

Nicola Pugno, Alberto Carpinteri

*Dipartimento Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: nicola.pugno@polito.it, alberto.carpinteri@polito.it*

*Keywords:* Subharmonic vibrations, Interaction box, Nonlinearity.

A so-called “interaction-box” formalism, which has recently been introduced by one of the authors to describe hysteresis in dynamical systems in the case of higher harmonic generation [Hirse Korn and Delsanto (2004)], is further discussed and generalized to describe the phenomenon of subharmonic generation. In this case, the increase in the periodicity of the response is reflected in the formation of multiple loops in the Effect (output) vs. Cause (input) diagrams. Conversely, we show how this type of response represents a sort of “signature” of the system, and can thus be employed to draw general conclusions about the features of the latter. A specific example of a nonlinear system is chosen [Pugno, Ruotolo, Surace, (2000)] to illustrate the approach, namely a vibrating cantilever beam with a breathing crack. Effect vs. Cause curves are calculated for this system, showing how an increase in the depth of the crack leads to increasingly complex patterns, due to the generation of higher harmonics and subharmonics

## *References:*

Hirse Korn, S. and Delsanto, P.P. (2004), “On the Universality of Nonclassical Nonlinear Phenomena and their Classification”, *Applied Physics Letters*, 84, 1413.

Pugno N., Ruotolo R., Surace C., (2000) “Evaluation of the non-linear dynamic response to harmonic excitation of a beam with several breathing cracks”, *International Journal of Sound and Vibration* 235, pp. 749-762.

*Curriculum vitae:* Born in Turin in 1973. Degree in Physics from the University of Turin in 1997. Researcher at IFW-Dresden (D) on the topic of surface acoustic waves until 1998. PhD work at EPFL-Lausanne (CH) on the topic of deformation characterization of composite materials using fibre optic sensors until 2002. Post-doc at Politecnico of Turin since 2004.

# Dual inertia operator in the rigid body dynamics

Mauro Benati

*University of Genoa, DIBE, Via Opera Pia 11a, 16145 Genoa*

*E-mail: benati@dibe.unige.it*

Angelo Morro

*University of Genoa, DIBE, Via Opera Pia 11a, 16145 Genoa*

*E-mail: morro@dibe.unige.it*

*Keywords:* dual vectors, motors, dual inertia operator.

There is a wide interest into the description of rigid body motions by means of dual numbers and vectors. In the rigid body dynamics, motors appear a set of privileged dual vectors; they involve vectors which depend on the pertinent point of the body and are characterized by the transformation rule associated with the change of the point. The main advantage of dual-vector calculus over standard vector calculus is that kinematic and dynamic equations can be expressed in a very compact form.

The paper elaborates a formulation of the balance equations for a rigid body within the realm of dual vectors and tensors. First dual vectors are considered and, in particulars, motors are characterized. By way of examples, the dual velocity, the dual force and the dual momentum are examined and shown to be motors. Next the dual inertia operator is determined by looking for a dual tensor operator which maps the dual velocity into the dual momentum. The dependence of the dual inertia operator on the origin is examined. The Euler-Newton equations are written in dual form and their structure is investigated in the particular case when the origin is fixed.

## *References*

Pennock, G. R. & Meehan, P. J. 2002. *Geometric insighy into the dynamics of a rigid body using the spatial triangle of screws*, J. Mechanical Design 124, 684-689.

Brodsky, V. & Shoham, M. 1998. *Dual numbers representation of rigid body dynamics*, Mechanism and Machine Theory 34, 693-718.

*Curriculum vitae:* Mauro Benati is associate professor of Rational Mechanics at the University of Genoa since 1983. His research activity is mainly addressed to the dynamics of chains of rigid bodies.

Angelo Morro is full professor of Mathematical Physics at the University of Genoa since 1981. His main scientific interest deals with models of continua with memory and wave propagation.

# Messa a punto di modelli per lo studio della dinamica della racchetta da tennis con particolare riguardo all'influenza delle tecniche di incordatura

Federico Casolo, Michele Camposaragna, Matteo Cocetta

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: federico.casolo@polimi.it, camposaragna@mech.polimi.it, cocetta@mech.polimi.it*

*Keywords:* Biomeccanica, tennis, incordatura, urto.

**SOMMARIO:** La tensione delle corde gioca un ruolo fondamentale nel tennis: è noto che corde meno tese garantiscono un miglior rendimento dell'urto tra pallina e racchetta, mentre corde più tese incrementano, da un certo punto di vista, la precisione dell'attrezzo. Variazioni nella tensione delle corde influenzano anche le caratteristiche vibrazionali del sistema. Errori nella fase di incordatura possono provocare gravi danni o la rottura del telaio. All'attrezzo è richiesta contemporaneamente leggerezza, rigidità, robustezza, potenza e manovrabilità. I nuovi materiali compositi garantiscono gradi di libertà nel progetto che erano una volta impensabili ma richiedono al progettista una conoscenza approfondita della meccanica dell'urto nel tennis. Sono stati messi a punto alcuni modelli per calcoli ad elementi finiti con formulazione esplicita che possono adeguatamente trattare materiali compositi multistrato con fibre ad orientamenti differenziati e permettono di simulare anche la fase d'urto. Anche nella costruzione del modello l'incordatura rappresenta una fase critica. Le simulazioni hanno dimostrato che la tensione effettiva finale delle singole corde si discosta microscopicamente da quanto previsto dalla tecnica di incordatura. Per lo studio della dinamica dell'urto racchetta-pallina non è accettabile inserire sul modello raffinato del telaio un piatto corde caratterizzato da tensioni uguali tutte per le corde disposte parallelamente perché questa condizione si discosta molto dalla realtà. La macchina incordatrice garantisce la tensione nominale di ogni corda solo all'atto del suo inserimento, ma non tiene conto della variazione della tensione conseguente all'inserimento delle corde successive, le quali provocano un'ulteriore deformazione del telaio. Gli esempi di incordature analizzate mostrano che un piatto teoricamente incordato con tutte le corde alla medesima tensione non risulterà omogeneamente teso e mentre le corde trasversali risulteranno quasi tutte meno tese di quanto previsto, quelle longitudinali risulteranno tutte significativamente più tese rispetto al valore nominale. Sequenze di incordature differenti per medesime tensioni nominali producono una differente distribuzione tensionale.

## *Riferimenti bibliografici*

F.Casolo, V.Lorenzi, H.Sasahara (2000), *On tennis equipment, impact simulation and stroke precision*, Tennis Sci.& Tech., Ed S.J.Haake Blackwell Science, Oxford.

## *Curriculum vitae*

*Federico Casolo*, Prof. (ing-ind13) meccanica del sistema uomo-macchina, ambiti di ricerca: protesi a più assi attivi per amputati, meccanica e biomeccanica dell'attrezzatura sportiva, sicurezza stradale.  
*Michele Camposaragna*, Assegnista di Ricerca (ing-ind13) ambiti di ricerca: sviluppo di modelli ad elementi finiti per la biomeccanica della sicurezza stradale, dello sport e dell'implantologia dentale.  
*Matteo Cocetta*, Assegnista di Ricerca (ing-ind13) ambiti di ricerca: applicazioni di realtà virtuale, programmi per il controllo di sistemi bio-meccatronici.



# Rotorcraft Aerodynamic Coefficients Estimation Using Artificial Neural Networks

Nicola de Divitiis

*Dipartimento di Meccanica e Aeronautica Università di Roma "La Sapienza"*

*E-mail: dedivitiis@dma.dma.uniroma1.it*

*Keywords:* rotorcraft, neural network, aerodynamic coefficient

The estimation of aerodynamic force and moment developed by a shrouded-fan unmanned aerial vehicle results to be a difficult task due to the intensive interference between fuselage and rotors flow. This sizable interaction, whose intensity varies depending on the angle of attack and fans system induced velocity, causes quite different flow fields around the vehicle. The vehicle dynamics is then governed by the aerodynamic force and moment coefficients the knowledge of which is of paramount importance in the analysis of performance and stability of vehicle. The vehicle here considered is a shrouded-fan rotorcraft which is made of a toroidal hull at the center of which are placed two rotors driven by three two-stroke air cooled engines. A method for estimating the aerodynamic coefficients is proposed which is based on the application of the artificial neural networks. In such procedure the weights of the networks are calculated by means of a novel variational approach that in turn allows the calculation in real time of the vehicle aerodynamic coefficients. The algorithm identifies all the aerodynamic coefficients through the training of the neural networks with flight test data. The procedure is in the framework of the output error method that is commonly adopted for the identification of the vehicle model. The flight test data used for training, are generated from direct simulations using a reference vehicle model, whereas the estimated data are calculated by means of a vehicle mathematical model that incorporates artificial neural networks for the estimation of aerodynamic force and moment coefficients. Once the networks are trained, the analysis of performance can be carried out. Comparisons are presented between the neural network based vehicle model and reference vehicle model.

## *References:*

de Divitiis N. "Performance and Stability Analysis of a Shrouded-Fan UAV". Submitted to *Journal of Aircraft*.

de Divitiis N. "Wind Estimation on a Lightweight Vertical-Takeoff-and-Landing Uninhabited Vehicle", *Journal of Aircraft*, vol.40 no.4 2003, pp. 759-767.

# Iterative learning control per la contornatura di geometrie incognite con manipolatori industriali

Giacomo Ziliani, Nicola Pedrocchi, Giovanni Legnani, Alberto Omodei

*Dip. Ing. Meccanica, Univ. di Brescia Via Branza 38, 25123 Brescia, Italy*

*E-mail: giacomo.ziliani@ing.unibs.it, nicola.pedrocchi@ing.unibs.it, giovanni.legnani@ing.unibs.it, alberto.omodei@ing.unibs.it*

Antonio Visioli

*Dip. Elettronica per l'Automazione, Univ. di Brescia, Via Branza 38, 25123 Brescia, Italy*

*E-mail: antonio.visioli@ing.unibs.it*

*Keywords:* ILC, apprendimento iterativo, controllo di forza, contour tracking, robot industriali

Il presente lavoro descrive un'originale metodologia di controllo per il tracciamento robotizzato di oggetti di forma non conosciuta dal manipolatore. Tale metodologia è basata sul principio dell'Iterative Learning Control (ILC). Un manipolatore deve tracciare un oggetto di forma ignota mantenendo costanti dei prefissati valori di forza normale e velocità tangenziale. La misura dell'errore di tracciamento in un ciclo viene utilizzato per migliorare il comportamento al ciclo successivo ciò è ottenuto sviluppando un originale algoritmo di apprendimento iterativo che non richiede la sincronizzazione temporale tra cicli successivi. Dopo un'introduzione teorica vengono presentati alcuni risultati sperimentali.

## *References:*

S. Arimoto, S. Kawamura, F. Miyazaki. *Bettering operation of robots by learning*. Journal of Robotic System, n° 1 - 1984.

Z. Bien, J. X. Xu. *Iterative Learning Control – Analysis, Design, Integration and Applications*. Kluwer Academic Publishers, 1998.

A. Visioli, F. Jatta, A. Omodei, G. Legnani. *Iterative learning control per un robot industriale*. Automazione e Strumentazione Settembre 2004.

## *Curriculum vitae:*

Giacomo Ziliani: Ingegnere meccanico, dottorando in Meccanica Applicata. si interessa di robotica, controllo di forza e biomeccanica.

Nicola Pedrocchi: Ingegnere meccanico, dottorando in Meccanica Applicata, si interessa di robotica, controllo di forza, azionamenti.

Giovanni Legnani: Ingegnere Elettronico, Dottore di ricerca in Meccanica Applicata, Prof. Ordinario del SSD Mec. App. alle Macchine. Interessi in robotica industriale, automazione e biomeccanica.

Alberto Omodei: Ingegnere meccanico dottore in Meccanica Applicata si interessa di robotica.

Antonio Visioli Ingegnere Elettronico, Dottore di ricerca in Meccanica Applicata, Prof. Associato di Controlli Automatici. Si interessa di controlli automatici, robotica e automazione.

# Classi di simmetria in elasticità piana

Sandra Forte

*Dipartimento di Matematica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: sanfor@mate.polimi.it*

*Parole chiave:* ortotropia, gruppo di simmetria, elasticità piana, decomposizione di Cartan.

In un laminato composito rinforzato da fibre, ogni strato può essere modellizzato come un materiale elastico ortotropo, cioè come un materiale che possiede tre assi di simmetria elastica, di cui uno normale allo strato.

Un materiale ortotropo può essere considerato un particolare materiale a simmetria piana. Sorge naturale una prima questione: assegnato un materiale con piano di simmetria  $x_3 = 0$ , come riconoscere se è ortotropo? E se il materiale è ortotropo, come individuare i suoi assi di simmetria nel piano  $x_1, x_2$ ?

Da un esame delle otto classi di simmetria dei materiali elastici si può dimostrare che solo cinque classi contengono materiali ortotropi (il numero scende a tre nel caso dell'elasticità piana). Come riconoscere a quale classe di simmetria appartiene un materiale ortotropo assegnato?

Gli strumenti matematici utilizzati per rispondere ai quesiti posti sono la decomposizione armonica e la decomposizione di Cartan, tecniche della teoria delle rappresentazioni dei gruppi che si sono mostrate efficaci in questioni simili, come ad esempio nel determinare il numero di classi di simmetria nello spazio dei tensori elastici (Forte e Vianello [1996]).

La visione dell'azione di  $SO(2)$  sui componenti del tensore elastico nella decomposizione di Cartan consente anche di mostrare l'esistenza di *materiali ortotropi speciali*, già rilevata da Vannucci [2002] nell'ambito dell'elasticità piana, qui evidenziata anche nell'ambito dell'elasticità tridimensionale.

## *Riferimenti bibliografici:*

Forte, S. & Vianello, M. 1996. *Symmetry classes for elasticity tensors*, Journal of Elasticity: 81-108.

Forte, S. & Vianello, M. 1998. *Functional bases for transversely isotropic and transversely anisotropic invariants of elasticity tensors*, Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics: 543-552.

Jones, R.M. 1975. *Mechanics of composite materials*, McGraw Hill and Scripta Book Co..

Vannucci P. 2002. *A special planar orthotropic material*, Journal of Elasticity: 81-96.

*Curriculum vitae:* Ricercatore nell'ambito della Fisica Matematica, si è occupata di termoelasticità, problemi di elasticità piana, di elasticità finita e, di recente, di elasticità anisotropa, con una serie di lavori sulle simmetrie materiali, che utilizzano tecniche della teoria delle rappresentazioni dei gruppi.

# Delimitazioni agli elementi finiti del moltiplicatore di collasso di archi murari interagenti con il riempimento

Andrea Cavicchi

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Genova, Italia*  
cavicchi@diseg.unige.it

*Parole chiave:* Ponti in muratura, analisi limite, teorema statico

L'interazione arco-riempimento ha un effetto rilevante sulla capacità portante e sui meccanismi di collasso dei ponti in muratura, come dimostrato da numerose prove sperimentali<sup>1</sup>. In Cavicchi<sup>2</sup> e Cavicchi & Gambarotta<sup>3,4</sup> è stato proposto un modello strutturale piano in cui l'arco è descritto come una trave curvilinea interagente con un continuo in stato piano di deformazione rappresentativo del riempimento; l'applicazione del teorema cinematico dell'Analisi Limite mediante discretizzazione agli elementi finiti ha consentito la determinazione di delimitazioni superiori del moltiplicatore di collasso e dei meccanismi corrispondenti al variare dei parametri costitutivi di riempimento e muratura.

Il risultato fornito dal metodo cinematico non è conservativo, e l'assenza di informazione sul grado di approssimazione del moltiplicatore di collasso ne condiziona l'applicabilità. Sulla base del modello strutturale definito in<sup>3,4</sup>, nel presente lavoro è sviluppata una procedura agli elementi finiti basata sul teorema statico<sup>5,6</sup> che fornisce delimitazioni inferiori del moltiplicatore di collasso ed i corrispondenti stati di equilibrio limite. La garanzia sulla proprietà del moltiplicatore statico di essere un minorante del moltiplicatore di collasso rende tale risultato un riferimento conservativo indipendentemente dal grado di approssimazione che lo caratterizza. Inoltre, la conoscenza del campo tensionale nel riempimento e di sollecitazione su archi e pile costituisce un'informazione essenziale per valutare l'impegno delle risorse resistenti del sistema. L'esempio riportato pone a confronto i risultati forniti dall'approccio statico con quelli ottenuti con il metodo cinematico, mettendone in evidenza il buon accordo nella descrizione dello stato limite.

## *Bibliografia*

Page J., *Masonry Arch Bridges* - TRL State of the Art Review, HMSO, 1993.

Cavicchi A., *Analisi limite agli elementi finiti di archi murari interagenti con il riempimento per la valutazione della capacità portante di ponti in muratura*, Tesi di Dottorato, *Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica*, Genova, 2004.

Cavicchi A., Gambarotta L., Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch-fill interaction, *Engineering Structures*, 27, 605-615, 2005.

Cavicchi A., Gambarotta L., Two-dimensional finite element upper bound limit analysis of masonry bridges, *Computers & Structures*, sottoposto per la pubblicazione.

Sloan S.W., Lower bound limit analysis using finite elements and linear programming, *Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 12, 61-77, 1988.

Lyamin A.V., Sloan S.W., Lower bound limit analysis using non-linear programming, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 55, 573-611, 2002.

# Modelli 2D con microstruttura per pannelli di muratura in 3D

Antonella Cecchi

*Dipartimento di Costruzione dell'Architettura, Università IUAV di Venezia, Italia*  
cecchi@iuav.it

Nicola Luigi Rizzi

*Dipartimento di Strutture, Università degli Studi 'Roma Tre', Italia*  
nlr@uniroma3.it

*Keywords:* muratura, Mindlin-Reissner, microstruttura

In [Masiani et al.,1992] si è proposto un modello di continuo con microstruttura per l'analisi di sistemi costituiti da blocchi rigidi e interfacce elastiche in 2D. Per tenere in conto i moti fuori dal piano gli autori [Cecchi e Rizzi, 2003] hanno sviluppato una procedura di identificazione tra un modello discreto a blocchi e una piastra di tipo Mindlin Reissner.

In questo lavoro si propone di identificare lo stesso sistema di blocchi con un modello di continuo bidimensionale ad ogni punto del quale è associata una microstruttura rigida 3D. Rispetto alla piastra, l'atto di moto è più ricco perché la velocità angolare della microstruttura è descritta da un tensore antisimmetrico completo, mentre le azioni di contatto sono rappresentate da due tensori che in generale non hanno nessuna proprietà di simmetria e che descrivono la forza e la coppia di contatto, rispettivamente.

In tal senso è risultato interessante aggiungere al modello di piastra anche una rotazione con asse ortogonale alla superficie media, al fine di descrivere la rotazione relativa fra blocchi nel piano del pannello e simulare quindi il comportamento indotto dalle azioni orizzontali su di un muro ammorsato ad una estremità.

## *Bibliografia*

- Cecchi A., Rizzi N.L.: Murature a tessitura regolare: identificazione 3D con modelli 2D di piastra. XVI congresso AIMETA, Ferrara (2003).
- Cecchi A., Sab K.: Out of plane model for heterogeneous periodic materials: the case of masonry. *European Jour. of Mechanics. A.-Solids*, Vol. 21, pp. 249-268 (2002).
- Di Carlo A., Podio Guidugli P., Williams W.O.: Shells with thickness distension, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 1201-1225 (2001).
- Masiani R., Rizzi N.L., Trovalusci P.: Masonry walls as structured continua. *Meccanica* Vol. 30, pp. 673-683 (1995).
- Salerno, G., de Felice, G.: Continuum modelling of discrete systems: a variational approach. Proc: ECCOMAS, Barcelona, 11-14 sept.(2000)
- Teresi L., Tiero A.: On Variational Approaches to Plate Models, *Meccanica* Vol. 32, pp. 143-156 (1997).

## *Curricula*

Antonella Cecchi, dottore di ricerca, assegnista di ricerca dal 2000 presso l'Università IUAV di Venezia.

Nicola Luigi Rizzi, Professore ordinario di Scienza delle Costruzioni presso l'Università degli Studi Roma Tre.

# Un modello a danneggiamento anisotropo per la muratura storica

Chiara Calderini

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Genova*

*E-mail: calderini@diseg.unige.it*

Sergio Lagomarsino

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Genova*

*E-mail: lagomarsino@diseg.unige.it*

*Keywords:* muratura, legame costitutivo, micromeccanica, elementi finiti, anisotropia.

Oggetto della lavoro è la formulazione di un legame costitutivo a danneggiamento della muratura per la modellazione di costruzioni storiche. Il legame è sviluppato con un approccio micromeccanico, nell'ipotesi di stato piano di tensione. La muratura è considerata come un materiale composito microstrutturato costituito da un insieme periodico di blocchi connessi da giunti di malta. Si considerano diversi meccanismi di danno nel piano relativi ai giunti di malta (Alpa & Monetto, 1994) ed ai blocchi. I giunti principali sono caratterizzati da resistenza a trazione, coesione e attrito sull'interfaccia, mentre si trascura la resistenza meccanica dei giunti secondari. Considerando tutti i possibili meccanismi di danno dei giunti, si è imposta una condizione di emisimmetria sulle deformazioni dei giunti principali di malta.

Il processo di danno è governato da leggi di evoluzione basate su un approccio energetico e su una legge di attrito alla Coulomb (Gambarotta & Lagomarsino, 1997). Il modello può essere adottato nell'analisi sismica delle strutture in muratura, per la sua capacità di descrivere diversi meccanismi di danno tipicamente associati ad azioni orizzontali, e di considerare la dissipazione isteretica associata ai fenomeni di attrito.

## *References:*

Alpa, G., Monetto, I. 1994. Microstructural model for dry block masonry walls with in-plane loading. *J. Mech. Phys. Solids* 42(7), 1159-1175.

Gambarotta, L., Lagomarsino, S., 1997. Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part II: the continuum model and its applications. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 26, 441-462.

*Curriculum vitae:* Chiara Calderini, architetto, ha conseguito il Dottorato in Ingegneria Strutturale e Geotecnica presso l'Università degli Studi di Genova nel 2004. Attualmente Assegnista di Ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Genova, svolge ricerca nel campo della modellazione ed analisi delle murature storiche e del consolidamento.

# Un metodo numerico per l'analisi strutturale di cupole in muratura: la chiesa di S. Maria Maddalena a Morano Calabro

Katia Bernardeschi

*Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "Alessandro Faedo" ISTI - CNR, Pisa, Italia*  
*E-mail: katia.bernardeschi@isti.cnr.it*

Francesco Paolo Cecati

*Soprintendenza per i Beni Architettonici e per il Paesaggio della Calabria, Cosenza, Italia*  
*E-mail: soprintendenzacal@tin.it*

Cristina Padovani

*Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "Alessandro Faedo" ISTI - CNR, Pisa, Italia*  
*E-mail: cristina.padovani@isti.cnr.it*

Giuseppe Pasquinelli

*Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "Alessandro Faedo" ISTI - CNR, Pisa, Italia*  
*E-mail: Giuseppe.pasquinelli@isti.cnr.it*

*Keywords:* analisi statica, cupole in muratura, elasticità non lineare, metodo degli elementi finiti.

Dopo avere descritto l'elemento "guscio spesso" implementato nel codice agli elementi finiti NOSA per modellare il comportamento strutturale di volte e cupole in muratura, si riportano i risultati di uno studio condotto sulla cupola e sul tamburo della chiesa di Santa Maria Maddalena a Morano Calabro. Inizialmente si è studiata la struttura soggetta al solo peso proprio, successivamente sono state condotte indagini per valutare l'effetto di cedimenti differenziali del tamburo. Le analisi sono servite sia a conoscere gli stati di tensione e di deformazione della struttura, sia a individuare le cause che hanno prodotto il quadro fessurativo rilevato.

## *Curricula vitae:*

Katia Bernardeschi, nata a Pontedera (PI) nel 1970, si è laureata in ingegneria civile nel 2001 all'università di Pisa. È titolare di un assegno di ricerca presso il laboratorio di Meccanica dei Materiali e delle Strutture dell'ISTI-CNR di Pisa.

Francesco Paolo Cecati, nato a Lanciano (CH) nel 1952, si è laureato in ingegneria civile edile nel 1977 all'università dell'Aquila. È soprintendente per i Beni Architettonici e per il Paesaggio della Calabria e professore a contratto all'università di Pisa.

Cristina Padovani, nata a Livorno nel 1961, si è laureata in matematica nel 1985 all'università di Pisa. È dirigente di ricerca CNR, svolge la sua attività presso il laboratorio di Meccanica dei Materiali e delle Strutture dell'ISTI-CNR di Pisa.

Giuseppe Pasquinelli, nato a Volterra (PI) nel 1948, si è laureato in fisica nel 1974 all'università di Pisa. È primo ricercatore CNR, svolge la sua attività presso il laboratorio di Meccanica dei Materiali e delle Strutture dell'ISTI-CNR di Pisa.

# Analisi non lineari di pannelli murari con elementi finiti equilibrati

Enrico Papa, Alberto Taliercio, Adolfo Zavelani Rossi

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano*

*E-mail: enrico.papa@polimi.it, alberto.taliercio@polimi.it, zavelani@stru.polimi.it*

*Keywords:* muratura, elementi finiti equilibrati, attrito, coesione

Nell'analisi di orditi murari riveste particolare importanza la definizione delle componenti di sforzo all'interfaccia fra mattoni e malta. In queste zone è più importante avere una definizione di uno stato di sforzo rigorosamente equilibrato piuttosto che una descrizione rigorosamente congruente dello stato di deformazione: questo risultato può essere ottenuto modellando direttamente i campi di sforzo e sfruttando quindi il principio della minima energia complementare.

E' stato precedentemente sviluppato da Zavelani Rossi (2001) un approccio all'equilibrio basato sulla modellazione di sottocampi a sforzo lineare in elementi finiti quadrangolari. Lo stato di sforzo all'interno di ciascun sotto-elemento triangolare è rigorosamente controllato attraverso una verifica imposta ai vertici, tale da evidenziare possibili situazioni di crisi lungo le frontiere interne. Fratture lungo il contorno degli elementi vengono identificate attraverso la specifica conoscenza delle componenti di sforzo tangenziale e normale alla superficie di contatto.

Utilizzando questo modello sono state analizzate tre diverse tipologie di strutture murarie: un pannello pieno "a secco" soggetto a sforzo verticale costante e a carico orizzontale progressivamente crescente (Oliveira, 2002); un pannello con apertura rettangolare asimmetrica soggetto alle stesse condizioni di carico (Vermeltoort et al., 1993); dei prismi in muratura di pietra a tre paramenti soggetti a sforzo di compressione o di "taglio" (Pina-Henriques et al., 2004) Il quadro fessurativo numericamente previsto è generalmente in buon accordo con i risultati sperimentali; la stima della capacità portante è paragonabile a quella fornita da modelli a elementi finiti congruenti.

## *Riferimenti bibliografici*

Oliveira, D.V. 2002. *Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading*, PhD Thesis, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães (P).

Pina-Henriques, J., Lourenço, P.B., Binda, L. & Anzani, A. 2004. *Testing and modelling of multiple-leaf masonry walls under shear and compression*, Proc. 4th Int. Sem. on Structural Analysis of Historical Constructions, Balkema, Leiden (NL), 1, 299-310.

Vermeltoort, A.Th., Raijmakers, Th.M.J. & Janssen, H.J.M. 1993. *Shear tests on masonry walls*, Proc. 6th North American Masonry Conference, Philadelphia (USA), 1183-1193.

Zavelani Rossi, A. 2001. *An equilibrium approach to plane problems*, Comp.& Struct., 79, 1877-1895.

*Curricula vitae:* Enrico Papa è prof. associato di Scienza delle Costruzioni presso la Facoltà di Ing. Civile del Politecnico di Milano. Alberto Taliercio è prof. ordinario di Scienza delle Costruzioni presso il Polo Regionale di Lecco del Politecnico di Milano. Adolfo Zavelani Rossi è prof. ordinario di Scienza delle Costruzioni presso la Facoltà di Ing. Industriale del Politecnico di Milano.



# Modelli continui 1D di sistemi di blocchi in forma di archi e piattabande

Nicola L. Rizzi

*Dipartimento di Strutture, Università Roma Tre, Italia*

*E-mail: nlr@uniroma3.it*

Valerio Varano

*Dipartimento di Strutture, Università Roma Tre, Italia*

*E-mail: nlr@uniroma3.it*

*Parole chiave:* archi, piattabande, modelli monodimensionali

Si consideri un sistema costituito da blocchi collegati da giunti di spessore sottile, disposti in modo da costituire un 'arco' o una 'piattabanda' di altezza e larghezza costanti. I solidi 'arco' e 'piattabanda' abbiano un asse costituito da una curva regolare piana, e da un segmento di retta, rispettivamente.

I giunti siano disposti con regolarità in modo da determinare una variazione regolare della forma dei blocchi. In una prima fase di modellazione si assume che i blocchi siano corpi rigidi e i giunti interfacce elastiche. Successivamente si introduce un modello di trave monodimensionale con sezioni rigide per descrivere sommariamente il comportamento meccanico dei sistemi a blocchi.

Si considera innanzitutto una configurazione iniziale in cui l'asse della trave coincide con l'asse del solido 'arco' o 'piattabanda' e le sezioni sono disposte lungo questo seguendo l'assetto dei giunti. Nel caso dell'arco, le sezioni sono ortogonali alla linea d'asse mentre nel caso della piattabanda formano un angolo variabile con continuità. Il caso più generale è quello in cui l'asse è una linea curva e le sezioni non sono ad esso ortogonali.

Postulando una relazione di equivalenza in potenza tra i processi dinamici del modello discreto e quelli della trave, per atti di moto test corrispondenti, si esprimono le azioni di contatto della trave in funzione di quelle nel discreto ( vedi Masiani et al. 1995 ). Assegnata quindi una relazione costitutiva per le azioni di contatto del modello discreto, si ricava la relazione corrispondente per le azioni interne della trave. Tramite la relazione costitutiva il modello continuo, pur se sommario, si rivela capace di tenere in conto aspetti legati alla disomogeneità del materiale e alla geometria dei blocchi.

## *Riferimenti bibliografici :*

Di Carlo A., Rizzi N.L., Tatone A. 1990. Continuum modelling of a beam-like latticed truss: identification of the constitutive functions for the contact and inertial action, *Meccanica*, 25, pagg. 168-174

Masiani R., Rizzi N.L., Trovalusci P. 1995. *Masonry walls as structured continua*, *Meccanica*, 30, pagg. 673-683.

*Curriculum vitae:* Nicola Luigi Rizzi è professore di meccanica delle strutture presso la facoltà di Architettura e direttore del Dipartimento di Strutture dell'università Roma Tre.

Valerio Varano, laureato in Architettura nel 2003, dottorando di ricerca in Scienze dell'Ingegneria Civile dell'università Roma Tre.

# Debonding problems in beams strengthened with composite materials: an analytical and numerical study

Rodolfo Carpino, Fabrizio Greco, Paolo Lonetti

*Department of Structural Engineering, University of Calabria, Italy*

*E-mail: r.carpino@unical.it (R. Carpino), f.greco@unical.it (F. Greco), lonetti@unical.it (P. Lonetti)*

*Keywords:* FRP Strengthening; Stress singularities; Mixed mode interfacial fracture; Interface models

Recently, fiber-reinforced plastic (FRP) materials have been increasingly used in place of conventional materials, for various strengthening, upgrading or retrofitting applications of existing civil concrete or steel structures. A common of flexural strengthening technique consists of externally bonding a laminated composite plates to the tension face of a concrete or steel beam, by means of an adhesive layer. Bonding FRP plates to the external surface of structural members leads to several improvements of the structural performance (see for instance Ramana et al., 2000). On the other hand, experimental evidences have shown that the increase in stiffness and strength provided by the reinforcement is accompanied by a decrease of ductility leading often to debonding failure modes in the FRP strengthened system, characterized by a brittle and unstable nature, which may compromise the effectiveness of the reinforcement. For instance, the concrete/adhesive interface cracking, involving the initiation and propagation of an interfacial crack at the interface between the adhesive layer and the lower face of the beam, is promoted by a poor or defective application of the FRP plate and is of great interest since it can be often a cause of local failure and, sometimes, of a catastrophic structural collapse (Rabinovitch, 2004).

This paper presents an analysis of debonding failure by interfacial cracking at the edge of reinforced beams strengthened with externally bonded composite plates. The beam and the strengthening system are modelled by means of a multilayer plate theory in which compatibility between plate elements is enforced by means of Lagrangian multipliers (Bruno et al., 2005). The accuracy of the present model is assessed by means of comparisons with highly accurate FE solutions. Contrary to the FE investigations based on 2D continuum elements, the proposed approach involves reduced computational cost due to lower degrees of freedom required by plate variables. Moreover, the use of plate theory leads to avoid the non-convergence energy release rates (ERRs) behavior due to the oscillatory singularities predicted by the classical elasticity theory for bimaterial interface cracks.

## *References:*

- Rabinovitch, O. 2004. *Fracture-mechanics failure criteria for RC beams strengthened with FRP strips-a simplified approach*, Composite Structures, 64: 479-492.
- Ramana V.P.V., Kant T., Morton S.E., Dutta P.K., Mukherjee A., Desai Y.M., 2000. *Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening*, Composites Part B, 31: 461-470.
- Bruno D., Greco F., Lonetti P. 2005. *A Delamination Modelling Technique Based On Plate And Interface Theories For 3D Laminated Structures*, European Journal of Mechanics A/Solids, 24: 127-149.

# Delamination in FRP-strengthened structures: acoustic emission monitoring and numerical modeling

Giuseppe Lacidogna

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy  
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino  
E-mail: giuseppe.lacidogna@polito.it*

Marco Paggi

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy  
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino  
E-mail: marco.paggi@polito.it*

Alberto Carpinteri

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy  
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino  
E-mail: alberto.carpinteri@polito.it*

**Keywords:** FRP retrofitting; Delamination; Creep; Acoustic Emission; Finite Elements; Seismicity.

A case study concerning both numerical modeling and in-situ monitoring of a retrofitted RC beam with non-rectangular cross-section is presented. Before retrofitting, non-destructive techniques, such as pull-out and impact tests, were used to estimate the mechanical parameters of concrete. At the same time, a long-term monitoring with the Acoustic Emission (AE) technique was carried out in order to investigate on creep effects and microcracking phenomena. Then, after a complete removal of the overload and retrofitting with FRP sheets, an in-situ loading test was performed. At that stage, the AE technique was again profitably used for the analysis of the cracking progression leading to FRP debonding. A numerical model of the structure is then proposed in the framework of the FE discretization with mechanical parameters estimated according to an inverse analysis on the monitored mechanical behavior of the structure before retrofitting. According to this model, it is clearly demonstrated that, when the flexural inertia of the retrofitted beam is considerably higher than that of the unrepaired beam, snap-back instabilities can take place. Finally, considering the self-similarity between the acoustic emission phenomenon and seismicity, an analogy between the snap-back instability of the FRP delamination and that occurring during fault growth is proposed.

*Curriculum vitae:* Giuseppe Lacidogna is Assistant Professor of Structural Mechanics, Marco Paggi is Post-Doctoral Research Fellow and Alberto Carpinteri is the Chair of Structural Mechanics at the Politecnico di Torino.

# Influenza della deformabilità tagliante sulla statica di profili compositi pultrusi

Luciano Feo, Geminiano Mancusi

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno, 84084 Fisciano (SA)*

E-mail: l.feo@unisa.it; g.mancusi@unisa.it

Francesco Ascione

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Roma Tor Vergata, 00123 Roma*

E-mail: ascione@ing.uniroma2.it

*Keywords:* FRP, pultrusi, sezioni sottili aperte, deformabilità tagliante.

Nel presente lavoro è stata svolta un'indagine numerica agli elementi finiti sul comportamento statico a breve termine di elementi pultrusi in parete sottile aperta [Bauld & Tzeng, Chandra & al., Vasiliev, Vlasov] nella quale sono stati presi in considerazione diversi schemi strutturali e prodotti a diffusione commerciale. Le simulazioni effettuate sono basate sul modello meccanico monodimensionale presentato in [Ascione & al., Feo & Mancusi]. Si tratta di un modello concepito specificamente per analizzare gli effetti della deformabilità tagliante sul comportamento di travi sottili con sezione aperta. I risultati numerici conseguiti dagli autori sono stati confrontati sia con quelli dei classici modelli di Timoshenko e di Vlasov, sia con quelli ottenuti da analisi agli elementi finiti in elasticità bidimensionale.

Le elaborazioni svolte hanno messo in evidenza l'accuratezza sia del modello meccanico che del modello numerico proposto dagli autori nello studio del comportamento statico di profili compositi pultrusi.

## *Riferimenti bibliografici:*

- Ascione, L., Feo, L. & Mancusi, G. 2000. *On the statical behaviour of FRP thin-walled beams*, Composites Part B 31 (8), 643–654.
- Bauld, N.R. Jr. & Tzeng, L. 1984. *A Vlasov theory for fiber-reinforced beams with thin-walled open cross sections*, Int. J. Solid Structures 20 (3), 277–297.
- Chandra, R., Stemple, A.D. & Chopra, I. 1990. *Thin-walled composite beams under bending, torsional and extensional loads*, J. Aircraft 27 (7).
- Feo, L. & Mancusi, G. 2005. *Modeling shear deformability of thin-walled composite beams with open cross-section*, SIMPRA, Elsevier Ed. (in press).
- Vasilev, V.V. 1993. *Mechanics of composites structures*. Robert Jones Editor, Taylor&Francis, Washington, D.C.
- Vlasov, V.Z. 1961. *Thin-Walled Elastic Beams*, Pergamon Press, New York.

## *Curricula:*

Luciano Feo, Ph.D., professore associato di Scienza delle Costruzioni e Geminiano Mancusi, Ph.D., professore a contratto di Scienza delle Costruzioni III, svolgono presso l'Università di Salerno attività di ricerca sia teorica che sperimentale nel campo della meccanica delle strutture, in particolare nel settore degli FRP: modellazione meccanica, esperimenti su delaminazione, viscosità, etc. Francesco Ascione è Ph.D. *student* presso l'Università di Roma Tor Vergata.

# Modelli agli elementi finiti per travi di parete sottile deformabili a taglio e torsione.

Fabio Minghini

*Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, Italia*

*E-mail: fminghini@ing.unife.it*

Ferdinando Laudiero

*Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, Italia*

*E-mail: flaudiero@ing.unife.it*

Nerio Tullini

*Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, Italia*

*E-mail: ntullini@ing.unife.it*

*Parole chiave:* travi, parete sottile, deformabilità, taglio

**SOMMARIO:** Con l'intento di proporre modelli numerici facilmente implementabili in codici di calcolo per lo studio di sistemi di travi di profilo sottile, gli Autori hanno scelto come riferimento la cinematica più semplice che permetta di cogliere l'influenza degli scorrimenti, quella che unisce la teoria di Timoshenko per la trave soggetta a flessione e taglio con quella di Reissner [1952] che adotta, per la torsione, un'unica funzione di ingobbamento.

Le funzioni di forma impiegate per l'interpolazione di spostamenti trasversali e rotazioni flessionali sono costituite da polinomi hermitiani "modificati" mediante un parametro che traduce l'effetto degli scorrimenti e che tende a zero al crescere della lunghezza della trave, generando un modello costitutivamente esente da fenomeni di *locking* (Kosmatka [1995]). Per descrivere la rotazione torsionale e l'ingobbamento, si è adottata una approssimazione polinomiale, ponendo a confronto alcune formulazioni lagrangiane, consistenti e non, con una formulazione hermitiana analoga a quella adottata per il caso di flessione e taglio (Kim et al [1994]). Quest'ultima, insieme a due delle formulazioni lagrangiane provate, si è rivelata accurata e pertanto adatta ad essere implementata in un codice di calcolo dedicato all'analisi di strutture reticolari in profili fortemente sensibili all'influenza degli scorrimenti quali sono tipicamente quelli in materiale composito.

*Riferimenti bibliografici:*

Kim, M.Y., et al. 1994. *Spatial stability and free vibration of shear flexible thin-walled elastic beams. II: numerical approach.* Int. J. Numer. Meth. Engng. 37 4117-4140.

Kosmatka, J.B. 1995. *An improved two-node finite element for stability and natural frequencies of axial-loaded Timoshenko beams.* Comp. Struct., 57 141-149.

Reissner, E. 1952. *On non-uniform torsion of cylindrical rods.* J. Math. Phys. 31 214-221.

*Curricula vitae:* Fabio Minghini è dottorando in Scienze dell'Ingegneria presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara, Ferdinando Laudiero docente di Tecnica delle Costruzioni presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Ferrara, Nerio Tullini docente di Tecnica delle Costruzioni presso la Facoltà di Ingegneria della stessa Università.

# Indagine sperimentale sul comportamento viscoso di laminati pultrusi in fibra di carbonio

Francesco Ascione<sup>1</sup>, Valentino Paolo Berardi<sup>2</sup>, Luciano Feo<sup>2</sup>, Antonella Giordano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", Italia*

<sup>2</sup>*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno, Italia*

*E-mail: ascione@ing.uniroma2.it, berardi@unisa.it, l.feo@unisa.it, angiordano@unisa.it*

*Parole chiave:* rinforzo strutturale, FRP, creep, durabilità

Il presente lavoro sintetizza i primi risultati di una campagna sperimentale incentrata sull'analisi del comportamento reologico di lamine di CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) di comune impiego nell'Ingegneria Civile.

L'interesse per tale comportamento nasce dall'esigenza di valutare la durabilità e l'affidabilità dei suddetti materiali innovativi nell'ambito delle applicazioni civili.

Nel caso del placcaggio strutturale, le proprietà viscoso del composito possono infatti innescare migrazioni tensionali verso la membratura rinforzata. Il conseguente incremento tensionale a carico di quest'ultima può pregiudicare in alcune situazioni l'efficacia dell'intervento di riabilitazione strutturale (Ascione et al. [2003], Berardi et al. [2003], Ascione et al. [2004]).

Il sistema di prova descritto nel presente lavoro ha consentito l'esecuzione di *creep test* a temperatura costante su più campioni di laminati pultrusi fibrorinforzati.

I provini testati nella sperimentazione sono stati confezionati a partire da una laminato pultruso ad alto modulo di elasticità con fibre di carbonio (CFRP), specifico per impieghi di riabilitazione strutturale.

Le deformazioni estensionali registrate hanno evidenziato la natura viscosa dei compositi fibrorinforzati analizzati.

## *Riferimenti bibliografici*

Ascione L., Berardi V.P., Feo L., Giordano A. (2004), *Il fenomeno del creep nel placcaggio strutturale con FRP: progettazione di un dispositivo sperimentale*, XXXIII Convegno AIAS, Salerno, CD-ROM Proceeding.

Ascione L., Berardi V.P. (2003), *Gli effetti reologici nel placcaggio strutturale di elementi in c.a. con laminati fibrorinforzati*, XVI Congresso AIMETA, CD-ROM Proceeding.

Berardi V. P., Giordano A., Mancusi G. (2003), *Modelli costitutivi per lo studio della viscosità nel placcaggio strutturale con FRP*, XXXII Convegno AIAS, Salerno, CD-ROM Proceeding.

## *Curricula:*

*Francesco Ascione*, dottorando di ricerca in Ingegneria delle Strutture e Geotecnica, *Valentino Paolo Berardi*, ricercatore di Scienza delle Costruzioni, *Luciano Feo*, professore associato di Scienza delle Costruzioni, *Antonella Giordano*, dottore di ricerca in Ingegneria Strutturale, svolgono attività di ricerca sia teorica che sperimentale nel campo della meccanica delle strutture, in particolare nel settore degli FRP (modellazione meccanica a breve e a lungo termine, analisi FEM, indagini sperimentali).

# Investigation on journal bearings in atypical working conditions

Roberto Bassani, Enrico Ciulli

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione, University of Pisa, Italy*

*E-mail: r.bassani@ing.unipi.it, ciulli@ing.unipi.it*

Bruno Piccigallo

*Gruppo Costruzioni e Tecnologia, Accademia Navale, Livorno, Italy*

*E-mail: b.piccigallo@ing.unipi.it*

*Keywords:* plain journal bearings, test rig, misalignment, windmilling, oil flow interruption.

A large amount of theoretical and experimental activity has been carried in the ambit of the co-operation between Avio and DIMNP (university of Pisa). In particular, concerning plain hydrodynamic bearings in very heavy working conditions, a design tool has been developed which proved to be very useful. As for the experimental activity, a test rig has been designed and built, which is capable to test a particular class of plain bearings (fixed pin and rotating bush), even in extreme working conditions for what concerns load and speed. Besides a large number of test devoted to the ordinary working conditions, other trials have been conducted on these bearings in order to simulate certain atypical working conditions, likely to occur following accidents or plant failure. In particular, this paper deals with misalignment due to non centred loading, engine windmilling and sudden flow interruption.

Misalignment was forced by applying different loads to the ends of the pin. The test confirmed that the maximum load capacity of the bearing is substantially reduced by misalignment: however a proper design can make the bearing able to sustain satisfactorily very high loads even in this quite dangerous condition.

Windmilling was simulated cutting off the oil supply after a few minutes; to obtain the required light load, a mass of 8 kg was suspended from the pin and, in certain cases, gradually increased up to 30 kg. No definitive conclusion could be drawn from these tests, however it seems possible to affirm that the materials employed are likely to survive long enough this particular working condition. The main problems encountered were connected with pin misalignment (the pin, from which the load was hanging, was actually floating in the rotating bush; a simple device at one end prevented its rotation), which should not occur in actual applications.

Oil flow interruption occurred while the bearing was running in one of the heaviest working conditions and, of course, the short time needed to halt the rig was enough to cause a very severe damage of the bearing surfaces. It is however interesting to note that the torque began to rise only 7 seconds after the beginning of the failure and for 3 seconds there was practically no lubricant supply.

*Roberto Bassani:* full Professor of Applied Mechanics at the University of Pisa, Italy. Main research activities: Tribology (Lubrication, Friction and Wear).

*Enrico Ciulli:* Professor of Applied Mechanics at the University of Pisa, Italy. Main research activities: Tribology (Lubrication and Friction in particular).

*Bruno Piccigallo:* Professor of Applied Mechanics at the Italian Naval Academy. Main research activities: Tribology (Lubrication, Friction and Wear).

# Lubricated non-conformal contacts under steady-state and transient conditions

Roberto Bassani, Enrico Ciulli, Kenred Stadler, Matteo Carli

*Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione*

*E-mail: bassani@ing.unipi.it, ciulli@ing.unipi.it, kenredstadler@gmx.de, matteo.carli@ing.unipi.it*

*Keywords:* Elastohydrodynamic lubrication, transient conditions, optical interferometry, film thickness

Lubricated contacts often work with variable speed and load in real applications. Steady-state results have been sometimes used to predict transient conditions, but this leads often to wrong results.

In this work, the results obtained with an investigation on a non-conformal lubricated contact between a ball and a plane surface of a disc are presented. Film thickness is measured using optical interferometry with white light. Some recent improvements of the experimental rig used, as the availability of a new encoder and in particular of a new high-speed camera, allow the measurement of the film thickness also under transient working conditions.

Both constant and variable speeds with two different frequencies are used. The results under steady-state conditions are in good agreement with the numerical ones. Loops of both central and minimum film thickness have been found that can explain the friction loops obtained in previous works: with increasing speed, values of the friction coefficient higher than the ones in stationary conditions are related to lower values of the film thickness, while with decreasing speed, lower friction values correspond to higher film thickness. Both friction and film thickness loops present greater amplitude with increasing the frequency of the speed variation.

## *References:*

Bassani, R. & Ciulli, E. 1997. *Lubricant film thickness and shape using interferometry and image processing*, in *Elastohydrodynamics - '96: fundamentals and applications in lubrication and traction*, Elsevier, Amsterdam, 81-90.

Bassani, R. & Ciulli, E. 2004. *Friction investigation under constant and variable speed conditions*, in *Transient Processes in Tribology*, Elsevier, Amsterdam, 783-794.

Ciulli, E. 2004. *Time and frequency domain analysis of experimental EHL transient conditions data*, Proceedings of the 11th Nordic Symposium on Tribology, Nordtrib 2004, Tromsø-Harstad-Hurtigruten, Norway, June 2004, 575-584.

*Roberto Bassani:* full Professor of Applied Mechanics at the University of Pisa, Italy. Main research activities: Tribology (Lubrication, Friction and Wear).

*Enrico Ciulli:* Professor of Applied Mechanics at the University of Pisa, Italy. Main research activities: Tribology (Lubrication and Friction in particular).

*Kenred Stadler:* PhD Student in Mechanical Engineering at the University of Pisa. Master of Science in USA and Dipl.-Ing at the University of Magdeburg (Germany).

*Matteo Carli:* PhD Student in Mechanical Engineering at the University of Pisa. Laurea Specialistica in Mechanical Engineering at the University of Pisa.



# Dinamica di meccanismi a camma veloci azionati da motori in corrente continua

Giovanni Incerti, Monica Tiboni

*Dip. di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Brescia, Italia*

*E-mail: giovanni.incerti@ing.unibs.it, monica.tiboni@ing.unibs.it*

Marco Ceccarelli, Giuseppe Carbone

*E-mail: ceccarelli@unicas.it, carbone@unicas.it*

*Dip. di Meccanica, Strutture, Ambiente e Territorio, Università degli Studi di Cassino, Italia*

*Keywords:* camme, modello, simulazione, banco prova

Come è noto, i meccanismi a camma azionati da attuatori elettrici trovano larga applicazione in numerosi settori del mondo industriale. Spesso tali meccanismi sono destinati ad applicazioni molto particolari, per le quali si richiedono velocità operative elevate; in questi casi la progettazione deve essere condotta con particolare attenzione, in modo tale da evitare la presenza di sovrassollecitazioni, urti e l'insorgere di fenomeni vibratorii. È infatti noto come il funzionamento delle camme veloci sia spesso accompagnato da vibrazioni che inducono nel cedente accelerazioni più elevate di quelle previste in sede teorica.

Nel lavoro vengono proposti alcuni modelli matematici che consentono di analizzare la dinamica di meccanismi a camma azionati da motori in corrente continua; oltre ai tradizionali aspetti cinematici e dinamici, si considerano anche i fenomeni legati alla parte elettrica del motore ed al suo sistema di controllo. La modellazione matematica, effettuata mediante schemi a parametri concentrati, ha come obiettivo quello di fornire uno strumento di calcolo in grado di simulare in modo attendibile la dinamica di dispositivi a camma reali, permettendo di valutare gli effetti legati ai parametri del sistema.

La validazione dei modelli sopra citati richiede un'attività a carattere sperimentale; per questo motivo, nella parte conclusiva del lavoro, si propone l'utilizzo di un banco prova strumentato sul quale effettuare test di laboratorio.

## *Riferimenti bibliografici:*

Chen F.Y., 1982, *Mechanics and Design of Cam Mechanisms*, Pergamon Press, New York.

Norton R.L., 2001, *Cam Design and Manufacturing Handbook*, Industrial Press, New York.

Lanni C., Ceccarelli M., Figliolini G., 2001, *An algebraic formulation and experimental analysis of two circular-arc cams*, Transactions of the CSME, Vol. 25, No. 1, pp. 29-49.

Incerti G., Faglia R., 1998, *Optimal design of cam mechanisms for compliant systems*, IV Int. Conf. on Motion and Vibration Control, vol. 1, pp. 273-278, Zurich, Switzerland.

Demeulenaere B., De Schutter J., 2002, *Accurate realization of follower motions in high-speed cam-follower mechanisms*, Int. Conf. on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.

Yan H.S., Tsai M.C., Hsu M.H., 1996, *An experimental study of the effects of cam speeds on cam-follower systems*, Mechanism and Machine Theory, vol. 31, No. 4, pp. 397-412.

# Progetto di un banco prova per lo studio della lubrificazione elastoidrodinamica di profili a contatto

Hermes Giberti

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: hermes.giberti@polimi.it*

Paolo Righettini

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: paolo.righettini@polimi.it*

Steven Chatterton

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: chatterton@mech.polimi.it*

*Keywords:* Lubrificazione, camme, test sperimentali.

In questo articolo viene presentato il progetto di una apparecchiatura che si prefigge il compito di valutare l'instaurarsi di uno stato di lubrificazione fra due profili non conformi a contatto con riferimento alla tipologia camme piane. In particolare viene descritto il layout generale dell'apparecchiatura, vengono illustrate le soluzioni costruttive adottate e la sensoristica impiegata per le rilevazioni sperimentali. L'idea che sta alla base di questo progetto è quella di mettere a punto una macchina di prova per valutare l'influenza che ha sulla vita della camma l'instaurarsi o meno di un regime di lubrificazione, in modo da trarre indicazioni sul tipo di lubrificante e sulla metodologia di lubrificazione da adottare per il tipo d'accoppiamento in studio. Il banco è in grado di ricreare condizioni di funzionamento tipiche delle applicazioni industriali sia per quanto riguarda le forze scambiate fra i profili sia per il tipo di profili che si possono adottare.

## *Riferimenti bibliografici*

Lee SC., Cheng HS. (1991), *Scuffing theory modeling and experimental correlation.*, Journal of Tribology, 113:327-334.

Nelias D.(1997), *Etude experimentale et theorique du microgrippage dans les contacts elasto-hydrodynamiques*, Rev Gen Therm, 36, pagg. 26-39.

Kelly D., Markov D. (2001), *Electromonitoring of lubricated tribocouples with use of varied voltage*, 2nd World TRIBOLOGY Congress, 03-07, September 2001, Vienna, AUSTRIA.

## *Curriculum vitae:*

*Hermes Giberti*, Ingegnere Meccanico, Dottore di Ricerca in Meccanica Applicata, Ricercatore del SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo dell'automazione industriale e dei sistemi di controllo.

*Paolo Righettini*, Ingegnere Meccanico, Prof. Associato del SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo della robotica, macchine a cinematica parallela e mecatronica.

*Steven Chatterton*, Ingegnere Meccanico, Ricercatore SSD Mec. App. alle Macchine (ING-IND/13). Interessi nel campo della robotica e nel progetto di macchine automatiche.

# Diagnostica di meccanismi a camma mediante l'impiego di reti neurali artificiali

Monica Tiboni, Giovanni Incerti

*Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Brescia, Italia*

*E-mail: monica.tiboni@ing.unibs.it, giovanni.incerti@ing.unibs.it*

*Keywords:* vibrazioni, diagnostica, reti neurali artificiali, higher order spectra

In ambito industriale è sempre più diffusa l'esigenza di sviluppare ed implementare strumenti e metodologie che consentano di monitorare il corretto funzionamento dei macchinari, in un'ottica di diagnostica di tipo protoattivo [Fitch]. La diagnostica applicata in ambito meccanico si pone come obiettivo la prevenzione di possibili disservizi di apparecchiature attraverso il monitoraggio dei "sintomi" su di esse rilevati. La natura delle grandezze rilevate e mantenute 'sotto osservazione' dipende dalla tipologia di macchina o sistema meccanico da monitorare. In numerosi impianti con macchine automatiche le grandezze di maggiore interesse sono le vibrazioni rilevate in differenti punti delle macchine, che possono essere sia parti fisse che mobili del macchinario. La fase di interpretazione delle rilevazioni è comunemente affidata a personale esperto, che ha acquisito esperienza sul macchinario. Le recenti tecniche di analisi dei segnali, combinate con opportuni strumenti di classificazione consentono di rendere automatica la funzione di interpretazione dei segnali rilevati, ottenendo dei sistemi esperti che consentono di individuare lo stato del sistema ed eventualmente anche fornire suggerimenti per opportuni interventi sulla macchina (diagnostica protoattiva).

Il lavoro presenta i risultati di uno studio relativo alla sperimentazione di una metodologia automatica di diagnostica del funzionamento di un sistema meccanico. La metodologia prevede l'impiego di reti neurali artificiali quali strumenti di classificazione, mentre la fase di elaborazione del segnale è stata implementata con differenti tecniche allo scopo di confrontarne le potenzialità (indicatori statistici classici, FFT, wavelet, higher order spectra). Il sistema meccanico considerato è un sistema per la generazione di moto intermittente unidirezionale. Tale sistema è stato fatto funzionare in differenti condizioni operative (carichi e velocità differenti, con lubrificanti con diversa viscosità) e si è indagata la capacità della tecnica di diagnostica implementata di riconoscere le differenti condizioni operative del sistema.

## *Riferimenti Bibliografici:*

Fitch E.C. (1992), Proactive maintenance for mechanical system, Elsevier Science Publisher Ltd, England.

Meirovitch L. (1986), Elements of vibration analysis, Mc Graw-Hill, USA.

Diana G., Cheli F. (1993), Dinamica e vibrazioni dei sistemi meccanici, UTET Libreria, Italia.

Magnani P.L., Ruggeri G. (1986), Meccanismi per macchine automatiche, Casa Editrice UTET, Città Torino.

Rivola, P.R. White (1999), Use of higher order spectral analysis in condition monitoring: simulation and experiments, Proceed. of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conference.

# Synthesis of unconventional cam-follower mechanisms

Roberto Strada, Vittorio Lorenzi, Riccardo Riva, Bruno Zappa  
*Department of Design and Technologies, University of Bergamo, Italy*  
*E-mail: strada@unibg.it | vlorenzi@unibg.it | mech@unibg.it | zappa@unibg.it*

*Keywords:* cam synthesis, pressure angle, lifting platform.

The synthesis of a cam-follower mechanism usually originates with the law of motion required to the follower. Even when the input member is the follower instead of the cam, the synthesis of a cam profile realizing a proper relationship between the input and the output movements remains a typical target.

However, in special applications, a cam mechanism can be used as a force amplifier rather than as a motion transformer. In this paper, the cam profiling based on a given force-displacement relationship between the input and the output members is done by an unconventional method.

## *References:*

- Ananthasuresh, G.K. 2001. *Design of fully rotatable, roller-crank-driven, cam mechanisms for arbitrary motion specifications*, Mechanism and Machine Theory, v. 36, n. 4, pp. 445–467.
- Angeles, J., et al. 2002. *Cam Synthesis*, Kluwer Academic Publishers.
- Erdman, A.G., et al. 2001. *Mechanism Design: Analysis and Synthesis*, Prentice Hall, 4th edition.
- Norton, R.L. & Lyden, T.J. 2001 *Cam Design and Manufacturing Handbook*, Industrial Press Inc.
- Rothbart, H.A. 2003. *Cam Design Handbook: Dynamics and Accuracy*, McGraw-Hill Professional, 2nd edition.
- Cavagna, C. & Magnani, P.L. 1981. *Metodo Generale per lo Studio e il Tracciamento Automatico di Profili di Camme*, Progettare, Anno III, n. 14-15.

## *Curricula vitae:*

**Roberto Strada:** Assistant Professor of Applied Mechanics at the Engineering Faculty of Bergamo University. Ph.D. degree received from the Politecnico di Milano in 2001. His research activities concern mainly electro-hydraulic servo-systems, electro-mechanical driving systems and mechatronics.

**Vittorio Lorenzi:** Associate Professor of Applied Mechanics at the Engineering Faculty of Bergamo University. His research interests include mainly biomechanics and multibody systems dynamics.

**Riccardo Riva:** Full Professor of Applied Mechanics at the Engineering Faculty of Bergamo University. Graduated in Mechanical Engineering at the Politecnico di Milano in 1971. Long teaching experience in Politecnico di Milano, Brescia University, Bergamo University. Topics of teaching and research: mechanisms, vibrations, CAE/CAI, automation.

**Bruno Zappa:** Associate Professor of Applied Mechanics at the Engineering Faculty of Bergamo University. His research interests include robotics, mechatronics, kinematics and dynamics of multibody systems.

# Analisi delle prestazioni di sistemi di trasmissione a camme con dispositivi di richiamo pneumatici

Stefano Pastorelli, Andrea Almondo, Massimo Sorli

*Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Torino, Italia*

*E\_mail: stefano.pastorelli@polito.it, andrea.almondo@polito.it, massimo.sorli@polito.it*

*Parole chiave:* camme, molle pneumatiche, servosistemi a fluido, dinamica di sistemi meccanici.

I meccanismi di trasmissione a camme trovano impiego in quelle applicazioni ove devono essere garantite elevate precisioni di posizionamento e sincronizzazione del moto. Aspetto fondamentale nel loro studio è il dimensionamento della rigidità e del precarico dei dispositivi di richiamo elastico necessari per garantire il costante mantenimento del contatto tra camma e cedente. Infatti, un inadeguato valore del precarico comporta un distacco tra camma e punteria. D'altro canto una forza di richiamo troppo elevata comporta un incremento della forza di contatto, con un aumento dell'usura delle superfici e una diminuzione dell'efficienza del sistema.

Nell'articolo è presentata una metodologia di analisi delle prestazioni dinamiche di sistemi di trasmissione a camma basata su modelli nel dominio del tempo e della frequenza, con particolare attenzione all'influenza delle caratteristiche dell'elemento di richiamo elastico sul valore della forza di contatto tra camma e cedente. Analizzando un tipico sistema di trasmissione a camma adottato nella distribuzione di un motore autoveicolistico, si rilevano i limiti di impiego della soluzione con molla meccanica, imposti dalla presenza di risonanze interne che possono essere eccitate ad elevate velocità di rotazione della camma, in funzione del contenuto armonico del profilo di alzata. Esse possono indurre ampie oscillazioni della forza di contatto, causa di riduzione di efficienza della trasmissione o, al limite, di perdita di contatto tra camma e cedente.

Viene studiato, in alternativa alla molla meccanica, l'impiego di un dispositivo di richiamo elastico costituito da una molla pneumatica con circuito di regolazione della pressione. Tale soluzione sta riscontrando crescente interesse in applicazioni con elevate velocità di rotazione della camma, quali ad esempio quelle dei sistemi di distribuzione di motori motociclistici e automobilistici da competizione. I vantaggi di tale sistema sono la possibilità di controllare il valore istantaneo della forza di contatto e la sostanziale assenza di fenomeni di risonanza interna.

## *Riferimenti*

Pisano, A.P., Freudenstein, F., (1983), *An Experimental and Analytical Investigation of the Dynamic Response of a High-Speed Cam-Follower System*, Parts 1 and 2, *J. of Mechanism, Transmission and Automation in Design*, vol. 105, Dec. 1983, pp. 692-704.

Tümer S.T, Ünlüsoy, Y.S., (1991), *Nondimensional Analysis of Jump Phenomenon in Force-closed Cam Mechanism*, *Mech. Mach. Theory*, vol. 26, No. 4, pp. 421-432.

Ünlüsoy, Y.S., Tümer S.T, (1993), *Analytical Dynamic Response of Elastic Cam-Follower System with Distributed Parameter Return Spring*, *J. of Mechanical Design*, vol.115, Sept. 1993, pp. 612-620.

Pastorelli S., Almondo A., Sorli M., *Performances of cam-follower systems with pneumatic return spring*, Bath Workshop on Power Transmission & Motion Control - PTMC 2005, Bath, UK, Sept. 2005.

Almondo A., Franco W., Sorli M., *Modal Approximation Time-Domain Models for Pneumatic Transmission Lines*, 9th Scandinavian International Conference on Fluid Power - SICFP'05, Linköping, Sweden, June 2005.

# Boundary integral fracture analysis and hypersingular evaluation

Alberto Salvadori

*Department of Civil Engineering, University of Brescia, 25123 Brescia*

*E-mail: alberto.salvadori@ing.unibs.it*

Ahn-Vu Phan

*Mechanical Engineering Dept., University of South Alabama, Mobile, AL 36688 USA*

Leonard Gray

*Oak Ridge National Laboratory, OakRidge, TN 37831 USA*

*Keywords:* fracture mechanics, integral equations, stress intensity factors

The key quantities of interest in computational fracture analysis are the stress intensity factors (SIFs), as these determine crack propagation. A significant advance in this area was the development of the quadratic quarter point (QP) crack tip element - Henshell and Shaw [1975], Barsoum [1976]. With this element, the square root singularity of the crack opening displacement at the tip could be easily incorporated in the numerical interpolation. Nevertheless, this method did not always result in highly accurate SIFs.

In the present work, two dimensional analysis proposed in Gray et al. [2003] has been extended to three dimensions. The fracture computations have been carried out by solving boundary integral equations, and in particular, the hypersingular integral equation for surface traction. Part of this work has therefore involved the development of algorithms for evaluating hypersingular surface integrals Gray et al. [2005]. Boundary limit evaluation methods initially developed for the Galerkin formulation using linear elements have been successfully extended to higher order interpolation. These algorithms are based upon analytic integration, and directly evaluate the hypersingular integrals without reformulating or regularizing the traction equation

## *References:*

- Henshell, R.D., Shaw, K.G. 1975. *Crack tip finite elements are unnecessary*, Int. J. Numer. Meth. Engrg., **9**, 495-507
- Barsoum R. S. 1976. *On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics*, Int. J. Numer. Meth. Engrg., **10**, 25-37.
- Gray, L.J., Phan, A.-V., Paulino, G.H., and Kaplan, T. 2003. *Improved quarter-point crack tip element*, Engineering Fracture Mechanics, **70**, 269-283.
- Gray, L.J., Paulino, G.H. 1998. *Crack tip interpolation revisited*, SIAM J. Applied Mathematics, **58**, 428-455.
- Gray, L.J., Salvadori, A., Phan, A.-V., and Mantic, V. 2005. *Direct evaluation of Hypersingular Galerkin surface integrals II*, submitted

# La modellazione della prova di pullout. Carico limite e propagazione della frattura

Antonio Gesualdo, Federico Guarracino, Luciano Nunziante  
*Dipartimento di Scienza delle Costruzioni, Università degli Studi di Napoli FEDERICO II, Napoli*  
*E-mails: {gesualdo, guarrac, nunschi}@unina.it*

*Keywords:* Plasticità, frattura, FEM

**SOMMARIO:** La prova di pullout per il conglomerato cementizio costituisce un importante strumento di analisi meccanica: resistenza, duttilità, propagazione della frattura, danneggiamento, sono tutti elementi leggibili dalla prova di pullout. L'importanza di indagare il calcestruzzo anche nelle sue parti interne e non solo corticali fa di questo test uno dei più importanti metodi di indagine conoscitive del calcestruzzo.

In questa memoria gli autori si soffermano su due fondamentali aspetti della prova di pullout riguardanti la stima del carico di estrazione e la propagazione della frattura.

La valutazione del carico di collasso viene effettuata con un modellatore FEM ipotizzando il comportamento del materiale con il criterio di crisi di Leon modificato ed effettuando uno studio di sensibilità sui parametri di comportamento plastico associato e non associato del materiale. Si costruiscono poi delle relazioni che forniscono in maniera diretta la caratteristica di resistenza del calcestruzzo noto il carico di estrazione del pullout.

In parallelo all'analisi del collasso con il metodo degli elementi finiti viene svolta un'analisi limite con i teoremi della plasticità ed in particolare il teorema cinematico considerando differenti forme di superfici di crisi. In plasticità non associata si utilizzano i due teoremi di Radenkovic per fornire una limitazione inferiore e superiore del carico di collasso.

Si osserva che la superficie di collasso è approssimativamente parabolica per gli ancoranti superficiali, mentre per quelli più profondi diventa una spirale logaritmica mentre per quelli più profondi tende alla configurazione cilindrica.

L'analisi della propagazione della frattura nella prova di pullout evidenzia che il calcestruzzo mostra due comportamenti primari: un comportamento fragile in cui si ha la coalescenza delle microfessure in macrofessure ed uno duttile che rappresenta lo sviluppo, la crescita delle macrofessure nel mezzo conducendo ad una macroscopica localizzazione della fessura e poi al collasso del provino. Lo studio della meccanica della frattura è costruito in modo quasi statico con il metodo del J-integral che caratterizza il rilascio dell'energia nella crescita delle fessure. Il criterio adottato per la propagazione della fessura è quello della massima energia rilasciata.

## *Bibliografia*

Franciosi, V., Nunziante L. 1979. *Discussione sull'articolo "Indagine teorico-sperimentale sulla determinazione della resistenza del calcestruzzo mediante prova di estrazione"*, L'Industria Italiana del Cemento, 7-8, 477-482, 1979.

Josselin de Jong, G. 1964. *Lower bound collapse theorem and lack of normality of strain rate to yield surface of soils*, Proc. IUTAM Symp. Rheology and soil mechanics, Grenoble.

Radenkovic, D. 1961. *Théorèmes limites pour un matériau de Coulomb à dilatation non standardisée*, Compt. Rendus Ac. Sci. Paris, 252, 4103-4104.

# Numerical analysis of cohesive crack propagation in functionally graded materials

Claudia Comi <sup>1</sup>, Stefano Mariani <sup>2</sup>

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: <sup>1</sup> claudia.comi@polimi.it, <sup>2</sup> stefano.mariani@polimi.it*

*Keywords:* functionally graded materials, extended finite elements, cohesive crack, fracture mechanics.

This work addresses some computational issues concerning failure analysis of functionally graded materials (FGMs). Focus is in particular on quasi-brittle FGMs, endowed with assigned spatially varying elastic and fracture properties. As proposed by Zhang and Paulino (2005), a cohesive approach is used to simulate crack propagation and no dissipation is attributed to the bulk material. The traction-displacement discontinuity model is employed within the context of the extended finite element method, Mariani and Perego (2003). The method allows to follow crack paths independently of the finite element mesh; this feature is especially important for FGMs, since gradation of the mechanical properties may lead to complex propagation paths also in simple symmetric tests (Rousseau and Tippur, 2000). Proper implementation of the method is developed to account for continuous grading in elastic and cohesive fracture properties. It is shown that the extended finite element method together with a graded element formulation, allows for the use of relatively coarse meshes in failure analysis of FGMs.

The proposed methodology is used to simulate quasi-static mode I crack growth in a functionally graded glass-filled epoxy beam; comparison with the experimental results of Rousseau and Tippur (2002) is also performed.

## *References:*

- Mariani, S. & Perego, U. 2003. *Extended finite element method for quasi-brittle fracture*, Int. J. Num. Meth. Engng., 58, 103-126.
- Rousseau, C.-E & Tippur, H.V. 2000 *Compositionally graded materials with cracks normal to the elastic gradient*, Acta Mater., 48, 4021–4033.
- Rousseau, C.-E & Tippur, H.V. 2002. *Evaluation of crack tip fields and stress intensity factors in functionally graded elastic materials: cracks parallel to elastic gradient*, Int. J. Fract., 114, 87-111.
- Zhang, Z. & Paulino, G.H. 2005. *Cohesive zone modelling of dynamic failure in homogeneous and functionally graded materials*, Int. J. of Plasticity, 21, 1195-1254.

## *Curriculum vitae:*

Claudia Comi received the M.S. degree (cum laude) in Civil Engineering from the Politecnico di Milano in 1988. She is currently Professor of Strength of materials at the Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano.

Stefano Mariani received the M.S. degree (cum laude) in Civil Engineering and the Ph.D. degree in Structural Engineering from the Politecnico di Milano in 1995 and 1999, respectively. He is currently Assistant Professor at the Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano.



# Atomistic simulations *versus* analytical approaches in fracture

Mariella Ippolito, Alessandro Mattoni, Luciano Colombo  
*INFN-SLACS and Department of Physics, University of Cagliari, Cagliari, Italy*  
E-mail: [luciano.colombo@dsf.unica.it](mailto:luciano.colombo@dsf.unica.it)

Nicola Pugno, Alberto Carpinteri  
*Department of Structural Engineering and Geotechnics, Politecnico di Torino, Torino, Italy*  
E-mail: [nicola.pugno@polito.it](mailto:nicola.pugno@polito.it)

*Keywords:* brittle fracture, Griffith theory, atomistic simulations, quantized fracture mechanics

Traditional analysis of brittle-fracture process resorts to Griffith theory, which describes a planar crack in a homogeneous medium as a reversible thermodynamic system, and implies thermodynamic equilibrium. The total energy of the system is written as the sum of a mechanical contribution - due to the strain energy absorbed from the external work - and a crack resistance term - originating from the material resistance to create new free surfaces by breaking bonds. A crack of given length is stable at the critical value of load for which the total energy of the system is stationary. Once the load exceeds such a critical value, the energy-release rate for unit area of crack advance  $G$  becomes larger than the intrinsic crack resistance  $G_c$  and, therefore, the crack propagates.

Formally,  $G_c$  is defined as  $G_c = 2\gamma_s$  where the material parameter  $\gamma_s$  is the integral of the stress vs. separation curve for the atomic planes undergoing separation during the fracture process. Actually, within linear elastic fracture mechanics it is typically assumed that  $\gamma_s = \gamma$ , where  $\gamma$  is the cleavage surface energy.

Atomistic simulations offer the opportunity to study the fundamental issues underlying the Griffith theory in ideally pure, perfect single-crystal materials. In this work we present an atomic-scale investigation of brittle fracture addressing the relationship among the critical load to fracture, the intrinsic crack resistance and the surface energy. We find that the identification of crack resistance  $\gamma_s$  with the cleavage surface energy  $\gamma$  provides only a lower limit to the energy release rate  $G$ . As a matter of fact,  $\gamma_s$  is found not to be a constant, rather it depends on the crack length and the deformation state.

We further show that a similar result is even obtained by means of a new energy-based theory, namely quantized fracture mechanics (QFM), that modifies continuum-based fracture mechanics substituting the differential in Griffith criterion with finite difference. This simple assumption has remarkable implications: fracture of tiny systems with a given geometry and loading conditions occurs at quantized stresses that are well predicted by QFM.

We discuss the study of crack resistance by means of atomistic simulation and by QFM comparing the results in the two cases. We focus our work on cubic silicon carbide since it is the prototype of an ideally brittle material up to extreme values of strain, strain rate and temperature, and because of its technological relevance as a structural and nuclear material.

## *References:*

- A. Mattoni, L. Colombo and F. Cleri (2005), in press.
- N. M. Pugno and R.S. Ruoff (2004), *Phil. Mag.* 84, 2829.

# Optimum Shape of a Patch Repair for Cracked Plates

Roberto Brighenti, Andrea Carpinteri, Sabrina Vantadori

*Department of Civil Engineering, Environment and Architecture, University of Parma, Italy*

*E-mail: brigh@unipr.it; andrea.carpinteri@unipr.it; sabrina.vantadori@unipr.it*

*Keywords:* fracture mechanics, Mode I, patch repair, optimisation

The presence of defects or damage in structural components is a common situation in many engineering fields. In such cases, whenever the required safety level is not assured, temporary repair, permanent repair or replacement are three possible actions to be performed. Repairs in components with out-of-tolerance defects represent the easiest way to achieve the requested safety level: for example, repairs can be performed by using bonded overlay patches to improve the mechanical resistance and increase fatigue life. It should be remarked that a badly repaired structure can be more unsafe than the corresponding unrepaired one. The design of efficient patch repairs is a crucial task. A good way to design a patch repair can be to find the optimum shape for it (Mahadesh Kumar et al., 2000), in order to obtain the maximum safety-cost ratio (Haftka et al., 1986).

In the present paper, the optimum shape of a patch repair for a cracked plate under Mode I loading is deduced by applying a biology-based method, known as the Genetic Algorithm (GA) (Goldberg, 1989; Cappello et al., 2003). In practice the best patch topology is obtained by finding out the extreme values of the SIF function (objective function) by varying the material density distribution (problem's design variable) in a given domain while keeping constant the total patched area (constrained optimisation problem).

Some finite element simulations are performed in order to assess the reliability of the proposed optimisation procedure. For the cracked plate problem considered, a significant decrease of the SIF values can be obtained (up to about 50%) by employing an optimal shape patch instead of a simple shape (square or rectangular) patch. The implemented optimisation procedure seems to be suitable to tackle structural problems in order to find out the best topology of patch repairs.

## *References:*

- Cappello F, Mancuso A. A genetic algorithm for combined topology and shape optimisations. *Computer-Aided Design* 2003; 35: 761-769.
- Goldberg DE. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. MA: Addison-Wesley Publishing Company inc., 1989.
- Haftka RT, Grandhi RV. Structural shape optimization - a survey. *Comp. Meth. Appl. Mech. and Engng.* 1986; 57: 91-106.
- Mahadesh Kumar A, Hakeem SA. Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet. *Composite Structures* 2000; 49: 285-292.

*Curriculum vitae:* Dr. Ing. Brighenti Roberto, laureato in ing. Civile presso l'Univ. di Parma, Dottore di Ricerca in Meccanica delle Strutture presso Univ. di Bologna, ricercatore di Scienza delle Costruzioni dal 1998 presso la Fac. di Ing. dell'Univ. di Parma. Membro dell'Editorial Board della rivista scientifica Internazionale *International Journal of Fatigue* dal 2001.

# L'evoluzione della frattura nei materiali fragili non coesivi con l'impiego del metodo simmetrico degli elementi di contorno

Teotista Panzeca, Filippo Cucco, Silvio Terravecchia, Liborio Zito

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Palermo, Italia*

*E-mail: panzeca@diseg.unipa.it*

*Parole chiave:* frattura meccanica, SGBEM, analisi tensionale

Obiettivo di questo studio è quello di creare un modello di calcolo che determini, indipendentemente dalle condizioni di carico e dalla geometria del corpo piano (lastra), le condizioni di propagazione della frattura in un sistema materiale fragile, studiato con la formulazione simmetrica alla Galerkin del Metodo degli Elementi di Contorno (SGBEM), utilizzando il software Karnak.sGbem, adattato allo scopo. Tale formulazione risulta particolarmente vantaggiosa in problemi caratterizzati da alte concentrazioni di sforzo quale è la meccanica della frattura e ciò in virtù delle caratteristiche proprie del metodo. Peraltro è noto che l'uso dei metodi BE comportano un notevole vantaggio in quanto si opera la discretizzazione del solo contorno e ciò rende tali metodi notevolmente competitivi per la modellazione delle grandezze di contorno (spostamenti e trazioni) che si deve effettuare nella zona interessata dalla frattura durante la fase di propagazione. In questa fase vengono trascurati fenomeni come la coesione e l'energia di dissipazione nella zona di processo.

Il modello proposto è basato sulla determinazione di un campo tensionale privo di singolarità sull'estremità della fessura indipendente dai classici modi elementari di processo della frattura e dalla determinazione degli *Stress Intensity Factors*. Questo obiettivo è stato raggiunto tramite una strategia basata su una particolare modellazione delle grandezze di contorno. In particolare in fase di ritorno si è adottata una modellazione degli spostamenti dei fronti che si affacciano sulla fessura che impiega funzioni di forma hermitiane. Questi spostamenti, in assenza di distribuzioni di forze coesive nella zona di processo, sarebbero le uniche grandezze in grado di generare singolarità sul "tip" della fessura. Inoltre la strategia che individua la progressione della frattura si basa sulla determinazione della massima tensione principale di trazione valutata sull'estremità della fessura.

## *Riferimenti bibliografici:*

Rice J.R. 1968. A path-independent integral and approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *J. Appl. Mech.* Vol. 35 No 2 pp. 379-386.

Panzeca T., Cucco F., Milana V., Terravecchia S. 2003. Stress field by SGBEM. *Journal of strain analysis.* Vol. 39 pp. 569-580.

Zito L. 2003. "La frattura nell'ambito della formulazione simmetrica del Metodo degli Elementi di Contorno: materiali fragili, non coesivi", Tesi di laurea, Facoltà di Architettura, Palermo.

*Curricula vitae:* Teotista Panzeca professore straordinario di Scienza delle costruzioni, Filippo Cucco professore a contratto di Statica e stabilità delle costruzioni murarie e monumentali, Silvio Terravecchia assegnista di ricerca e professore a contratto di Scienza delle costruzioni, Liborio Zito dottorando in Ingegneria delle strutture.

# Guided wave features in absorbing waveguide with arbitrary cross-section

Alessandro Marzani

*DISTART, University of Bologna, Italy*

*E-mail: alessandro.marzani@mail.ing.unibo.it*

Ivan Bartoli

*DISTART, University of Bologna, Italy*

*E-mail: ivan.bartoli@mail.ing.unibo.it*

Francesco Lanza di Scalea

*Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, USA*

*E-mail: flanza@ucsd.edu*

Erasmus Viola

*DISTART, University of Bologna, Italy*

*E-mail: erasmus.viola@mail.ing.unibo.it*

*Keywords:* semi-analytical finite element method, eigenvalue problems, ultrasonic guided waves, viscoelastic damping, structural health monitoring

**SUMMARY:** This paper deals with a Semi-Analytical Finite Element (SAFE) method for modeling wave propagation in absorbing waveguides of arbitrary cross-section. The method simply requires the finite element discretization of the cross-section of the waveguide, and assumes harmonic motion along the wave propagation direction. The general SAFE technique is extended to account for viscoelastic material damping by allowing for complex stiffness matrices for the material. The dispersive solutions are obtained in terms of phase velocity, group velocity (for undamped media), energy velocity (for damped media), attenuation, and cross-sectional mode shapes. Knowledge of these properties is important in any structural health monitoring attempt that uses ultrasonic guided waves.

## *References:*

- Auld, B.A., *Acoustic Fields and Waves in Solids*. 2nd ed., vols. 1 and 2. Malabar, FL, Kreiger 1990.
- Bernard, A., Lowe, M.J.S. and Deschamps, M., 2001, *Guided waves energy velocity in absorbing and non-absorbing plates*, *Journal of Acoustic Society of America*; 110(1): 186-196.
- Finnveden, S., 2004, *Evaluation of modal density and group velocity by a finite element method*, *Journal of Acoustic Society of America*; 273: 51-75.
- Gavric', L., 1994, *Computation of propagating waves in free rail using a finite element technique*, *Journal of Sound and Vibration*; 185(3): 531-543.
- Hayashi, T., Song, W.J. and Rose, J.L., 2003, *Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example*, *Ultrasonics*; 41: 175-183.
- Shorter, P.J., 2004, *Wave propagation and damping in linear viscoelastic laminates*, *Journal of Acoustic Society of America*; 115(1): 1917-1925.
- Rose, J.L., *Ultrasonic waves in solid media*, The Pennsylvania State University, Cambridge Press 1999.

# Wave propagation in dissipative linear thermoelasticity

Angelo Morro

*University of Genoa, DIBE, Via Opera Pia 11a, 16145 Genova*

*E-mail: morro@dibe.unige.it*

Giacomo Caviglia

*Mathematics Department, Via Dodecaneso 35, 16146 Genova*

*E-mail: caviglia@dimma.unige.it*

*Keywords:* thermoviscoelasticity, energy flux, reflection-transmission process.

A model of linear thermoviscoelasticity is set up by viewing the material as a thermoelastic solid with memory. The dissipative character of the model is characterized by requiring that the divergence of the energy flux vector be non-positive. The characterization of the energy flux turns out to be a basic step for the analysis of wave propagation.

In a recent investigation a general scheme is set up for the description of the reflection-transmission process, for time-harmonic waves, generated by a planarly-stratified layer. Upon writing the pertinent equations as a first-order system of equations and determining an associated energy flux then appropriate conditions are shown to guarantee existence and uniqueness of the solution to the reflection-transmission problem. As a consequence, a privileged set of waves is singled out for the analysis of a reflection-transmission process.

The main purpose of this paper is to establish the expression of the energy flux vector for linear thermoviscoelastic solids and to show that the corresponding scalar energy flux satisfies the decay property. To this end we begin by briefly reviewing the classical theory of anisotropic thermoelasticity and generalizing it to linear thermoviscoelasticity. Next, time-harmonic fields are considered and the dissipative character is characterized by the non-positive value of the divergence of the energy flux. This in turn provides the restrictions on the constitutive parameters. The attention is then restricted to planarly-stratified solids and the governing equations are shown to satisfy a first-order system of the Stroh-form. The scalar energy flux is shown to satisfy a decay property which, thanks to a result of ours, allows us to state existence and uniqueness for the reflection-transmission process generated by a layer.

## *References*

Suhubi, E.S. 1975. *Thermoelastic solids*, Continuum Physics II (ed. A. C. Eringen). Pergamon, New York.

Caviglia, G. & Morro, A. 2004. *Arch. Mech.* 56, 59-82.

*Curriculum vitae:* Angelo Morro is full professor of Mathematical Physics at the University of Genoa since 1981. His main scientific interest deals with models of continua with memory and wave propagation.

Giacomo Caviglia is full professor of Rational Mechanics since 1994, first at the University of Cagliari and next at the University of Genoa. His research activity is mainly addressed to wave propagation in dissipative continua.

# On the use of analogies in deriving variational formulations for initial-value mechanical problems

Angelo Carini, Anna Feriani,

*Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile, Italy*

E-mail: [angelo.carini@ing.unibs.it](mailto:angelo.carini@ing.unibs.it), [anna.feriani@ing.unibs.it](mailto:anna.feriani@ing.unibs.it)

Osvaldo De Donato

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Italy*

*Keywords:* initial-value mechanical problems, variational formulations, kinematic analogue

The aim of the present work is to search for a new approach to find a variational formulation of a mechanical problem governed by a system of linear differential equations with initial conditions. In Carini et al., 2005, a comparison with different methods is outlined.

The approach here adopted falls within those which proceed by analogies, like Kirchhoff firstly did through his well known "kinematic analogue" (Kirchhoff, 1859).

The proposed methodology begins by looking for a large as possible set of mechanical cases (the set of "analogous physical problem"), governed by the same system of linear differential equations. Then, inside this set, attention is given to the mechanical problem which leads, through a suitable linear transformation, to a new one governed by a symmetric operator. The variational formulation of the new problem will then be valid for the original problem as well as for all the mechanical problems that belong to the set.

This method is applied to the system of linear differential equations with initial conditions that govern the undamped oscillations of a system with a positive definite inertia matrix.

In a first simple application, for the one dimensional case, it is shown that the variational formulation is derived on the basis of a suitable linear transformation of the unknown displacement vector. Later, for the multidimensional case, the general form of this linear transformation is derived and a number of approaches are discussed for deriving the variational formulation of the set of "analogous physical problems". The proposed formulations can be interpreted as Tonti's functionals (Tonti, 1984, Carini and De Donato, 1997) if a particular integrating operator is used; all of them have the meaning of an energy and are of a Hamiltonian type.

## *References:*

Carini, A., Feriani, A., De Donato O., *Deriving variational formulations for initial-value mechanical problems by means of analogies*, (submitted).

Carini A. and De Donato O., 1997. *A comprehensive energy formulation for general nonlinear material continua*, ASME J. Applied Mechanics, 64, 353-360.

Kirchhoff, G. 1859. J. f. Math. (Crelle), 56.

Tonti E., 1984. *Variational formulations for every nonlinear problem*, Int. J. Engrg. Sci., 22(11-12), 1343-1371.

# On the Reynolds equation for linearized models of the Boltzmann Operator

Carlo Cercignani

*Dipartimento di Matematica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: carcer@mate.polimi.it*

Maria Lampis

*Dipartimento di Matematica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: marlam@mate.polimi.it*

Silvia Lorenzani

*Dipartimento di Matematica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: silvia@mate.polimi.it*

*Keywords:* Boltzmann equation, Reynolds Equation, Poiseuille and Couette flow

In gas film lubrication problems, operating under submicron or less clearance conditions, the gas cannot be treated as a continuous medium since the mean free path of the gas molecules is not negligible compared with the film thickness. Accordingly, the kinetic theory of rarefied gas flows in narrow channels must be applied.

Traditionally, the pressure distribution in the gas film has been computed using the classical Reynolds lubrication equation (an approximation of the full Navier-Stokes equation). Since rarefaction effects are significant for gas flows in close spacings, Fukui and Kaneko [1988] first derived a generalized Reynolds equation from the linearized Boltzmann equation based on the BGK model - Bhatnagar et al. [1954]. The solution of this equation requires that the Poiseuille and Couette flow rates between two parallel plates have to be accurately calculated in advance, therefore we have used our numerical and variational results on Poiseuille and Couette flow to evaluate the lubrication characteristics - Cercignani et al. [2004].

We have derived the generalized Reynolds equation using a further linearized model of the Boltzmann equation: the ellipsoidal statistical model (ES model) - Cercignani et al. [1966].

## *References:*

Fukui, S. and Kaneko, R. 1988. *Analysis of ultra-thin gas film lubrication based on linearized Boltzmann equation: first report-Derivation of a generalized lubrication equation including thermal creep flow*, J. Tribology 110, 253.

Cercignani, C., Lampis, M., and Lorenzani, S. 2004. *Variational approach to gas flows in microchannels*, Physics of Fluids 16, 3426.

*Curriculum vitae:* Carlo Cercignani, Professor of Theoretical Mechanics at the Politecnico di Milano, is member of Istituto Lombardo, Accademia Nazionale dei Lincei and foreign member of the Academie des Sciences de Paris. He is author or editor of several books concerning the area of Kinetic Theory, and of about 290 research papers.

Maria Lampis, Professor of Theoretical Mechanics at the Politecnico di Milano.

Silvia Lorenzani, Assegnista at the Department of Mathematics of the Politecnico di Milano.

# Non-stationary viscoelastic surface waves in the Stroh formalism

Maurizio Romeo

*D.I.B.E., University of Genoa, Italy*

*E-mail: romeo@dibe.unige.it*

*Keywords:* Surface waves, anisotropic materials, linear viscoelasticity.

The Stroh formalism is one of the most effective approaches in dealing with wave propagation within anisotropic elasticity. In the first formulation [1] it has been introduced as a mathematical tool to treat stationary two-dimensional problems in homogeneous elastic media but successive developments have revealed its usefulness in the more general contexts of electroelasticity and inhomogeneous media. A special attention has been devoted by many authors to simple boundary-value problems like surface and interfacial waves (see [2] and references therein), in order to study the existence and properties of stationary modes in a solid structure of general anisotropy. These topics stand at the basis of various physical settings running from the geophysical analysis of earthquakes to the design of electroacoustic devices. In these respect, despite its complexity, the study of non-stationary modes is a more attractive issue for a comprehensive description of applicable theories of wave propagation into anisotropic solids. Apart from some special material symmetries such as the transverse isotropy, few works have been devoted to the general transient problem.

The present paper proposes an attempt to extend the Stroh formalism to a time-domain analysis of surface perturbations. Via a separation of space variables and the asymptotic expansion of the Laplace transform of the viscoelastic tensor, we derive a Stroh eigenvalue problem. The compatibility condition for surface waves is obtained using the integral approach of Lothe and Barnett [3], and discussed in the light of the thermodynamic restrictions. Transient solutions are derived in the form of inhomogeneous waves whose amplitude decays along the propagation direction. The explicit expression for the propagator function is then obtained for a special class of solutions to the eigenvalue problem, i.e., the one-component waves. It is found that a transient mode exists in this case also when material constraints rule out the occurrence of stationary waves.

## *References:*

- [1] A.N. Stroh, Steady state problems in anisotropic elasticity, *J. Math. Phys.* **41** (1962) 77-103.
- [2] D.M. Barnett, Bulk, surface and interfacial waves in anisotropic linear elastic solids, *Int. J. Solids Struct.* **37** (2000) 45-54.
- [3] J. Lothe, D.M. Barnett, On the existence of surface-wave solutions for anisotropic elastic half-spaces with free surface, *J. Applied Physics* **47** (1976) 428-433.

*Curriculum vitae:* Maurizio Romeo is assistant professor at the Faculty of Engineering, University of Genoa (Italy), from 1993. He is a researcher in the field of continuum mechanics with special interest on wave propagation in dispersive elastic and electromagnetic media.



# Some considerations on a RBF formulation for planar FE

Paolo Biagini

*DIC/CRIACIV, Università degli Studi di Firenze, Italia*

*E-mail: paolo.biagini@dicea.unifi.it*

Luca Facchini

*DIC/CRIACIV, Università degli Studi di Firenze, Italia*

*E-mail: luca.facchini@dicea.unifi.it*

*Keywords:* finite elements, RBF, plane stress

The paper presents some recent developments in the formulation of a new quadrilateral finite element for plane stress analysis, based on a special formulation involving radial basis functions (RBFs). The recourse to such functions stems from the idea of a hierarchical formulation, which allows the generation of high order elements without the need of introducing any additional node. The general purpose of this study is an application to a plane stress case where a mesh refinement test is performed considering both an  $h$  and  $p$  refinement method. The main idea is to approximate the displacement field, inside the element, by means of a particular kind of RBFs. The core of the approximating function is represented by the following:

$$f_k(x,y) = \frac{1}{\sigma \left( \sqrt{\left(x - x_c^{(k)}\right)^2 + \left(y - y_c^{(k)}\right)^2} \right)^\alpha + \varepsilon} \quad (1)$$

where  $\sigma$  and  $\alpha$  are parameters which allow to change the shape of the target approximating function and  ${}^{(k)} = [x_c^{(k)} \ y_c^{(k)}]^t$  are the so-called centres of the functions;  $\varepsilon$  usually attains a very small value ( $\sim 10^{-14}$ ) and is introduced for numerical reasons. An interesting advantage of this kind of approximation is also the possibility to increase the number of element nodes by simply increasing the number of the function centers.

## *References:*

B. Gotovac, V. Kozulic (1999). On a selection of basis functions in numerical analyses of engineering problems, *International Journal for Engineering Modelling*, 12 (1999), no. 1-4, 25 – 41.

*Curriculum vitae:* Paolo Biagini is PhD student at the Department of Civil Engineering at the University of Florence and his research activity is focused on finite elements for stochastic analyses. Luca Facchini is Associate Professor of Strength of Materials at the Department of Civil Engineering at the University of Florence.

## Martedì 13 settembre

---

MINI SIMPOSIO – <i>Aerodinamica dei flussi separati e dei corpi tozzi</i>	153
MINI SIMPOSIO – <i>Stochastic Mechanics in Structural Engineering Applications</i>	159



# U-RANS simulations around bluff bodies

Claudio Marongiu, Pier Luigi Vitagliano, Francesco Capizzano, Pietro Catalano  
*CIRA, Italian Center for Aerospace Research, via Maiorise, Capua (CE), 81043, Italy*  
*E-mail: c.marongiu@cira.it*

*Keywords:* RANS, U-RANS, Turbulence

This work focuses on the applicability of an U-RANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) model to the simulation of flows around bluff bodies. Test configurations, as the cylinder and the square in 2D, and the cube in 3D are discussed for validation purposes. The flow around a matrix of cubes has been considered as final application. All computations are performed by the U-ZEN flow solver, a code developed at CIRA.

The fluid dynamic analyses of bluff bodies with simple geometry, like cylinder, square and cube, represent an interesting problem for the CFD community. These applications are often used as test cases for the validation of numerical methods. They are interesting not only in the aerospace field, where an airfoil or a wing at high incidence behaves as a bluff body, but also for automotive and other configurations like civil constructions.

The numerical solution of flows with a large separation region (comparable to the characteristic length of the domain) is a difficult task because the turbulence influences the whole field. The direct simulation requires a computational cost proportional to  $Re^{9/4}$  (where  $Re$  is the Reynolds number of the problem). Therefore, in the field of the applied research, the development and validation of models in order to reduce the computational costs is an important task. Nowadays the most competitive methodologies are those based on RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) approach, where an explicit dependency of the flow variables on the time does not exist. The fluctuations which represent the turbulence, are entirely modeled and only the time averaged part of the solution is resolved.

A more accurate mathematical model is represented by the U-RANS, where the variation of the mean solution in time is taken into account. The U-RANS models are applicable when a dominant frequency in the flow field solution exists, or in other words, when the flow is periodic. Durbin (2002) clarifies that it is not necessary the dominant frequency to be a low frequency with respect the turbulence spectrum. Therefore the unsteadiness due to explicit forcing, as in the cases of moving bodies, or control devices, Capizzano (2005), or due to fluid dynamic instabilities as the vortex shedding, can be studied by U-RANS models.

## *References:*

Durbin P. A., (2002), A Perspective on recent developments in RANS modeling, *Engineering Turbulence Modelling and Experiments* **5** 3-16

Capizzano F., Catalano P., Marongiu C., Vitagliano P. L., (2005), U-RANS Modelling of Turbulent Flows Controlled by Synthetic Jets, *AIAA 2005-5015, 35<sup>th</sup> Fluid Dynamics Conference and Exhibit*

## *Curriculum vitae*

Claudio Marongiu, Degree in Aeronautical Engineering at University of Naples. Since 2002, at CIRA, in the Computational Fluid Dynamics Laboratory.

# On the capabilities of CFD for the aerodynamic design of high-performance cars

Giovanni Lombardi

*Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale di Pisa, Italy*

lombardi@ing.unipi.it

Keywords: Aerodynamics, Cars, CFD, Unsteady flow

## ABSTRACT

The Computational Fluid Dynamics (CFD) can now be considered a basic tool to analyse the aerodynamic behaviour of high performance cars. The assessment of CFD and the benefits and shortcomings related to such a choice are the subject of the present paper.

A verification of the most significant numerical aspects is considered. The sensitivity analysis indicates that a second order solution is necessary, while a K- $\epsilon$  turbulence model is adequate for this type of geometry.

The comparison with experimental results available for the Ferrari 430, and a bibliography analysis, indicate that, while CFD can be considered very accurate in the evaluation of the differences between different geometries, it is not possible to ensure that the results, in absolute terms, are characterised by the same confidence level.

Steady and non-steady solutions on the same geometries are carried out to analyse the unsteady aspects of the problem. Results indicate that the level of correlation between the average flow field (of the non steady solution) and the stationary flow field is very high, especially for a closed car. Furthermore, no evidence of asymmetrical behaviour of the flow appears when symmetrical flow conditions are considered.

In the last years parallel computing had a great development, and this has reduced significantly the time to solve the RANS numerical problem. However, it must be highlighted that the same improvement is not yet available for the grid generation, that is, at the present, the bottleneck of a CFD simulation in terms of time requirements.

## CURRICULUM VITAE

Laureato in ing. Aeronautica all'Università di Pisa, dove è Professore Associato di Aerodinamica. Insegna "Aerodinamica degli Aeromobili" e "Aerodinamica Sperimentale". I principali argomenti di ricerca sono sullo sviluppo aerodinamico di configurazioni aeronautiche e sull'aerodinamica delle automobili. È responsabile per il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale di Pisa della convenzione con Ferrari S.p.A. per la ricerca in campo aerodinamico legata alle autovetture.

# Characterization of the velocity fluctuations in the wake of a triangular prism of moderate aspect-ratio

Guido Buresti, Giacomo Valerio Iungo

*Department of Aerospace Engineering, University of Pisa, Italy*

*E.mail: g.buresti@ing.unipi.it, giacomo.iungo@ing.unipi.it*

*Keywords: Bluff body aerodynamics, wakes, flow fluctuations, wavelet-Hilbert procedures.*

The velocity fluctuations experimentally detected in the wake of a prism with equilateral triangular cross-section, aspect ratio  $h/w = 3$  (where  $h$  is the prism height and  $w$  the width of its cross-section base), and placed vertically on a plane with its apex edge against the incoming flow, are characterized by using time-frequency signal processing procedures based on the wavelet and Hilbert transforms (see Buresti et al., 2004). The body shape and the direction of the flow are such that two strong counter-rotating vortices detach from the free-end, and significantly influence all the upper-wake flow field.

Fluctuations at three prevailing frequencies are singled out, with different relative intensities depending on the wake regions. In particular, the frequency connected to alternate vortex shedding from the lateral vertical edges of the prism, corresponding to a Strouhal number  $St = fw/U \cong 0.15$ , dominates for vertical positions below  $z/h = 0.9$ , and is particularly strong in the regions just outside the lateral boundary of the wake. A lower frequency, at  $St \cong 0.05$ , is found to prevail in the velocity fluctuations on the whole upper part of the wake, and may confidently be associated, in agreement with previous suggestions, with the oscillation of the counter-rotating axial vortices detaching from the body tip and of the sheets of vorticity wrapped around them.

Fluctuations at an intermediate frequency, around  $St \cong 0.09$ , are also observed, and the region where they prevail is described. In particular, by using as a reference the numerical results of Camarri et al. (2004), it is suggested that they may be caused by a flag-like oscillation of the sheet of transversal vorticity shed from the rear edge of the body free-end, and approximately lying along the downstream boundary of the recirculation region in the central part of the near wake.

The wavelet-Hilbert analysis applied to velocity signals acquired in positions where all the three frequencies may be detected does not provide any clear indication of positive or negative correlation between the time variations of the amplitudes of the extracted components. This substantiates the present suggestion that they are connected with different physical mechanisms, and in particular with the dynamics of different vortical structures.

## *References:*

Buresti G., Lombardi G., Bellazzini J. 2004. *On the analysis of fluctuating velocity signals through methods based on the wavelet and Hilbert transforms*, Chaos, Solitons & Fractals, **20**:149-158.

Camarri S., Salvetti M.V., Buresti G. 2004. *Large-Eddy simulation of the flow around a finite-length triangular prism*, In-Vento-2004, Reggio Calabria. Subm. to J. Wind Engng. Ind. Aerod.

*Curriculum vitae:* G. Buresti, Professor of Fluid Dynamics at the University of Pisa, has been active in the field of applied aerodynamics since 1974, and bluff-body aerodynamics, particularly as regards vortex shedding, is one of his main research interests; he is Associate Editor of *Meccanica* and *Wind & Structures*. G.V. Iungo is an aerospace engineer, and a student of the Ph.D. course in Aerospace Engineering; his main research topic is the study of the dynamics of vortical structures in wake flows.

# Toward a reliable usage of indicial functions in the practice of bridge design: numerical issues and implementation details

Luca Salvatori

*Int. Doctoral Course on Risk Management c/o DIC, Università degli Studi di Firenze, Italy*  
*E-mail: luca.salvatori@dicea.unifi.it*

Claudio Borri

*DIC/CRIACIV, Università degli Studi di Firenze, Italy*  
*E-mail: cborri@dicea.unifi.it*

Keywords: bridge dynamics, wind excitation, aeroelasticity, indicial functions, numerical methods

The aeroelastic self-excited load model via indicial functions [Scanlan et al, 1971] has reached sufficient theoretical maturity in the academic realm. In order to be used in the real practice of bridge design, a reliable procedure must be provided to obtain indicial functions and an efficient implementation of the convolution integrals into structural analysis programs is required. The former problem is addressed by [Borri et al., 2005], whereas the latter problem is addressed in the present paper, where an optimized model with fading aeroelastic-memory is developed and implemented into a specific code [Salvatori et al., 2005], and a first criterion to evaluate the optimal size of the memory is proposed. A substantial reduction of the computing time is obtained without compromising the accuracy of the analyses. The questions of the optimal time-step size and the computationally manageable boundaries for the parameters of the identified indicial functions are discussed

## *References:*

- Borri, C., Salvatori, L., Zahlten, W. 2005. On the Identification of Indicial Functions from measured Aeroelastic Derivatives, Proceedings of VI EuroDyn (in press), Paris.
- Salvatori, L., Spinelli, P. 2005a. Effects of structural nonlinearity and along-span wind coherence on suspension bridge aerodynamics: some numerical simulation results, Submitted.
- Scanlan, R.H., Béliveau, J.-G., Budlong, K. 1974. Indicial aerodynamics functions for bridge decks, Journal of Engineering Mechanics, 100:657-672.

## *Curricula vitae:*

*Luca Salvatori*, civil engineer, since 2004 PhD student in the International Doctoral Course on Risk Management of the Universities of Florence and Braunschweig.

*Claudio Borri*, full professor of Computational Mechanics at the University of Florence.

# Generalized Föppl Curves

Luca Zannetti

*DIASP, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: luca.zannetti@polito.it*

*Keywords:* bluff bodies, vortex dynamics, separated flow.

**SUMMARY:** The equilibrium conditions of a point vortex in the separated flow past extending to infinity arbitrary bodies is studied in the framework of the 2D potential flow. Equilibrium locations are represented as fixed points of the vortex Hamiltonian contour line map. Their pattern is ascribable to the Poincaré-Birkhoff fixed point theorem. An “equilibrium-manifold” representing the generalization of the Föppl curve pertinent to semicircular bumps, is defined for arbitrary bodies. The property  $\partial\omega/\partial\tilde{\psi} = 0$  holds on it, with  $\tilde{\psi}$  being the vortex-free stream function and  $\omega$  the vortex-free streamline slope.

A “Kutta manifold” is defined as the locus of vortices pertinent to flows separating at prescribed points. The existence of Kutta satisfying standing vortices for symmetric bodies is discussed. On the basis of an asymptotic expansion of the equilibrium manifold, Kutta manifold and body geometry, it is shown that different classes of symmetric bodies exist which are ranked by the number of allowable standing Kutta satisfying vortices.



# Transient dynamics model of the flow past a confined square cylinder

Marcelo Buffoni

*DIASP, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: marcelo.buffoni@polito.it*

Bernardo Galletti

*DIASP, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: bernardo.galletti@polito.it*

Angelo Iollo

*MAB, Université de Bordeaux I, France*

*E-mail: angelo.iollo@math.u-bordeaux1.fr*

*Keywords:* low-order models, transient dynamics, calibration

We consider the incompressible flow past a square cylinder in a channel. The Reynolds number considered is based on the square side of the cylinder. The flow is laminar, two-dimensional and unsteady, as a Von Karman street develops past the cylinder. The flow field is obtained by numerical integration of the full Navier-Stokes equations. The direct numerical simulation is achieved by means of the penalization of the obstacle, an efficient downstream boundary condition and a multigrid procedure with finite differences on a cartesian mesh.

Starting from the numerical simulations, we build a low order model by using Proper Orthogonal Decomposition (POD). The eigensystem pertinent to the time-correlation matrix is solved yielding spatial modes which give an optimal representation of the kinetic energy. Such modes are then used to construct a Galerkin projection of the Navier-Stokes equations. Linear terms in the expansion coefficients are adjusted to exactly cope some reference solution. It is shown that such models are predictive in the sense that they can be extrapolated to parameter ranges that were not explored in the set up of the models.

*Curriculum Vitae:* M. Buffoni is a PhD student and his thesis is focussed on low-order modeling and control in fluid dynamics. B. Galletti is a posdoc student; his main research topic is low-order modeling and control in fluid dynamics. A. Iollo is Professor, and his main research interests are low-order modeling, control and optimization in fluid dynamics.

# Analisi dinamica di sistemi non-smooth sottoposti ad input stocastico

## Un approccio preliminare

Anna Sinopoli, Alessio Ageno

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Via Gramsci 53, 00195 Roma (Italy)*

*E-mail: anna.sinopoli@uniroma1.it*

*Keywords:* Dinamica discontinua, input stocastico, stabilità.

In recenti lavori sono state sviluppate dagli autori tecniche opportune per valutare sia analiticamente sia numericamente le caratteristiche di stabilità di sistemi dinamici discontinui.

Il problema analizzato è stato quello delle oscillazioni senza scorrimento del blocco semplicemente appoggiato su frontiera mobile. Nonostante tale problema sia stato oggetto di numerose ricerche durante gli ultimi decenni, la dinamica di tale sistema è così complessa da poter essere assunta come emblematica di temi emergenti in dinamica non lineare: il carattere unilaterale del contatto, l'attrito secco alla Coulomb e soprattutto gli urti rendono il sistema ibrido perché caratterizzato da fasi sia continue sia discontinue.

L'estensione e l'opportuno adattamento degli strumenti tipici delle procedure variazionali dell'analisi perturbativa hanno consentito allora sia di analizzare in dettaglio le frontiere dei campi di stabilità entro cui esistono particolari soluzioni periodiche stabili, sia di localizzare per la soluzione numerica esatta le regioni in cui si possono manifestare biforcazioni. Numerose risposte dinamiche sono state così ottenute, ivi comprese le sequenze di risposte caratterizzate da raddoppio di periodo e transizione al caos.

Con in mente il problema della salvaguardia dal rischio sismico, scopo di questo lavoro è quello di estendere l'analisi al caso di moto del suolo casuale di tipo sismico (stocastico), sotto l'ipotesi che la snellezza del sistema ed i valori dell'attrito di contatto siano tali da evitare fenomeni di scivolamento, cosicché l'unico moto considerato è quello di rotazione alternata del blocco intorno agli spigoli di base.

Parametri di misura della stabilità della risposta (moltiplicatori caratteristici, esponenti di Lyapunov, etc.) verranno utilizzati per indagare la sicurezza del sistema sia durante la fase transitoria di input stocastico sia durante la susseguente fase di moto libero.

Saranno inoltre considerati gli eventuali effetti sulla risposta del sistema di procedure di controllo realizzate mediante dispositivi di dissipazione viscosa agenti con continuità durante il moto.

### *References:*

1. A. Ageno, A. Sinopoli, 2003, "Stability Analysis of the Rocking Block: Numerical Investigations on Analytical Stability Boundaries", Proceedings of DETC '03, DETC 2003/VIB-48478, © by ASME, Software © Adobe and Pinehurst Technologies.
2. A. Ageno, A. Sinopoli, 2002, "Lyapunov's exponents for non-smooth dynamics with impacts: Stability analysis of the rocking block", Non-Smooth Dynamical Systems: Recent Trends and Perspectives, Special Issue of the International Journal of Bifurcation and Chaos, 2005 (Accettato per la pubblicazione).
3. A. Sinopoli, A. Ageno, 2001, "Stability Analysis of a Free-Standing Block with Friction on a moving Foundation", Proceedings of DETC '01, DETC 2001/VIB-21510, © by ASME, Software © Adobe and Pinehurst Technologies.
4. J. Awrejcewicz, C. Lamarque, Bifurcation and Chaos in Non-Smooth Mechanical Systems, World Scientific Series on Non-Linear Science, L. O. Chua Editor, World Scientific, 2003.

# Proper Orthogonal Decomposition of dynamic loads on structures

Francesco Ricciardelli

*Faculty of Engineering, University of Reggio Calabria, Italy*

*E-mail: friccia@ing.unirc.it*

*Keywords:* dynamic loads, random processes, Proper Orthogonal Decomposition

The first application of Proper Orthogonal Decomposition (POD) to structural loading dates back more than 35 years, and was aimed at investigating the characteristics of the wind loading of a cooling tower. After that, this technique has been widely analysed, especially in the last decade and for the specific case of wind loads. Applications are available in the literature, mainly aimed at two goals. The first is that of reducing the computational burden, by simplifying the mathematics and simultaneously retaining all the required information on the loading processes. The second goal is that of better understanding the mechanisms of excitation of structures by isolating the different physical phenomena involved. Indeed, POD is a general tool, and can be used in all those cases in which there is the necessity of simplifying a complex loading process described through a stochastic approach.

In spite of the large number of papers appeared in the recent years, there seems to be still some controversy concerning the actual capacities of POD, together with some inappropriateness in its applications.

In this paper the second of the two issues above will be dealt with, that is the capacity of POD of separating physical mechanisms incorporated in one single loading process. Examples will be shown, with specific reference to the case of the wind loading, but the approach and the conclusions will be general, therefore applicable to any other source of loading. Issues such as (a) the question of why mathematical decoupling of a process can bring also physical decoupling, (b) the meaning of the constrain of orthogonality of modes, (c) the effects of the presence of the mean value of the process, (d) the application of POD to non-Gaussian processes, (e) the relation between time- and frequency-domain applications of POD, will be addressed in the paper.

## *References:*

- de Grenet, E.T. & Ricciardelli, F. 2004a. Analysis of wind loading of square cylinders using Covariance Proper Transformation, *Wind and Structures*, 7(2): 71-88.
- de Grenet, E. T. & Ricciardelli, F. 2004b. Spectral Proper Transformation of wind pressure fluctuations: application to a square cylinder and a bridge deck, *J. Wind Eng. Ind. Aero.*, 92(14-15): 1281-1297.
- Liang, Y.C., Lee, P., Lim, S.P., Lin, W.Z., Lee, K. & Wu, C.G. 2002. Proper Orthogonal Decomposition and its applications – Part I: Theory, *J. Sound Vib.* 252(3): 527-544.
- Loeve, M. 1963. *Probability theory*, Van Nostrand, Princeton, NJ.
- Solari, G. & Carassale, L. 2000. Modal Transformation tools in structural dynamics and wind engineering, *Wind and Structures*, 3(4): 221-241.

# Recent developments on methods of uncertain structure static analysis

Giovanni Falsone

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Messina, Italia*

*E-mail: gfalse@ingegneria.unime.it*

*Keywords:* stochastic finite element, structural uncertainties, random field discretization.

In this work a brief review of the methods used for solving the problem of the stochastic response analysis of structures characterized by some mechanical and/or geometrical properties is reported. In particular, some of the approaches in literature discretizing the random fields representing the structural uncertainties and those solving the corresponding stochastic finite element (SFE) problems are reported. All these approaches provide for the discretization of both the structure, by means of a finite element (FE) approach, and the random fields describing the structural uncertainties. These two discretizations may be characterized by the same meshes or not, depending on the approach used. At last the evaluation of the response statistics, that is the goal of any stochastic analysis, requires the solution of a (SFE) problem, in which each FE is characterized by one or more random variables. In the last section we report a SFE recent approach (Falsone & Ferro, 2005) able to give, once that the random field is discretized in random variables, some exact solutions.

In this work we have tried to show what tools and technique are available in the literature to deal with the analysis of uncertain structures. For the sake of brevity we have, while trying to comment on all major steps involved from the beginning onwards, refrained from making too specific remarks. Our goal has not been to evidence if an approach is better than the others, but only to show the fundamental drawbacks and advantages of each of them. In particular, we have wanted to give an overview on the techniques used to represent stochastic fields and on the numerical methods used to solve the resulting structural problems. We have tried to mention all the major methods at the best of our knowledge and to give proper credit and references.

## *References:*

Falsone G. and Ferro G. 2005. *An exact solution of the static and dynamic analysis of FE discretized uncertain structures*, submitted to International Journal of Solids and Structures.

*Curriculum vitae:* Since 2003 Giovanni Falsone is full professor in Mechanics of Structures. Now he is Director of Civil Engineering Department at the University of Messina. His scientific interests regard the Stochastic Mechanics and the Seismic Analysis.

# Fractional moments of non-linear systems under Lévy white noise processes

Giulio Cottone and Mario Di Paola

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy*

*E-mail: gcottone@diseg.unipa.it; dipaola@diseg.unipa.it;*

*Keywords:* Einstein-Smoluchowsky equation, characteristic function, fractional absolute moments, fractional derivatives

Several real phenomena observed in physics, seismology, electrical engineering, astronomy show evident non Gaussianity observed in heavy tail distributions of the recorded sample functions. The widest class of non Gaussian processes is the so called  $\alpha$  - stable Lévy processes. Such  $\alpha$  - stable processes have heavy tails distribution that give rise to a first kind discontinuity in zero in the characteristic function (CF). The consequence of this discontinuity in the slope is that the moments  $E[X^k]$ ,  $k \in N$  do not exist, making impossible the moment equation approach usually adopted for the classical analysis of linear or non linear systems under  $\alpha$  - stable Lévy white noise systems. The only existing moments are the fractional moments (FM) of the type  $E[|X|^p]$ , with  $p \in R$  and  $p < \alpha$ . For this reason the analyses up to now conducted are performed in terms of probability density function (PDF) by solving the Einstein-Smoluchowsky equation or the equation of its spectral counterpart, namely the CF equation (Grigoriu 2004, Di Paola et al. 2005, Chechkin et al. 2002, Ditlevesen 2004).

In this paper some new perspectives on such problems for the response of non-linear systems driven by external Lévy processes is presented. The first relevant observation shown in the paper is that, despite the derivatives of the CF in zero do not exist, the fractional Riesz derivatives exist and in zero coincide with the fractional moments. Then by using the Taylor expansion generalized by Riemann in which the fractional derivatives appear instead of the classical ones, the generalized version of the expansion in terms of fractional moments are presented.

This new perspective opens the way to extensions and numerical treatments for the analysis of non linear systems under Lévy white noise processes.

## *References:*

Samko, S., Kilbas, A., Marichev, O., *Fractional integrals and derivatives, theory and applications*, Gordon & Breach, Amsterdam, 1993.

# RBF – Galerkin approach for the dynamics of simple disordered masonry structures

Luca Facchini  
*DIC/CRIACIV, Università degli Studi di Firenze, Italia*  
*E-mail: luca@dicea.unifi.it*

Michele Betti  
*DIC/CRIACIV, Università degli Studi di Firenze, Italia*  
*E-mail: luca@dicea.unifi.it*

Paolo Biagini  
*DIC/CRIACIV, Università degli Studi di Firenze, Italia*  
*E-mail: paolo.biagini@dicea.unifi.it*

Andrea Vignoli  
*DIC, Università degli Studi di Firenze, Italia*  
*E-mail: avignoli@dicea.unifi.it*

*Keywords:* disordered structures, no-tensile material, galerkin approach.

Even the simplest masonry structures are extremely difficult to describe in terms of their mechanical characteristics as they are composed of the most different materials, so that the result is hardly definable as deterministic. A further difficulty in the study of the dynamic behaviour of masonry structures is their extremely limited resistance to traction, which induces the presence of pronounced non linearities in the numerical model. Masonry may therefore be idealised as a disordered material, in the sense that its mechanical characteristics may satisfactorily be described by means of a random field.

A Galerkin approach may be usefully applied to the study of such problem. The basic idea of the present work is to exploit the modal reduction method in order to write the non-linear equations of motions in principal co-ordinates.

## *References:*

Betti M., Biagini P., Facchini L. 2005, *Stochastic dynamics of complex uncertain systems by means of a conditional – Galerkin – RBF approach*, Eurodyn 2005, Paris, September 4-7, 2005.  
Chiostrini S., Facchini L. 1999, *Response analysis under stochastic loading in presence of structural uncertainties*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 46, 853 – 870.

*Curriculum vitae:* Luca Facchini is Associate Professor and Chair of Strength of materials at the University of Florence. Paolo Biagini is presently a Ph.D. student at Univ. of Florence. Michele Betti is presently a Research Scholar at the Dept. of Civil Eng. of University of Florence. Andrea Vignoli is Full Professor and Chair of Structural Dynamic and Earthquake Engineering at the University of Florence. Andrea Vignoli is also the present head of DIC (Dept. of Civil Engineering).

# Reliability assessment of complex structural systems

Marcello Ciampoli

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza", Italia.*

*E-mail: marcello.ciampoli@uniroma1.it*

*Keywords:* structural reliability, complex systems, PC structures, deterioration, advanced simulation

A procedure for the reliability assessment of complex structural systems is illustrated, where the term "complex" is related both to the lack of an explicit analytical model of the structural response and to the computational burden associated to its evaluation. The procedure allows to take into account the uncertainties of the input parameters entering the reliability assessment, as well as the uncertainty of the computational model.

The procedure is based on Monte Carlo simulation: but pure Monte Carlo simulation cannot be applied to time-consuming problems, as it requires a large number of repetitive calculations of the structural response. This obstacle has been solved by implementing an advanced simulation technique, that has been demonstrated to be both efficient and robust, even with a reduced number of simulations: this technique consists in coupling Latin Hypercube Sampling (LHS) with Simulated Annealing (SA) (Ciampoli & Paulotto 2004).

The Latin Hypercube Sampling simulation technique belongs to the category of advanced simulation methods. Briefly, it is a special type of Monte Carlo numerical simulation, which uses the stratification of the theoretical cumulative probability distribution function of each input variable.

Simulated Annealing is a technique that allows to solve combinatorial optimization problems: it has been coupled with LHS to make the correlation between each pair of random variables close to the prescribed value, that is, to adjust random samples in such a way that the resulting rank correlation matrix is as close as possible to the target user-defined rank correlation matrix.

As a case example, the procedure is applied to the reliability assessment of a prestressed concrete containment vessel of a nuclear reactor, subject to sudden and severe changes of temperature and internal pressure (corresponding to a Loss of Coolant Accident), in order to evaluate the effects of such shocks on the chance of prolonging the operational lifetime (Ciampoli et al. 2004).

## *References:*

Ciampoli, M. & Paulotto, C. 2004. A simulation procedure for the reliability assessment of structural systems subject to deterioration. *Bridge Maintenance, Safety, Management and Cost* (E.Watanabe, D.M.Frangopol, T.Utsunomiya Eds.), Taylor & Francis Group plc, Londra, UK, ISBN 90 5809 680 7; abstract p. 675 [paper in CD-ROM].

Ciampoli, M., Paulotto, C., Augusti, G., Pesavento, F., Bacchetto, A. & Maiorana, C. 2004. On Reliability Assessment of Deteriorating Structural Systems via Improved Monte-Carlo Simulation. *PMC 2004: Proc. 9th ASCE Joint Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*; Albuquerque, New Mexico; Program/Abstracts Volume, p. 33 [paper in CD-ROM].

# Random Vibrations of Uncertain Linearly Elastic Trusses

Antonina Pirrotta, Roberta Santoro, Massimiliano Zingales

*Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo, 90128 Palermo, Italy*

*E-mail: santoro@diseg.unipa.it*

*Keywords:* Stochastic Analysis, Random processes, Virtual Distortion Method

In this paper dynamic analysis of linearly elastic non-redundant trusses involving uncertainties in material and/or in geometrical parameters in presence of random load will be performed. In detail by the aid of the Virtual Distortion Method (VDM) in a time-domain setting, parameter fluctuations have been considered as parameter-dependent inelastic superimposed strains applied to a deterministic truss. The latter structure is also loaded by a random dynamically-varying external load modelled as Gaussian non-stationary random process.

By means of the superposition principle, dynamic response may be provided by the solution of a deterministic system under both external agencies and superimposed elastic strains.

By using Laplace integral operator the proposed method yields asymptotic solution which may be applied to any coefficient of variation (c.o.v.) of random structural parameter showing fast convergence increasing number of terms in the asymptotic expansion.

Proposed method has been applied to a nine-degree freedom system contrasting the statistics of mechanical response with Monte-Carlo estimates.

## *References:*

Di Paola M (2004), “Probabilistic analysis of truss structures with uncertain parameters (virtual distortion method approach)”, *Probabilistic Engineering Mechanics*, **19**, pagg. 321-329.

Di Paola M., Greco A., (2004), “Structures with uncertain parameters under random loads (virtual distortion approach)”, *Convegno di meccanica stocastica, Pantelleria 2004*.

Di Paola M., Pirrotta A., Zingales M., (2004), “Stochastic dynamics of linear elastic trusses in presence of structural uncertainties (virtual distortion approach)”, *Probabilistic Engineering Mechanics*, **19**, pagg. 41-51.



# Aeroelastic stability of long span bridges under turbulent wind

Vincenzo Sepe and Marcello Vasta

*Dipartimento di Progettazione, Riabilitazione e Controllo delle Strutture Architettoniche - Università "G. D'Annunzio" di Chieti - Pescara, Italy*

*E-mail: v.sepe@unich.it*

*Keywords:* long span bridges, wind engineering, aeroelastic stability

In a previous paper (Sepe and D'Asdia, 2003) one the writers proposed a model to take into account the effects on the aeroelastic stability of long span bridges due to low-frequency wind speed fluctuations, i.e. those components of the atmospheric turbulence characterised by frequencies below 0.2 Hz and by a strong along-span coherence. It was shown that the bridge response to this kind of loading can be modelled as a perturbation of the critical state of the 1dof system (flutter mode) that represent the 3D oscillations (vertical, transversal and torsional) under a non-turbulent critical wind-speed.

Although the problem of aeroelastic stability is described by a model that includes terms of parametric excitation both on the damping and on the stiffness terms, in Sepe and D'Asdia [2003] it was assumed that the aeroelastic stability be determined only by the term of parametric excitation related to the angular speed; this is equivalent to assume that also for a slowly fluctuating wind speed the aeroelastic behaviour depends on the "total equivalent damping", as is typical for a flutter condition. This simplifying hypothesis was partially removed in Sepe and Vasta [2005], where both the parametrical excitations on the damping and on the stiffness terms are included, although considered as statistically independent.

This paper improves the model including a more realistic wind turbulence field, with terms of parametrical excitation that turn out to be strongly correlated. This requires an appropriate application of the stochastic averaging technique to find the stability conditions.

It is shown that for a turbulent wind of the kind considered, with both frequency and coherence unfavourable tuned (and therefore worse than any realistic field), the stability can be assured only if the infinite-time average of the wind speed is appropriately lowered.

A numerical example illustrates the proposed procedure.

## *References:*

Sepe V., D'Asdia P. 2003, *Influence of low-frequency wind speed fluctuations on the aeroelastic stability of suspension bridges*, J.Wind Eng. and Ind. Aerod., 91, pp.1285-1297, ISSN:0167-6105

Sepe V., Vasta M. 2005, *Turbulence effects on the aeroelastic stability of long span bridges*, Sixth European Conference on Structural Dynamics EURODYN 2006, Paris, September 4-7, 2005

*Curriculum vitae:* Vincenzo Sepe and Marcello Vasta are Associate Professors of Structural Mechanics.

# Role of indicial parameters on aeroelastic response of rectangular cylinders

Carlotta Costa

*CRIACIV(1) / Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Firenze, Italy*

*E-mail: carlotta@dicea.unifi.it*

Claudio Borri

*CRIACIV(1) / Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Firenze, Italy*

*E-mail: cborri@dicea.unifi.it*

*Keywords:* aeroelasticity, bridges, time-domain simulations, indicial functions

The interaction between fluid and structure is treated, in bridge aeroelasticity, by means of appropriate external loads acting over the structure itself. Amid various possible manners to describe such types of loads, a time-domain representation based on families of ‘indicial functions’ is adopted here (Costa & Borri, 2005). Indicial approach is characterized by sets of coefficients which can suffer uncertainties coming from experimental errors. On the other hand, time-domain approach allows for easy account of structural nonlinearities. The aim is to investigate the sensitivity of such an approach to calculate the flutter condition of bridge deck cross-sections and to evaluate the influence of structural nonlinearities in pitch. Here, a 2-DoF schematic model is investigated at given values of dynamic derivatives, for rectangular cross-sections characterized by different ‘slenderness’.

The main influence of indicial function coefficients is found to regard coefficients related to aerodynamic moment. Such a significance increases with the bluntness of the section. A minor effect can be identified in the lift function  $\Phi_{Lz}$ , while a negligible role is played by  $\Phi_{La}$ .

The effect of structural nonlinearity results in a no diverging motion at flutter incoming wind speed, but in limit cycles with amplitude increasing with wind speed. The effect of the constant characterizing the cubic spring is moreover quantified.

## *References:*

Costa, C., Borri, C. 2005. *Application of indicial functions in bridge deck aeroelasticity*, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., submitted for publication

*Curriculum vitae:* Carlotta Costa is a Ph. D. at the University of Florence. Her main interests are on structural engineering and, in particular, on bridge aeroelasticity. She published some papers on this subject, working with Prof. Borri, Full Professor of Computational Mechanics at the University of Florence.

# Analisi dinamica deterministica ed aleatoria di oscillatori che percorrono travi su suolo viscoelastico

Giuseppe Muscolino

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Messina*

*E-mail: muscolin@ingegneria.unime.it*

Alessandro Palmeri

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Messina*

*E-mail: alexpalm@ingegneria.unime.it*

**Keywords:** Interazione Veicolo-Armamento, Modello di Zener, Oscillatori Viaggianti, Viscoelasticità.

Nella memoria è presentata una tecnica che consente di eseguire l'analisi nel dominio del tempo delle vibrazioni indotte da un oscillatore ad 1 Gdl che percorre una trave elastica, modellata al continuo, su un suolo viscoelastico.

Rispetto alle formulazioni disponibili in letteratura, in cui si utilizzano valori equivalenti di rigidità e dissipazione della fondazione, la tecnica proposta consente di studiare l'interazione oscillatore-trave adottando modelli reologici più accurati per il suolo viscoelastico. In particolare, nella memoria si fa riferimento al cosiddetto modello di Zener, che può essere efficacemente impiegato per il materiale elastomerico da inserire tra rotaia e sottopiastra per ridurre le vibrazioni indotte dal transito dei veicoli ferroviari. Per questo modello sono presentate le equazioni di stato, che sono accoppiate a valle con le equazioni del moto dell'oscillatore viaggiante e della trave elastica.

Nelle applicazioni numeriche è evidenziata l'entità dell'errore che si commette utilizzando valori equivalenti per la rigidità e la dissipazione dell'elastomero (modello di Kelvin-Voigt equivalente). È dimostrata, inoltre, la possibilità di impiegare la tecnica proposta per valutare le statistiche della risposta in presenza di un'irregolarità aleatoria nel contatto oscillatore-trave. Per il sistema considerato nelle applicazioni, in particolare, le statistiche del picco massimo dell'accelerazione assoluta dell'oscillatore viaggiante possono essere accuratamente valutate anche con il modello di Kelvin-Voigt equivalente, mentre per le statistiche della risposta della trave è necessario utilizzare modelli più accurati.

## *References:*

- Bruni, S. & Collina, A. 2000. *Modelling the viscoelastic behaviour of elastomeric components: an application to the simulation of train-track interaction*, Vehicle System Dynamics, 34: 283-301.
- Fryba, L. 1996. Dynamics of railway bridge, Telford, Londra.
- Fryba, L. 1999. Vibration of solids and structures under moving loads, 3<sup>rd</sup> ed, Telford, Londra.
- Johnson, C.D. & Kienholz D.A. 1982. *Finite element prediction of damping in structures with constrained viscoelastic layers*, AIAA Journal, 20: 1284-90.
- Muscolino, G. 1996. Dynamically modified linear structures: deterministic and stochastic response. J. of Engineering Mechanics – ASCE, 122: 1044-51.
- Palmeri, A., et al. 2004. *Effects of viscoelastic memory on the buffeting response of tall buildings*, Wind and Structures, 7: 89-106.

## Mercoledì 14 settembre

---

ST11 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: DINAMICA E VIBRAZIONI	171
MM11 – MECCANICA DELLE MACCHINE: SIMULAZIONE	175
SO7 – MECCANICA DEI SOLIDI	179
MF2 – MECCANICA DEI FLUIDI: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS	183
ST10 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: DINAMICA	187
MM10 – MECCANICA DELLE MACCHINE: VEICOLI	194
SO6 – MECCANICA DEI SOLIDI: SOLUZIONI ANALITICHE	202
MF1 – MECCANICA DEI FLUIDI: TURBOLENZA	209
ST12 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: MURATURE	216
MM12 – MECCANICA DELLE MACCHINE: BIOMECCANICA E SOSPENSIONE MAGNETICA	221
MM13 – MECCANICA DELLE MACCHINE: DINAMICA	227
SO8 – MECCANICA DEI SOLIDI: ELEMENTI FINITI E SOLIDI NON RESISTENTI A TRAZIONE	233
MF3 – MECCANICA DEI FLUIDI	239
ST13 – MECCANICA DELLE STRUTTURE: STOCASTICA	246
MM14 – MECCANICA DELLE MACCHINE: SIMULAZIONE	252
MM15 – MECCANICA DELLE MACCHINE: ANALISI E CONTROLLO DELLE VIBRAZIONI	257
SO9 – MECCANICA DEI SOLIDI: ANALISI E IDENTIFICAZIONE DEL DANNEGGIAMENTO	262
MF4 – MECCANICA DEI FLUIDI: BIOFLUIDODINAMICA	267



# Multi-modal passive electric control of mechanical vibrations through distributed piezoelectric transducers and electric networks: results and perspectives

Francesco dell'Isola

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza"*

*E-mail: francesco.dellisola@uniroma1.it*

Corrado Maurini

*Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Università di Roma "La Sapienza"*

*Laboratoire d'Études Mécaniques des Assemblages, Université de Versailles/S.-Quentin-en-Yvelines*

*E-mail: corrado.maurini@uniroma1.it*

Maurizio Porfiri

*Engineering Science and Mechanics Department, Virginia Tech, Blacksburg, U.S.*

*E-mail: mporfiri@vt.edu*

Stefano Vidoli

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza"*

*E-mail: stefano.vidoli@uniroma1.it*

*Keywords:* Vibration Control, Intelligent Structures, Damping, Passive Shunts, Electric Circuits

This paper presents some results on passive damping of structural vibrations with piezoelectric transducers and electric networks. The key idea is to use multiple piezoelectric transducers to couple a structural element with a multi-degrees-of-freedom electric circuit. The piezoelectric elements introduce an efficient electromechanical energy exchange and allows for an electrical dissipation of the vibration energy.

*Curriculum vitae:* Francesco dell'Isola is "Professore Associato" of "Scienza delle Costruzioni" at the "Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica", University of Rome "La Sapienza".

# An Active Vibration Isolation System for a three-dimensional equipment structures

Mario Pasquino

*Faculty of Engineering, University of Naples Federico II, Italy*

*E-mail: pasquino@unina.it*

Francesco Fabbrocino

*Faculty of Engineering, University of Naples Federico II, Italy*

Mariano Modano, Michele Brigante

*Faculty of Engineering, University of Naples Federico II, Italy*

*Keywords:* active vibration isolation system, piezoelectric actuators and sensors

This paper describes an investigation into an active four-mount vibration isolation system for a three-dimensional equipment structure, and is focused, in particular, on the physical aspects and mechanisms of control, including stability issues. Piezoelectric actuators are used as the control actuators of the active vibration isolation system for convenience, and are installed in parallel with each of four mounts placed between a piece of equipment and a flexible base structure. Although one end of the actuator acts at the sensor position on the equipment, the system is not collocated because of the reactive force at the other end acting on the flexible base structure, whose dynamics may be strongly coupled with the mounted equipment. The investigation of this actuator installation and its practical implementation are the motivation of this research. A general theoretical formulation for analysing multiple-mount vibration isolation systems using the impedance method is presented and is used to investigate the control mechanisms involved. A proof of unconditional stability is given in this research through the use of the Nyquist criterion. The maximum allowable gain is also analytically addressed for a control system having a time delay in the control loop.

## *References:*

Chin-Hsiung Loh, L. Y. Wu and P. Y. Lin, (2003), *Displacement control of isolated structures with semi-active control devices*, Journal of Structural Control.

Pasquino M., Fabbrocino F., (2001), *Teoria e Tecnica del Controllo Attivo*, CUEN, Napoli, Italy.

Pasquino M., Fabbrocino F., M. Modano, (2005), *Stability Control Analysis of a M-DOF system*, AIMETA '05, Firenze, Italy.

*Curriculum vitae:* M. Pasquino is full professor of Structural Engineering and head of the Department of Structural Engineering, authors of 70 publications on structural optimization, composite materials, active and semi-active vibration control and thin walled structures; M. Brigante is researcher; F. Fabbrocino is PhD; M. Modano is PhD.

# Prove dinamiche su strutture adiacenti controllate con dispositivi magnetoreologici (MR)

Maurizio De Angelis

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma “La Sapienza”*

*E-mail: maurizio.deangelis@uniroma1.it*

Giancarlo Fraraccio, Vincenzo Ciampi, Michela Basili

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma “La Sapienza”*

Nicola Ranieri

*ENEA div. Servizi Tecnologici, Prove Dinamiche ed Ambientali, C.R. Casaccia Roma*

Mariano Ciucci

*ISPESL, DIPIA, Roma*

## SOMMARIO

Il programma di ricerca che si sta svolgendo in collaborazione con l'ISPESL ha come obiettivo la riduzione della risposta sismica di componenti di impianti industriali a rischio di incidente rilevante. Sono state già studiate alcune situazioni (isolamento sismico e controventi dissipativi), mentre più recentemente si è rivolta l'attenzione sulla possibilità di collegare componenti adiacenti di diverse caratteristiche dinamiche mediante connessioni di tipo dissipativo. In Cimellaro et al. 2004 sono presentati i risultati della sperimentazione su tavola vibrante svolta su di un modello in acciaio in scala 1:5 di due strutture adiacenti a 4 e 2 piani collegate mediante dispositivi isteretici in acciaio.

In questo lavoro sono presentate prove condotte sul medesimo modello di strutture adiacenti, collegate con un dispositivo magnetoreologico (MR). Le prove sono state svolte utilizzando la tavola vibrante 4m x 4m presente nei laboratori dell'Enea Casaccia vicino a Roma. Il dispositivo MR utilizzato è in grado di variare le sue caratteristiche meccaniche con la tensione con cui viene alimentato (0-2.5 Volt), seguendo le indicazioni fornite da un algoritmo di tipo ON-OFF. Il modello è stato sottoposto ad accelerogrammi naturali (El Centro, Hachinohe, Kobe, Northridge).

Le prove svolte hanno dimostrato che utilizzando un controllo di tipo semi attivo è possibile ottenere riduzioni della risposta sismica considerevoli, sia in termini di valori massimi, che in termini di *rms*. Infine è stato identificato un modello numerico delle strutture e del dispositivo, tenendo conto anche dei reali tempi di ritardo. Il modello numerico identificato ha dimostrato di cogliere con buona approssimazione il comportamento dinamico dell'intero sistema.

## Bibliografia

Cimellaro, G.P. De Angelis, M. Renzi, E. Ciampi, V., 2004, *Theory and Experimentation on Passive Control of Adjacent Structures*. XIII World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver (Canada), su CD.

*Curriculum vitae*: Maurizio DE ANGELIS, ricercatore confermato di Scienza delle Costruzioni presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma “La Sapienza”.



# A numerical model for the nonlinear dynamics of a semi-infinite beam on unilateral Winkler soil

Giovanni Lancioni<sup>1</sup>, Stefano Lenci

*Dip.to di Architettura, Costruzioni e Strutture, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy*

*E-mail: giovannilancioni@tin.it, lenci@univpm.it*

Massimo Callegari

*Dipartimento di Meccanica, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy*

*E-mail: m.callegari@univpm.it*

*Keywords:* nonlinear dynamics, infinite domains, unilateral Winkler soil, finite elements

In this work the nonlinear dynamics of a semi-infinite beam laid on a bed of elastic unilateral springs is investigated. We consider a linearly elastic Kirchhoff beam, which is supposed to lay on the soil except for an initial detached part and we assign an harmonic vertical oscillation to the beam finite boundary. This problem arises in various practical applications, such as, e.g., railway tracks and laying of marine pipelines, the latter being our principal motivation.

We study the dynamics of pipelines which undergoes vertical motions due, e.g., to the oscillations of the barge on the sea surface. More specifically, we pay attention on the semi-infinite laid part of the beam and only on the neighbourhood of the suspended part. These two regions are divided by the so-called Touch-Down Point (TDP). We refer to the literature for the study of the motion of the suspended part from the TDP to the laying barge. Our simplifications are motivated by the fact that this model captures the main difficulties, i.e., the semi-infinite length of the beam and the nonlinearity due to the unilateral behaviour of the springs, whose combined study is the subject of this work.

Being no expectation of finding an exact solution due to the nonlinearity of the problem, we look for numerical solutions. A self-made code is developed which combines the finite element method (in space) with the incremental Newmark method (in time). Moreover, at each time step an iterative procedure is performed to find the new position of the TDP. Since the semi-infinite beam cannot be discretized by a finite number of finite elements, we consider a truncated domain and introduce approximated non-reflecting conditions on the artificial boundary.

Three frequency ranges related to different mechanical behaviours have been theoretically identified:  $\omega < \omega_c/2$ ,  $\omega_c/2 < \omega < \omega_c$  and  $\omega > \omega_c$  ( $\omega$  is the frequency of the excitation and  $\omega_c$  is a critical frequency), and three numerical simulations, one for each class, have been performed to highlight the main phenomena related to the wave propagation. Despite the simplicity of the model, some interesting dynamical behaviours have been found, especially in the middle range, where, far enough from the TDP the harmonic oscillation with frequency  $2\omega$  becomes predominant on that with forcing frequency  $\omega$ , that is, the beam essentially doubles its oscillating frequency going away from its detached extreme.

<sup>1</sup> Currently at Centro Ricerche ENEA "Casaccia," Roma.

# Metodologia di modellazione di valvole a due vie con elevata dinamica

Stefano Pastorelli e Massimo Sorli

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: stefano.pastorelli@polito.it; massimo.sorli@polito.it*

Giorgio Figliolini e Pierluigi Rea

*DiMSAT, Università di Cassino, Italia*

*E-mail: figliolini@unicas.it; rea@unicas.it*

**Keywords:** Valvola digitale pneumatica, modulazione PWM, solenoide, integrazione mecatronica, modellazione a parametri concentrati

Nei servosistemi a fluido si individuano numerosi esempi di applicazione di valvole digitali dove il comando di apertura e chiusura è costituito da un segnale che viene opportunamente modulato al fine di variare la portata transitante analogamente a quanto effettuato da una valvola proporzionale. Una possibile modulazione è rappresentata dalla tecnica PWM (Pulse-Width-Modulation) secondo la quale il segnale digitale di comando è costituito da un'onda quadra a periodo fisso e duty/cycle variabile.

Tuttavia, le dinamiche di apertura e chiusura dell'otturatore determinano una non perfetta linearità di funzionamento tra duty/cycle e sezione di passaggio e fenomeni di saturazione o banda morta che limitano il campo di impiego della valvola, anche in funzione delle condizioni di pressione di lavoro e della frequenza dell'onda di comando. E' quindi utile approfondire lo studio del comportamento di valvole digitali modulate al fine di determinarne le prestazioni dinamiche e le metodologie di ottimizzazione del loro funzionamento.

Nel presente lavoro viene proposta una metodologia di modellazione di valvole pneumatiche a due vie ad elevata dinamica. In particolare, viene formulato il modello mecatronico della valvola SMC VQ21A1-5Y0-C6-F mediante una scomposizione in sottosistemi funzionali che operando in maniera integrata, ne determinano le prestazioni statiche e dinamiche. Quindi il modello viene validato confrontando i risultati di alcune simulazioni con quelli ottenuti dai rilievi sperimentali al variare delle condizioni di pressione e comando della valvola.

## *References:*

Sorli M., Figliolini G., Pastorelli S., 2004. *Dynamic model and experimental investigation of a pneumatic proportional pressure valve*, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 9 (1), pp.78-86.

Sorli M., Pastorelli S., Almondo A., 2003. *Dynamic Analysis of a Pneumatic Digital Valve through Ansys/Matlab-Simulink Cosimulation*, 1st Int. Conf. on Computational Methods in Fluid Power Technology, Melbourne, Australia, 26-28 November 2003, pp.175-186.

Figliolini G., Sorli M., 2000. *Open-loop force control of a three-finger gripper through PWM modulated pneumatic digital valves*, J. of Robotics and Mechatronics, 12 (4), pp.480-493.

**Curriculum vitae:** Giorgio Figliolini è professore associato di Meccanica Applicata alle Macchine presso l'Università di Cassino dove svolge attività didattica e di ricerca in diversi settori della Meccanica delle Macchine e dell'Automazione Industriale.

# Allestimento e Strumentazione di un Simulatore Innovativo per Allenamento su Kayak

Giovanni Mimmi, Carlo Rottenbacher, Andrea Negri, Manuel Regazzoni  
Dipartimento di Meccanica Strutturale, Università degli studi di Pavia, Via Ferrata 1, Pavia  
E-mail: mimmi@unipv.it

Parole chiave: biomeccanica, pagaia-ergometro, kayak, allenamento in-door, sport-medicine

**SOMMARIO:** In questa memoria viene illustrato uno speciale apparato che può essere impiegato per l'allenamento di atleti che praticano la disciplina sportiva del kayak. L'obiettivo di questo lavoro è quello di realizzare un dispositivo atto a riprodurre in palestra le condizioni di lavoro di un atleta durante l'azione di pagaia in barca, prescindendo dalle sollecitazioni dovute ai movimenti di rollio e beccheggio dello scafo in acqua. Data la limitata diffusione di questo sport non sono disponibili notizie significative di analoghi apparati già realizzati.

Prove sperimentali sono state condotte con un soggetto atleta, acquisendo grafici dell'andamento della forza di pagaia durante una fase di allenamento a diverse cadenze di battuta. In seguito l'apparato è stato modificato realizzando un volano-rotore dotato di un sistema di regolazione a saracinesca per variare l'afflusso e la portata di aria trattata e, in tale modo, l'azione resistente.

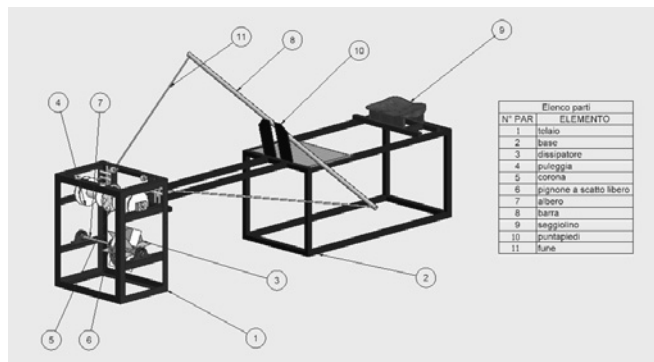


Figura Schema del pagaia-ergometro sperimentale

## Bibliografia

Kobus, J.M. & Barré, S. 2000. *Simulation of oars boats dynamics*, Congrès Européen Marine Industrie et Simulation, Sim' Ouest Nantes.

Mimmi, G., Rottenbacher, C., Frosini, L. & Negri, A. 2004. *An original 3-D cycle ergometer (3-DCE) for three-axial force measurements*, Proc. BioMech 2004 – The IASTED International Conference on Biomechanics, Honolulu, USA.

# Progettazione e simulazione di un pantografo ferroviario dotato di sistemi di asservimento

Luca Pugi

*Univ. Di Firenze Dip. Energetica S. Stecco Sez. Meccanica Applicata-Corso di Laurea in Ingegneria dei Trasporti Pistoia*

*E-mail: luca@mapp1.de.unifi.it*

Benedetto Allotta

*Univ. Firenze Dip. Energetica Sergio Stecco Sez. Meccanica Applicata*

Andrea Rindi

*Univ. Firenze Dip. Energetica Sergio Stecco Sez. Meccanica Applicata*

Mirko Rinchi

*Univ. Firenze Dip. Energetica Sergio Stecco Sez. Meccanica Applicata*

Riccardo Cheli

*Trenitalia Spa*

*Keywords: Pantografo, Catenaria, Controllo, Pneumatica, Captazione*

**SOMMARIO:** Il miglioramento della qualità della captazione riveste grande importanza nello sviluppo e nella diffusione dell'alta velocità ferroviaria. Un'accurata simulazione dell'interazione pantografo catenaria richiede elevate risorse computazionali e l'uso di modelli di simulazione dedicati. Il progetto e la ottimizzazione di un asservimento è spesso una procedura iterativa che risulta difficile da eseguire su modelli che richiedano elevate risorse e tempi di calcolo anche tenendo conto del fatto che la simulazione di sistemi asserviti in retroazione spesso richiede uno sforzo computazionale molto maggiore di quello necessario per la simulazione dei corrispondenti sistemi passivi (modellazione della dinamica degli attuatori, passi di integrazione più fitti per tener conto della dinamica più veloce del sistema etc). D'altrocanto l'uso di modelli lineari eccessivamente semplificati può introdurre delle approssimazioni che non permettono la valutazione anche qualitativa di fenomeni importanti quali ad esempio limitazioni della corsa della sospensione, non linearità cinematiche del pantografo e del relativo sistema di trasmissione. In questo lavoro vengono descritti i modelli utilizzati per simulare l'interazione tra pantografo e catenaria ed i risultati ottenuti ipotizzando diverse metodologie di controllo ed attuazione. In particolare vengono confrontati i risultati relativi a regolatori basati sulla misura della forza di contatto ed algoritmi alternativi che cercano di migliorare la risposta dinamica del sistema tramite una procedura di parziale cancellazione della dinamica del pantografo basata sulla misurazione di grandezze cinematiche. Quest'ultima soluzione presenta l'indubbio vantaggio di evitare l'uso di sensori di forza che sono inevitabilmente affetti da forti problemi di affidabilità che ne rendono sconsigliabile l'uso in un ambiente estremamente ostile per la presenza di elevati disturbi elettromagnetici, esposizione continuativa ad agenti atmosferici, sollecitazioni meccaniche difficilmente prevedibili. Ulteriori risultati riguardano la valutazione delle diverse prestazioni ottenibili in ragione della risposta dinamica e dei limiti tecnologici delle diverse tipologie di attuatori adottati (es. pneumatici, oleodinamici).

# Sperimentazione e Simulazione HIL di cambi e trasmissioni automobilistiche

Benedetto Allotta

*Università di Firenze Dip. Energetica Sergio Stecco Sez. Meccanica Applicata-Corso di*  
*E-mail: allotta@unifi.it*

Luca Pugi

*Università di Firenze Dip. Energetica Sergio Stecco Sez. Meccanica Applicata-Corso di*  
*Laurea in Ingegneria dei Trasporti Pistoia*  
*E-mail: Luca@mapp1.de.unifi.it*

Susanna Papini

*Università di Firenze Dip. Energetica Sergio Stecco Sez. Meccanica Applicata*  
*E-mail: susanna@mapp1.de.unifi.it*

Duccio Carloni

*Università di Firenze Dip. Energetica Sergio Stecco Sez. Meccanica Applicata*

*Keywords: cambio sequenziale, kit selespeed, cambio ad S, HIL, simulazione real time*

## SOMMARIO:

La crescente diffusione di tecnologie mecatroniche in ambito automobilistico trova il suo fondamento negli indubbi vantaggi che questo comporta sia in termini prestazionali che di riduzione di costi e complessità degli apparati.

Un classico esempio in tal senso è lo sviluppo e la diffusione di tali tecnologie all'interno di cambi e trasmissioni automobilistiche. Lo sviluppo e la prototipazione di questi dispositivi implica l'ottimizzazione di componenti meccanici ed elettronici e la calibrazione di software ed algoritmi di controllo funzionanti in real time.

La simulazione hardware in the loop rappresenta uno strumento ideale per eseguire queste attività di sviluppo. I ricercatori del dip. Energetica Sergio Stecco nell'ambito del progetto di ricerca "Simulazione Hardware-In-the-Loop (HIL) per il test di trasmissioni meccaniche" cofinanziato dal MIUR hanno sviluppato un banco prova che è stato utilizzato per emulare le funzionalità della centralina di controllo (TCU) di un cambio sequenziale automobilistico selespeed.

Il software di controllo del banco funzionante in real time, sviluppato in ambiente DSPACE, integra al suo interno le funzionalità di un modello di veicolo fornito dal Politecnico di Torino nell'ambito di questo progetto. A tale scopo gli autori desiderano ringraziare tutto il gruppo di ricerca del DIMEC del politecnico di Torino ed in particolare il prof. Mauro Velardocchia e l'ing. Andrea Morgando.

In questa memoria vengono descritti tutti i principali aspetti concernenti la progettazione e la realizzazione del banco. Alcuni risultati sperimentali vengono quindi mostrati per mostrarne utilità ed effettivo funzionamento.

# Triggering of dry snow slab avalanches and a new concept of active protection

Bernardino M. Chiaia

*Faculty of Technology, University of Paris, France*

*E-mail: bernardino.chiaia@polito.it*

Pietro Cornetti

*Department of Structural Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: pietro.cornetti@polito.it*

Barbara Frigo

*Department of Structural Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: barbara.frigo@polito.it*

Alessandro Luisi

*Department of Structural Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: alessandro\_luisi@fastwebnet.it*

*Keywords:* snow avalanche, fracture mechanics, active protection, crack arrester

We present a new stress-energetic model for the snow avalanche triggering based on a shear lag model. The model, compared with experimental data and similar models (McClung et al., 2003, Bader & Salm, 1990), seems to be closer to the physical reality. In the second part of the paper, we use Dynamic Elastic Fracture Mechanics to evaluate a new concept of active protection for snow avalanches, based on the theory of crack arresters.

## *References:*

- McClung, D.M., Bažant, Z.P., Zi, G. 2003. *Size effect law and fracture mechanics of the triggering of dry snow slab avalanche*, J. Geoph. Res., Vol. 108, No **B2**, pagg. 2119-2129.
- Palmer, A.C., Rice, J.R. 1973. *The growth of slip surfaces in the progressive failure of over-consolidated clay*, Proc. R. Soc. Lond. A **332**, pagg. 527-548.
- Stang, H., Li, Z., Shah, S.P. 1990. *Pullout problem: stress versus fracture mechanical approach*, J. Eng. Mech., Vol. 116, No. **10**, pagg. 2136-2150.

*Curriculum vitae:* Barbara Frigo is PhD Student in the Department of Structural and Geotechnical Engineering of the Politecnico di Torino. Scientific interests: fracture mechanics, snow and avalanches, ice and glaciers, contact mechanics, protection structures.

# Robust Fluid-Solid Interfacing Algorithms with Application to Turbomachinery Aeroelastic Computations

Enrico Gambini<sup>1</sup>, Francesco Poli, Andrea Rindi

*Dipartimento di Energetica "S. Stecco", Università di Firenze, Via S. Marta 3, 50139, Firenze, Italy*

<sup>1</sup>*E-mail: gambini@mapp1.de.unifi.it*

Claudia Schipani

*Avio - R&D, Via Io Maggio 99, 10040 Rivalta di Torino, Italy*

*Keywords:* Aeroelasticity, turbomachinery, flow-structure interaction, intergrid algorithms.

This paper presents robust algorithms to transfer information between a set of independently designed solid and fluid grids. Focus is on the application to uncoupled aeroelastic computations for turbomachinery design and analysis, although the same techniques may be applied to coupled methods as well. Solid and fluid dynamics are developed in separate, independent numerical models, and their interaction is accomplished through an exchange of quantities at the flow-structure interface. The methods here depicted are intended to be adequate strategies for industrial simulations, where flexible and robust techniques of information interchange between separate, highly specialized codes are required. Independently designed grids have differently discretized interfaces between structural and flow domains. Frequently the interface itself is undefined, because of mismatching boundaries. The presented algorithms allow interfacing in presence of both numerical and geometrical mismatching. The uncoupled linearized method in the context of which the interfacing algorithms are exploited is also briefly described.

## *References:*

Rauscher M. (1949), *Station functions and Air Density Variations in Flutter Analysis*, Journal of The Aeronautical Sciences, 16(6).

Hounjet M.H.L., Meijer J.J. (1995), *Evaluation of Elastomechanical and Aerodynamic Data Transfer for Non-Planar Configurations in CAE Analysis*, Proceedings of the International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, Manchester, England, London: Royal Aeronautical Society.

Smith M.J., Cesnik C.E.S., Hodges D.H., Moran K.J. (1996), *An Evaluation of Computational Algorithms to Interface between CFD and CSD Methodologies*, AIAA Paper 96-1400.

*Curriculum vitae:* Enrico Gambini is a Mechanical Engineer and Ph.D. student in Applied Mechanics, Francesco Poli is a Mechanical Engineer and Ph.D. Aeroelasticity research fellow, Andrea Rindi is a Mechanical Engineer and Applied Mechanics researcher and Cludia Schipani is an Aeronautical Engineer, employed at AVIO as an aeroelastic and acoustic know-how engineer.

# A micromechanical material model for the numerical simulation of the human cornea

Giorgio Fotia<sup>1</sup>, Federico Manganiello<sup>2</sup>, and Anna Pandolfi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Dipartimento di Metodi Computazionali per l'Ingegneria, CRS4, ITALY*

<sup>1,3</sup> *Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano, ITALY*

*E-mail: <sup>1</sup>Giorgio.Fotia@crs4.it, <sup>2</sup>manganiello@stru.polimi.it, <sup>3</sup>pandolfi@stru.polimi.it*

**Keywords:** human cornea, anisotropic material, two-fiber reinforced material, finite element method.

A specific understanding the biomechanical response of the cornea is very interesting in a quantitative matter, when it comes to the set up of reliable pre-operative planning tools for surgical and refractive procedures on the corneal tissue. Available literature, however, is very scarce and, in most cases, material models are derived on a phenomenological basis only. Based on an analysis of the micro-organisation of the human cornea, an anisotropic, finite deformation material model of the structured stromal tissue, able to account for the mechanical behavior of the cornea, has been recently developed, Fotia, *et al.* [2005], Pandolfi and Manganiello [2005]. This micro-mechanical model is thought to play a novel role not only in understanding and evaluating the effects of surgical procedure, as well as to support planning of implant placements, but also in developing newer modalities to achieve predictable results in pathological cases. In view of its use in pre-operative surgical planning procedures, this model is employed here to numerically evaluate the variation of configuration and stress due to the various procedure of corneal refractive surgery.

## *References:*

Fotia, G., Manganiello F., Pandolfi, A. 2005. *A micromechanical material model for the numerical simulation of the degenerated human cornea*, Paper #L6.4, Structure and Mechanical Behavior of Biological Materials Symposium, 2005 Material Research Society Meeting, San Francisco, CA, USA, March 29 – April 1, 2005.

Pandolfi, A., Manganiello F. 2005. *A material model for the human cornea*, Journal of Biomechanics and Modeling in Mechanobiology (submitted, 2005).

## *Curriculum vitae:*

Giorgio Fotia after graduating in Civil Engineering at Politecnico of Milano initiated his career in the industrial research at AERMACCHI Spa. He is currently Director of the Computational Methods for Engineering Group at CRS4, Centro di Ricerca, Sviluppo e Studi Superiori in Sardegna.

Federico Manganiello is a PhD student at the Structural Engineering Department of the Politecnico of Milano. He received his MS degree in Materials Engineering in 2001.

Anna Pandolfi received her MS degree in Civil Engineering in 1984. She is currently Associate Professor in Structural Engineering at the Structural Engineering Department, Politecnico of Milano.



# Recent advances in the analysis of mechanically driven mass diffusion in elastic solids

Stefano de Miranda

*DISTART, University of Bologna, Italy*

*E-mail: stefano.demiranda@mail.ing.unibo.it*

Luisa Molari

*DISTART, University of Bologna, Italy*

*E-mail: luisa.molari@mail.ing.unibo.it*

Francesco Ubertini

*DISTART, University of Bologna, Italy*

*E-mail: francesco.ubertini@unibo.it*

*Keywords:* mechanically driven mass diffusion, recovery procedure, discontinuous Galerkin.

Mechanically driven mass diffusion in solids plays an important role in many technological processes. One of the most known effects is the so called hydrogen embrittlement, which may occur in metals containing an initially uniform dilute concentration of hydrogen. The phenomenon is characterized by a two-way interaction between mechanical and diffusive quantities: changes in mass concentration induce strains in the solid (swelling effect) and strain gradients induce mass fluxes (piezo-diffusive effect). The aim of this paper is to present some recent advances in the numerical analysis of these problems in the linear, steady state case.

In the standard finite element setting based on assumed concentration and displacement, the presence of the strain gradient in the piezo-diffusive coupling term demands  $C^1$  continuous displacement interpolation, which is difficult to construct in spatial dimension higher than one. To avoid  $C^1$  continuity various techniques can be used. A mixed approach where displacements and volumetric strain are interpolated as independent variables was early explored by Girrens & Smith (1987). However, the computational effort increases and some inconsistency issues may arise. An alternative approach is to establish a staggered solution strategy in conjunction with a smoothing procedure. This method was employed by Garikipati et al. (2001) using the standard L2 projection. Here, a more efficient and accurate solution scheme is presented by resorting to a superconvergent patch-based recovery procedure, recently proposed by Ubertini (2004). Another possibility to avoid  $C^1$  continuity is to operate within the numerical setting of discontinuous Galerkin methods. Here, a new formulation which requires standard  $C^0$  interpolation for both displacement and concentration is proposed.

The three approaches are discussed and compared by a benchmark test. The numerical results show that both the recovery-based and the discontinuous approach can be successfully applied.

## *References*

- Garikipati, K., Bassman, L. & Deal, M. 2001. A lattice-based micromechanical continuum formulation for stress-driven mass transport in polycrystalline solids, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*; 49:1209-1237.
- Girrens, S.P. & Smith, F.W. 1987. Finite element analysis of coupled constituent diffusion in thermoelastic solids. *Computer Methods in Applied Mechanics in Engineering*; 62:209-223.
- Ubertini, F. 2004. Patch recovery based on complementary energy, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*; 59:1501-1538.

# Simulazione numerica LES dell'effetto del raffreddamento in mare

Filippo Maria Denaro, Giuliano De Stefano

*Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale e Meccanica, Seconda Università di Napoli*

*E-mail: denaro@unina.it, giuliano.destefano@unina2.it*

Daniele Iudicone, Vincenzo Botte

*Stazione Zoologica "Anton Dohrn", Napoli*

*E-mail: iudicone@szn.it, v.botte@cira.it*

*Keywords:* turbolenza oceanografica, large eddy simulation, direct numerical simulation, modellistica dinamica della turbolenza

In questo lavoro, si presenta la soluzione numerica di un modello fisico-matematico dell'effetto del raffreddamento termico in mare. La fenomenologia considerata, pur rappresentando una semplificazione del caso reale, tiene conto di alcuni degli effetti fisici fondamentali che determinano l'evoluzione della fisica reale in mare. In particolare, il modello qui adottato considera le seguenti diverse fenomenologie di interesse oceanografico: lo strato turbolento creato da un vento stazionario agente sulla superficie del mare, supposta indeformabile ed a pressione atmosferica costante; la convezione termica turbolenta generata da un raffreddamento della superficie a partire da una condizione iniziale di stratificazione termica orizzontale con un fondale isoterma (trascurando l'oscillazione diurna della temperatura dovuta all'irraggiamento solare) ed, infine, l'effetto della rotazione terrestre ad una latitudine media. Le caratteristiche essenziali del modello descritto, ovvero la presenza della turbolenza non in equilibrio e l'accoppiamento col campo termico, rendono la soluzione numerica del problema particolarmente onerosa. La metodologia di simulazione adottata è quella nota come large-eddy simulation (LES), la quale consente uno studio accurato dell'evoluzione termo-fluidodinamica senza dover ricorrere alla simulazione diretta (DNS) di tutte le scale del flusso che risulterebbe proibitiva per questa particolare applicazione. L'effetto delle scale di sottogriglia viene simulato con l'adozione di una procedura di modellazione dinamica. In particolare, in questo studio viene proposta un'estensione della "scaling formulation" di Wong e Lilly (1994) alla integrazione delle equazioni filtrate in forma integrale e viene esplorata la capacità di tale modello di ottenere risultati accurati in caso di turbolenza prodotta simultaneamente da shear e buoyancy.

# Accuracy estimates for interpolating numerical solutions of hyperbolic differential problems

Gianluca Argentini

Research & Development Department, Riello Burners, Legnago (Verona), Italy

E-mail: gianluca.argentini@riellogroup.com

*Keywords:* CFL condition, finite differences, numerical accuracy

Let  $w$  a numerical solution, obtained using a finite differences scheme with spatial step  $h$ , of an hyperbolic differential problem. Let  $v$  a piecewise polynomial, based on a set of suitable cubic splines, interpolating the values of the solution  $w$  on the nodes of the grid. We can evaluate  $v$  on a fine grid with step  $k < h$ . Let  $u$  the solution computed with the same FD scheme on the finer grid with step  $k$ . Some numerical simulations show that the computation of  $v$  has a cost smaller then the direct computation of solution  $u$ .

But what about the accuracy of  $v$  as solution of the problem?

At least for one-dimensional problem, and under not too restrictive hypotheses, it's possible to obtain an estimate about  $|v_n - u_n|$ , where  $n$  is the grid index, which shows that the error is uniformly limited in a prefixed time interval. In the particular case of a solution which vanishes with a regular period, the error depends only on the grid step  $h$ :  $|v_n - u_n| \leq O(h)$ .

The method can be useful in the case the CFL condition  $\Delta t \leq O(h)$  is too severe for the direct numerical computation of the solution. We have tested the method in the processing and post-processing phases of some Computational Fluid Dynamics simulations, and we have obtained a good accuracy of solution.

## *References:*

Anderson, J.D. 1995, *Computational Fluid Dynamics*, McGraw-Hill, New York.

Quarteroni A. and Valli A. 1994, *Numerical Approximation of Partial Differential Equations*, Springer, Berlin and Heidelberg.

Tadmor E. and Tang T. 2000, *Pointwise error estimates for relaxation approximations to conservations laws*, SIAM J. Math. Anal., 32 (4), pp. 870-886.

*Curriculum vitae:* Gianluca Argentini; Mathematics Graduated (Padova University, 1988), Schools on Scientific Computing; speaker at ational and international Meeting about scientific computing and applied Mathematics; invited lectured about numerical modeling at italian Universities; research works about Numerical Analysis and Computational Fluid Dynamics; activity on simulation and development of mathematical models for combustion problems at Riello Group, Italy.

# Simulazione numerica del flusso oscillante su una parete scabra

Francesco Fornarelli

*Dipartimento di Ingegneria Ambientale, Università di Genova, Italia*

*E-mail: fornar@diam.unige.it*

Giovanna Vittori

*Dipartimento di Ingegneria Ambientale, Università di Genova, Italia*

*E-mail: vittori@diam.unige.it*

*Keywords:* Flusso oscillante, parete scabra, transizione, turbolenza, direct numerical simulation.

Nell'articolo è affrontato lo studio del flusso oscillante su una parete coperta da una scabrezza regolare. La scabrezza considerata è costituita da semisfere disposte su una parete piana secondo una matrice esagonale. Le equazioni che reggono il moto del fluido sono state risolte numericamente su una griglia cartesiana. Le condizioni al contorno sulla parete sono state imposte utilizzando la tecnica dei contorni immersi (Fadlun et al., 2000). Il metodo numerico è stato validato riproducendo i risultati sperimentali di Keiller & Sleath, (1976). E' analizzato l'andamento temporale delle strutture vorticosi e delle forze indotte sulla parete dalle oscillazioni del fluido. Il lavoro numerico condotto contribuisce a chiarire alcuni aspetti dei lavori sperimentali presenti in letteratura (Keiller & Sleath, 1976; Sleath, 1987; Jensen et al., 1989) e risulta essere un potente strumento di indagine nello studio di questo tipo di flusso.

## *References:*

- Fadlun E.A., Verzicco R., Orlandi P. and Mohd-Yusof J. 2000. Combined immersed-boundary finite-difference methods for three-dimensional complex flow simulations. *J. Comp. Phys.* 161, 35-60.
- Keiller D.C. and Sleath J.F.A. 1976. Velocity measurements close to a rough plate oscillating in its own plane. *J. Fluid Mech.*, 73, 673-691
- Sleath J.F.A. 1987. Turbulent oscillatory flow over rough beds. *J. Fluid Mech.*, 182, 369-409.
- Jensen B.L., Sumer B.M. and Fredsoe J. 1989. Turbulent oscillatory boundary layers at high Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* 206, 265-297.

*Curriculum vitae:* Francesco Fornarelli si è laureato il 21/03/2003 in Ingegneria Meccanica c/o il Politecnico di Bari con una tesi in Fluidodinamica & Gasdinamica sotto la supervisione del Prof. Roberto Verzicco e del Prof. Michele Napolitano. Da Gennaio 2004 è studente di dottorato c/o il Dipartimento di Ingegneria Ambientale dell'Università di Genova sotto la supervisione della Prof.ssa Giovanna Vittori e del Prof. Paolo Blondeaux.

# Transizione in un flusso pulsante all'interno di un condotto di sezione circolare

Raffaella Tuzi, Paolo Blondeaux

Facoltà di Ingegneria, Università di Genova, Italia

E-mail: tuzi@diam.unige.it blx@diam.unige.it

*Parole chiave:* flusso oscillante, flusso pulsante, turbolenza, stabilità

Il flusso in un condotto cilindrico di sezione circolare, originato da un gradiente di pressione oscillante, è determinato tramite la soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes. Si considera un condotto caratterizzato da pareti con piccole imperfezioni che risultano necessarie per innescare il processo di transizione dal regime di moto laminare a quello turbolento anche se le caratteristiche della turbolenza non dipendono dalle caratteristiche dell'ondulazione di parete fino a quando essa si mantiene molto minore delle dimensioni del condotto (Vittori *et al.* 1998). Sono riprodotti i regimi di moto individuati sperimentalmente da Hino *et al.* 1976 per un flusso oscillante ed, in particolare, l'attenzione è stata rivolta alla determinazione dell'effetto che la curvatura della sezione ha sulla stabilità del flusso e alle caratteristiche dei disturbi più instabili. Si è osservato che la geometria a simmetria assiale tende a stabilizzare il flusso rispetto al corrispondente caso piano: la diminuzione del parametro di Stokes, cioè del rapporto tra il raggio del condotto  $R$  e lo spessore dello strato di Stokes  $\delta = \sqrt{2\nu/\omega}$  ( $\nu$  è la viscosità cinematica e  $\omega$  la frequenza angolare delle oscillazioni di velocità), fa registrare la transizione in corrispondenza di numeri di Reynolds critici maggiori.

Inoltre, i risultati preliminari relativi al caso di flusso pulsante, cioè flusso base oscillante a cui si sovrappone una componente di velocità stazionaria, hanno messo in evidenza il ruolo destabilizzante della componente stazionaria di velocità in accordo con gli studi sperimentali effettuati da Lodahl *et al.*

## *References:*

Vittori, G. & Verzicco, R. 1998. *Direct numerical simulation of transition in an oscillatory boundary layer*, J. Fluid Mech. 371: 207-232.

Hino, M. Sawamoto, M. Takasu, S. 1976. *Experiment on transition to turbulence in an oscillatory pipe flow*, J. Fluid Mech. 75: 193-207.

Lodahl, C.R. Sumer, B.M. & Fredsoe, J. 1998. *Turbulent combined oscillatory flow and current in a pipe*, J. Fluid Mech. 373: 313-348.

*Curriculum vitae:* Raffaella Tuzi, laureata in Ingegneria Aerospaziale presso l'Università 'La Sapienza' di Roma. Studente di dottorato, XVIII ciclo, in Fluidodinamica dei Processi Ambientali presso il dipartimento di Ingegneria Ambientale dell'Università di Genova.

# Short pulse loading of circular plates: regular and chaotic dynamic elastic-plastic responses

ANDREA BASSI, GIOVANNI BONO, ANGELO CARINI, ANNA FERIANI \*

*Dipartimento di ingegneria civile, Università di Brescia, Italy*

*\*E-mail:feriani@ing.unibs.it*

PAUL S. SYMONDS<sup>†</sup>

*Division of Engineering, Brown University, Rhode Island, U.S.A.*

<sup>†</sup> *deceased*

*Keywords:* chaos, plates, impact loading

Scientific literature, both experimental and numerical, (see Bassi et al., 2003 for a review), has widely dealt with the “counterintuitive” response of beams and plates subjected to impulsive loads.

In Bassi et al., 2003, it was shown that numerical analyses with the hypothesis of visco-elastic perfectly-plastic material and finite, moderately small deflections may detect unpredictable behaviour: with reference to a clamped circular plate of ductile metal, the final deflections of the damped plate repeatedly change of sign as the value of the applied load slightly changes.

Herein, the same structure is studied, with the same loading conditions, adopting the same Galerkin formulation but neglecting viscous damping, following the approach described in Carini et al. (1997), that is, considering the undamped oscillations of the plate with initial conditions and initial, fixed, plastic strains, corresponding to the values determined by an elastic-plastic analysis when shakedown has occurred.

In order to investigate chaotic behaviour, maximum Lyapunov exponents are estimated by means of the  $K$ - $n$  diagrams, and Poincaré sections are constructed. Some of the results are tested with two different integration algorithms, the adaptive 4th order Runge-Kutta method used in Carini et al. (1997) and a fixed step implicit Runge-Kutta method, especially formulated for symplectic systems (Hairer and Hairer, 2003).

The analyses here performed show that the Hamiltonian system exhibits positive Lyapunov coefficients, thus chaotic trajectories, at the same load ranges that cause unpredictable behaviour in the slightly damped plate. Poincaré sections confirm the chaotic nature of the orbits characterized by positive Lyapunov coefficients.

## *References:*

Bassi A., Genna F., and Symonds P.S. 2003. *Anomalous elastic-plastic responses to short pulse loading of circular plates*, Int. J. Impact Engng., 28(1), 65-91.

Carini A., Castiglioni L., and Symonds P.S. 1997. *Regular and chaotic responses of a Hamiltonian beam model*, Europ. J. Mech. A/Solids, 16(2), 341-367.

Hairer E. and Hairer M. 2003. *GniCodes – Matlab programs for geometric numerical integration*, in *Frontiers in numerical analysis (Durham 2002)*, Springer, Berlin.

# Non-smooth dynamics of oscillators with frictional contacts: analyses and experiments

Paolo Casini<sup>1</sup>, Oliviero Giannini<sup>2</sup> and Fabrizio Vestroni<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Facoltà di Architettura, Università “G. D’Annunzio”, Viale Pindaro 42 – 65127 Pescara, Italia.*

*E-mail: p.casini@unich.it*

<sup>2</sup>*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma “La Sapienza” Via Eudossiana 18 – 00184 Roma, Italia.*

*Keywords:* friction, stick-slip oscillations, non-standard bifurcations, experimental measurements

The model of a non-smooth oscillator, which exhibits different discontinuity boundaries in the phase space, is considered in order to investigate the dynamics of vibrating systems characterized by the occurrence of multiple frictional contacts. The physical system consists of a visco-elastic oscillator that is continuously in contact with one or two different rough supports moving with constant driving velocities. Due to friction, the phase space is divided in regions where the behavior is smooth, while smoothness is lost as trajectories cross the boundaries between adjacent regions: this leads to nonstandard bifurcations.

Two different configurations have been considered: when the oscillator is continuously in contact with both supports and when the mass can only contact a support at a time. In both configurations, the evolution of steady state attractors as the velocities of the disks are varied has been analytically and experimentally studied. Three different characteristic transitions disclosed by the theoretical analyses are considered: i) non-smooth fold bifurcations, which divides a scenario with one fixed point from another with three co-existing solutions; ii) sliding-exchange bifurcations, when the trajectory has a stick phase on one support and then on the other; iii) sliding bifurcations, characterized by abrupt appearance or disappearance of one or multiple stick phases in the trajectories.

A test set-up of the model has been built and its behaviour is experimentally investigated to find out the existence of the non-standard bifurcations predicted by the theoretical analyses and the influence of other parameters, as the friction coefficient, the non-ideal energy source, the variation of the normal contact force during the oscillations. Based on measurements performed, a good qualitative and quantitative agreement with the responses of the theoretical model has been observed. The analytical and experimental investigations, even though limited to a simple model, could provide a valuable insight on the basic features exhibited by more complex mechanical systems with non-smooth characteristics related to the presence of multiple frictional contacts.

## *References:*

Di Bernardo M., Budd C.J., Champneys A.R. (2001), “Unified framework for the analysis of grazing and border-collisions in piecewise-smooth systems”, *Physical Review Letters*, 86, pp. 2554-2556.

Galvanetto U., Bishop S.R. (1999), “Dynamics of a simple damped oscillator undergoing stick-slip vibrations”, *Meccanica*, 34, pp. 337-347.

P. Casini, F. Vestroni (2004), “Nonstandard bifurcations in mechanical systems with multiple discontinuity boundaries”, *Nonlinear Dynamics*, 35(1), pp. 41-59.

# Comportamento dinamico dei cavi sotto l'azione del vento: modelli numerici e prove sperimentali

Federico Cluni

*Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Perugia, Italia*

*E-mail: cluni@strutture.unipg.it*

*Parole chiave:* dinamica del cavo, prove in galleria del vento, modelli numerici, non-linearità geometrica

Nel presente lavoro il comportamento dinamico dei cavi viene analizzato secondo un approccio numerico che tiene conto di risultati ottenuti da prove sperimentali.

Nella prima parte si riportano i principali risultati conseguiti nelle prove sperimentali eseguite in galleria del vento, Cluni (2004) e Bartoli et al. (2004). Tali prove sono state eseguite su di un cavo con rapporto freccia su luce di 1/10, sia in regime laminare che in regime turbolento. Le grandezze rilevate sono state il tiro assiale alle estremità, la componente in direzione del vento della reazione agli appoggi (forza di drag complessiva) e la velocità del vento (sia nella sua componente media che turbolenta) in mezzeria e ad L/6 da questa. Dall'analisi dei dati acquisiti è stato possibile determinare le caratteristiche stocastiche del comportamento dinamico del cavo e l'andamento dell'incremento dello sforzo assiale e della forza di drag complessiva al variare della velocità del flusso.

Successivamente, è stato realizzato un modello numerico del cavo. Il modello consiste in una discretizzazione mediante elementi finiti utilizzando una biella con comportamento geometricamente non lineare, Bathe (1982); il sistema risultante è stato integrato in maniera diretta mediante un algoritmo  $\alpha$ -H.H.T.. L'analisi numerica è stata svolta in campo non lineare: a tal fine, sono state generate numericamente delle storie di vento a partire dallo spettro rilevato in galleria: in particolare, la componente turbolenta è stata generata mediante il metodo di Shinozuka, Augusti et al. (1990). I risultati ottenuti dal modello numerico sono stati confrontati con quelli derivanti dall'elaborazione dei dati sperimentali ottenuti in galleria del vento, sia in termini di componenti medie che di caratteristiche meccaniche e stocastiche della risposta dinamica, rilevando un buon accordo.

## *Riferimenti:*

Augusti G., Borri C. & Gusella V. 1990. *Simulation of wind loading and response of geometrically non-linear structures with particular reference to large antennas*. Structural Safety, 8, pagg. 161-179.

Bathe, K. J. 1982. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice Hall. Englewood Cliffs NJ.

Bartoli G., Cluni F. & Gusella V. 2004. *Wind Tunnel Scale Model Testing of Suspended Cables*. 5th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, Ottawa, Canada.

*Curriculum vitae:* Federico Cluni, Dottore di Ricerca in Ingegneria Civile, è attualmente Assegnista di Ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università di Perugia.



# Dinamica libera e forzata di una trave elastica 3D inizialmente curva

Daniele Zulli

*Disat, Università degli Studi dell'Aquila, Monteluco di Roio, AQ*

*E-mail: danzulli@ing.univaq.it*

Rocco Alaggio

*Disat, Università degli Studi dell'Aquila, Monteluco di Roio, AQ*

*E-mail: ala@ing.univaq.it*

Francesco Benedettini

*Disat, Università degli Studi dell'Aquila, Monteluco di Roio, AQ*

*E-mail: ben@ing.univaq.it*

*Parole chiave:* Trave 3D, curvatura iniziale, dinamica libera, dinamica forzata

L'analisi del comportamento dinamico di strutture flessibili rappresenta, ad oggi, un tema di ricerca scientifica sempre più ricorrente in letteratura, vista l'elevata resistenza raggiunta dai materiali costituenti, con conseguente sensibile incremento della snellezza strutturale, nonché per lo sviluppo di processori sempre più potenti, che consentono manipolazioni e integrazioni di equazioni non-lineari prima inaffrontabili. Inoltre tale tema, certamente centrale nell'ingegneria civile, risulta di trasversale interesse in vari campi dell'ingegneria, della fisica, della chimica e della matematica applicata.

Si colloca pienamente in questo ambito lo studio delle variazioni del comportamento dinamico di una struttura in funzione di differenti, possibili, configurazioni iniziali; in generale, da un punto di vista prettamente ingegneristico, il comportamento delle strutture snelle può risultare molto sensibile alle inevitabili imperfezioni di realizzazione, che comportano incertezza sulla configurazione iniziale.

La configurazione iniziale viene ad essere quindi assunta, in qualche modo, come un parametro cruciale nella rappresentazione del sistema dinamico che descrive il comportamento di un modello strutturale. La sua influenza può risentirsi, in particolare, nelle oscillazioni libere come nella risposta forzata ai carichi di esercizio. Si possono avere, ad esempio, sostanziali variazioni nelle autosoluzioni del problema non forzato, in termini di frequenze proprie e modi di vibrare, causando modifiche nelle condizioni di risonanza interna, fenomeni di veering e coinvolgimento di componenti di spostamento o velocità altrimenti non attive. In corrispondenza, la risposta forzata può subire modifiche altrettanto drastiche, qualitative e quantitative, riguardo, ad esempio, alla comparsa o spostamento di punti di biforcazione, alla variazione delle proprietà di stabilità o periodicità di soluzioni, alle transizioni ad evoluzioni di tipo complesso.

L'oggetto di questo lavoro è una trave elastica tridimensionale, inizialmente non rettilinea, della quale si vuole caratterizzare la dinamica libera e forzata. In particolare l'interesse è rivolto all'influenza, sulla dinamica, della forma iniziale della trave. Assumendo un profilo a parete sottile, incastrato da un lato e sottoposto ad un carico dinamico di ta-

glio nell'estremo libero, si indaga la dipendenza, dalla configurazione iniziale, del fenomeno dell'accoppiamento dinamico flesso-torsionale.

Si considera, a tal fine, un modello di trave geometricamente esatto, mutuato dalla teoria di Cosserat, capace di descrivere il comportamento dinamico della struttura in regime di grandi spostamenti. La configurazione iniziale viene descritta in termini di tre grandezze adimensionali, riconducibili ad intensità delle tre componenti semplici di curvatura di una trave nello spazio, assunte uniformi.

La costruzione del modello e l'ottenimento delle equazioni del moto necessita di passaggi successivi e propedeutici: si introducono le grandezze che descrivono la configurazione di riferimento della trave, che si assume essere quella iniziale; si introducono le grandezze caratteristiche della deformazione; si ricavano le espressioni delle forze interne e d'inerzia che prendono parte nelle equazioni bilancio.

Una volta ottenute le equazioni del moto, si studiano le soluzioni del problema libero lineare associato, al variare della curvatura iniziale. Le equazioni non-lineari del problema forzato vengono invece dapprima proiettate su uno spazio a dimensione finita e poi integrate con tecniche numeriche per diversi valori della curvatura iniziale.

*Riferimenti bibliografici:*

- [1] S. S. Antman. *Nonlinear Problems of Elasticity*. Springer-Verlag, 1993.
- [2] V. V. Bolotin. *The Dynamic Stability of Elastic Systems*. Holden-Day, Inc., 1964.
- [3] M. R. M. Crespo da Silva. Equations of nonlinear analysis of 3d motions of beams. *Appl. Mech. Rev.*, 44(11), 1991.
- [4] A. Di Carlo, N. Rizzi, and A. Tatone. Continuum modelling of a beam-like latticed truss: Identification of the constitutive functions for the contact and inertial actions. *Meccanica*, 25:168–174, 1990.
- [5] A. Di Egidio. *Un Modello Nonlineare di Trave a Sezione Aperta per l'Analisi delle Oscillazioni Flesso-Torsionali di Grande Ampiezza*. PhD thesis, Università di Roma "La Sapienza" - Università dell'Aquila, 1997.
- [6] J. C. Simo. A finite strain beam formulation. the three-dimensional dynamic problem. part i. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 49:55–70, 1985.
- [7] D. Zulli, R. Alaggio, and F. Benedettini. Dinamica flesso-torsionale di una trave in parete sottile: aspetti teorici e sperimentali. In *XVI Congresso Aimeta*, Ferrara, 2003.

# On the dynamics of three-coupled periodic mechanical models

Francesco Romeo, Achille Paolone

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza", Italy*

*E-mail: francesco.romeo@uniroma1.it; E-mail: achille.paolone@uniroma1.it*

*Keywords:* multi-coupled periodic structures, transfer matrix, wave propagation

Periodic structures are called *n-coupled* when their modular elements are coupled through  $n$  degrees of freedom; here, the dynamics of three-coupled periodic structures is analyzed through the single element transfer matrix properties. The well known transfer matrix method has been proposed by many authors to analyze periodic structures; the main advantage of relying on transfer matrices lies in the reduction of the dimension of the whole periodic structure problem to  $2n$ . The propagation properties of periodic structures are thoroughly described on spaces with the minimum dimension necessary to characterize qualitatively the type of eigenvalues. This dimension is given by the number of invariants of the transfer matrix characteristic equation; due to the reversibility of its coefficients, the invariants are, in turn, equal to the coupling degree.

In this work the qualitative study of pass, stop and complex regions on the invariants' space, so far limited to bi-coupled structures, is extended to three-coupled cases; this system-independent representation is specialized to mechanical systems such as pipes and thin-walled beams.

Stiffened periodic pipes, modeled as thin cylindrical shells undergoing axisymmetric ("breathing") modes of vibration, are first considered. Next, thin-walled beams with symmetric cross-section resting on elastic supports undergoing flexural-torsional oscillations are analyzed. The chosen models give rise to equations of motion where the three-coupled nature stems from the coupling between transversal (bi-coupled) and longitudinal (mono-coupled) dynamics for the pipes, whereas, for the thin-walled beams, coupling arises between transversal and torsional (mono-coupled) dynamics. Moreover, while the cylindrical shells are characterized by an elastic coupling, thin-walled beams feature inertial coupling. For each model the boundaries of the propagation regions are determined in the physical parameters' space. Moreover the evolution of the propagation properties is discussed when the coupling parameters tend to vanish leading to uncoupled equations. They correspond, to the longitudinal bar and the beam on a spring bed, for the pipes, and to the torsional bar and the Euler-Bernoulli beam for the thin-walled beams. Extending Mead's results a mechanical interpretation of the bounding frequencies of the propagation regions is eventually provided.

## *References:*

- Mead, D.J. 1975. *Wave propagation and natural modes in periodic systems: II bi-coupled systems, with and without damping*, Journal of Sound and Vibration, 40, pp. 19-39.
- Romeo, F., Luongo, A. 2002. *Invariant representation of propagation properties for bi-coupled periodic structures*, Journal of Sound and Vibration, 257, pp. 869-886.

*Curriculum vitae:* Francesco Romeo, Ph.D., M.S., Assistant Professor (ICAR/08).

# Linear and non-linear elastodynamics of non-shallow cables

Walter Lacarbonara, Achille Paolone, Fabrizio Vestroni

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma La Sapienza, Italy*

*E-mail: walter.lacarbonara@uniroma1.it, achille.paolone@uniroma1.it, vestroni@uniroma1.it*

*Keywords:* Non-shallow cables, primary resonances, direct method of multiple scales, discretization procedures.

Cables are used in a variety of engineering applications such as in suspension bridges, transmission lines, moorings in ocean engineering or in aerospace applications as deployable structures. In most applications, cables are shallow and are constrained at both ends. Nonetheless, in some other applications they tend to be non-shallow. Most of the theoretical and experimental investigations have been carried out for shallow cables whereby the condensation of the longitudinal dynamics holds [Irvine and Caughey, 1974]. Clearly, it is of interest to compute and appreciate the differences in the prediction of linear and non-linear elastodynamics when the cables become non-shallow [Lacarbonara et al., 2005]. In this paper, a mechanical model describing finite motions of non-shallow cables around their initial catenary configurations has been discussed. The governing nondimensional mechanical parameters have been determined along with the regions of their physically plausible variations.

The linearization of the equations of motion around the initial configuration has led to a detailed investigation of the linear spectral properties. Then, a third-order polynomial expansion of the governing equations of motion within a 3D neighborhood of the initial static configuration has been employed. The responses to primary-resonance excitations of either the lowest symmetric or skew-symmetric mode, away from internal resonances, have been investigated directly applying the method of multiple scales to the equations of motion. A detailed analysis of these responses has been conducted shedding light onto the importance of high-order mode shapes in the motion spatial description for non-shallow cables that renders their behaviors more complex than those exhibited by shallow cables. In particular, for non-shallow cables, the high-order symmetric mode shapes become important around those regions where their frequencies undergo crossovers with the frequencies of the near skew-symmetric modes. These symmetric modes suffer a shape variation manifested by the absence or a low number of nodes in both the longitudinal and transverse displacement components. The appearance of these peculiar modes causes a breakdown of the expected sequence of nodes in the mode shapes. As a result of the discontinuous change in the mode sequence (symmetric, skew-symmetric), two consecutive modes are of the same type and both contribute to the cable non-linear response, prominently the mode shape involved in the crossover. These modes may be the manifestation of stretching/geometric modes with a dominant stretching deformation and are shifted to higher modes as the elastic stiffness with respect to the geometric stiffness is increased. The influence of this phenomenon on the non-linear responses may not be captured by low-order reduced models.

## *References*

Irvine, H. M. and Caughey, T. K. [1974] The linear theory of free vibrations of a suspended cable. *Proc. Roy. Soc. Lond. A Mat.*, **341**, pp. 299–315.

Lacarbonara, W., Paolone, A., and Vestroni, F. [2005] Shallow versus nonshallow cables: linear and nonlinear vibration performance, in *Proceedings of Fifth EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference*, Eindhoven, The Netherlands, August 7-12.

*Curriculum vitae:* Walter Lacarbonara, MS in Engineering Mechanics, 1997; Phd in Structural Engineering, 1998; Assistant Professor, University of Rome La Sapienza.

# Modellazione dei sistemi di trazione integrale e della loro influenza sulla dinamica del veicolo

Mauro Velardocchia

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: mauro.velardocchia@polito.it*

Aldo Sorniotti

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: aldo.sorniotti@polito.it*

Andrea Morgando

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: andrea.morgando@polito.it*

*Parole chiave:* modelli di veicolo, differenziali, validazione sperimentale

L'articolo descrive la metodologia utilizzata per la modellazione di un sistema di trazione integrale automobilistico, caratterizzato da due differenziali convenzionali in corrispondenza degli assali e da un differenziale centrale della tipologia sensibile alla coppia. In primo luogo viene sommariamente presentato il modello di veicolo impiegato per l'attività. Dopo un'introduzione sulla modellazione dei differenziali automobilistici, si procede alla descrizione matematica del funzionamento del differenziale Torsen T2 centrale oggetto dello studio. Si ricavano le espressioni analitiche dei differenti contributi di potenza dissipata internamente al componente. Il paragrafo finale riporta il confronto tra i risultati di simulazione e quelli sperimentali, ottenuti a livello dell'intero veicolo.

*Riferimenti:*

Shih, S., Bowerman, W. 2002. *An Evaluation of Torque Bias and Efficiency of Torsen Differential*, SAE Paper 2002-01-1046.

Maretzke, J., Richter, B. 1988. *Directional Control of 4WD Passenger Cars – A Study by Computer Simulation*, SAE Paper 861370.

*Curriculum vitae:* Gli autori hanno dato vita al gruppo di ricerca sulla Dinamica dell'Autoveicolo del Politecnico di Torino. La loro attività di ricerca si concentra sullo studio dei sistemi attivi dell'autoveicolo, sia dal punto di vista della definizione delle logiche di controllo, che da quello della modellazione e della verifica sperimentale dei sistemi di attuazione. Numerose pubblicazioni scientifiche internazionali hanno riguardato questi temi.

# Modellazione dei componenti di impianti frenanti idraulici

Mauro Velardocchia

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: mauro.velardocchia@polito.it*

Aldo Sorniotti

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: aldo.sorniotti@polito.it*

Andrea Morgando

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: andrea.morgando@polito.it*

*Parole chiave:* impianti frenanti, modellazione, validazione sperimentale

L'obiettivo dell'attività è la costruzione di modelli di dettaglio, in grado di cogliere il comportamento semi-stazionario e dinamico di un impianto frenante automobilistico. La finalità è quella di ottenere strumenti per l'effettuazione di calcoli predittivi durante la fase di progettazione e verifica dei componenti. In primo luogo, l'articolo riassume i principi seguiti nella modellazione dei sistemi frenanti automobilistici, riportando le equazioni alla base della trattazione. In seconda istanza, sono presentati i modelli dei differenti componenti, con la relativa validazione sperimentale al banco. Si discute dell'effetto indotto dalla centralina del sistema di antibloccaggio in frenata sulla sensazione offerta dal pedale del freno in manovre di emergenza. Si riporta la procedura necessaria all'ottenimento dei parametri equivalenti agli orifici della centralina. Infine si descrive la modellazione di servofreni volti al miglioramento del comportamento dinamico del sistema frenante, attraverso una variazione del rapporto di asservimento.

## *Riferimenti:*

McCloy, D., Martin, H. 1980. *Control of Fluid Power : Analysis and design*, 2<sup>nd</sup> edition. Ellis Horwood Limited.

Andersen B. W. 1976. *The analysis and design of pneumatic systems*, New York, John Wiley and Sons.

*Curriculum vitae:* Gli autori hanno dato vita al gruppo di ricerca sulla Dinamica dell'Autoveicolo del Politecnico di Torino. La loro attività di ricerca si concentra sullo studio dei sistemi attivi dell'autoveicolo, sia dal punto di vista della definizione delle logiche di controllo, che da quello della modellazione e della verifica sperimentale dei sistemi di attuazione. Numerose pubblicazioni scientifiche internazionali hanno riguardato questi temi.

# Progetto di una logica VDC con ipotesi di linearità. Parte 1: Simulazione

Mauro Velardocchia

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: mauro.velardocchia@polito.it*

Aldo Sorniotti

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: aldo.sorniotti@polito.it*

Andrea Morgando

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: andrea.morgando@polito.it*

*Parole Chiave:* sistemi attivi, VDC, logica di controllo.

Utilizzando un modello di veicolo lineare a singola carreggiata e tre gradi di libertà sono state messe in evidenza le variazioni del comportamento dell'autoveicolo in relazione ai parametri costruttivi. E' stata approntata una procedura che permettere di definire un obiettivo di comportamento ideale di un veicolo dotato del sistema attivo VDC. Da esso è quindi possibile ricavare le funzioni di trasferimento necessarie al funzionamento di una logica di controllo in anello aperto del sistema attivo stesso. Per ragioni di sicurezza tale logica è stata integrata con una logica di controllo ad anello chiuso precedentemente sviluppata. E' stata verificata la validità del lavoro svolto tramite le simulazioni numeriche al calcolatore.

## *Riferimenti:*

Villa. 1979. *Comandi e Regolazioni*. Ed. CELID, Torino.

Ogata. 2002. *Modern Control Engineering*. Upper Saddle River, Prentice- Hall.

Velardocchia, Sorniotti, Krief, Suraci. 2002. *Virtual Experimentation on Vehicle Dynamics on a Multi-Physics Desktop – Part 1: Dynamics and Active Control*. Fisita I02I247

Yahamoto. 2002. *Active Control Strategy for Improved Handling and Stability*. SAE Technical Paper 911902.

*Curriculum vitae:* Gli autori hanno dato vita al gruppo di ricerca sulla Dinamica dell'Autoveicolo del Politecnico di Torino. La loro attività di ricerca si concentra sullo studio dei sistemi attivi dell'autoveicolo, sia dal punto di vista della definizione delle logiche di controllo, che da quello della modellazione e della verifica sperimentale dei sistemi di attuazione. Numerose pubblicazioni scientifiche internazionali hanno riguardato questi temi.

# Progetto di una logica VDC con ipotesi di linearità.

## Parte 2: Sperimentazione

Mauro Velardocchia

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: mauro.velardocchia@polito.it*

Aldo Sorniotti

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: aldo.sorniotti@polito.it*

Andrea Morgando

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia*

*E-mail: andrea.morgando@polito.it*

*Parole Chiave:* sistemi attivi, VDC, hardware in the loop.

L'obiettivo dell'attività è la sperimentazione a banco di una logica di controllo innovativa per il sistema Vehicle Dynamics Control (VDC), frutto di precedenti attività. Il banco prova Hardware in the Loop per sistemi frenanti viene descritto nei suoi componenti principali. Un modello matematico di autoveicolo a quattro gradi di libertà viene compilato da un calcolatore affinché le simulazioni possano avvenire in tempo reale; il modello matematico di sistema frenante viene rimpiazzato dal reale impianto idraulico di frenatura di un veicolo. Viene descritta la procedura tramite la quale una centralina idraulica VDC, necessaria ad attuare il controllo del sistema attivo, è stata modificata al fine di testare logiche di controllo progettate durante l'attività di ricerca. Particolare attenzione viene posta nei confronti della modalità di attuazione delle elettrovalvole della centralina, che traduce il segnale di controllo in uscita dalla logica in opportuni segnali elettrici che comandano l'apertura o la chiusura delle suddette valvole. Vengono presentati i risultati di una prova sperimentale di colpo di sterzo che mette in luce i limiti della logica di controllo progettata in maniera puramente funzionale.

### *Riferimenti:*

van Zanten. 2000. *Bosh ESP Systems: 5 Years of Experience*. SAE Technical Paper 2000-01-1633.

Velardocchia, Sorniotti. 2004. *Hardware-In-the-Loop (HIL) Testing of ESP (Electronic Stability Program) Commercial Hydraulic Units and Implementation of New Control Strategies*. SAE Technical Paper 2004-01-2770.

*Curriculum vitae:* Gli autori hanno dato vita al gruppo di ricerca sulla Dinamica dell'Autoveicolo del Politecnico di Torino. La loro attività di ricerca si concentra sullo studio dei sistemi attivi dell'autoveicolo, sia dal punto di vista della definizione delle logiche di controllo, che da quello della modellazione e della verifica sperimentale dei sistemi di attuazione. Numerose pubblicazioni scientifiche internazionali hanno riguardato questi temi.



# Un dispositivo per la misura di accelerazioni 3D per applicazioni in campo automobilistico

Federico Casolo, Michele Camposaragna, Barbara Cattaneo, Simone Cinquemani

*Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Italy*

*E-mail: federico.casolo@polimi.it; {camposaragna; cattaneo; cinquemani}@mech.polimi.it*

Giovanni Legnani

*Dipartimento di Meccanica, Università di Brescia, Italy*

*E-mail: giovanni.legnani@ing.unibs.it*

*Keywords:* Sicurezza stradale, cinematica, dinamica, simulatore di guida, mems.

**SOMMARIO:** E' stato sviluppato un dispositivo per il rilevamento di parametri cinematici in campo automobilistico che verrà impiegato, in primo luogo, per acquisire e analizzare in 3D il moto di veicoli su percorsi stradali ai fini della determinazione di parametri di sicurezza. Sarà anche utilizzato per verificare le prestazioni dinamiche di un simulatore di guida di recente sviluppo e sarà impiegato per la messa a punto di un sistema da abbinare ai sistemi GPS per permettere il rilevamento della posizione del veicolo anche nelle zone in cui il segnale risulta schermato. Il dispositivo, oltre a quattro accelerometri triassiali di tipo MEMS (12 canali), comprende un antenna GPS e un sistema di acquisizione portatile che include un PC per l'elaborazione e la memorizzazione dei dati. Ad ogni istante di campionamento vengono acquisiti i 12 valori di accelerazione monoassiali che, opportunamente elaborati, permettono di ricavare i valori di  $a_O$ ,  $\dot{\omega}$  ed  $\omega$  della scatola. Prevedendo che l'evoluzione del sistema possa portare ad un dispositivo adatto ad equipaggiare vetture di serie, si è scelto in via preliminare di utilizzare solo componenti a basso costo (come i componenti MEMS).

## *Riferimenti bibliografici*

B. Zappa, G. Legnani, A.J. van den Bogert, R. Adamini, "On the Number and Placement of Accelerometers for Angular Velocity and Acceleration Determination" *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 123, September 2001, pp. 552-554.

Padgaonkar, A.J. Krieger, K.W., King, A.I., "Measurement of Angular Acceleration of a Rigid Body Using Linear Accelerometers" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 42, pp. 552-558, 1975

## *Curriculum vitae*

*Michele Camposaragna*, Dottore di ricerca, assegnista di ric. (ing-ind13) ambiti di ricerca: sviluppo di f.e.m. per la biomeccanica della sicurezza stradale, dello sport e dell'implantologia dentale.

*Federico Casolo*, Prof. (ing-ind13) meccanica del sist. uomo-macchina, ambiti di ricerca: protesi a più assi attivi per amputati, meccanica e biomeccanica dell'attrezzatura sportiva, sicurezza stradale.

*Barbara Cattaneo*, Dottore di ricerca, assegnista di ric. (ing-ind13) ambiti di ricerca: mecatronica, elettronica applicata a sistemi protesici.

*Simone Cinquemani*, Dottorando (ing-ind13) ambiti di ricerca: biomeccanica, sicurezza stradale.

*Giovanni Legnani*, Dottore di ricerca in Meccanica Applicata, Prof. Ordinario del SSD Me. App. alle Macchine. Interessi in Robotica Industriale, Automazione e Biomeccanica.

# Logica di controllo della sterzata attiva per l'impostazione handling di un veicolo stradale

Federico Cheli

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: federico.cheli@polimi.it*

Stefano Melzi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: stefano.melzi@polimi.it*

Edoardo Sabbioni

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: edoardo.sabbioni@polimi.it*

*Keywords:* handling autoveicolo, 4WS, zero side slip controller, filtro di Kalman, controllore LQR

Il presente lavoro discute la possibilità di utilizzare un sistema di controllo attivo per la sterzata integrale dell'autoveicolo (4WS) al fine di migliorarne la maneggevolezza alle basse velocità e incrementarne le prestazioni handling alle alte velocità. Questo ultimo aspetto riveste grande importanza per quanto riguarda la sicurezza di marcia. Una logica di controllo mista feed-forward – feed-back è stata implementata con l'obiettivo di annullare l'angolo di assetto veicolo in ogni condizione di marcia.

Le simulazioni per verificare l'efficacia della logica di controllo sono state effettuate basandosi su un modello non lineare a 14 gradi di libertà (gdl) del veicolo completo, sviluppato presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano e già validato tramite prove sperimentali in pista.

## *Curriculum vitae:*

Federico Cheli: Professore Ordinario di Meccanica Applicata dal 2000. L'attività scientifica è prevalentemente svolta nel campo della dinamica e della stabilità dei sistemi meccanici, con applicazione ai veicoli terrestri, alla dinamica di grandi strutture, alla dinamica dei rotori e a problemi di vibrazioni delle macchine.

Stefano Melzi: Ricercatore in Meccanica Applicata. La sua attività di ricerca è incentrata sulla dinamica del veicolo stradale e ferroviario.

Edoardo Sabbioni: Dottorando di Meccanica Applicata. La sua attività di ricerca riguarda la dinamica dei veicoli stradali con particolare riferimento ai sistemi di controllo del veicolo stesso.

# Metodologia per la valutazione della percorribilità di marcia in assenza e in presenza di vento su ponte e su veicolo

Andrea Collina

*Politecnico di Milano – Dipartimento di Meccanica*

*E-mail: andrea.collina@polimi.it*

Elisabetta Leo

*Politecnico di Milano – Dipartimento di Meccanica*

*E-mail: elisabetta.leo@polimi.it*

Ferruccio Resta

*Politecnico di Milano – Dipartimento di Meccanica*

*E-mail: ferruccio.resta@polimi.it*

Gisella Tomasini

*Politecnico di Milano – Dipartimento di Meccanica*

*E-mail: gisella.tomasini@polimi.it*

*Keywords:* percorribilità ferroviaria, vento trasversale, comfort, Critical Wind Curves, impact factor

In questo lavoro è presentata un'analisi della percorribilità di due ponti ferroviari con e senza modellazione degli effetti del vento trasversale. La prima parte del lavoro riguarda la stima delle velocità critiche di percorrenza e la determinazione degli indici di deragliamento e di comfort, durante la marcia su ponte. La seconda parte del lavoro è relativa invece alla modellazione dei carichi aerodinamici sia su ponte, sia su veicolo ferroviario, per il calcolo delle curve critiche del vento (CWCs), ovvero delle velocità del vento al limite della sicurezza del veicolo.

## *Curricula vitae:*

Andrea Collina: dal 2000 ha preso servizio in qualità di professore straordinario, afferendo al Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. L'attività scientifica tratta differenti argomenti nel settore della dinamica e della stabilità dei sistemi meccanici, con speciale attenzione alla dinamica dei sistemi soggetti a campi di forze.

Elisabetta Leo: dal 2004 svolge il Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici. L'attività scientifica riguarda la stabilità dinamica dei veicoli e il controllo dei sistemi meccanici, con applicazione ai veicoli terrestri e alla micromeccanica.

Ferruccio Resta Dal 2001 è Professore Associato in Meccanica Applicata al Politecnico di Milano, dove svolge attività di ricerca nelle aree della dinamica delle macchine, dei sistemi meccanici ed elettromeccanici, della meccanica e diagnostica del macchinario, della meccanica del veicolo, dei sistemi di controllo e attuazione e nel campo dell'interazione fluido-struttura.

Gisella Tomasini: Ricercatrice in Meccanica Applicata. La sua attività di ricerca è incentrata sull'interazione vento-struttura e sulla dinamica dei-veicoli ferroviari.

# Modello numerico del sistema sterzante di un veicolo con asservimento idraulico

Federico Cheli

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: federico.cheli@polimi.it*

Stefano Melzi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: stefano.melzi@polimi.it*

Edoardo Sabbioni

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: edoardo.sabbioni@polimi.it*

Andrea Zuin

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: andrea.zuin@mecc.polimi.it*

*Keywords:* sistemi sterzanti, identificazione parametri, modellazione numerica, automotive

In questo lavoro viene presentato un modello numerico semi-fisico di un sistema sterzante per autoveicolo, dotato di asservimento idraulico. Il modello permette di valutare la risposta dinamica delle ruote e la coppia applicata al volante durante una generica manovra. Vengono descritte le misure eseguite per caratterizzare sperimentalmente il sistema sterzante, in base alle quali sono stati identificati alcuni parametri del modello di simulazione. A conclusione del lavoro viene descritta l'implementazione del sottosistema sterzo in un modello dell'intero veicolo, sviluppato presso il Politecnico di Milano, che permette di simulare il comportamento comfort ed handling dello stesso.

## *Curriculum vitae:*

Federico Cheli: Professore Ordinario di Meccanica Applicata dal 2000. L'attività scientifica è prevalentemente svolta nel campo della dinamica e della stabilità dei sistemi meccanici, con applicazione ai veicoli terrestri, alla dinamica di grandi strutture, alla dinamica dei rotori e a problemi di vibrazioni delle macchine.

Stefano Melzi: Ricercatore in Meccanica Applicata. La sua attività di ricerca è incentrata sulla dinamica del veicolo stradale e ferroviario.

Edoardo Sabbioni: Dottorando di Meccanica Applicata. La sua attività di ricerca riguarda la dinamica dei veicoli stradali con particolare riferimento ai sistemi di controllo del veicolo stesso.

Andrea Zuin: Assegnista di Meccanica Applicata. La sua attività di ricerca riguarda la dinamica dei veicoli stradali, l'interazione dinamica del sistema pantografo-catenaria e le vibrazioni delle linee di trasmissione.

# Gli studi sull'elasticità di Enrico Betti

Danilo Capecchi, Giuseppe C. Ruta

*Dipartimento di ingegneria strutturale e geotecnica, Università di Roma "La Sapienza", Italia*

*E-mail: danilo.capecchi@uniroma1.it, giuseppe.ruta@uniroma1.it*

Rossana Tazzioli

*Dipartimento di matematica e informatica, Università di Catania, Italia*

*E-mail: tazzioli@dmi.unict.it*

*Parole chiave:* meccanica del continuo, teoria dell'elasticità, fisica-matematica

Enrico Betti, insieme ad Eugenio Beltrami, è il maggiore fisico-matematico italiano nella prima parte della seconda metà dell'Ottocento. Il potenziale è fondamentale in Betti per risolvere le equazioni che reggono le forze di gravità, elettriche e magnetiche per diverse distribuzioni di corpi e condizioni al contorno.

La presente memoria riguarda la monografia *Teoria dell'elasticità* (1872). Betti introduce, sulla scia di Lord Kelvin, considerazioni termodinamiche nella costruzione del potenziale d'elasticità. In altri lavori, tra cui *Teoria delle forze newtoniane e sue applicazioni all'elettricità e al magnetismo* (1879), Betti ottiene il potenziale come integrale primo di forze di campo assegnate. Di contro, nella *Teoria dell'elasticità* Betti suppone l'esistenza di una energia potenziale elastica funzione solo delle componenti della deformazione infinitesima. La trattazione è condotta senza fare intervenire affatto le tensioni, come fatto prima di lui da Green e Thomson.

Il contributo di Betti non presenta quasi nessun progresso riguardo alla formulazione dei principi fisici della meccanica del continuo; da questo punto di vista è meno interessante delle sintesi quasi contemporanee di Saint-Venant (*De la torsion des prismes avec des considérations sur leur flexions*), Clebsch (*Théorie de l'élasticité des corps solides*) e Thomson e Tait (*Treatise on natural philosophy*).

Ciò nonostante si tratta di un contributo fondamentale da altri punti di vista. La monografia di Betti delinea infatti un approccio di tipo essenzialmente analitico, praticamente privo di considerazioni di tipo fisico-sperimentale, che farà scuola nella teoria dell'elasticità e nella fisica matematica successive. I principi (gli assiomi) della teoria sono presentati all'inizio, ridotti al minimo e presentati, acriticamente, in veste puramente analitica. Prima si formula una teoria completa dell'elasticità poi si passa alla soluzioni dei problemi, con un ordine di generalità decrescente. Inoltre, e forse principalmente, nella *Teoria dell'elasticità* sono delineate alcune strategie matematiche di soluzione dei vari problemi, strategie che sono di grandissimo pregio e ancora attuali.

## *Riferimenti bibliografici:*

Bottazzini, U. 1982. *Enrico Betti e la formazione della Scuola Matematica Pisana*, Convegno "La storia delle matematiche in Italia", Cagliari.

Tazzioli, R. 1999. *Per una storia della fisica matematica italiana (1860-1880)*. XIX Convegno di Storia della fisica e dell'astronomia, Milano.

Betti, E. *Teoria dell'elasticità*, Nuovo Cimento, Pisa, 1872.

Green G., 1871. *Mathematical Papers* (N. M. Ferrers, ed.) London: Macmillan.

Thomson W., Tait, P.G., *Treatise on natural philosophy*, Cambridge: University Press, 1879-1883.

# Fundamental solutions in the theory of thermomicropolar elastic solids

L.Nappa, S. De Cicco and M. Lippiello

*Dipartimento di Costruzioni e Metodi Matematici in Architettura, Università degli Studi di Napoli "Federico II", Napoli, Italy*

*E-mail: decicco@unina.it*

*Keywords:* thermomicropolar elastic solids, fundamental solutions, steady oscillations.

The theory of thermomicropolar solids was developed by Nowacki, Eringen [1966], Tauchert et al. [1968] and Eringen [1970]. The basic results and an extensive review on the theory of thermomicropolar elastic solids can be found in the book of Eringen [1999]. The theory of micropolar elasticity is a special case of the micromorphic theory. A body is assumed to consist of interconnected particles in the form of small rigid bodies undergoing translational motion as well as rotational motion. Because of the physical reality, micropolar theory was successfully developed by Eringen [1966] for elastic solids and is now well-established and universally accepted. The theory has been a subject of a enormous number of investigations and extended to fluids and nonlocal polar fields. The micropolar continua are used to characterize composite materials, granular media and multimolecular bodies such as polymers.

In recent years there has been some interest in a theory of thermomechanics that will allow for "second sound" effects. Some authors have discussed generalized theories on the basis of a modified law of heat conduction. Green and Lindsay [1972] presented a theory of thermoelasticity by discussing restrictions on the constitutive equations with the help of an entropy production inequality proposed by Green and Laws [1972].

For investigating boundary value problems of the classical and non-classical theories of elasticity and thermoelasticity with potential methods (boundary integral methods) it is necessary to construct fundamental solutions of systems of partial differential equations and establish their basic properties Kupradze et al. [1979]. Several methods are known for constructing a fundamental solution in the classical theory of elasticity and thermoelasticity Nowacki [1962], Kupradze [1965]. Useful information on fundamental solutions of differential equations is contained in the books of Hörmander [1963], [1983]. The fundamental solutions in the linear theory of binary mixtures for elastic and thermoelastic solids and in the theory of thermoelasticity with microtemperatures were constructed by Svanadze [2004]. In this article, the fundamental solutions of the system of equations of the steady oscillations of the linear theory of thermomicropolar elastic solids is constructed by means of elementary functions.

# Un problema dell'equilibrio elastico per un materiale granulare

Luigi La Ragione

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Bari, Italy*

*E-mail: l.laragione@poliba.it*

*Keywords:* granular material, stress wave, elasticity, ordinary differential equation.

**SOMMARIO:** Viene proposta una soluzione del problema dell'equilibrio elastico per un materiale granulare in condizioni di particolari simmetrie. Si considera un cilindro cavo che ruota attorno al proprio asse e in cui la pressione sui bordi viene mantenuta costante. Questa condizione di carico definisce lo stato di riferimento per il materiale. Successivamente si applica un incremento di pressione sui bordi e si studia la relativa distribuzione degli sforzi nel mezzo. Si mostra come la soluzione sia dipendente da un parametro che e' funzione della pressione di confinamento, cui il materiale è stato preventivamente assoggettato, e differisce da quella classica ottenuta per materiali elastici, isotropi ed omogenei.

## Riferimenti

- Digby, P. J., 1981, *The effective elastic moduli of porous granular Rocks*, J. Appl. Mech. 48, 803-808.
- Walton, K., 1987, *The effective elastic moduli of a random packing of spheres*, J. Mech. Phys. Solids 35,213-226.
- Jenkins, J.T., Johnson,D., La Ragione,L., Makse,H., 2005, *Fluctuations and the Effective Moduli of an Isotropic, Random Aggregate of Identical, Frictionless Spheres*, J. Mech. Phys. Solids 53, 197-225.
- Makse, H. A., Gland, N, Johnson, D. L., and Schwartz, L. M., 1999, *Why effective medium theory fails in granular materials*, Phys. Rev. Letts. 83, 5070-5075.
- Domenico, S. N., 1977, *Elastic properties of unconsolidated porous sand reservoirs*, Geophysics 42, 1339-1368.
- Timoshenko, S. and Goodier, J.N., 1951, *Theory of Elasticity*, McGraw- Hill Book Company, Second Edition.
- Kamke, E., 1967, *Differentialgleichunge- Losungsmethoden und Losungen*, Akademische Verlagsgesellschaft- Geest & PortigK.-G., Leipzig.

Luigi La Ragione è attualmente ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Bari. Si occupa di modelli analitici e numerici per materiali granulari in regimi deformativi che precedono il collasso del materiale in cui l'elasticità dei contatti e lo scorrimento tra i granuli sono elementi essenziali per descrivere il comportamento meccanico del mezzo.

# Inhomogeneous elastostatic solutions constructed from stress- and displacement-associated homogeneous solutions

Massimiliano Fraldi

*Faculty of Engineering, University of Napoli "Federico II", Italy*

*E-mail: fraldi@unina.it*

Stephen C. Cowin

*New York Center for Biomedical Engineering, New York, USA*

*E-mail: scowin@earthlink.net*

*Keywords:* inhomogeneous materials, elastic solutions, anisotropic media

**SUMMARY:** In this paper we first present a theorem - already published by the authors - and its new extension that provides solutions for anisotropic and inhomogeneous elastostatic problems by using the known solution of an *associated* anisotropic and homogeneous problem, if the associated problem has a stress state with a zero eigenvalue everywhere in the domain of the problem. The fundamental property on which this *Stress Associated Solution* (SAS) theorem is built is the coaxiality of the eigenvector associated with the zero stress eigenvalue in the homogeneous problem and the gradient of the scalar function  $\varphi$  characterizing the inhomogeneous character of the inhomogeneous problem. It is shown that most of the solutions of anisotropic elastic problems presented in the literature have this property and, therefore, it is possible to use the SAS theorem to construct new exact solutions for inhomogeneous problems, as well as to find - using the SAS theorem - solutions for the *shape intrinsic* and *angularly inhomogeneous* problems. Finally, a *Displacement Associated Solution* (DAS) dual theorem is given.



# Relaxed solutions in two-dimensional models

Michele Buonsanti

*Department of Mechanics and Materials, Mediterranea University, Reggio Calabria, Italy*

*E-mail: buonsanti@ing.unirc.it*

*Keywords:* multi-well potential, phase transitions, bi-dimensional equilibrium

In a classic “invited lecture” I. Muller [1] asserts that in finite elasticity when dead loads tractions are applied in elastic bodies, severe non linearity often leads multiple deformations with lack of symmetry.

Particularly he find that in two-axial traction surprising membrane buckling occurs. In its book [2] an interesting confirm is represented in the graphs where are plotted 3-D composed diagram. The strain function begins to develop a fold at the critical load value and that fold becomes more pronounced for larger value of the load.

In Kearley’s paper [3] this is confirmed with multiple asymmetric solutions and is remarked that for Mooney-Rivlin and other materials solution give but in neo-hookenian materials fails.

Both experiences don’t recall Ericksen’s bar model [4] even if physics similarities are present. Again, an important application of this approach is inhomogeneous deformation field by means of proper concentration deformation in localized zone.

According to this theory many interesting experimental tests has been carried out and particularly Shaw & Kyriakides results [5,6] confirm initiation and propagation of localized deformation in elastic-plastic shape memory alloys strips.

As for computational side non monotone stress-strain implies non convex strain energy density, as well under mathematical aspects lack of low-semi-continuity of energy functional occurs. Consequently directs methods in variational problem aimed to energy minimization are very difficult to be solved.

In this simple bi-dimensional proposed model, undergone to mono-axial traction, we try to solve equilibrium problem as a mixture of phases which minimize the energy functional minimizing sequences in order the relaxed problem converge to the original one.

Finally a comparison with experimental results is performed.

## *Reference:*

Muller, I., 1996, Two instructive instabilities in non linear elasticity: biaxially loaded membrane, and rubber ballons, *Meccanica*, **31**, pag. 387-395

Kearsley, E.A., 1986, Asymmetric stretching of symmetrically loaded elastic sheet, *Int. Journal Solids and Structures*, **22**, 2, pag. 111-119

Shaw, J.A., Kyriakides, S., 1998, Initiation and propagation of localized deformation in elasto plastic strips under uniaxial tension, *International. Journal of Plasticity*, **13**, 10, pag. 837-871

De Tommasi, D., et al., 2001, Incompressible elastic bodies with non-convex energy under dead-load surface tractions, *Journal of Elasticity*, **65**, pag. 149-168

*Curriculum vitae:* Michele Buonsanti, assistant professor in Mechanics of Materials. Interest fields: constitutive models in non linear elasticity, magneto-chemo-elastic interaction, materials degradation.

# On the application of a general solution procedure for plane stress isotropic plasticity

Nunziante Valoroso

*Istituto per le Tecnologie della Costruzione, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy*

*E-mail: nunziante.valoroso@itc.cnr.it*

Luciano Rosati, Roberto Serpieri

*Dipartimento di Scienza delle Costruzioni, Università di Napoli Federico II, Italy*

*E-mail: rosati@unina.it*

*Keywords:* computational plasticity, return mapping, consistent tangent

It is well known [1] that plane stress elastoplastic problems are more difficult to solve than the associated three-dimensional or plane strain problems, even for the simplest case of  $J_2$  plasticity. This difficulty considerably increases when Lode-dependence comes into play, as typically occurs for concrete and geomaterials [2, 3].

The consistent derivation of the projected plane stress algorithm has been discussed by the authors in [4], where it has been proved that the algorithmic treatment for isotropic plasticity models under plane stress conditions can be obtained from the one pertaining to the three-dimensional case. In particular, in [4] has been shown that the 3D formulation can be suitably specialized to a 2D ambient space in a way to preserve the structure of the return mapping algorithm and the formal expression of the consistent tangent tensor of the three-dimensional case.

Aim of this work is that of providing an implementation of the stress computation algorithm for the plane stress problem able to take full advantage of the isotropic properties of the model. A numerical example is presented that shows the effectiveness of the proposed approach.

## *References:*

- [1] Simo, J. C. and Hughes, T. J. R. 1998. *Computational Inelasticity*. Springer, Berlin.
- [2] Willam, K. J. and Warnke, E. P. 1974. Constitutive models for triaxial behaviour of concrete. International Association for Bridge and Structural Engineering: seminar on concrete structures subject to triaxial stresses. Paper III-01.
- [3] Bigoni, D. and Piccolroaz, A. 2004. Yield criteria for quasibrittle and frictional materials. *International Journal of Solids and Structures*, 41(11–12):2855–2878.
- [4] Valoroso, N. and Rosati, L. 2005. Consistent derivation of the constitutive algorithm for plane stress isotropic plasticity. *Submitted for publication*.

*Curriculum vitae:* NV is researcher at ITC-CNR. Research interests are solid mechanics and numerical methods in engineering.

# Local energy minimizers in incompressible elasticity

Gianpietro Del Piero, Raffaella Rizzoni

*Department of Engineering, University of Ferrara, Italy*

*E-mail: gdpiero@ing.unife.it, rizzoni@ing.unife.it*

*Keywords:* nonlinear elasticity, elastic stability, local energy minima, torsion.

When considering the equilibrium problem for a hyperelastic body constrained on a part of the boundary, one may easily obtain, under reasonable assumptions on the strain energy density, that the natural (stress-free) configuration is a global minimizer for the total energy of the body. However, due to the non-convexity of the energy density imposed by material objectivity, it is not granted that other equilibrium configurations, corresponding to perturbed boundary data, be even *local* energy minimizers, no matter how small the perturbation is.

In the theory of elastic stability it is well known that the positiveness of the second variation is not a sufficient condition for a local minimum. For this reason, and failing other efficient methods for detecting the minima, it has become usual to take the positiveness of the second variation as a stability criterion for what is called *Hadamard stability*. In this paper, a sufficient condition for a local energy minimum is obtained using a method used by Ericksen and consisting in a finite Taylor expansion of the energy functional. In the incompressible case, the problem is made difficult by the fact that the domain of definition of the energy is a non-linear manifold, and therefore one cannot compute the variations in the standard way. In this more complex case, necessary conditions for a local energy minimum were provided by Fosdick & MacSithigh. Here, a sufficient condition for a local minimum is achieved by an extension argument, which renders it possible to join two configurations in the manifold by a rectilinear path.

As an application, we consider the problem of the torsion of an isotropic incompressible circular cylinder with free lateral boundary. For it, we state some conditions on the energy density under which Rivlin's fundamental solution is a local energy minimizer for a small but finite interval of angles of twist.

## *References:*

Ericksen J.L., (1966), *A thermokinetic view of elastic stability theory*, Int. J. Solids Structures **2**, 573-580.

Fosdick R. L., MacSithigh G.P. (1986), *Minimization in incompressible nonlinear elasticity*, J. of Elasticity, **16**, 267-301.

# Analisi $SO(3)$ delle leggi di scala in un flusso di shear omogeneo

Boris Jacob

*E-mail: boris@piva.dma.uniroma1.it*

Paolo Gualtieri

*E-mail: p.gualtieri@caspur.it*

Carlo Massimo Casciola

*E-mail: carlo@flu5.dma.uniroma1.it*

*Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Università di Roma La Sapienza, Via Eudossiana 18, 00184 Roma*

*Parole chiave: Turbolenza, Anisotropia, Leggi di scala*

L'analisi statistica dei flussi turbolenti è stata affrontata in modo dettagliato limitatamente al caso della turbolenza omogenea ed isotropa da Komogorov (K41). L'ipotesi fondamentale alla base di questa teoria risiede nel fatto che gli effetti anisotropi introdotti dalla geometria del flusso o più in generale dai meccanismi di forzamento, perdono progressivamente importanza man mano che l'energia viene trasferita dalle grandi verso le piccole scale.

La teoria di Kolmogorov è alla base dei principali modelli di chiusura per tecniche di simulazione RANS o LES utilizzate in ambito applicativo. Tuttavia in molte situazioni, ed in particolar modo in prossimità di pareti solide, l'intervallo di scale caratterizzate da un puro trasferimento d'energia è limitato. Di conseguenza, quasi tutte le scale del flusso sono influenzate dai meccanismi, tipicamente anisotropi, di produzione di energia cinetica turbolenta.

Per questo motivo risulta di grande importanza l'analisi delle proprietà statistiche delle turbolenza in presenza di meccanismi di produzione, che affrontiamo in questo lavoro mediante l'esame delle leggi di scala delle funzioni di struttura longitudinali in un flusso di shear omogeneo basandoci su dati sperimentali [1] e numerici ad alto numero di Reynolds [2]. Mediante la decomposizione  $SO(3)$  mostriamo come l'alterazione delle leggi di scala delle funzioni di struttura nel settore isotropo sia dovuto ai soli effetti di produzione di energia cinetica turbolenta mentre sono da escludere eventuali contaminazioni dovute all'anisotropia di larga scala [2]. Infine mostriamo come le leggi di scala dei settori anisotropi dipendano sia dal settore  $j$  che dalla sua proiezione  $m$ .

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Jacob, B., Biferale, L., Iuso, G., Casciola, C.M., *Anisotropic fluctuations in turbulent shear flows*, Phys. Fluids, **16**, 2004
- [2] Casciola, C.M., Gualtieri, P., Jacob, B., Piva, R., *Scaling properties in the production range of shear dominated flows*, In via di pubblicazione su Phys. Rev. Lett., 2005

# Small scale localization in the simulation of a turbulent jet at $M = 5$

Daniela Tordella, Michele Iovieno

*Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Aeronautica e Spaziale*

*C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italy*

*E-mail: daniela.tordella@polito.it, michele.iovieno@polito.it*

*Keywords:* turbulence, compressible jets, transition, sub-grid scale model

**SUMMARY:** It is proposed a methodology for the automatic selective insertion-elimination of subgrid scale stresses in the numerical simulation of transitional laminar-turbulent flows in both compressible and incompressible regimes. By means of a functional of the filtered vorticity field, it is possible to approximatively locate the flow regions that are rich in small scale motions. In these regions, it can be opportune to filter the equations of motion to carry out a Large Eddy Simulation, that is, a simulation where the larger scales only are resolved, but the small scale dynamics is considered and represented through proper terms in the equations. In case of compressible regimes, a functional of the pressure local variation and divergence can be associated to the functional previously mentioned in order to determine the eventual presence of shocks. In such a way, it is possible to locate the regions where, to capture the shock, it is necessary to insert an explicit numerical dissipation and suppress the subgrid model.

## REFERENCES

- Biferale L., Boffetta G., Celani A., Lanotte A., Toschi F. (2005), "Particle trapping in three-dimensional fully developed turbulence", *Phys. Fluids*. **17**(2), 021701/1-4
- Bodo G., Rossi P., Massaglia S., (1998), "Three-dimensional simulations of jets", *Ast. & Astr.* **333**, pagg. 1117.
- Colella P., Woodward P.R., (1984), "The piecewise parabolic method (ppm) for gas-dynamical simulations", *J.Comp. Phys.* **54**, pagg. 174-201.
- Ducros F., Ferrand V., Nicoud F., Weber C., Darracq D., Gacherieu C., Poinot T. (1999), "Large-eddy simulation of the shock-turbulence interaction", *J.Comp. Phys.* **152**, pagg. 517-549.
- Iovieno M., Tordella D. (2002), The angular momentum equation for a finite element of fluid: a new representation and application to turbulent flows, *Phys. Fluids* **14**,(8), 2673-2682.
- Rossi P., Bodo G., Massaglia S., Ferrari A. (1997), "Evolution of Kelvin-Helmholtz instabilities in radiative jets: shock structures and entrainment properties", *Ast. & Astr.* **321**, pagg. 672-684.
- Smits J., Dussage JP (1996), *Turbulent shear layers in supersonic flow*, AIP Press, Woodbury, New York.
- Yee H.C., Sandham N.D., Djomehri M.J. (1999), "Low-dissipative high-order shock-capturing methods using characteristic-based filters", *J. Comp. Phys.* **150**, pagg. 199-238.

# Effetto dei polimeri sui flussi d'energia in turbolenza di parete

Elisabetta De Angelis

E-mail: [elisabetta.deangelis@uniroma1.it](mailto:elisabetta.deangelis@uniroma1.it)

Nicoletta Marati

E-mail: [nicoletta.marati@uniroma1.it](mailto:nicoletta.marati@uniroma1.it)

Carlo Massimo Casciola

E-mail: [carlomassimo.casciola@uniroma1.it](mailto:carlomassimo.casciola@uniroma1.it)

Renzo Piva

E-mail: [renzo.piva@uniroma1.it](mailto:renzo.piva@uniroma1.it)

Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Università di Roma La Sapienza, Via Eudossiana 18, 00184 Roma

*Parole chiave: Turbolenza di parete, Polimeri, Leggi di scala*

## SOMMARIO

La turbolenza nelle soluzioni diluite di polimeri è ancora un problema aperto, malgrado il crescente interesse sull'argomento. Molti sforzi sono stati infatti rivolti alla comprensione di aspetti pratici, come la riduzione di resistenza, legati alla modificazioni della struttura della turbolenza di parete ad opera di polimeri a catena lunga. Ad ogni modo, la gran parte dei tentativi non ha portato a risultati conclusivi, suggerendo che, pur rimanendo legati ad interessi applicativi, è necessario adottare un approccio più elementare.

Per questa ragione, recentemente il meccanismo di interazione tra turbolenza e polimeri è stato studiato in un flusso omogeneo e isotropo [1], tale indagine ha portato alla identificazione di una scala al di sotto della quale il flusso di energia verso la microstruttura è più grande del trasferimento classico inerziale. Tale strumento di analisi viene qui esteso a flussi con disomogeneità, come già fatto in [2] per la turbolenza Newtoniana, e viene applicato a risultati numerici ottenuti mediante una simulazione numerica diretta di un modello semplificato del modello FENE-P in un canale. Basandosi su tali dati viene presentata un'analisi sistematica dell'interazione tra polimeri e turbolenza a varie distanze dalla parete. In particolare, tramite una appropriata estensione della equazione di Karmam-Howarth ai flussi disomogenei con polimeri, viene mostrato il bilancio scala per scala dell'energia cinetica turbolenta.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] De Angelis E., Casciola C. M., Benzi R., Piva R. (2004), *Homogeneous isotropic turbulence in dilute in dilute polymers*, Journal Fluid Mech. **531**, pagg 1 - 10.
- [2] Marati N., Casciola C. M., Piva R. (2004), *Energy cascade and spatial fluxes in wall turbulence* Journal Fluid Mech. **521**, pagg 191 - 215.

# Turbulent thermal convection over non-flat surfaces

Giuseppe Stringano

*Politecnico di Bari, DIMeG and CEMeC, Italy*

*E-mail: g.stringano@poliba.it*

Roberto Verzicco

*Politecnico di Bari, DIMeG and CEMeC, Italy*

*E-mail: verzicco@poliba.it*

Giuseppe Pascazio

*Politecnico di Bari, DIMeG and CEMeC, Italy*

*E-mail: pascazio@poliba.it*

*Keywords:* Rayleigh-Bénard convection, heat transfer, turbulence, DNS.

Numerical simulations are conducted in a cylindrical cell heated from below and cooled from above in presence of rough surfaces. Heat transport has important applications in engineering and meteorology and a better understanding of heat transport phenomena would lead to improvements in technological applications such as cooling of thermal machines and micro-electronic components or cooling during a metallurgical fusion. It would also improve the prediction of geophysical motions in oceans and atmosphere. The main dimensionless parameters governing this phenomenon are the Rayleigh number  $Ra$ , the Nusselt number  $Nu$  and the Prandtl Number  $Pr$ . The experiments show that the normalized heat flux  $Nu$ , scales with the Rayleigh number as  $Nu = \alpha Ra^\beta$  with limited variations in  $\alpha$  and  $\beta$ , leading to limited heat fluxes. The use of rough surfaces is a way to enhance the heat flux. Indeed, the interaction between the main shear flow and the rough surface creates secondary vortices that enhance the detachment of thermal plumes from the tip of the rough elements. Our simulations are conducted in a  $\Gamma=0.5$  aspect ratio cylindrical cell filled with gaseous helium ( $Pr=0.7$ ), with five axial-symmetric roughnesses and with an adiabatic sidewall. Rayleigh number ranges from  $2 \cdot 10^7$  to  $2 \cdot 10^{10}$ . The flow is solved using a DNS of the three dimensional unsteady Navier-Stokes equations with the Boussinesq approximation. Numerical probes were positioned all over the cell to provide point-wise measurements of velocity and temperature. A comparison of  $Ra$ - $Nu$  scaling between rough surfaces and smooth ones shows enhanced heat fluxes that cannot be explained by simply considering a bigger contact surface. Moreover, our results will show thermal boundary layer, frequency spectra of temperature and velocity fields and cross correlation between velocity and temperature fluctuations.

## *References:*

Verzicco R. , Camussi R. ,2003, *Numerical experiment on strongly turbulent thermal convection in a slender cell*, Journal of Fluid Mechanics, 477, 19-49.

Y.-B. Du, Tong P, 2003, *Turbulent thermal convection in a cell with ordered rough boundaries*, Journal of Fluid Mechanics, 407, 57-84.

# Analisi statistica della struttura della turbolenza in un canale idraulico a superficie libera

Guido Troiani

*Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Università di Roma La Sapienza, Via Eudossiana 18, 00184 Roma*

*E-mail: [guido.troiani@uniroma1.it](mailto:guido.troiani@uniroma1.it)*

Angelo Olivieri

*INSEAN-Istituto per Studi ed Esperienze di Architettura Navale, Via di Vallerano 139, 00128 Roma*

*Parole chiave: turbolenza, superficie-libera, esponenti di scala.*

Scopo del presente lavoro è lo studio delle proprietà della turbolenza di un flusso (acqua) in prossimità di una superficie libera. L'indagine svolta è di tipo sperimentale ed è stata condotta in un canale idraulico a basso numero di Froude (assenza di onde). Le misure sono state realizzate con un anemometro laser Doppler ed uno a filo caldo. L'analisi dei dati raccolti ha confermato la presenza di una doppia legge di scala negli spettri dell'energia cinetica turbolenta in prossimità della superficie libera. Un ulteriore studio basato sulle funzioni di struttura  $S_p$ , mediante Extended Self Similarity (ESS), ha evidenziato la natura non puramente bidimensionale della turbolenza di superficie libera. D'altro canto le analisi dei momenti  $S_p$  in funzione della separazione suggerisce un peculiare scenario per la cascata di energia soprattutto alle piccole scale.



# Flow field development of an axisymmetric synthetic jet

G. Iuso

*Dipartimento di Ingegneria Aeronautica e Spaziale, Politecnico di Torino*  
*gaetano.iuso@polito.it*

G. M. Di Cicca

*Dipartimento di Ingegneria Aeronautica e Spaziale, Politecnico di Torino*  
*gaetano.dicicca@polito.it*

R. Donelli

*Cento Italiano Ricerche Aerospaziali*  
*r.donelli@cira.it*

*keywords:* synthetic jet, turbulence, hot wire

**SUMMARY:** The flow field development generated by a round synthetic jet has been experimentally investigated. A piston actuator system has been used to generate the synthetic jet, namely the engine of an airplane model constitutes the heart of the actuator, driven by a stepper motor. By means of hot wire anemometry technique, mean streamwise velocity and turbulent fluctuations profiles have been evaluated at different distances from the jet exit section. The jet width growth along the jet axis was also calculated. Triple decomposition has been applied to the velocity signal in order to extract the single contributions, random, coherent and mean part, to the total instantaneous velocity. The study shows that synthetic jet is characterized by common features with a continuous turbulent jet but at the same time also differences are evidenced. Synthetic jet presents in the far field self-similarity behaviour of the mean velocity profiles for shorter distances respect to a continuous turbulent jet.

## *References:*

- [1] Smith B.L. and Glezer, A. 1998. *The formation and evolution of synthetic jets*. Physics of Fluids A, 10:765-777.
- [2] Smith, B. L. and Swift, G. W. (2003). *A Comparison Between Synthetic Jets and Continuous Jets*. Experiments in Fluids, 34:467-472.
- [3] Glezer, A. and Amitay, M. (2002). *Synthetic Jets*. Annual Review of Fluid Mechanics, 34:503-529
- [4] Kim, K. and Sung, H.J., 2003, *Effects of Periodic Blowing from Spanwise Slot on a Turbulent Boundary Layer* AIAA Journal, Vol. 41, No. 10, 1916 - 1924
- [5] A.M. Honohan, M. Amitay, and A. Glezer *Aerodynamic control using synthetic jets* Fluids 2000 Conference and exhibit June 19-22, 2000 Denver, CO
- [6] Smith, B. L. and Glezer, A. E. (2002). *Jet Vectoring Using Synthetic Jets*. JFM, 458:1-34.

**Curriculum:** Associate professor in Fluidynamic. Research fields of interest: wall turbulent structure and regeneration mechanisms; eduction of coherent structures; bluff bodies; three dimensional complex flows; unsteady separated flows; flow control. Measurement techniques: hot wire anemometry for instantaneous velocity and wall shear stress; cold wire for temperature fluctuations; qualitative and quantitative flow visualization techniques; pressure probes.

# A Statistical Method for Turbulence

Amilcare Pozzi

*Dipartimento di Progettazione Aeronautica, Università di Napoli "Federico II", Napoli*  
*E-mail: pozzi@unina.it*

Renato Tognaccini

*Dipartimento di Progettazione Aeronautica, Università di Napoli "Federico II", Napoli*  
*E-mail: rtogna@unina.it*

Daniele Guida

*Centro Italiano Ricerche Aerospaziali (CIRA), Capua*  
*E-mail: d.guida@cira.it*

*Keywords:* turbulence, statistical methods, channel flows

Una possibile alternativa agli attuali metodi di calcolo per la turbolenza sono i metodi stocastici, come la tecnica POD (Lumley 1967). L'assenza di empirismo si trova nella formulazione statistica elaborata nella prima metà del secolo scorso, di Hopf. In questo lavoro si propone un metodo di calcolo di flussi turbolenti che si basa sull'equazione di probabilità ricavata da Hopf. Questa equazione determina la probabilità che si verifichi un campo di velocità tra gli infiniti possibili, senza l'introduzione di alcun dato empirico.

L'analisi stocastica del moto di un fluido incomprimibile in un dominio spaziale  $R$  si articola in più parti. Bisogna innanzitutto introdurre lo spazio delle fasi  $S$  in cui gli elementi (le fasi) sono tutti i possibili istantanei campi di velocità  $V(\underline{x})$  che hanno la proprietà di essere solenoidali e di rispettare le condizioni al contorno sulla frontiera di  $S$ .

La seconda parte dell'analisi riguarda il modo di risolvere l'equazione di probabilità. Hopf ed altri hanno usato come incognita il funzionale caratteristico che determina univocamente la distribuzione di probabilità legata ad ogni singola fase del relativo spazio. Nel nostro lavoro si assume direttamente come incognita la funzione probabilità. Si assume che ognuno degli infiniti coefficienti peso delle fasi sia una variabile aleatoria con una distribuzione di probabilità caratterizzata da due incognite: valor medio e deviazione standard. L'equazione di probabilità fornisce il sistema di equazioni che consente di determinare le incognite il cui numero dipende dall'ordine di approssimazione che si intende raggiungere:

*Curriculum:* Amilcare Pozzi professore ordinario di Gasdinamica, laureato in Ingegneria meccanica, Ingegneria aeronautica ed in Matematica ha pubblicato oltre cento lavori, molti dei quali su riviste internazionali ed una monografia sugli approssimanti di Pade'.

*Curriculum:* Renato Tognaccini professore associato nel settore Fluidodinamica, ha pubblicato circa venti lavori su riviste internazionali, più volte invitato a tenere conferenze o seminari in campo internazionale.

*Curriculum:* Daniele Guida dottore di ricerca presso l'Università di Napoli Federico II, è attualmente ricercatore al CIRA (Centro Italiano Ricerche Aerospaziali) di Capua.

# Analisi di pannelli murari mediante una formulazione FEM di tipo misto

Antonio Bilotta

*Dipartimento di Strutture, Università della Calabria, Rende, Italy*

*E-mail: abilotta@labmec.unical.it*

Marialaura Malena

*Dipartimento di Strutture, Università della Calabria, Rende, Italy*

*E-mail: marialaura.malena@labmec.unical.it*

Raffaele Casciaro

*Dipartimento di Strutture, Università della Calabria, Rende, Italy*

*E-mail: rcasciaro@labmec.unical.it*

Antonio Domenico Lanzo

*DiSGG, Università della Basilicata, Potenza, Italy*

*E-mail: lanzo@unibas.it*

*Keywords:* elementi misti, danno ortotropo.

**SOMMARIO:** In questa nota si presentano i risultati di una prima esperienza di una modellazione ad elementi finiti di tipo misto di pannelli murari a tessitura regolare. Il continuo di riferimento è bidimensionale, in condizione di tensione piana e con una risposta di tipo non lineare caratterizzata mediante un modello di danno ortotropo. Il modello ad elementi finiti di tipo misto è stato opportunamente adattato al modello di danno assunto in maniera da valutare la risposta non lineare dell'elemento direttamente rispetto ai parametri discreti dell'elemento.

## *Riferimenti bibliografici:*

Berto L. (2003), *Modelli di danno per materiali ortotropi. Applicazione al caso della muratura*, PhD thesis, Università di Padova.

Berto L., Saetta A., Scotta R., Vitaliani R. (2002), *An orthotropic damage model for masonry structures*, Int. J. Num. Methods Engrg., **55**, 127–157.

Bilotta A., Casciaro R. (2002), *Assumed stress formulation of high order quadrilateral elements with an improved in-plane bending behaviour*, Comput. Methods Appl. Mech Engrg., **191**, 1523–1540.

Bilotta A., Casciaro R., Lanzo A. D. (2004b), *Mixed finite elements for the elastoplastic analysis of 2D continua*, Proc. Congress ECCOMAS 2004, Jyvaskyla, 24–28 July.

Lourenco, P. B. (1996), *Computational Strategies for Masonry Structures*, PhD thesis, Delft University of Technology.

Lourenco P. B., de Borst R., Rots J. G. (1997), *A plane stress softening plasticity model for orthotropic materials*, Int. J. Num. Methods Engrg., **40**, 4033–4057.

Massart, T. J. (2003), *Multi-scale modelling of damage in masonry structures*, PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven.

## *Ringraziamenti:*

Lavoro svolto nell'ambito del PRIN *Definizione di metodi integrati per la verifica strutturale di edifici in muratura*, finanziamento MIUR 2003082318.

# Un modello omogeneo per pareti in muratura con struttura non periodica

Federico Cluni

*Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Perugia, Italia*

*E-mail: cluni@strutture.unipg.it*

Vittorio Gusella

*Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Perugia, Italia*

*E-mail: guse@unipg.it*

*Parole chiave:* muratura, omogeneizzazione, materiali eterogenei con microstruttura non periodica

Dopo i primi studi di Pande et al. (1989) numerosi ricercatori hanno affrontato il tema della omogeneizzazione della muratura. I modelli proposti, sia in forma analitica che numerica, assumono la condizione di micro-struttura periodica della muratura. Tuttavia, considerando murature storiche la tessitura presenta caratteristiche di non periodicità. In tale contesto è stato recentemente proposto (Cluni & Gusella, 2004) un metodo per la stima dell'elemento di volume rappresentativo (RVE), con cui determinare le caratteristiche meccaniche del continuo omogeneo equivalente mediante convergenza dei moduli elastici stimati attraverso condizioni al contorno essenziali e naturali. Per la verifica dell'affidabilità della stima del RVE, è stato inoltre proposto (Gusella & Cluni, 2004) l'analisi della tessitura muraria nell'ambito dei campi aleatori, introducendo un criterio di convergenza probabilistica. In particolare viene presa in esame la statistica delle caratteristiche geometriche dei componenti (dimensioni della pietre, spessori dei giunti di malta di letto e di testa), mentre la tessitura è descritta attraverso funzioni materiali e funzioni di auto-correlazione e cross-correlazione. La porzione di volume può essere quindi considerata un Elemento di Volume Statistico (SVE) sufficientemente adeguato qualora lo stesso sia compatibile con la statistica del pannello murario. Nella presente memoria il metodo viene esteso all'analisi tridimensionale. A partire da un caso reale, viene considerata una parete muraria con struttura "a sacco" che viene descritta come solido tri-fase. La procedura proposta prevede un approccio a fasi successive per i singoli strati.

## *Riferimenti:*

Cluni, F. & Gusella, V., 2004, *Homogenization of non-periodic masonry structures*, International Journal of Solids and Structures, 41 (2004), 1911-1923.

Gusella, V. & Cluni, F. 2004, *Modelli aleatori e omogeneizzazione di pareti in muratura*, Meccanica Stocastica'04, Gruppo AIMETA di Meccanica Aleatoria – Pantelleria – 31/05-1/06/2004.

Pande, G. et al. 1989, *Equivalent Elastic Moduli for Brick Masonry*. Computers and Geotechnics 8, 243-365.

## *Curriculum vitae:*

Federico Cluni, Dottore di Ricerca in Ingegneria Civile, è attualmente Assegnista di Ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università degli Studi di Perugia.

Vittorio Gusella è Professore di Scienza delle Costruzioni presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia.

# A simple homogenized micro mechanical model for the analysis at the collapse of out-of-plane loaded masonry walls

Gabriele Milani

*Department of Engineering, University of Ferrara, Ferrara, Italy*

*E-mail: gmilani@ing.unife.it*

Paulo Lourenço

*Department of Civil Engineering, University of Minho, Campus de Azurem, Guimarães, Portugal*

*E-mail: pbl@civil.uminho.pt*

Antonio Tralli

*Department of Engineering, University of Ferrara, Ferrara, Italy*

*E-mail: atralli@ing.unife.it*

*Keywords:* masonry, out-of-plane homogenization, limit analysis, linear programming

The prediction of the ultimate load bearing capacity of masonry walls out-of-plane loaded is of great technical relevance. Earthquake surveys have shown that the lack of out-of-plane strength is a primary cause of failure in many traditional forms of masonry. On the other hand, laboratory tests conducted on masonry walls laterally loaded, have demonstrated that failure occurs along a definite pattern of lines, so inspiring approximate (but technically effective) analytical solutions based on the yield line theory (Sinha 1978). For this reason, limit analysis combined with a homogenization approach seems a powerful tool able to predict masonry behavior at collapse.

In this paper, a simple micro-mechanical model in which a FE discretization of the elementary cell is avoided is presented. Masonry thickness is subdivided in several layers and for each layer fully equilibrated micro-stress fields are assumed, a-priori fixing polynomial expressions for the stress in a finite number of sub-domains. Continuity of the stress vector on internal interfaces and anti-periodicity on the boundary surface are further imposed, as well as admissibility conditions for the constituent materials. In this manner, a simple linear optimization problem with few variables is obtained and out-of-plane failure surfaces of masonry are recovered. Several comparisons at a cell level both with experimental data (Gazzola et al. 1985) and kinematic approaches (Sab 2003) are reported. Finally, the homogenized strength domains are implemented in FE limit analysis codes (both upper and lower bound) for the analysis at collapse of entire panels.

## *References:*

Gazzola, E.A., Drysdale, R.G., Essawy, A.S. 1985. *Bending of concrete masonry walls at different angles to the bed joints*, Proc. 3<sup>th</sup> North. Amer. Mas. Conf., Arlington, Texas, USA, Paper 27.

Sinha, B.P. 1978. *A simplified ultimate load analysis of laterally loaded model orthotropic brickwork panels of low tensile strength*, J. Struct. Eng. ASCE, 56B(4), 81-84.

Sab, K. 2003. *Yield design of thin periodic plates by a homogenisation technique and an application to masonry walls*, C.R. Mécanique, 331, 641-646.

# Una strategia multilivello per l'analisi non lineare di pannelli murari

Sandro Brasile

*Dipartimento di Strutture, Università della Calabria, Italy*

*E-mail: [brasile@unical.it](mailto:brasile@unical.it)*

Raffaele Casciaro

*Dipartimento di Strutture, Università della Calabria, Italy*

*E-mail: [rcasciaro@labmec.unical.it](mailto:rcasciaro@labmec.unical.it)*

Giovanni Formica

*Institute of Mathematics, Helsinki University of Technology, Finland*

*E-mail: [gformica@cc.hut.fi](mailto:gformica@cc.hut.fi)*

*Keywords:* multilevel approach, damage and friction nonlinear behaviors, path-following analysis

Viene proposta e discussa una strategia di soluzione multilivello (v. Lopez e Casciaro) per l'analisi non lineare in piano di singoli pannelli murari. Si propongono due livelli di descrizione (locale e globale) che, interagendo tra loro, vengono utilizzati per ridurre selettivamente l'errore sulle equazioni di equilibrio. Il primo livello, che costituisce il livello di riferimento e cioè quello in cui si testa la convergenza dell'intero schema, riprende il modello fine proposto da Formica et al.; il livello globale consiste in una discretizzazione rada ad Elementi Finiti del pannello, le cui caratteristiche sono ricavate tramite una procedura algebrica di identificazione delle caratteristiche meccaniche del livello locale.

Vengono, quindi, presentati alcuni test numerici con l'obiettivo di mostrare l'efficienza della strategia proposta nell'analisi di pannelli murari di dimensioni sufficientemente grandi che rendono impraticabili da un punto di vista computazionale l'utilizzo di codici basati unicamente su discretizzazioni fini. In particolare, si evidenzia come l'efficienza sia legata alla taratura del modello globale e, soprattutto, alle modalità con cui vengono scambiate le informazioni tra i diversi livelli.

Il lavoro, seppur rivolto ad un contesto semplificato di murature ad una testa e solo comportamento in piano, presenta aspetti che possono essere estesi a contesti più generali di edifici in muratura ed, in effetti, si colloca in un progetto di ricerca (PRIN2003) più ampio a carattere nazionale.

## *References:*

Formica, G., Sansalone, V., Casciaro, R. 2002. *A mixed solution strategy for the nonlinear analysis of brick masonry walls*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 191: 5847-5876.

Lopez, S. & Casciaro, R. 1997. *Algorithmic aspects of adaptive multigrid finite element analysis*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 40: 919-936.

*Curriculum vitae:* Brasile è studente del Dottorato di Ricerca in Meccanica Computazionale (M.C.) e si occupa di FEM e di sviluppo di codici ad uso generalizzato; Casciaro è professore ordinario ICAR/08 e si è occupato di FEM in problemi di analisi non lineare delle strutture; Formica è Dottore di Ricerca in M.C. e si occupa attualmente di Meccanica della Frattura come Assegnista di Ricerca.

# The spherical asperity interface model for the numerical analysis of blocky structures

Giuseppe Fileccia Scimemi, Santi Rizzo & Giuseppe Giambanco

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Palermo, Italy*

*E-mails: gfs@diseg.unipa.it , santiriz@unipa.it , ggiamb@diseg.unipa.it*

*Keywords:* blocky structures, interface models, asperities.

The presence of singularity surfaces with reference to the displacement field is a characteristic of a number of structural systems. Strong discontinuities are present in the rock masses and in old masonry structures where dry joints connect the blocks or the mortar ageing suggests to neglect the adhesion properties.

For this kind of structures, the central problem is how to conjugate the mechanical response of the elements constituting the structure and that of the contact between the elements themselves.

In the literature, two different approaches are envisaged: The *continuum approach* [1], [2] which intentionally makes no distinction between elements and joints but smears the effects of joint presence through the formulation of a fictitious homogeneous and continuous material equivalent to the actual one. The *discrete* [3] approach where the structure is considered as an assembly of blocks and their interaction is regulated by apposite interface laws. This rigorous and detailed structure modelling is generally a time consuming analysis but in many cases it represents the only possible approach for obtaining a realistic response of the structure and to consider the several mechanical aspects that the real problem presents. The present work shows that the discrete approach in the framework of finite element analysis can be an effective structural analysis tool if the interface laws are opportunely regularized and integrated making use of the classical tools of computational plasticity.

The interface laws adopted in the present study are the derived from the *double asperity* interface model [4]. The simplified version of this interface model is briefly illustrated in the text and the application of the FEM code to an old masonry column is presented.

## *Bibliografia:*

[1] P. Fuschi, G. Giambanco & S. Rizzo, 1995. “*Nonlinear finite element analysis of no-tension masonry structures*”, *Meccanica*, 30: 233-249.

[2] Cerrolaza M., Sulem J. & Elbied A., 1999. “*A Cossierat non-linear finite element analysis software for blocky structures*”, *Advances in Engineering Software*, 30: 69-83.

[3] Chuhan Z., Pekau O.A., Feng J. & Guanglun W., 1997. “*Application of distinct element method in dynamic analysis of high rock slopes and blocky structures*”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16: 385-394.

[4] Mròz Z. & Giambanco G., 1996. “*An interface model for analysis of deformation behavior of discontinuities*” *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*: 1-33.

# Dinamica magneto-elastica del Levitron

Elvio Bonisoli

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: elvio.bonisoli@polito.it*

Cristiana Delprete

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: cristiana.delprete@polito.it*

Alessandro Vigliani

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: alessandro.vigliani@polito.it*

*Keywords:* magneti permanenti, stabilità, effetto giroscopico

Si presenta un modello analitico in grado di descrivere il comportamento dinamico di un dispositivo di sospensione magnetica passiva rotante, conosciuto con il nome commerciale Levitron<sup>TM</sup>, costituito da un giroscopio magnetico orientato verticalmente, in grado di levitare sospeso al di sopra di un secondo magnete permanente di dimensioni maggiori, con magnetizzazione anch'essa verticale e posto in repulsione rispetto all'elemento sospeso.

Per un determinato campo di velocità di rotazione del giroscopio è possibile osservare sperimentalmente che, al di sopra del magnete fisso, esiste una regione limitata in cui il sistema presenta un comportamento dinamico stabile in apparente contraddizione al noto teorema di Earnshaw [1842] sull'impossibilità di ottenere configurazioni di equilibrio stabile con l'utilizzo di soli materiali magnetici passivi.

Il modello analitico proposto in questo lavoro è costituito da un modello dinamico del giroscopio accoppiato ad un modello non lineare che descrive l'interazione magnetica. Il modello dinamico della trottola è sviluppato seguendo l'approccio Lagrangiano, adottando una formulazione a 6 gradi di libertà sulla base del lavoro di Genta *et al.* [1999]. Per descrivere le interazioni magneto-elastiche con il rotore levitante, si utilizza un modello magnetico basato sull'analogia delle correnti equivalenti.

Si presenta quindi l'analisi non lineare e linearizzata del modello che consente di descrivere le cause fisiche corrispondenti all'esistenza di due velocità di rotazione critiche per la stabilità del sistema e di determinarne i valori numerici. Si riporta inoltre un'analisi parametrica delle caratteristiche geometriche e inerziali del giroscopio finalizzata all'ottimizzazione del campo di stabilità del sistema.

Infine si presentano i risultati numerici relativi al modello non lineare del sistema: il comportamento dinamico appare influenzato da accoppiamenti tra le diverse forme modali.

## *Riferimenti bibliografici:*

Earnshaw S. (1842), "On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether", *Trans. Cambridge Philos. Soc.*, 7(116), pagg. 97-112.

Genta G., Delprete C., Rondano D. (1999), "Gyroscopic stabilization of passive magnetic levitation", *Meccanica*, 34, pagg. 411-424.



# Modello e analisi della stabilità di una sospensione magnetica passiva

Elvio Bonisoli

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: elvio.bonisoli@polito.it*

Cristiana Delprete

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: cristiana.delprete@polito.it*

Alessandro Vigliani

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: alessandro.vigliani@polito.it*

*Keywords:* magneti permanenti, stabilità, diamagnetici

Si presenta un modello analitico e la validazione sperimentale dell'interazione magneto-elastica di una sospensione completamente passiva costituita da materiali magnetici duri a base di terre-rare e materiali diamagnetici.

Come noto dal teorema di Earnshaw [1842] e dalle considerazioni di Braunbeck [1939], la stabilità di sospensioni puramente ferro-magnetiche è ottenibile esclusivamente attraverso sistemi ausiliari di controllo attivo; tuttavia, recentemente è stata realizzata una sospensione elasto-magnetica completamente passiva, senza quindi immissione nel sistema di energia esterna, utilizzando particolari elementi diamagnetici.

Nel presente lavoro si analizza il comportamento statico e dinamico di una sospensione costituita da un magnete permanente posto verticalmente in attrazione rispetto ad un secondo magnete, di maggiori dimensioni, posizionato al di sopra di questo. Per conseguire la stabilità del sistema si utilizzano due pastiglie diamagnetiche, una posta inferiormente al magnete sospeso, l'altra interposta verticalmente tra i due magneti della sospensione.

Il modello magnetico è sviluppato sull'analogia delle correnti equivalenti e permette di determinare l'induzione magnetica in forma analitica per magneti permanenti di geometria semplice; in conseguenza dell'approccio scelto, si presenta l'estensione dello stesso modello per stimare gli effetti indotti sui materiali diamagnetici. Attraverso il modello dinamico magneto-elastico, si determina qualitativamente e quantitativamente l'effetto stabilizzante introdotto dai materiali diamagnetici; viene inoltre analizzato il comportamento dinamico linearizzato e non-lineare del sistema.

Si presenta, infine, la validazione dei risultati mediante un banco-prova realizzato *ad hoc*, grazie al quale si verifica che, in determinate configurazioni, esiste la possibilità di avere due posizioni di equilibrio verticali distinte, al variare del traferro presente tra il magnete sospeso e i materiali diamagnetici.

*Riferimenti bibliografici:*

Braunbeck W. (1939), *Freischwebende Krper in electrischen and magnetischen feld*, Z. Phys., 112, pagg. 753-763.

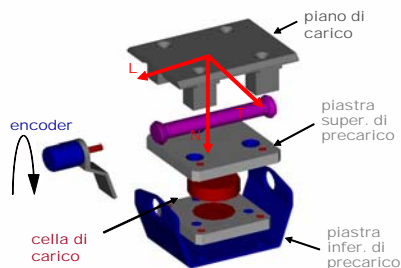
Earnshaw S. (1842), *On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether*, Trans. Cambridge Philos. Soc., 7(116), pagg. 97-112.

# Analisi delle Componenti Tri-Assiali della Forza ai Pedali durante la Pedalata in un Ciclo-Ergometro Innovativo

Giovanni Mimmi, Lucia Frosini, Carlo Rottenbacher, Andrea Negri, Manuel Regazzoni  
Dipartimento di Meccanica Strutturale, Università di Pavia, Italia  
E-mail: mimmi@unipv.it

*Parole chiave:* Biomeccanica, riabilitazione, ciclo-ergometro, medicina dello sport

**SOMMARIO:** La presente memoria illustra l'impiego di un ciclo-ergometro con pedali innovativi, strumentati mediante speciali celle di carico di tipo piezoelettrico con misura tri-assiale delle forze. I primi risultati ottenuti vengono illustrati in questa memoria e evidenziano in particolare gli spunti di originalità rispetto alle ricerche svolte in precedenza dagli autori. Tali precedenti studi, realizzati attraverso prove sperimentali su un ciclo-ergometro strumentato con *encoder* e celle di carico mono-assiali, hanno portato alla definizione di indicatori quantitativi del grado di riabilitazione degli arti inferiori e della "qualità" del movimento (forze sui pedali, momenti agenti sulle articolazioni e posizione angolare dei pedali durante l'intero movimento) nel campo della medicina dello sport. Il presente lavoro sperimentale sul nuovo ciclo-ergometro analizza dati quantitativi relativi alle due componenti, normale e tangenziale sul pedale, agenti nel piano sagittale, nonché alla componente laterale, normale a tale piano. Tali dati potranno essere impiegati come nuovi indicatori, sia in campo medico-riabilitativo, sia nel campo della medicina dello sport, nell'ottica della ottimizzazione della postura e del miglioramento delle prestazioni durante la pedalata.



Vista in esplosivo di un pedale strumentato

## *Bibliografia:*

- Mimmi, G., Rottenbacher, C., Frosini, L. & Negri, A. 2004. *An original 3-D cycle ergometer (3-DCE) for three-axial force measurements*, Proc. BioMech 2004 – The IASTED International Conference on Biomechanics, Honolulu, USA.
- Hull, M.L. & Jorge, M. 1985. *A method for biomechanical analysis of bicycle pedalling*, Journal of Biomechanics, 18(9): 631-644.
- Doria, A. & Lot, R. 2001. *The generalized torque approach for analyzing the results of pedalling tests*, Journal of Biomechanical Engineering, 123: 33-39.

# Identificazione del sistema mano-braccio di un pilota di un veicolo a due ruote tramite manopola strumentata

Alessandro Bechi, Francesca Di Puccio, Paola Forte

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, Università di Pisa, Italia*

*E-mail: alessandro.bechi@ing.unipi.it, f.dipuccio@ing.unipi.it, p.forte@ing.unipi.it*

*Keywords:* vibrazioni sull'uomo, sistema mano-braccio, impedenza, comfort, veicolo a due ruote.

L'esposizione umana alle vibrazioni rappresenta uno dei principali problemi d'interazione tra l'uomo e le macchine; in particolare le vibrazioni trasmesse all'uomo, usualmente distinte tra vibrazioni tutto corpo e mano-braccio, possono rivelarsi dannose o sconcertevoli.

Questo lavoro si colloca all'interno di una collaborazione con Piaggio, volta ad individuare l'impedenza meccanica del sistema mano-braccio durante la guida di un veicolo a due ruote, necessaria per ricavare un modello a parametri concentrati da utilizzare in fase di *design*. In letteratura non esistono riferimenti simili al caso in esame e quindi è stato necessario progettare e realizzare un'apposita manopola strumentata, direttamente interfacciabile con il manubrio del veicolo, in grado di misurare la forza di afferraggio (*grip*) e la forza risultante trasmessa dal manubrio alla mano.

Dopo prove statiche di taratura con carichi applicati noti, la manopola è stata utilizzata in prove di *grip* da parte dell'operatore sia in condizioni statiche sia dinamiche. Dalle prime è emerso che, nonostante l'operatore mantenga la solita postura e cerchi di riprodurre sempre le stesse forze, il peso del sistema mano-braccio e la forza di *grip*, sono parametri non del tutto stazionari. Le seconde sono state condotte con l'impiego di uno shaker impostato per riprodurre onde sinusoidali monofrequenza, e con determinato valore di *grip*. Dall'elaborazione dei dati ricavati in ogni singola prova ad una determinata frequenza d'eccitazione, è stato ricavato lo spettro dell'impedenza meccanica in funzione della frequenza, da poter anche confrontare con i dati di letteratura. L'andamento ottenuto, crescente con la frequenza, è in accordo con quello ottenuto da altri ricercatori. Ulteriori prove di laboratorio con diversi operatori potranno confermare i risultati preliminari fin qui ottenuti.

## *Riferimenti bibliografici:*

Griffin M. J., 1996. *Handbook of Human Vibration*, Academic Press, Londra.

Di Puccio F., Forte P. Pratesi A., 2002. *Assessment of discomfort due to motor scooter hand-transmitted vibration*, Automotive and Transportation Technology Congress SAE 2002 ATT02-124.

Gurram R., Rakheja S., Brammer A.J., 1995. *Driving-point mechanical impedance of the human hand-arm system: synthesis and model development*, Journal of Sound and Vibration, 180(3): 437-458.

## *Curriculum vitae:*

A. Bechi, borsista neolaureato in Ingegneria Aerospaziale, F. Di Puccio, ricercatrice confermata di Meccanica Applicata, P. Forte, professore associato, si occupano di tematiche di ricerca inerenti all'interazione uomo-macchina.

# Technical and Economical Problems in a Passive Maglev Train

Roberto Bassani

Enrico Ciulli

*Department of Mechanical, Nuclear and Production Engineering, University of Pisa, Italy*

*E-mails: r.bassani@ing.unipi.it ; e.ciulli@ing.unipi.it*

Antonino Musolino

Rocco Rizzo

*Department of Electrical Systems and Automations, University of Pisa, Italy*

*E-mails: musolino@dsea.unipi.it; rocco.rizzo@dsea.unipi.it*

*Keywords:* MAGLEV, permanent magnets, passive control.

**SUMMARY:** This paper deals about some technical and economical problems with the operation of a passively controlled MAGLEV transportation system. In such system, the magnetic suspension is assured by the repulsion of permanent magnets both on the guideway and on the vehicle and the presence of an aluminum sheet around the magnets on the guideway, allows to overcome the intrinsic instability of the system once the vehicle has reached a proper speed. The detailed structure of the proposed system is described and the main results in terms of forces and stiffness, obtained by means a FE code, are discussed. Finally, some indications about economical problems related to the cost of different parts of the system are reported and a comparison of the costs between the proposed system and a standard Electromagnets-based Maglev system is presented.

## *References:*

- [1] R. Bassani, A. Musolino, R. Rizzo, 2003. *Controlled Passive Maglev Transport*, International Congress MTT2003-Mech. and Trib. of Transport Systems-2003- Rostov on Don, Russia.
- [2] S. Earnshaw, *On the nature of molecular forces which regulate the constitution of luminofeferous ether*, Trans. Comb. phil. Soc., 7. 1842, 97-112
- [3] H. Tokoro, K. Uchida *High energy product Nd-Fe-B sintered magnets produced by wet compacting process*, IEEE Trans on Magn. vol. 37, Jul. 2001, pp. 2463-2466.
- [4] R. Bassani, 2000. *Permanent Magnetic Levitation and Stability*, NATO Adv. Study Inst. on Fund. of Trib. and Bridg., Kluwer Academic Publishers, pp. 899-913.
- [5] R. Bassani, 2005. *Stability of PM-Bearings under Parametric excitations*, Accepted for pubbl. on Trib Trans. STLE.

## *Curriculum vitae:*

- *Roberto Bassani* is a full Professor of Applied Mechanics at University of Pisa, Italy. His main research activity is Tribology (Lubrication, Friction and Wear).
- *Enrico Ciulli* is a Professor of Applied Mechanics at University of Pisa, Italy. His main research activity is Tribology (Lubrication and Friction).
- *Antonino Musolino* is a Professor of Electrical Engineering at University of Pisa, Italy. His main research activities deal with Numerical Methods in Electromagnetism.
- *Rocco Rizzo* is a Post-doctoral Researcher at University of Pisa, Italy. His main research activities deal with Applied Electromagnetism.

# On the limits of the articular surface approximation of the human knee passive motion models

Andrea Ottoboni

*Department of Mechanical Engineering-DIEM, University of Bologna, Italy*  
*E-mail: andrea.ottoboni@mail.ing.unibo.it*

Vincenzo Parenti Castelli

*Department of Mechanical Engineering-DIEM, University of Bologna, Italy*  
*E-mail: vincenzo.parenticastelli@mail.ing.unibo.it*

Alberto Leardini

*Movement Analysis Laboratory, Rizzoli Orthopedic Institutes Bologna, Italy*  
*E-mail: leardini@ior.it*

**Keywords:** Passive Motion, Parallel Mechanism, Human Knee

An in-depth study of the human joints requires complex mathematical models, which can be helpful both in prosthesis design and surgical planning. Recently, mathematical models of the knee joint based on one-dof equivalent mechanisms have been presented to replicate the passive relative motion of the femur and tibia. Knee passive motion is defined as the motion of the knee in virtually unloaded conditions. These mechanisms rely upon the assumptions that some fibres within the Anterior Cruciate Ligament (ACL), Posterior Cruciate Ligament (PCL) and Medial Collateral Ligament (MCL) are isometric during passive motion and condyle contact surfaces are rigid. The shapes of the condyle surfaces may be described with increasing accuracy which consequently leads to models with increasing complexity. In this paper, the comparison of experimental measurements with simulation results from different models featuring better and better surface approximations are presented, in order to highlight whether a limit exists beyond which a further approximation of the surface description is not beneficial to the passive motion description.

## *Curriculum vitae:*

Andrea Ottoboni received his Laurea degree (2003) in Mechanical Engineering at the University of Bologna. He is currently a PhD student at the University of Bologna, Italy.

Vincenzo Parenti-Castelli received the Laurea degree (1973) cum laude in Mechanical Engineering at the University of Bologna. He is full professor (1989) of Mechanical Engineering at the University of Bologna, Italy.

Alberto Leardini has an Electronic Engineering Degree from the University of Bologna (1986) and a DPhil in Engineering Science from Oxford University (2000). Since 1990 he has worked as a research engineer at the Movement Analysis Lab IOR, Bologna, Italy.

# Comportamento non lineare di un albero con cuscinetti lubrificati

Furio Vatta

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: furio.vatta@polito.it*

Alessandro Vigliani

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: alessandro.vigliani@polito.it*

*Keywords:* lubrificazione, dinamica dei rotori, stabilità

È noto che un albero elastico avente un rotore in mezzeria e cuscinetti lubrificati alle estremità è soggetto ad un moto, detto *whirling motion*, che consiste in una precessione dell'asse congiungente i perni attorno all'asse congiungente i cuscinetti.

Newkirk e Taylor [1925] furono i primi ad osservare che tale moto si verifica quando la velocità angolare dell'albero supera il doppio della pulsazione propria del sistema elastico con massa concentrata, costituito da albero e rotore. Lo studio della stabilità del *whirling motion* è stato affrontato da diversi autori. Robertson [1933] concluse che tale moto è instabile per qualsiasi valore della velocità di rotazione  $\omega$ ; Poritsky [1953], invece, giunse alla conclusione che per velocità angolari inferiori al doppio della velocità critica il *whirling motion* è stabile. Sweet e Genin [1971] hanno dimostrato che il sistema composto di un rotore portato da un albero elastico rotante su cuscinetti lubrificati, in presenza di una forza esterna dissipativa e nell'ipotesi di considerare piccoli valori del parametro di eccentricità, è stabile per tutti i valori della velocità angolare superiori ad un certo valore limite  $\omega_M$ : qualora il parametro di eccentricità non sia trascurabile rispetto all'unità, i suddetti Autori hanno dimostrato che il perno, per tutti i valori di velocità angolare inferiori ad un certo valore limite  $\omega_m$ , tende a portarsi su una traiettoria circolare avente raggio uguale al gioco. Rimane pertanto da chiarire il comportamento del perno per velocità comprese nell'intervallo tra  $\omega_M$  e  $\omega_m$ .

Scopo del presente lavoro è fornire una risposta a tale interrogativo: a tal fine si adotta lo stesso modello matematico proposto da Sweet e Genin [1971]. Le equazioni differenziali non lineari che determinano la legge del moto del perno sono integrate numericamente; i risultati della simulazione si discostano sensibilmente da quelli calcolati mediante la linearizzazione del modello.

## *Riferimenti bibliografici:*

Newkirk B. L., Taylor D.D. (1925), *Shaft Whipping Due to Oil Action in Journal Bearing*, General Electric Review, 28, pagg.559-568.

Poritsky H. (1953), *Contribution to the Theory of Oil Whip*, Trans. Amer. Soc. Mech. Eng., 75, pagg.1153.

Robertson D. (1933), *Whirling of a Journal in a Sleeve Bearing*, Philosophical Mag., 15, pagg.113.

Sweet J., Genin J. (1971), *Squeeze Film Bearing for the Elimination of Oil Whip*, J. of Lubrication Tech., 93, pagg.252-561.

# Dinamica non lineare di un giroscopio MEMS

Francesco Braghin

*Dipartimento di meccanica, Politecnico di Milano*

*E-mail: francesco.braghin@polimi.it*

Elisabetta Leo

*Dipartimento di meccanica, Politecnico di Milano*

*E-mail: elisabetta.,leo@polimi.it*

Ferruccio Resta

*Dipartimento di meccanica, Politecnico di Milano*

*E-mail: ferruccio.resta@polimi.it*

*Keywords:* giroscopio MEMS, comportamento hardening, dinamica non lineare, equazione di Duffing

**SOMMARIO:** Il presente lavoro ha affrontato la progettazione meccanica di un giroscopio MEMS traslazionale. All'interno del giroscopio è presente una massa sospesa tramite travi; quando la massa viene spostata significativamente rispetto alla posizione di equilibrio, si manifesta la caratteristica non lineare degli elementi di supporto; conseguentemente il picco di risonanza del sistema non è più verticale ma risulta ripiegato verso frequenze maggiori. Questa proprietà viene sfruttata per accordare le frequenze di risonanza lungo la direzione di attuazione del giroscopio e lungo la direzione di misura. È infatti opportuno che le due suddette frequenze di risonanza coincidano per aumentare lo spostamento della massa sospesa lungo la direzione di misura. Una struttura di prova è stata appositamente progettata e realizzata allo scopo di spostare significativamente la massa e evidenziare quindi il comportamento non lineare delle travi di supporto; la vibrazione non lineare del giroscopio è stata quindi studiata sia numericamente che sperimentalmente.

## *Curricula vitae:*

Francesco Braghin: nel 2001 è stato nominato ricercatore universitario presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. L'attività scientifica riguarda l'interazione pneumatico-strada e ruota-rotai, la dinamica dell'autoveicolo e dei treni e il controllo di tali sistemi meccanici al fine di migliorarne le prestazioni e i livelli di sicurezza attiva e passiva. Infine, l'attività di ricerca riguarda la micromeccanica sia per quanto riguarda lo studio della dinamica dei microcomponenti sia per quanto riguarda il controllo degli stessi

Elisabetta Leo: dal 2004 svolge il Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici. L'attività scientifica riguarda la stabilità dinamica dei veicoli e il controllo dei sistemi meccanici, con applicazione ai veicoli terrestri e alla micromeccanica.

Ferruccio Resta Dal 2001 è Professore Associato in Meccanica Applicata al Politecnico di Milano, dove svolge attività di ricerca nelle aree della dinamica delle macchine, dei sistemi meccanici ed elettromeccanici, della meccanica e diagnostica del macchinario, della meccanica del veicolo, dei sistemi di controllo e attuazione e nel campo dell'interazione fluido-struttura.

# Non linear dynamics of spur gears

*Francesco Pellicano*

Department of Mechanical and Civil Engineering, University of Modena and Reggio Emilia, Italy  
E-mail: pellicano.francesco@unimore.it

*Faggioni Marcello*

Department of Mechanical and Civil Engineering, University of Modena and Reggio Emilia, Italy  
E-mail: faggioni.marcello@unimore.it

*Bonori Giorgio*

Department of Mechanical and Civil Engineering, University of Modena and Reggio Emilia, Italy  
E-mail: bonori.giorgio@unimore.it

*Keywords:* Gear, profile error, backlash, bifurcation, non-smooth

## Abstract

In the present study a single degree of freedom oscillator with clearance type non-linearity is considered. Such an oscillator represents the simplest model able to analyze a single teeth gear pair, neglecting: bearings and shafts stiffness; multi mesh interactions. The test case considered in the present work represents an actual gear pair that belongs to a gear box of an agricultural vehicle; such gear pair gave rise to noise problems. The main gear pair characteristics (mesh stiffness and inertia) have been evaluated after an accurate geometrical modeling and a finite element analysis, including contact mechanics. Values for the mesh stiffness are evaluated for different positions along one mesh cycle and a Fourier expansion of the time varying stiffness is carried out. The dynamical model presents a piecewise linear periodic stiffness and a constant viscous damping. A direct numerical integration approach and a smoothing technique have been considered to obtain the dynamic scenario. Bifurcation diagrams of Poincaré maps are plotted according to some sample case study from literature. Moreover continuation techniques have been applied to an HBM method in order to evaluate the whole scenario for which concern periodic responses. came from New York to photograph him and his sculpture". Her enthusiasm was so great that all of us got caught up in it.

## *Curriculum vitae*

Francesco Pellicano was is Aeronautical Engineering and Ph.D. in Theoretical and Applied Mechanics. He is currently Associate Professor at the University of Modena and Reggio Emilia. He was involved in investigations concerning: nonlinear vibrations fluid structure interaction; Chaos; Gears. He published a Book, more than 30 Journal papers and more than 50 conference papers.



# Sulla risposta in frequenza di sistemi meccanici con dissipazione non lineare

Francesco Sorge

*Dipartimento di Meccanica, Università di Palermo*

*Posta elettronica: [sorge@dim.unipa.it](mailto:sorge@dim.unipa.it)*

*Parole chiave:* vibrazioni, attrito misto viscoso-coulombiano, risposta in frequenza, smorzatori dinamici.

Molti sistemi meccanici presentano azioni dissipative di tipo non lineare che spesso, con buona approssimazione, è lecito esprimere in funzione della velocità  $v$  nella forma  $F_d = -(F_{d0} + c |v|^n) \operatorname{sgn}(v) - F_{st} (1 - |\operatorname{sgn}(v)|)$ , ove  $F_{d0}$  è il valore della forza d'attrito cinetico per  $v \rightarrow 0$ ,  $c$  ed  $n$  sono opportuni coefficienti ed  $F_{st}$  è la forza d'attrito statico che si desta durante eventuali fasi d'arresto ( $\operatorname{sgn}(v) = 0$ ), il cui valore si adegua continuamente a quelli delle altre azioni esterne e deve essere necessariamente compreso tra i limiti d'aderenza ( $-F_{ad} \leq F_{st} \leq F_{ad}$ ).

Nel caso d'oscillazioni forzate con attrito coulombiano, puro ( $c = 0$ ) o combinato con attrito viscoso ( $c \neq 0$ ,  $n = 1$ ), la non-linearità si riduce ad una linearità parziale a tratti ed è possibile determinare, a partire da qualsivoglia condizione iniziale, una successione di soluzioni parziali esatte, valedoli nelle singole fasi di *slip* ed eventualmente di *stick*, da raccordare tutte fino alla derivata prima. Sotto certe condizioni ( $c = 0$ ,  $F_{d0} = F_{ad}$ , e frequenze d'eccitazione sufficientemente grandi) tali soluzioni sono ben note in letteratura (Den Hartog). Tuttavia alle basse frequenze, quando il coefficiente d'aderenza è maggiore di quello d'attrito cinetico, condizione che senz'altro è sempre da presumere nella pratica, possono presentarsi situazioni più complesse, in quanto possono aversi uno o anche più arresti per semiciclo e può venir meno l'unicità e talvolta anche l'esistenza delle soluzioni oscillatorie, nel senso che, a seconda delle condizioni iniziali, le forme d'onda possono mostrare periodi d'arresto simmetrici o asimmetrici, in numero diverso per le semionde positive e negative, e può anche succedere che il moto si arresti per non più riprendere.

L'analisi può essere estesa ai sistemi a due o più gradi di libertà (ad es. agli smorzatori dinamici d'oscillazioni) e con l'impiego d'adequati metodi numerici, come ad esempio quello del gradiente, si può procedere alla ricerca dei valori ottimali dei coefficienti d'attrito viscoso e secco ai fini della limitazione delle ampiezze massime d'oscillazione in un prefissato intervallo di frequenze. La maggiore complessità rispetto ai sistemi ad un solo grado di libertà è compensata in parte dal fatto, verificabile mediante sperimentazione numerica, che le soluzioni oscillatorie sono simmetriche e presentano al più un solo arresto per semiciclo o assenza totale di moto relativo.

*Curriculum vitae dell'autore:* Professore straordinario di Meccanica Applicata alle Macchine presso l'Università di Palermo. Attività di ricerca su trasmissioni meccaniche, meccanismi, vibrazioni, lubrificazione, tribologia, turbomacchine. Memorie su riviste nazionali ed internazionali, interventi in congressi nazionali ed internazionali.

# Studio di problemi vibro-acustici nelle pompe centrifughe per impiego automobilistico

Riccardo Adamini, Massimo Antonini, Roberto Bussola, Rodolfo Faglia, Edoardo Piana, Monica Tiboni.

*Dipartimento di Ingegneria meccanica, Università degli studi di Brescia, Italia*

*E-mail: adamini ,antonini, bussola, rfaglia, piana, mtiboni @ing.unibs.it*

*Parole chiave:* pompe acqua, diagnostica, test vibro-acustici, premistoppa, vibrazioni auto-eccitate

Oggetto principale della presente memoria è l'analisi di aspetti vibro-acustici di una pompa acqua, destinata in particolare ad impieghi automobilistici. La specifica natura del problema richiede la disponibilità di un idoneo banco di test per la misura delle caratteristiche salienti della pompa stessa, da cui la prima fase del lavoro e della memoria, in cui si presenta la struttura essenziale del banco ideato. In seconda battuta il banco viene impiegato per il compimento di misure su un campione di pompe scelto ad hoc. Si mostrerà di seguito come sia possibile diagnosticare, attraverso il banco, la presenza di malfunzionamenti, in particolare di rumorosità legata al premistoppa. Si tenterà quindi di analizzare in maggior dettaglio questo specifico difetto, proponendo un modello in grado di spiegare uno dei fenomeni associati al premistoppa, quello dello "squeal" tipicamente presente a basse velocità. L'analisi sperimentale evidenzierà altresì la presenza di una seconda rumorosità, talvolta in compresenza dello squeal, talvolta presente singolarmente. Si sottolineerà come le due rumorosità siano ben distinguibili attraverso l'accostamento degli spettri in frequenza ottenuti al variare della velocità (diagramma waterfall) e come l'attrito rivesta un ruolo discriminante sul comportamento acustico.

## Bibliografia:

G. Capone, V. D'Agostino, S. Della Valle, D. Guida, Stick slip instability analysis, *Meccanica* N° 27 pg 11-118,1992.

E.C. Fitch, *Proactive Maintenance for Mechanical Systems*, Elsevier Science Publisher, Oxford UK 1992.

S.S. Rao, *Mechanical Vibration*, Addison-Wesley Publishing, 1995.

*Curriculum vitae:* Massimo Antonini si è laureato in Ingegneria Meccanica il 22/12/1999, ha conseguito il dottorato di ricerca in Meccanica Applicata nell'anno accademico 2003-2004 presso l'Università degli Studi di Brescia; attualmente svolge attività di ricerca presso la medesima Università.

# Vibrazioni Torsionali in Alberi Rotanti causati da cricche trasversali

Nicolò Bachschmid

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 34, 20156 Milano*

*E-mail: nicolo.bachschmid@polimi.it*

Paolo Pennacchi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 34, 20156 Milano*

*E-mail: paolo.pennacchi@polimi.it*

Ezio Tanzi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 34, 20156 Milano*

*E-mail: ezio.tanzi@mecc.polimi.it*

*Keywords: rotore, cricca, sidebands*

Negli alberi rotanti orizzontali, quando i momenti flettenti stazionari dovuti al peso sono prevalenti rispetto ai carichi dinamici, la cricca si apre e si chiude una volta per giro, secondo il fenomeno detto di “respiro”. La rigidezza dell’elemento criccato (se si assume una rappresentazione ad elementi finiti del rotore) varia periodicamente. In presenza di forze stazionarie, come ad esempio il peso nelle macchine orizzontali, e di coppie stazionarie, come ad esempio il momento motore, la cricca innesca vibrazioni flessionali e torsionali. Se una componente armonica è presente nella coppia motrice, allora la variazione periodica della rigidezza torsionale si combina alla componente armonica della coppia dando luogo a sidebands nello spettro della vibrazione torsionale. Infine, anche un meccanismo d’accoppiamento insorge tra la vibrazione torsionale e quella flessionale: quando la cricca è aperta, il risultante delle azioni tangenziali (dovute alle coppie applicate e/o alle forze di taglio) è eccentrico rispetto all’asse del rotore, determina l’eccitazione delle vibrazioni torsionali e causa infine l’accoppiamento tra vibrazioni torsionali e flessionali.

Lo scopo di questo lavoro è sviluppare un modello semplificato che sia in grado di riprodurre il reale meccanismo del respiro della cricca e che consideri anche i coefficienti d’accoppiamento flessor-torsionale dipendenti dal respiro per poterlo successivamente introdurre in un codice di calcolo per la simulazione del comportamento dinamico di rotori.

*Curriculum vitae:* Il prof. N. Bachschmid, ordinario di Meccanica Applicata alle Macchine dal 1986, è attualmente docente di “Regolazione, Dinamica e Diagnostica delle Macchine Rotanti” di “Controllo del Rumore” e di “Meccanica delle Vibrazioni” nonché presidente CCS Ing. Mecc. presso la Facoltà di Ingegneria Industriale del Politecnico di Milano, è autore di numerose pubblicazioni nel campo delle Vibrazioni, della Dinamica dei rotori e della Diagnostica, è stato ed è coordinatore di diverse ricerche finanziate nel campo della dinamica dei rotori ed è presidente del Sottocomitato Diagnostics del Comitato Rotordynamics dell’IFTOMM.

# Bem simulations over unbounded domains

Alberto Salvadori, Angelo Carini, Anna Feriani

*Department of Civil Engineering, University of Brescia, 25123 Brescia*

Alessandra Aimi, Mauro Diligenti

*Department of Mathematics, University of Parma, 43100 Parma*

*Keywords:* BEM, hyper-singular integrals, unbounded domains.

Modelling unbounded domains is an important issue in engineering: the present work – that concerns hypersingular boundary integral equations but has interesting applications in the framework of the finite element method, too - deals with elastostatic problems as a first step towards the simulation of elastodynamic problems. In two-dimensions it is easy to see that in general stresses vary about infinity as  $r^{-1}$  and thus so will strains. On integration the displacement field will have a logarithmic form. Since  $\log(r)$  increases with  $r$  this gives the paradoxical result that the displacements at an infinite radius will, themselves, be infinite (*Bettess [1992]*). Such a paradox led to seek infinite elements with displacement approximation behavior of the form  $r^{-1}$  even in two-dimensional problems, starting from the pioneering works - about FEM as well as about standard collocation BEM - up to the most recent ones; infinite elements with reciprocal decaying shape functions are currently implemented in many commercial codes, see e.g. *Hibbitt et al. [2004]* . An infinite element which incorporated a logarithmic behavior seems not to have been devised yet.

In the present work, an infinite element with constant and logarithmic shape functions is proposed and implemented by means of analytical and numerical integration schemes in the framework of the standard collocation boundary integral approach, as well as of the symmetric Galerkin BEM. The formulation of the problem for the symmetric Galerkin BEM deserves special attention in the choice of the bilinear form and some peculiar aspects are investigated. Numerical solutions obtained by means of several implementations of infinite elements have been compared on benchmark problems, thus showing the capabilities of the proposed element which, reproducing the asymptotical behavior of Boussinesque's solution, reveals to be accurate and effective.

## *References:*

Bettess, P. 1992. *Infinite elements*. Penshaw Press, UK.

Hibbitt, Karlsson, and Sorensen 2004 . *ABAQUS/Standard Theory Manual*, volume 6.4.

Salvadori, A., Feriani, A., and Aliprandi, A. 2004. *Formulation and implementation of hypersingular infinite boundary elements for soil-structure interaction problems*. TR 15, University of Brescia.

# Omogeneizzazione di murature storiche

Antonio Gesualdo, Luciano Nunziante

*Dipartimento di Scienza delle Costruzioni, Università degli Studi di Napoli FEDERICO II, Napoli*  
E-mails: {gesualdo, nunscli}@unina.it

*Keywords:* Muratura, Anisotropia, Omogeneizzazione

**SOMMARIO:** In quest'articolo si vuole effettuare lo studio dell'omogeneizzazione con tecniche basate sull'analisi ad elementi finiti di pannelli di muratura storica in ambito di elasticità lineare. Si parte dalla caratterizzazione storica delle più comuni tessiture: componenti lapidei, laterizi, malte ed aggregazioni con vuoti e difetti. Si costruisce poi un modello FEM delle singole tessiture murarie che tiene conto del contatto pietra malta modellato con un criterio di attrito alla Mohr-Coulomb.

La teoria elastica che interpreterà correttamente questi risultati è l'elasticità con attrito. Si costruirà la matrice di rigidezza dell'elemento finito omogeneizzato per le varie tessiture basandosi sulla teoria dell'omogeneizzazione e precisamente utilizzando un fabric tensor. L'utilizzo dei moduli di Kelvin consentirà di rappresentare il tensore dell'elasticità nella base degli autovettori ottenendo così la visione più semplice del tensore elastico.

Un aspetto interessante riguarderà la modifica della matrice di rigidezza dopo l'applicazione di tecniche consolidative sul pannello murario. Essenzialmente si pensa a tecniche consolidative basate sull'inserimento di tirantini antiespulsivi, sulla rigenerazione della malta con resine epossidiche miglioranti le prestazioni della malta presente e sull'applicazione di materiali fibrorinforzati corticali.

Si perviene infine alla costruzione di tabelle di grande utilità dal punto di vista applicativo che comprendano la costruzione dei parametri omogeneizzati delle murature a partire dai parametri fisico-geometrico-meccanici dei componenti la muratura storica.

## *Bibliografia*

- Cluni F., Gusella V. 2004. *Homogenization of non-periodic masonry structures*, I.J.S.S.,41.
- Zucchini A., Lourenco P.B. 2002. *A micro-mechanical model for the homogenization of masonry*, I.J.S.S., 39.
- Nemat-Nasser S. *Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials*, North-Holland.
- Lekhnitskii S.G. 1963. *Theory of elasticity of an anisotropic elastic body*, Julius J. Brandstatter, San Francisco, 1963.
- Pietruszczak S., Mroz Z. 2000. *Formulation of anisotropic failure criteria incorporating a microstructure tensor*, Computers & Geotechnics, 26.
- Pietruszczak S., Ushaksaraei R. 2003. *Description of inelastic behaviour of structural masonry*, I.J.S.S., 40.
- Cowin S. C. 1985. *The relationship between the elasticity tensor and the fabric tensor*, Mech. Mat., 4.

# A fast Gauss transform algorithm for the finite element solution of nonlocal integral models

Elena Benvenuti, Antonio Tralli

*Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, Italia*

*E-mail: ebenvenuti@ing.unife.it*

*Keywords:* Fast multipole algorithms, integral equations, non-local elasticity

Fast-multipole methods have been developed by Greengard and Rohklin for the direct evaluation of integral equations (Greengard and Rohklin, 1987), and it has been successfully applied in the past to applied physics problems and to the boundary element modelling of heterogeneous materials (Akaiwa et al. 2001). The Fast Gauss Transform (FGT) is a particular fast-multipole method for the numerical solution of integral equations with a Gauss kernel (Greengard and Strain, 1991). The Fast Gauss Transform replaces the evaluation of the Gaussians at a point with a Hermite polynomial expansion. As a new application of the FGT algorithm, the case of non-local elastic materials is here taken into account. In the non-local elastic constitutive laws, the stress at a point is assumed to depend on the strain of the surrounding points, weighted through a distance-dependent weight function, such as the Gauss function or the kernel  $e^{-s/\ell}$  (Eringen, 1987). As a consequence of assuming a non-local stress-strain law, a characteristic length is brought into the model. On the other hand, the equilibrium equation becomes an integro-differential equation. Here, some of the results previously obtained by the authors for the finite element solution of non-local elasticity problems are presented (Benvenuti and Tralli, 2005). It is shown that the saving-time capacity of the FEFGT method is significant whenever a fine discretization of the geometry is required. Examples are reported concerning a one-dimensional tensile bar in non-local elasticity for both the Gauss kernel and the kernel  $e^{-s/\ell}$ .

## *References:*

- Akaiwa, N., Thornton, K., Voorhees, PW. 2001. *Large-scale Simulations of microstructural Evolution in Elastically Stressed Solids*. J.Comp. Phys. ; **173**: 61–86.
- Benvenuti, E., Tralli, A. 2005. *The fast Gauss transform for non-local integral FE models*. submitted.
- Eringen, C. Theory of nonlocal elasticity and some applications. *Res Mechanica* 1987; **21**: 313–342.
- Greengard, L., Rohklin V. 1987. *A Fast Algorithm for Particle Simulations*. J. Comp. Phys.; **73**: 325–348.
- Greengard, L., Strain, J. 1991. *The fast Gauss transform*. SIAM J. Sc.Stat.Comp.; **12**:79–94.

# Verifica di un criterio di rottura unificato per muratura e conglomerato da prove su calcestruzzo iperconfinato con FC

Lionello Bortolotti

*Professore, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Cagliari*

*E-mail: bortolo@unica.it. Sito web: <http://www.unica.it/~dis/>*

Silvia Carta

*Dottore di ricerca, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Cagliari*

*E-mail: silcart@tiscali.it*

Daniela Cireddu

*Dottore di ricerca, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Cagliari*

*E-mail: ingdc@tiscali.it*

*Parole chiave:* conglomerato, muratura, fibra di carbonio, criterio di rottura, verifiche.

In questo articolo si riferiscono i risultati sperimentali provenienti da prove di compressione assiale eseguiti su cilindri di conglomerato confinati con un numero elevato di strati di tessuto di fibre di carbonio. Le variabili in gioco erano: la resistenza cilindrica del conglomerato (da 20 a 40 MPa); il numero di avvolgimenti (fino a 62).

Lo scopo principale della sperimentazione era di verificare l'attendibilità di un criterio di rottura in stato di compressione pluriassiale, generalizzato e unificato, formulato in un precedente lavoro per i materiali muratura e conglomerato. In esso la superficie limite, nello spazio degli sforzi principali, fu riscontrata essere una superficie di rivoluzione generata dalla rotazione di una curva parabolica attorno all'asse equi inclinato sugli assi principali.

Il lavoro illustra il comportamento sperimentale dei provini sotto carico e fornisce la legge di distribuzione delle deformazioni circonferenziali nello spessore dell'avvolgimento. Tale legge permette di determinare analiticamente la pressione di confinamento e quindi le componenti di sforzo principale individuanti lo stato di rottura.

Nella sperimentazione sono stati conseguiti valori del rapporto di sforzo principale fino a 0.8.

Le modellazioni analitiche, effettuate in termini di componenti di sforzo principale, hanno convalidato la formulazione del criterio di rottura citato in precedenza e confermato che il valore di resistenza a compressione idrostatica è pari a 12 volte il valore della resistenza cilindrica.

I risultati sanciscono, come già prospettato nel lavoro citato in bibliografia, l'identità costitutiva di muratura e calcestruzzo quali conglomerati a comportamento macroscopicamente omogeneo e isotropo.

## *Riferimenti bibliografici*

Bortolotti, L., Carta, S., Cireddu, D. 2005. *Unified Yield Criterion for Masonry and Concrete in Multiaxial Stress State*, ASCE Materials Journal, 17 (1), pp.54/62.

# Stati di sforzo singolari per solidi non resistenti a trazione

Massimiliano Lucchesi  
Dipartimento di Costruzioni, Università di Firenze  
E-mail: [massimiliano.lucchesi@unifi.it](mailto:massimiliano.lucchesi@unifi.it)

Miroslav Šilhavý  
Dipartimento di Matematica, Università di Pisa  
Mathematical Institute of the AV CR, Praga  
E-mail: [silhavy@dm.unipi.it](mailto:silhavy@dm.unipi.it)

Nicola Zani  
Dipartimento di Costruzioni, Università di Firenze  
E-mail: [nicola.zani@unifi.it](mailto:nicola.zani@unifi.it)

Keywords: masonry, axisymmetric bodies, singular stress fields

In questo lavoro, che segue [1], [2], [3] e [4], si considera il problema di equilibrio per solidi costituiti da materiale non resistente a trazione, in assenza di forze di massa e si integrano esplicitamente le equazioni di equilibrio per alcune particolari condizioni di carico.

Poichè siamo interessati a considerare anche stati di sforzo singolari, si suppone che lo sforzo sia un tensore misura con divergenza misura, limitandosi al caso in cui siano presenti alcune superfici di singolarità  $S$ . Così lo sforzo risulta essere la somma di una misura di densità  $T_r$ , che è assolutamente continua rispetto alla misura di Lebesgue nel complementare di  $S$ , e di una misura concentrata in  $S$ , la cui densità  $T_s$  è un campo di sforzo superficiale differenziabile. Le equazioni di equilibrio richiedono che  $T_r$  abbia divergenza nulla nel complementare di  $S$  e che la divergenza superficiale di  $T_s$  sia bilanciata dal salto della componente normale di  $T_r$  attraverso  $S$  [5]. Negli esempi presentati, la superficie  $S$  e lo sforzo superficiale  $T_s$  vengono dedotti utilizzando questa proprietà, una volta determinato  $T_r$ .

## Riferimenti bibliografici

- [1] M. Lucchesi, N. Zani, *Some explicit solutions to plane equilibrium problem for no-tension bodies*, Structural Engineering and Mechanics, 16, 295-316, 2003.
- [2] M. Lucchesi, M. Šilhavý, N. Zani, *Singular equilibrated stress fields for no-tension panels*, Colloquium Lagrangianum (Ravello 2002), to appear in a volume of Springer Verlag, 2005.
- [3] Lucchesi, M., Zani, N., *Stati di sforzo per pannelli costituiti da materiale non resistente a trazione*, Atti del XVI Congresso AIMETA di Meccanica Teorica e Applicata. Ferrara, 9-12 Settembre 2003.
- [4] M. Lucchesi, M. Šilhavý, N. Zani, *Stress States for heavy masonry panels*, Colloquium Lagrangianum (Venezia 2004), to appear in a volume of Springer Verlag, 2005.
- [5] M. Lucchesi, M. Šilhavý, N. Zani, *Singular equilibrated stress fields for no-tension bodies*, In preparazione, 2005.



# A class of mixed finite elements for 2D problems with general non linear material models

Roberta Grimaldi

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, University of Rome “La Sapienza”, Italy  
E-mail: roberta.grimaldi@uniroma1.it*

Daniela Addessi, Vincenzo Ciampi

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, University of Rome “La Sapienza”, Italy  
E-mail: daniela.addessi@uniroma1.it , vincenzo.ciampi@uniroma1.it*

*Keywords: mixed formulations, non linear material behaviour, damage, non local regularization*

A class of Lagrangian mixed finite elements for membrane problems with non linear material behaviour is presented. The formulation is derived from the weak equilibrium and compatibility equations arising from the Hellinger-Reissner variational principle.

In particular, non linear constitutive laws with isotropic damage internal variables and a non local regularization technique are considered, and the performances of the presented class of elements are tested in relation with their capability to represent strain localization with coarse meshes.

## *References:*

Addessi, D. et al. 2002, *A plastic non local damage model*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 191, 1291-1310.

Bischoff, M., et al. 1999. *A class of equivalent enhanced assumed strain and hybrid stress finite elements*, Comput. Mech., 22, 443-449.

Pian, T.H.H. & Sumihara, K. 1984. *A rational approach for assumed stress finite elements*, Int. J. for Num. Meth. In Engrg., 22, 173-181.

Simo, J.C. & Kennedy, J.G. 1989. *Complementary mixed finite element formulations for elastoplasticity*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 79, 177-206.

## *Curriculum*

Roberta Grimaldi was born in Naples, Italy, on 18 July 1974.

Degree in Architecture (Final Mark 110/110 cum laude), University of Naples Federico II, Italy, with a dissertation entitled “*Static behaviour of high span suspended bridges*”. She is completing her PhD course in Structural Engineering with a thesis entitled “*In-Plane Mixed Finite Element formulation for plasto-damaging material behaviours*”. Completion date expected: October 2005.

# Stabilità del flusso potenziale bidimensionale in prossimità del bordo di una superficie libera

Paolo Luchini

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Salerno*

*E-mail: luchini@unisa.it*

Amilcare Pozzi

*Dipartimento di Progettazione Aeronautica, Università di Napoli Federico II*

*Keywords: fluid mechanics, stability, free surface, capillarity, gravity, waves.*

La situazione in cui la superficie libera di un fluido (tipicamente una superficie di separazione acqua-aria o, se le proprietà dell'aria vengono trascurate, acqua-vuoto) è perturbata dalla presenza di un corpo solido è classicamente descritta come generazione di onde (lineari, se la perturbazione è abbastanza piccola) con la caratteristica, se il solido ed il fluido imperturbato sono in moto relativo a velocità uniforme, che la parte dello spettro di piccola lunghezza d'onda, associata agli effetti di tensione superficiale, appare a monte del corpo solido mentre la parte di grande lunghezza d'onda associata alla gravità appare a valle [1]. (Più precisamente, ciò accade purché la velocità relativa superi una determinata soglia, al di sotto della quale la superficie prende la forma di menisco.)

Nel limite di corpi di forma molto allungata si può studiare separatamente il bordo presso cui il fluido entra al di sotto della parete solida ed il bordo presso cui ne esce; il problema può così essere visto alternativamente come quello di un galleggiante in moto sulla superficie dell'acqua, oppure di un getto che entra o esce, rispettivamente, da un condotto aperto. Benché il problema così impostato del flusso di prua o di poppa appaia estremamente classico, ad esso sono dedicati lavori recenti in bibliografia [2,3,4]. Non risulta chiarito, in particolare, il ruolo della tensione superficiale nel determinare l'angolo con cui la superficie libera si distacca dal bordo della lastra.

In questo contributo si mostrerà che in realtà quando il numero di Froude è maggiore di 1 questo tipo di flusso è instabile, e quindi entrambe le soluzioni "stazionarie" presentate nei lavori di cui sopra non sono fisicamente realizzabili.

*Curriculum vitae:* Paolo Luchini è professore ordinario del settore Fluidodinamica dal 1994, è autore o coautore di 60 articoli su riviste internazionali ed 1 libro, ed è Associate Editor dell'European Journal of Mechanics B/Fluids. È frequentemente invitato presso università estere ed ha tenuto 10 conferenze su invito in congressi internazionali. I suoi correnti interessi di ricerca comprendono la stabilità fluidodinamica, la turbolenza ed i relativi metodi di calcolo numerico e di controllo.

Amilcare Pozzi, Professore Ordinario di Gasdinamica, si è laureato a Napoli in Ingegneria Meccanica nel 1956, a Roma in Ing. Aeronautica nel 1958 e a Napoli in Matematica nel 1962. Ha pubblicato oltre 100 lavori, molti dei quali su riviste internazionali quali AIAA J. Int. J. of Heat and Mass Transfer, J. of Heat Transfer, Int J. Heat and Fluid Flow, J. of Fluid Mechanics, ZAMM, Comput. Math. Appl., Meccanica, e una monografia sugli approssimanti di Padé in Fluidodinamica.

<sup>1</sup>Lord Rayleigh, The form of standing waves on the surface of running water, *Proc. London Math. Soc* 15, 69-78 (1883).

<sup>2</sup>T. J. Osborne & D. M. Stump, Capillary waves on a Eulerian jet emerging from a channel, *Phys. Fluids* 13, 616-623 (2001)

<sup>3</sup>C. D. Andersson & J.-M. Vanden-Broeck, Bow flows with surface tension, *Proc. R. Soc. London A* 452, 1985-1997 (1996).

<sup>4</sup>S. Tooley & J.-M. Vanden-Broeck, Capillary waves past a flat plate in water of finite depth, *IMA J. Appl. Math.* 69, 259-269 (2004).

# Simulazione numerica dell'interazione fluido-struttura con la tecnica lagrangiana SPH

Carla Antoci, Mario Gallati, Stefano Sibilla

*Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale, Università degli Studi di Pavia, Italia*

*E-mail: carla.antoci@unipv.it, gallati@unipv.it, stefano.sibilla@unipv.it*

*Parole chiave:* interazione fluido-struttura, Smoothed Particle Hydrodynamics, condizioni di interfaccia

In questo lavoro la tecnica Lagrangiana SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), già impiegata da numerosi autori per modellare indipendentemente il moto di fluidi viscosi e la deformazione di solidi elastici (Monaghan 1994, Gallati e Braschi 2000, Libersky *et al.* 1993), viene utilizzata per simulare problemi di interazione fluido-struttura in due dimensioni. Considerando un modello di elasticità basato su una formulazione incrementale della legge di Hooke, è possibile esprimere l'equilibrio dinamico di un solido elastico in termini di pressione e velocità, come avviene per quello di un fluido. Nel modello il continuo materiale (solido o fluido) è discretizzato come un insieme di pseudo-particelle che interagiscono fra loro entro un raggio finito (smoothing length), muovendosi secondo le equazioni della dinamica, approssimate con la tecnica di interpolazione SPH. Alle particelle che si trovano a una distanza dalla superficie di separazione solido-fluido minore della smoothing length vengono imposte le condizioni di interfaccia. In particolare si impone al fluido la condizione cinematica di continuità della velocità, considerando per esso il solido come un contorno in movimento, e al solido quella dinamica di continuità degli sforzi (principio di azione e reazione), considerando l'azione esercitata su di esso dalla pressione del fluido. Si riportano qui, oltre a una descrizione del metodo, alcuni risultati ottenuti dalla simulazione del problema dello sloshing verticale in un serbatoio con fondo flessibile parzialmente riempito di liquido e da quella del funzionamento, con uno schema semplificato, di un dispositivo per la riduzione delle sovrapressioni di colpo d'ariete.

## *Riferimenti bibliografici:*

Gallati M., Braschi G. 2000. *Simulazione lagrangiana di flussi con superficie libera in problemi di idraulica*, *L'ACQUA*, 5, 7-18.

Libersky L.D., Petschek A.G., Carney T.C., Hipp J.R., Allahdadi F.A. 1993. *High strain lagrangian hydrodynamics*, *Journal of computational physics*, 109, 67-75.

Monaghan J.J. 1994. *Simulating free surface flows with SPH*, *Journal of computational physics*, 110, 399-406.

## *Curriculum vitae:*

Carla Antoci è iscritta al Dottorato di ricerca in Ingegneria Civile, presso l'Università degli Studi di Pavia

Mario Gallati è Professore Ordinario di Idraulica presso l'Università degli Studi di Pavia

Stefano Sibilla è Ricercatore di Idraulica presso l'Università degli Studi di Pavia

# Analisi di stabilità e simulazione numerica diretta di flussi reagenti

Francesco Salvatore

*E-mail: francescosalvadore@yahoo.com*

Francesco Picano

*E-mail: francesco.picano@uniroma1.it*

Paolo Gualtieri

*E-mail: p.gualtieri@caspur.it*

Carlo Massimo Casciola

*E-mail: carlo@flu5.dma.uniroma1.it*

*Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Università di Roma La Sapienza, Via Eudossiana 18, 00184 Roma*

*Parole chiave: Combustione, Stabilità*

I flussi reattivi presentano fenomeni di instabilità di notevole complessità a causa della interazione non lineare di diversi meccanismi fisici. L'analisi di stabilità lineare di alcuni casi semplici può consentire in particolare di evidenziare comportamenti peculiari di tali meccanismi. Quest'analisi può essere effettuata per via analitica o per via numerica. Nel presente lavoro sono affrontati due casi in regimi molto diversi di combustione. Il primo è omogeneo isotropo e consente di mettere in luce l'interazione tra il termine di sorgente di chimica e il comportamento acustico del flusso. L'altro è relativo alla stabilità del fronte laminare piano e si riferisce quindi a una configurazione tipica di analisi sperimentale e teorica. In entrambi sono considerate le equazioni di Navier-Stokes comprimibili e reattive, mentre la cinetica chimica è basata su un modello a singolo passo alla Arrhenius.

Nel primo caso è possibile sfruttare fino in fondo le potenzialità dell'approccio analitico arrivando a scrivere un'equazione caratteristica per valutare autovalori ed autovettori per ciascun modo. Lo studio di quest'ultima al variare di alcuni parametri ha permesso di evidenziare l'esistenza di un modo stazionario corrispondente all'entropia totale e la presenza di modi la cui stabilità dipende dai parametri che regolano il sistema. È stata inoltre condotta una simulazione numerica nel caso non lineare per la validazione dei risultati.

Il secondo caso analizzato riguarda la stabilità del fronte laminare piano e risulta più complesso in quanto viene introdotta una direzione di anisotropia. Come soluzione di riferimento si assume la configurazione stazionaria di fiamma laminare monodimensionale. Per studiare le proprietà di stabilità del fronte di fiamma piano in condizioni realistiche si è utilizzato un codice numerico tridimensionale con condizioni al contorno di ingresso-uscita nella direzione ortogonale al fronte di fiamma e con condizioni trasversali periodiche. Sulla soluzione di riferimento si impone una perturbazione così da ottenere un corrugamento geometrico del fronte in una o in entrambe le direzioni trasversali. La prima parte dell'evoluzione è dominata dal comportamento lineare: è stato quindi realizzato un diagramma di dispersione riportando al variare delle lunghezze d'onda eccitate il tasso di crescita del modo più instabile. Inoltre sono state riprodotte configurazioni di fiamme cellulari stazionarie quali possono risultare dall'evoluzione non lineare del campo perturbato sul modo più instabile.

## Bibliografia

- [1] Buckmaster J. D., Ludford G.S.S. .  
*Theory of laminar flames*. Cambridge University Press (1982).

# Meccanismo di formazione delle streaks

G. GIGLI, & P. ORLANDI

Dipartimento di Meccanica ed Aeronautica Università di Roma "La Sapienza", Roma

E-mail: gigli@kolmogorov.ing.uniroma1.it

Parole chiave: strato limite laminare, streaks

Nel presente lavoro si studiano, mediante simulazioni numeriche, i meccanismi di formazione e di sostentamento delle "wall streaks" in uno strato limite laminare su lastra piana. Le simulazioni sono state portate a termine discretizzando il sistema tridimensionale di equazioni di Navier-Stokes, con un metodo alle differenze finite accurato al secondo ordine nel tempo e nello spazio (Orlandi [1]). Per indurre la formazione delle streaks viene imposto un disturbo di notevole entità all'interno del flusso laminare, in condizioni di numero di *Reynolds* sensibilmente inferiore al valore critico di transizione. Tale disturbo viene introdotto sotto forma di soffiamento concentrato.

Nel caso di disturbo concentrato si è imposta una velocità verticale ( $v$ ) uniforme, in corrispondenza di una fessura presente sulla lastra. A partire dalla regione di soffiamento si formano, in prossimità della parete, due strutture vorticosi controrotanti in direzione del flusso ( $x$ ), che sono alla base del meccanismo di formazione delle streaks. Tale  $\omega_x$  è prodotta dal vortex tilting, il cui termine maggiore  $\omega_x \frac{\partial u}{\partial z}$  è quello associato al gradiente trasversale di velocità assiale. Di conseguenza la dimensione dei vortici dipende da tale gradiente introdotto dal soffiamento. I due vortici inducono un movimento verso l'alto delle particelle nella zona centrale, ed un movimento verso la parete ai lati. Questo produce un difetto di velocità rispetto alla velocità media tra i due vortici (low-speed), ed un aumento di velocità (high-speed) nelle regioni laterali. Le streaks così formate sono caratterizzate da una dimensione longitudinale estremamente allungata, molto maggiore dell'estensione della zona in cui la  $\omega_x$  assume valori significativi, e da profili di velocità assiale caratterizzati dalla presenza di punti di flesso, sia in direzione  $z$  che in direzione ortogonale alla parete ( $y$ ) [2].

Variando il modulo della velocità esterna si è potuta analizzare la dipendenza delle caratteristiche delle streaks dal numero di *Reynolds*, riscontrando un aumento di intensità e dimensioni all'aumentare del *Re*. Sono state condotte inoltre delle simulazioni in presenza di gradienti di pressione esterni, e si è verificata una tendenza fortemente instabilizzante nel caso di gradiente sfavorevole, con conseguente rottura delle streaks e comparsa di fenomeni turbolenti molto intensi a valle del soffiamento. La tendenza opposta è stata invece riscontrata in presenza di un gradiente di pressione favorevole.

Bibliografia:

- [1] Orlandi, P. (2000) Fluid Flow Phenomena : A Numerical Toolkit, Dordrecht, Kluwer.
- [2] Masahito Asai, Masayuki Minagawa & Michio Nishioka (2002) The instability and breakdown of a near-wall low-speed streak. J.Fluid Mech. 455, 289–314.

Curriculum Vitae: Gigli Gabriele, collaboratore presso il Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Università di Roma "La Sapienza".

Dottore in Ingegneria Aerospaziale; votazione finale 110/110 (vecchio ordinamento) il 24/05/2005

# Model of air entrainment in central jet vertical dropshafts in ordinary working conditions

Luca Ciaravino

*Faculty of Engineering, Dept. of Hydraulic and Envir. Eng., University of Naples "Federico II", Italy*  
E-mail: lciaravi@unina.it

Guelfo Pulci Doria

*Faculty of Engineering, Dept. of Hydraulic and Envir. Eng., University of Naples "Federico II", Italy*  
E-mail: pulci@unina.it

*Keywords:* air entrainment, experimental data, volumetric method, analytical model

The paper reports results of a study of the phenomenon of air entrainment carried out on a physical model of large dimensions consisting of a vertical dropshaft supplied by an orifice endowed with radial inlet and central jet at the base of a tank. In order to evaluate entrained air flow rate in the last years an original measure method, called volumetric, has been proposed and successively improved. Such a method has been used in order to carry out a large number of experimental tests on the installation. On the basis of the data thus obtained the Authors have been able to propose a new analytical-experimental model for the calculation of the well-known air entrainment coefficient  $\beta$  in ordinary working conditions. The following model (in which  $h$  is the water depth in the supply tank and  $H$  is the free fall height in the shaft) is a fully non dimensional one and takes into account the dependence of  $\beta$  on the diameter  $d$  of the orifice supplying the vertical dropshaft:

$$\beta = \frac{0.000555}{\left(\frac{D}{d} - 1\right)^{3.30}} \cdot \left(\frac{H_{tot}}{d}\right)^{1.025} \cdot \left(\frac{h_{eq,tot}}{d}\right)^{0.815} ; h_{eq,tot} = h + \frac{d}{2} ; H_{tot} = H + h .$$

## *References:*

Ciaravino, L. & Pulci Doria, G. 2004. *Air entrainment in a particular reservoir outlet*, Proceedings of First Storage International Conference. Ed. SIG. Geneva: 113-120.

Ciaravino, L., Gualtieri, P., Pulci Doria, G. 2005. *Complementary experimental methods for measurements of air entrainment in vertical dropshafts*, Proceeding of Twelfth International Conference on Computational Methods and Experimental Measurements CMEM 2005. Ed. Witpress. Malta.

*Curriculum vitae:* Guelfo Pulci Doria is full professor of Fluid Mechanics at the University of Naples "Federico II" and is author of about 140 scientific and didactic publications. Luca Ciaravino is PhD in Engineering of Civil Networks and Territorial Systems in the same University and is author of experimental and numerical studies concerning hydrodynamic problems.

# Leaky Waves in Spatial Stability Analysis

Jan O. Pralits

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Salerno, Italy*

*E-mail: pralits@fd.dimec.unisa.it*

Paolo Luchini

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Salerno, Italy*

*E-mail: luchini@unisa.it*

**Keywords:** Fluid mechanics, transition, stability analysis, Orr-Sommerfeld, leaky waves

Laminar-turbulent transition in a flat plate boundary layer is usually caused by perturbations with infinitesimal amplitude which grow as they propagate downstream. These perturbations are commonly analysed using the Orr-Sommerfeld equations (OSE), either in a temporal or a spatial framework. In both cases, the mode structure of the OSE is composed of a finite number of discrete modes which decay at infinity in the wall normal direction ( $y$ ), and a continuous spectrum of propagating modes behaving as  $\exp(\pm ky)$  at infinity, where  $k$  is a complex wave number in the wall normal direction. The number of discrete modes changes with Reynolds number and it seems as if they disappear behind the continuous spectrum for certain Reynolds numbers. It is therefore of interest to investigate if something in particular happens as these modes disappear. Further, since the representation of a given solution as a superposition of modes is not unique, i.e. an all-continuous representation always exist, it is of interest to investigate if it is possible to find an all-discrete representation. Such a representation has several possible applications. It might help the physical understanding and ordering of higher modes (discrete modes other than the least stable one such as the Tollmien-Schlichting waves). It can further be useful in applications where these higher modes are important, eg. evaluating the first order correction of the eigen functions in the multiple scales method. An intrinsic problem with the discrete modes appearing in the vicinity of the continuous spectrum is that they are ill-conditioned. This is an additional problem in applications where higher modes are important. The method proposed here to enable an all-discrete representation intends to show that the trajectory of the discrete modes in fact persist behind the continuous spectrum at each Reynolds number appearing as so called leaky waves. The amount of literature concerning the analysis of leaky waves in problems relating to fluid mechanics is small, but is well known eg. in the field of fiber optics concerning non-ideal or leaky fibers. There it is observed that while the wave amplitude inside the fiber decays downstream of the source, the leaking radiation creates waves perpendicular to the fiber which grow unbounded.

**Curriculum vitae:** Paolo Luchini, full professor of fluid dynamics since 1994. His present research interests include numerical formulations of the Navier-Stokes equations, the theory of fluid-dynamic instabilities with its application to transition prediction, and turbulence control and drag reduction phenomena. Jan Pralits, PhD in Fluid Mechanics from the Royal Institute of Technology in Stockholm, presently on a Marie Curie Fellowship at Università di Salerno.

# On the Irregular Evolution of the Self-similar Start-up Vortex

Renato Tognaccini

*Dipartimento di Progettazione Aeronautica, Università di Napoli "Federico II", Napoli*

*E-mail: rtogna@unina.it*

Paolo Luchini

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Salerno*

*E-mail: luchini@unisa.it*

*Keywords: Vortex Dynamics, Computational Fluid Dynamics*

The stability of the initial evolution of the start-up vortex issuing from a sharp edge was studied by different authors without a final answer. Even experimental papers, written by different authors.

Recently, Luchini & Tognaccini simulated the start-up of a semi-infinite flat plate by solving the two-dimensional Navier-Stokes equations in the vorticity-streamfunction formulation. They proposed an irregular evolution of the vortex spiral for two different problems. In both cases the oscillations in the vortex sheet became visible when the instantaneous Reynolds number attained a value  $Re_S \approx 4500$ . Therefore, they also suggested that the differences between the experiments could be explained by the different Reynolds number of the two experiments.

The irregularities, evidenced by the numerical simulations for sufficiently large Reynolds numbers, put into a different light the various attempts made in the past to simulate the formation of a start-up vortex by inviscid lumped-vortex methods. Indeed, many inviscid simulations showed oscillations which, many authors, explained as numerical instabilities.

How accurately do these inviscid "chaotic" solutions represent the real physical problem which should be accurately modeled by the Navier-Stokes simulations presented in Luchini & Tognaccini (2002)? In particular, do the inviscid unsteady results represent the asymptotic solutions of the viscous simulations when time tends towards infinity?

These are the questions we try to answer in the paper. For this purpose we compared the previously obtained viscous simulations with some inviscid simulations obtained by solving the unsteady Euler equations written in self-similar variables. The quantitative agreement of the results suggests that the inviscid "chaotic" model provides a correct description of the physics of the self-similar stage of start-up vortex evolution.

*Curriculum vitae:* Renato Tognaccini è professore associato nel settore Fluidodinamica dal 2001, ha pubblicato circa 20 lavori su riviste internazionali, è stato più volte invitato a tenere conferenze o seminari in campo internazionale.

*Curriculum vitae:* Paolo Luchini è professore ordinario del settore Fluidodinamica dal 1994. È autore o coautore di 60 articoli su riviste internazionali ed 1 libro, ed è Associate Editor dell'European Journal of Mechanics B/Fluids. È frequentemente invitato presso università estere ed ha tenuto 10 conferenze su invito in congressi internazionali. Compare 169 volte nel Citation Index.



# Analisi limite elastica di strutture con resistenze aleatorie sotto azioni dinamiche campionate

Salvatore Benfratello, Francesco Giambanco  
Università degli Studi di Palermo  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica  
Viale delle Scienze, 90128 – Palermo – Italia  
benfri@diseg.unipa.it, fgiamban@diseg.unipa.it

Parole chiave: analisi limite elastica, resistenze aleatorie, analisi dinamica, forzanti campionate.

## SOMMARIO

La conoscenza del comportamento meccanico dei materiali svolge un ruolo fondamentale nell'ambito della analisi strutturale. Tuttavia anche nel caso di leggi costitutive ben definite come quella elastico-lineare, i valori delle costanti mostrano un carattere aleatorio. Ciò è dovuto sia alle naturali caratteristiche dei materiali sia alle intrinseche incertezze presenti nei test sperimentali adottati per la loro determinazione. Quest'ultimo aspetto è oggetto della normativa internazionale ENV 13005 [1], nella quale vengono anche fissate le regole per determinare le caratteristiche aleatorie dei risultati di un esperimento in termini di media e di deviazione standard. La risposta strutturale, anche nel caso di strutture a comportamento lineare, è quindi una variabile aleatoria le cui caratteristiche devono essere opportunamente determinate. D'altro canto, nel caso di strutture composte da materiale a comportamento elastico-perfettamente plastico, un ruolo fondamentale è svolto dall'analisi limite. Un primo livello di analisi è costituito dalla analisi limite elastica, nella quale si cerca il massimo amplificatore dei carichi per il quale la struttura rimane dappertutto in campo elastico. Dal momento che azioni significative sulle strutture, come vento e terremoto, possiedono un comportamento fortemente dinamico e che i loro effetti devono essere determinati attraverso gli strumenti propri dell'analisi dinamica, è evidente l'interesse alla estensione al caso dinamico dell'analisi limite. Nel lavoro viene presentato un metodo per la determinazione della funzione densità di probabilità (pdf) esatta del moltiplicatore limite elastico nel caso di strutture a molti gradi di libertà sotto azioni dinamiche campionate, assumendo le resistenze come variabili aleatorie di caratteristiche note. La pdf si identifica con quella del minimo di alcune variabili aleatorie ottenute dalle resistenze attraverso una trasformazione lineare con coefficienti dipendenti dal tempo. Tali coefficienti possono essere calcolati, anche nel caso di forzanti campionate, nella ipotesi in cui per il carico non amplificato non si verificano plasticizzazioni nella struttura. Dal momento che la espressione esatta richiede un elevato onere computazionale viene anche proposta una espressione approssimata, a vantaggio della sicurezza, che comporta un onere computazionale modesto. La applicazione numerica al caso di un telaio soggetto ad un accelerogramma reale mostra la validità della formulazione presentata ed i vantaggi di quella approssimata.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] UNI CEI ENV 13005:2000, Guide to the expression of uncertainty in measurement.

## CURRICULA VITAE

Francesco Giambanco, Professore Ordinario di Scienza delle Costruzioni, Facoltà di Architettura.  
Attività di ricerca: analisi elastoplastica, ottimizzazione strutturale, tecniche di delimitazione.  
Salvatore Benfratello, Ricercatore di Scienza delle Costruzioni, Facoltà di Architettura.  
Attività di ricerca: analisi dinamica deterministica ed aleatoria, ottimizzazione strutturale.

# Risposta esatta di strutture a parametri incerti soggette ad azioni deterministiche

Giovanni Falsone

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Messina , Italia*

*E-mail: gfalsone@ingegneria.unime.it*

Gabriele Ferro

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Messina , Italia*

*E-mail: ferroga@ingegneria.unime.it*

*Keywords:* strutture a parametri incerti, elementi finiti stocastici, risposta dinamica esatta

In questo lavoro viene presentata una metodologia che consente di ottenere la forma esatta della risposta di strutture lineari a parametri incerti soggette ad azioni dinamiche deterministiche. Tale metodologia richiede una discretizzazione della struttura in elementi finiti (FE) ed una corrispondente discretizzazione del campo aleatorio che descrive le incertezze strutturali in variabili aleatorie. Il metodo opera nel dominio delle frequenze e sfrutta i risultati ottenuti dagli autori in alcuni lavori precedenti (Falsone and Impollonia, 2002; Falsone and Ferro, 2005) basati sulle proprietà dei modi principali di deformazione degli (FE) utilizzati per discretizzare la struttura e, in particolare, sul numero dei modi principali della struttura influenzati dalla generica variabile aleatoria che caratterizza le incertezze strutturali. In particolare, per varie tipologie di FE, vengono fornite le relazioni in forma chiusa tra la risposta strutturale e le variabili aleatorie che caratterizzano le incertezze dei parametri fisico-geometrici della struttura. L'onere computazionale connesso all'applicazione del metodo è ovviamente legato alle dimensioni del corrispondente problema deterministico e dal numero di modi principali di deformazione che caratterizzano il tipo di FE utilizzato nella discretizzazione. Tuttavia viene mostrato come questo approccio, accoppiato ad un'analisi di sensitività che individua le variabili aleatorie che maggiormente influenzano la risposta di riferimento, consenta di ottenere una risposta approssimata ottimamente accurata e caratterizzata da un ragionevole onere computazionale.

## *References:*

Falsone G. and Impollonia N. 2002. *A New Approach for the Stochastic Analysis of Finite Element Modelled Structures with Uncertain Parameters*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 191, 5067-5085.

*Curriculum vitae:* Dal 2003 Giovanni Falsone è professore straordinario nel settore scientifico-disciplinare ICAR/08. Attualmente è Direttore del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Messina. I suoi interessi scientifici sono prevalentemente orientati verso la Meccanica Stocastica e la Dinamica Sismica. Gabriele Ferro dal 2003 è studente del Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Strutture presso l'Università di Catania (con sede consorziata l'Università di Messina).

# Identification of multi degree of freedom civil systems under base lateral random forces by using potential models

Salvatore Benfratello

*E-mail: benfri@diseg.unipa.it*

Liborio Cavaleri

*E-mail: cavaleri@diseg.unipa.it*

Giacomo Navarra

*E-mail: navarra@diseg.unipa.it*

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, University of Palermo, Italy*

The accurate prediction of the response of physical systems to the environmental excitations is conditioned by the effectiveness of the mathematical models used for this aim. Formulation of models is often very difficult for the uncertainties connected to the mechanical behaviour of the materials, to the geometry and to the boundary conditions. In order to obtain more reliable models and to reduce the prediction errors, models themselves can be calibrated by dynamic identification procedures. The use of models with simple analytical forms leads to a simple position of the identification problem as in the case of Restricted Potential Models (RPM). Unfortunately, RPM have the defect to be characterized by equally distributed velocities in a each degree of freedom by the probabilistic point of view against the real characteristics of civil structures, which are characterized, when they are excited laterally at the base, by a not uniform distribution of the velocities along the height by the probabilistic point of view (generally one expects meanly higher velocities at the top of a structure). In the present work a previous dynamic identification technique based on the use of RPM is modified and used for the identification in the time domain of civil structures under base lateral loads supposing, as structural input, a white noise. In order to reach this aim first a classical model for civil structure under base input has been transformed into a RPM by introducing a new state variable said pseudo-velocity. In the introduction of the pseudo-velocity an approximation of the PSD matrix of the input was done because of the impossibility to obtain its inverse. In spite of the approximation, application of the proposed procedure showed that the modified identification procedure is effective and allows one to obtain the parameters defining stiffness and dissipation characteristics of the systems to be identified and to obtain also input identification with limited errors.

## *References:*

- Cavaleri, L. & Di Paola, M. 1999. *Identificazione strutturale di sistemi a più gradi di libertà soggetti ad input stocastico*. Proc. of 14<sup>th</sup> National Conference AIMETA, October 6-9, Como, Italy.
- Cavaleri, L., Papia, M., 2003. *A new dynamic identification technique: application to the evaluation of the equivalent strut for infilled frames*, Engineering Structures, 25, Elsevier, London.
- Cavaleri, L., Zingone, G., 2000. *Structural identification and potential systems*. 12<sup>th</sup> WCEE, January 30- February 4, Auckland, New Zealand

# Probabilistic Analysis of Uncertain Bernoulli-Euler Beams via Virtual Distortion Method

Massimiliano Zingales

*Faculty of Engineering, University of Palermo, Italy*

*E-mail: zingales@diseg.unipa.it*

*Keywords:* Uncertain Beams, Probabilistic Analysis, Virtual Distortion Method, Karhuen-Loeve Expansion

In many engineering problems we need to analyse structures involving uncertain material and geometrical parameters. Some parameters may vary with the spatial coordinates and hence they are often modelled as spatial random fields. Structures with stochastic parameters have been dubbed as stochastic structures. However, several difficulties arise in obtaining exact solution of such systems since the appropriate governing equations constitute random differential equations with random coefficient functions. In this paper an approach to this problem, introduced by Di Paola (2004) for stochastic trusses, will be extended to Bernoulli-Euler beam with random parameters in presence of deterministic static load. Randomly fluctuating structural parameters yielding random inhomogeneity have been represented as a nearly gaussian random field with prescribed second-order probabilistic characterization. Random fluctuations have been considered by means of an imposed strain field, depending upon internal stress distribution and random parameters, applied to a deterministic, parameter independent structure. Analysis of statically determinate beams yields closed form solution without discretization of the random parameter field whereas the solutions for statically indeterminate beams have been provided by means of integral formulation with random, degenerate kernel resorting to discretization of the parameter stochastic field on Karhuen-Loeve basis (Ghanem & Spanos, 1991). Numerical results obtained deal with the evaluation of first and second-order statistics of internal distributed bending actions contrasted with Monte-Carlo solutions used as benchmark to assess the accuracy and robustness of the proposed method.

## *References:*

Di Paola M., 2004, Probabilistic Analysis of Truss Structure under Uncertain Parameters (Virtual Distortion Method Approach), *Prob. Eng. Mech.*, 19, 321-329.

Ghanem R. & Spanos P.D., 1991, *Stochastic Finite Elements: a Spectral Approach*. Springer-Verlag, New York.

*Curriculum vitae:* Massimiliano Zingales, got his Ph.D in Structural Engineering from University of Palermo in 2000. He serves as Researcher at the Department of Structural and Geotechnical Engineering of University of Palermo since 2002. His main research interests cover areas of stochastic dynamic, uncertain structures, earthquake engineering, stability of structures and he is author of almost 35 publications on international journals and conferences.

# Utilizzo di tecniche possibilistiche nella meccanica delle strutture

Stefano Gabriele e Fabio Brancaleoni

*Dipartimento di Strutture, Università “Roma Tre”, Roma*

*E-mail: gabriele@uniroma3.it, branca@uniroma3.it*

Claudio Valente

*Dipartimento PRICOS, Università “G. d’Annunzio”, Chieti-Pescara*

*E-mail: c.valente@unich.it*

*Parole chiave:* incertezza dei parametri meccanici, analisi ad intervalli, metodi inversi

Questo lavoro nasce dal crescente interesse per tecniche innovative di trattamento delle incertezza nella meccanica delle strutture. Ci si riferisce in particolare alle tecniche possibilistiche. La impostazione possibilistica ha dato impulso allo sviluppo del calcolo basato sulla matematica dei numeri fuzzy e degli intervalli (Elishakoff [1998] e Hansen [1992]). La analisi della letteratura corrente lascia aperte alcune questioni di base legate soprattutto al confronto tra le tecniche possibilistiche e probabilistiche ed alla interpretazione fisica delle soluzioni possibilistiche. Nel lavoro si parte da queste considerazioni per presentare il modello di incertezza ad intervalli ed il suo utilizzo nel caso della analisi di sistemi meccanici a parametri incerti.

Per questo si presenta un esempio preliminare, su una semplice funzione modello, per un confronto tra tecniche diverse di trattamento dell’incertezza e per evidenziare quelle che, secondo noi e molti autori, sono le caratteristiche positive della analisi ad intervalli. In ambito meccanico si discute l’applicazione della analisi ad intervalli (a.i.) nel calcolo della risposta diretta statica e dinamica delle strutture. In particolare si presenta una semplice metodologia per la riduzione della sovrastima indotta dalla formulazione di base del calcolo ad intervalli. Nel caso della analisi modale si evidenzia come, talvolta, la formulazione ad intervalli può portare a soluzioni non fisiche del problema e si mostra come la soluzione può essere corretta modificando in maniera opportuna le regole di calcolo tra intervalli. La discussione delle soluzioni fisiche dei modelli viene ulteriormente estesa al caso dell’applicazione a problemi inversi nei quali, utilizzando “il teorema di inclusione”, è possibile definire dei criteri di ammissibilità fisica delle soluzioni fornite da un modello strutturale, Gabriele [2004]. Tale ammissibilità viene vista come un indice della rappresentatività del modello nei confronti della risposta fisica attesa e permette di definire le basi per la formulazione di algoritmi di ricerca della soluzione ottima.

## *Riferimenti bibliografici:*

Elishakoff I. (1998), “Three version of the finite element method based on concepts of either stochasticity, fuzziness, or anti-optimization”, (ASME) Appl. Mech. Rev., Vol. 51 No. 3.

Gabriele S. (2004) Aggiornamento parametrico di modelli EF con tecniche di analisi ad intervalli, Tesi del dottorato in Scienze della Ingegneria Civile, Università “Roma Tre”, Roma.

Hansen E. R. (1992), Global optimization using interval analysis, Marcel Dekker, New York.

*Curriculum vitae:* Stefano Gabriele ha ottenuto il titolo di dottore di ricerca nell’ottobre 2004 ed è attualmente titolare di un assegno di ricerca presso il Dip. di Strutture della Università “Roma Tre”.

# A variational approach for the numerical treatment of convex structural MDOF systems under stochastic loading

Michele Betti

*DIC/CRIACIV, Università degli Studi di Firenze, Italia*

*E-mail: mbetti@dicea.unifi.it*

Claudio Borri

*DIC/CRIACIV, Università degli Studi di Firenze, Italia*

*E-mail: cborri@dicea.unifi.it*

*Keywords:* variational principle, non-smooth mechanics, stochastic loading

A stochastic variational principle is proposed for the numerical treatment of convex MDOF nonlinear systems under stochastic loading. Unilateral contact problems of monotone nature, taking into account the “Non-smooth Mechanics” framework, can be formulated as constrained minimization problems of the potential energy of the structure, and are numerically treated by means of efficient convex optimisation algorithms.

In order to deal with the loading - and/or material properties - randomness in a natural and consistent manner, some versions of stochastic variational principle were proposed. The basic idea of the stochastic variational principle developed in this paper involves the expansion of all the random functions by Taylor series (about the averages of the random fields).

Primary focus is placed on stochastic variational principle for convex non linear structural problem under stochastic dynamic excitation. Based on incremental theory of nonlinear analysis and subdifferential laws for the theoretical treatment of unilateral contact area, the corresponding formulation for MDOF is developed to use for solving nonlinear problems of random structural dynamics. In addition, a numerical example is also utilized to test this method. As a conclusive remark it can be also stated that the presented procedure can be applied also for the analysis of “convex potential of complementary energy” structural analysis problems where the stochastic parameters are either the geometry or the material properties.

## *References:*

Hien T.D., Kleiber M. 1990, *Finite element analysis based on stochastic Hamilton variational principle*, Computer & Structures, 37, pagg. 893–902.

Panagiotopoulos, P.D., *Inequality Problems in Mechanics and Applications. Convex and Nonconvex Energy Functions*, Birkhäuser Boston Inc. 1985.

*Curriculum vitae:* Michele Betti, got his Ph.D in Structural Engineering from University of Florence, and is presently a Research Scholar at the Department of Civil Engineering of University of Florence. Claudio Borri is Full Professor and Chair of Mechanics of Solid, Computational Mechanics of structures and Wind Engineering at the University of Florence. Prof. Claudio Borri is also the present director of CRIACIV (Interuniversity Centre for Building Aerodynamics and Wind Engineering).

# Sviluppo di uno strumento di simulazione per la valutazione della maneggevolezza di veicoli a due ruote

Francesca Di Puccio, Paola Forte, Francesco Frendo, Massimo Guiggiani, Walter Schiavi  
*Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione, Università di Pisa, Italia*  
E-mail: [frendo@ing.unipi.it](mailto:frendo@ing.unipi.it), [dipuccio@ing.unipi.it](mailto:dipuccio@ing.unipi.it), [p.forte@ing.unipi.it](mailto:p.forte@ing.unipi.it), [guiggiani@ing.unipi.it](mailto:guiggiani@ing.unipi.it),  
[walter.schiavi@tin.it](mailto:walter.schiavi@tin.it)

Claudio Limone  
*Piaggio & C. S.p.A., Italia*  
E-mail: [claudio.limone@piaggio.com](mailto:claudio.limone@piaggio.com)

*Parole chiave:* veicoli a due ruote, maneggevolezza, modello di pilota, simulazione dinamica

Una delle caratteristiche di successo di un nuovo veicolo, in particolare di un veicolo a due ruote, è rappresentato dalle sue caratteristiche di maneggevolezza (si veda ad es. (Cossalter 1997)). Il presente studio è parte di una attività di ricerca volta alla standardizzazione di procedure per la valutazione oggettiva della maneggevolezza di un veicolo a due ruote. In particolare si descrivono gli strumenti sviluppati per la simulazione numerica di manovre handling. Per il sistema motoveicolo-pilota è stato realizzato un modello multi-body parametrico in ambiente MSC.Adams che viene “guidato” tramite un controllore sviluppato in ambiente MatLab/Simulink.

Tramite apposite interfacce grafiche di facile impiego è possibile impostare le caratteristiche inerziali, geometriche del veicolo, unitamente alle caratteristiche costitutive di sospensioni e pneumatici; analogamente è possibile definire una traiettoria piana ed i parametri della manovra.

Vengono mostrati i risultati di alcune manovre preliminari a fronte di rilievi sperimentali. Lo strumento realizzato è in grado di fornire tramite simulazione le grandezze rappresentative della manovra e quindi indici oggettivi della maneggevolezza di un veicolo, valutati in accordo ai modelli di regressione definiti tramite analisi sperimentali (si veda ad es. Rosellini 2004), ancora nella fase di sviluppo; le simulazioni numeriche consentono inoltre di valutare l'effetto di diverse scelte progettuali sulle prestazioni di maneggevolezza.

## *Riferimenti bibliografici:*

Cossalter, V. 1997. *Cinematica e Dinamica della Motocicletta*, Edizioni Progetto, Padova.  
Rosellini W., Limone C., Frendo F., Guiggiani M. 2004. *Objective handling quality evaluation*, XXIV ADM, XXXIII AIAS, Innovazione nella Progettazione Industriale, Bari 31 Agosto-2 settembre.

*Curriculum vitae:* M. Guiggiani (Professore Ordinario di Meccanica Applicata), F. Frendo (ricercatore di Costruzione di Macchine) e Walter Schiavi (borsista, laureato in ingegneria meccanica) si occupano di dinamica del veicolo e da anni collaborano con Piaggio per il settore delle due ruote; P. Forte (Professore Associato di Costruzione di Macchine) e F. Di Puccio (ricercatrice di Meccanica Applicata) hanno collaborato alla ricerca, in particolare per gli aspetti di modellazione del pilota. C. Limone è responsabile in Piaggio di sviluppo di metodologie innovative e progettazione.

# A dynamic model for an internal combustion engine full-floating piston-pin in lubricated conditions

Marco Spuria

*Faculty of Mechanical Engineering, University of Bologna, Italy*

*E-mail: marco.spuria@mail.ing.unibo.it*

Dominique Bonneau

*Laboratoire de Mécanique des Solides, University of Poitiers, France*

*E-mail: dbonneau@iutang.univ-poitiers.fr*

Yoann Le Baratoux

*Ferrari Ge.S., Italy*

Pier Gabriele Molari

*Faculty of Mechanical Engineering, University of Bologna, Italy*

*E-mail: piergabriele.molari@mail.ing.unibo.it*

*Keywords:* Crank mechanism, EHD lubrication, piston-pin motion, Lagrangian formulation

A model capable to predict the lubricating conditions of the small-end and piston boss bearings for an internal combustion engine is presented. The lagrangian approach, applied to the rod-crank system mechanism, permits to develop the dynamic equations of each member. Some considerations are then discussed to show that the rotational motion of the piston-pin is completely unknown, while the motion of the conrod and the piston are quite completely assigned by the properties of the kinematic chain.

To evaluate the motion of the pin we state an EHD model to estimate the viscous couples that act on the small-end and on the piston-bosses. According to the achieved state of the art, the EHD model incorporates a cavitation algorithm that assures the conservation of the lubricant mass flow.

A simple case study is then presented to show the effectiveness of the method. This example shows the peculiar behaviour of a free piston pin: it follows the member that exerts the greater couple. This “self-adjustment” should provide the reduction of friction forces, of wear and of power losses.

## *References:*

Bonneau D., Hajjam M. 2001. *Modélisation de la rupture et de la reformation des films lubrifiants dans les contacts élastohydrodynamiques*, Revue européenne des éléments finis, v. 10, pp. 679-704.

Optasanu V., Bonneau D. 2000. *Finite Element Mass-Conserving Cavitation Algorithm in Pure Squeeze Motion. Validation/Application to a Connecting-Rod Small End Bearing*, ASME Journal of Tribology, v. 122, pp. 162-169.



# Nuovo algoritmo di simulazione dinamica per Motori Ultrasonici

Simone Pirrotta

*Facoltà di Ingegneria, Università di Messina, Italia*

*E-mail: spirrotta@ingegneria.unime.it*

Rosario Sinatra

*Facoltà di Ingegneria, Università di Catania, Italia*

*E-mail: r.sinatra@diim.unict.it*

Alberto Meschini

*Alenia Spazio S.p.A., Italia*

*E-mail: Alberto.Meschini@aleniaspazio.it*

*Keywords:* motore, ultrasonico, simulazione, dinamica, algoritmo.

**SUMMARY:** In questo lavoro è descritto un nuovo modello di simulazione dinamica del comportamento di un *Motore Ultrasonico* del tipo *Travelling Wave*, studiato dal reparto di Progettazione Meccanica Antenne di Alenia Spazio, Roma (Italy), all'interno di un programma di sviluppo dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Partendo da equazioni dinamiche di statore e rotori ottenute mediante l'approccio energetico note dalla letteratura e adattate alla configurazione scelta, si scrive il sistema di equazioni del moto differenziali, accoppiate dai termini che rappresentano le forze generalizzate di contatto. In particolare sarà prestata attenzione alla descrizione di dei fenomeni di interfaccia nella modellazione e scrittura delle equazioni. Il sistema dinamico viene quindi risolto in condizioni di funzionamento a regime, mediante un processo iterativo che coinvolge le variabili di stato del sistema.

L'algoritmo risolutivo, implementato su Matlab® e gestito mediante una apposita *Graphical User Interface*, consente di simulare il funzionamento del motore in diverse condizioni operative al variare della geometria del sistema e dei principali parametri di controllo, fornendo di volta in volta le principali curve di performance ed i parametri caratteristici.

Il modello così sviluppato presenta diversi vantaggi rispetto a quelli presenti in letteratura, tra cui la semplicità e trasparenza delle singole fasi di modellazione, l'utilizzo di equazioni risolutive algebriche che non richiedono l'introduzione di condizioni iniziali, l'assenza di gravose ipotesi semplificative se non quella di non analizzare la fase di transitorio, la rapidità di elaborazione. Esso rappresenta così un valido ausilio sia in fase di progettazione, perchè consente di ottimizzare la configurazione ed il design rispetto alle prestazioni desiderate, sia in fase operativa, per verificare il funzionamento in differenti condizioni ambientali ed operative.

*Simone Pirrotta (ME 24/01/1977):* laurea in Ingegneria Meccanica all'Università degli Studi di Catania (2002), borsa di dottorato in "Chimica ed Ingegneria dei materiali" all'Università degli Studi di Messina (2002). Attività di ricerca e pubblicazioni nel settore scientifico/disciplinare ING-IND12 in collaborazione con il centro ENEA di Frascati (Roma) e nel settore della meccanica applicata in collaborazione con Alenia Spazio (Roma) per lo sviluppo di meccanismi per antenne satellitari.

# Development of a flight simulator: motion cueing algorithms

Stefano Mauro

*Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Torino, Italia,*

*E\_mail: stefano.mauro@polito.it*

Giuliana Mattiazzo

*Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Torino, Italia,*

*E\_mail: giuliana.mattiazzo@polito.it*

Stefano Pastorelli

*Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Torino, Italia,*

*E\_mail: stefano.pastorelli@polito.it*

Massimo Sorli,

*Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Torino, Italia*

*E\_mail massimo.sorli@polito.it*

**Keywords:** flight simulation, parallel structure, pneumatic actuation, motion cueing

Flight simulators are more and more used worldwide as they can provide an efficient and economic tool for pilots training, as in most cases it is possible to reduce the flying hours needed to obtain a pilot's license substituting them with hours of simulated flight. This solution is generally applied by large companies and military air forces, which must train their pilots to fly expensive jet aircrafts. On the contrary, because of the high cost of the simulators, leisure pilots usually can not use this solution and they are constricted to train on true, expensive aircraft even to learn the first elements of flying technique.

An important part of the cost of a flight simulator is due to the actuation platform, which in most cases is an hydraulic Stewart platform with six degrees of freedom. Some producers of simulator propose solutions that do not forecast any device to move the pilot, but experience says that the motion feeling is basilar for beginners.

The paper intends to discuss the possibility of obtaining satisfactory motion simulation by mean of a pneumatic parallel platform with three degrees of freedom. The main advantage of this solution should be the low cost of the structure and of its actuators; of course, the performance are limited with respect to the traditional solution by the lower dynamic of pneumatic actuators with respect to hydraulic ones and by the reduced number of degrees of freedom. However even with the dynamic characteristics of pneumatic actuators, some motion cueing algorithms should be realisable.

The work analyses the problem by mean of simulations carried out in the Matlab/Simulink environment and measuring the feelings experienced by the pilot by mean of recognised models of the human perceptive organs. Its behaviour suggests that the motion device must be used only to reproduce acceleration sensation, while velocity sensation are better provided by visual cues.

The possibility of reaching this result is shown demonstrating that motion capable to reproduce the sensation experienced during dives, zooms or turns can be realised, and showing that the trajectories required by the platform are compatible with the dynamic characteristics of pneumatic actuators.

# Development of a flight simulator: structure and motion platform

Giuliana Mattiazzo

*Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Torino, Italia,*

*E\_mail: giuliana.mattiazzo@polito.it*

Stefano Mauro

*Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Torino, Italia,*

*E\_mail: stefano.mauro@polito.it*

Stefano Pastorelli

*Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Torino, Italia,*

*E\_mail: stefano.pastorelli@polito.it*

Massimo Sorli,

*Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Torino, Italia*

*E\_mail massimo.sorli@polito.it*

Flight simulators are widely used in aeronautics for pilots training since a long time. Usually they are based on large hydraulic Stewards platforms with six degrees of freedom that allows the reproduction motion within a very large manoeuvre space, and they include electronics capable of reproducing highly realistic scenery. They are completed by a detailed physical model of the environment in which the pilot shall operate, that is the cabin, the cockpit, the instruments and the flight commands. The possibility of using the simulators for officially recognised training hours is related to the satisfaction of requirements expressed by IAR norms and to the obtainment of certification by the controlling body. Flight simulators are used to train on board personnel too. In this case a platform, again based on the Steward schematics, moves a cabin reproducing the passengers area of the aircraft or, more commonly, a part of it. The high cost of this simulators, however, limits their applications to the training centres of large companies or of military aviation. Generally they are not suitable for training of private pilots because their hourly cost is higher than that of the aircrafts typically used by flying schools and Flying Training Organisations.

The project described in this papers is oriented to the development of a flight simulator characterised by low cost and by the possibility of increasing the detail of the simulation in an almost modular way in order to obtain a system that can range from a most economic arrangement, to be used for entertainment only, up to a certified version to be used in pilots training.

The main component of the system is a pneumatic parallel platform with three degrees of freedom based on the HBR schematics.

The simulator is build around this component using, wherever possible, parts, components and software commercially available. In the most economic version, flight simulation is carried out by Microsoft Flying Simulator. All the mechanical parts that compose the cabin environment can be either found on the market or specifically build to increase the realism level in order to obtain the certification needed for training .

The paper discusses the organisation of the simulator, shows the mechanical platform and the dynamic characteristic of its actuators.

# Algoritmi per la blind source separation (BSS) di sorgenti vibrazionali nei sistemi meccanici

Aleramo Lucifredi, Paolo Silvestri, Andrea Vaccari

*Laboratorio di Meccanica Generale e Meccanica delle Vibrazioni, Dipartimento di Meccanica e Costruzione delle Macchine, Università di Genova, Italia, e-mail: mgmv@unige.it*

*Keywords:* Meccanica; diagnostica; monitoraggio; vibrazioni; dinamica

Un tipico campo di attività del Laboratorio di Meccanica Generale e Meccanica delle Vibrazioni (MGMV) dell'Università di Genova riguarda il monitoraggio di condizione e la diagnostica delle macchine. Nella presente memoria vengono presentati i più recenti risultati volti ad approfondire ulteriori aspetti nell'ambito del monitoraggio e della diagnostica. In particolare è stata condotta un'attività di "screening" sulle procedure presenti in letteratura per la Blind source separation (BSS) ovvero la separazione cieca delle sorgenti. Le tecniche di BSS consistono nella ricostruzione di un insieme di segnali quando sono note soltanto misture o combinazioni di questi. La struttura delle combinazioni e le sorgenti dei segnale non sono osservabili (il termine "blind" sottolinea l'assenza di informazioni sul comportamento del sistema che miscela i segnali sorgente e sulla statistica di essi). Si è ritenuto significativo approfondire tale aspetto in quanto in genere nel monitoraggio delle macchine rotanti le misure sul campo sono soggette ad interferenze dovute alla presenza di altre macchine che operano in vicinanza. Attraverso l'applicazione di queste tecniche appare possibile isolare la parte significativa del segnale in modo da facilitare il lavoro di un successivo software per il monitoraggio e la diagnostica. Le tecniche attualmente proposte per tale analisi sono in numero elevato; ciò sottolinea ad oggi l'inesistenza di una metodologia che si sia rivelata universale ovvero applicabile "a scatola chiusa": tutte richiedono una precisa conoscenza dei vari aspetti e dei fenomeni. Occorre sottolineare che tecniche che paiono soddisfacenti nel caso di pure simulazioni al computer, si rivelano invece inefficienti quando applicate a segnali acquisiti sperimentalmente sul campo su sistemi meccanici reali. Di seguito si riportano le metodologie più rilevanti cercando di evidenziarne le caratteristiche peculiari. Inoltre vengono riferiti risultati sperimentali ottenuti nel corso di attività su macchine rotanti.

## *References:*

A.Lucifredi, P.Silvestri 2004. *Experiences on innovative trends in the field of rotating machinery condition monitoring and diagnostics*, V Internat. Conf. Acoust. and Vibr. Surveill. Methods and Diagn. Techn., Compiègne

*Curriculum vitae:* Prof. A. LUCIFREDI. Nato il 9/7/1943. Professore ordinario di Meccanica applicata alle macchine dall'1/3/76. Tiene i corsi di Meccanica applicata alle macchine, Meccanica delle vibrazioni, Meccanica del veicolo. Responsabile del Lab. di Meccanica generale e meccanica delle vibrazioni. Coordinatore Dottorato in Ingegneria meccanica. Membro Commissione Vibrazioni UNI. Membro Direttivo A.I.MAN. (Associazione Italiana di Manutenzione) e delegato europeo E.F.N.M.S.. Settori di ricerca: Meccanica applicata, Meccanica delle vibrazioni, Diagnostica meccanica e monitoraggio, Analisi modale sperimentale, Meccanica del veicolo, Progettazione meccanica.

# Analisi bivariata di dati complessi di vibrazione: applicazione al monitoraggio di macchine rotanti

Paolo Pennacchi

*Politecnico di Milano, Dip. di Meccanica, Via La Masa 34, 20156 Milano*

*E-mail: paolo.pennacchi@polimi.it*

Andrea Vania

*Politecnico di Milano, Dip. di Meccanica, Via La Masa 34, 20156 Milano*

*E-mail: andrea.vania@polimi.it*

*Parole chiave:* analisi di dati bivariati, dinamica dei rotori, monitoraggio. regioni di accettabilità, misure di profondità.

La definizione delle regioni di accettabilità nel condition monitoring delle vibrazioni delle macchine rotanti è di fondamentale importanza per un loro esercizio sicuro. Alcune tecniche parametriche tradizionali vengono utilizzate per l'analisi dei dati di vibrazione, che possono essere rappresentati in maniera conveniente in un piano complesso. Tali tecniche vengono esaminate criticamente in questo lavoro e viene presentato un innovativo metodo non parametrico basato sul concetto statistico di "profondità dei dati". L'idea di base è di analizzare la regione contenente un certo insieme di misure di vibrazione senza fare supposizioni sulla loro distribuzione statistica, ma semplicemente contando e ordinando i dati, o in maniera più propria, introducendo un criterio di ordinamento dei valori. In questo senso l'approccio è non parametrico. L'ordinamento non è tuttavia banale, dato che si considerano distribuzioni bivariate e l'ordinamento non è definito in  $R^2$ . Considerevoli sforzi sono stati fatti nel corso degli anni per la definizione di criteri d'ordinamento (Barnett [1976]) e differenti misure di profondità sono state sviluppate (Liu et al. [1999], Hwang et al. [2004]) per l'analisi statistica di dati multivariati. Le prestazioni dei metodi parametrici e di quello non parametrico nei riguardi della robustezza nella stima delle regioni di accettabilità sono confrontate mediante un caso sperimentale relativo ad una macchina di un impianto per la produzione dell'energia elettrica.

## *Bibliografia:*

Barnett V., The Ordering of Multivariate Data, *Journal of Royal Statistical Society - Series A*, (1976), 139, pp. 319-354.

Liu R.Y., Parelius J.M. and Singh K., Multivariate Analysis by Data Depth: Descriptive Statistics, graphics and Inference, *The Annals of Statistics*, (1999), 27(3), pp. 783-858.

Hwang J., Jorn H. and Kim J., On the Performance of Bivariate Robust Location Estimators under Contamination, *Computational Statistics & Data Analysis*, (2004) 44, pp. 587-601.

*Curriculum vitae:* Andrea Vania, professore associato di Meccanica Applicata alle Macchine presso il Politecnico di Milano a partire dal 1991. I settori di ricerca sono: vibrazioni meccaniche, dinamica dei rotori, diagnostica, analisi modale, monitoraggio su condizione, identificazione dei sistemi meccanici, cuscinetti lubrificati.

# Calcolo dello sbilanciamento magnetico nelle macchine rotanti elettriche

Paolo Pennacchi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano*

*E-mail: paolo.pennacchi@polimi.it*

Lucia Frosini

*Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università degli Studi di Pavia*

*E-mail: lucia@unipv.it*

*Parole chiave:* Unbalanced magnetic pull, generatore, dinamica dei rotori, non-linearità

In questa memoria è presentato un metodo per analizzare il comportamento dinamico dei generatori di grande potenza soggetti allo sbilanciamento magnetico. Nelle macchine elettriche rotanti, le forze elettromagnetiche radiali agenti tra le superfici di rotore e statore sono molto elevate, ma bilanciate quando il rotore è concentrico con lo statore; analogamente, le forze elettromagnetiche tangenziali producono solo un momento rotante. Nel caso di eccentricità, si verifica uno sbilanciamento di queste forze tale per cui si sviluppa una forza elettromagnetica radiale, nota in letteratura come “Unbalanced Magnetic Pull” (UMP), diretta lungo l’asse radiale in cui il traferro è minimo. I modelli tradizionalmente proposti in letteratura per studiare l’UMP possono essere considerati affidabili nel caso di macchine elettriche di piccola taglia supportate da cuscinetti a rotolamento. Al contrario, nel caso di macchine di elevata potenza e velocità, quali i turbo-alternatori supportati da cuscinetti lubrificati, l’approssimazione di orbita circolare per il centro geometrico del rotore non è accettabile. Tuttavia, gli autori che hanno studiato l’UMP in generatori di grossa taglia [Stoll, Guo et al.] hanno trascurato il fatto che le orbite filtrate di questi rotori sono ellittiche e generalmente il centro dell’orbita non è concentrico con lo statore. In questa memoria viene introdotto un modello più realistico mediante il quale si determina analiticamente la distribuzione reale del traferro durante la rotazione, tenendo conto degli effetti prodotti dall’orbita del rotore. L’UMP è calcolato con l’approccio della permeanza al traferro e la simulazione del comportamento dinamico di un generatore da 320 MVA mostra il contenuto armonico dell’UMP e la presenza di non-linearità.

## *Bibliografia:*

Stoll RL, “Simple computational model for calculation the unbalanced magnetic pull on a two-pole turbogenerator rotor due to eccentricity”, IEE Proc.-Electr. Power Appl., 144(4), July 1997, 263-270.

Guo D, Chu F and Chen D, “The Unbalanced Magnetic Pull and its Effects on Vibration in a Three-Phase Generator with Eccentric Rotor”, J. of Sound and Vibration, 254(2), 2002, 297-312.

*Curriculum vitae:* Lucia Frosini è nata a Pavia il 04/05/1970, ha conseguito la laurea e il dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrica presso l’Università di Pavia, dove attualmente lavora presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica con un contratto di ricerca post-doc. È autrice di circa 30 pubblicazioni scientifiche su riviste, libri e atti di congressi. Ha partecipato a diversi programmi di ricerca finanziati da MIUR, ASI, FAR. I suoi ambiti di ricerca riguardano principalmente l’identificazione e la diagnostica applicate alle macchine elettriche.

# Analisi teorico sperimentale per la messa a punto di un modello di una macchina lavatrice

Federico Cheli

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: federico.cheli@polimi.it*

Ferruccio Resta

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: ferruccio.resta@polimi.it*

Marco Belloli

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: marco.belloli@polimi.it*

Alessandro Tosi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italia*

*E-mail: alessandro.tosi@polimi.it*

*Parole chiave:* lavabiancheria, riduzione delle vibrazioni, analisi modale

La riduzione delle vibrazioni nei pannelli e delle conseguenti emissioni acustiche durante il funzionamento sono aspetti centrali nella progettazione di una moderna macchina lavatrice. Oggetto del presente lavoro è l'analisi di una lavabiancheria ad asse orizzontale per uso domestico con capacità di carico pari a 9 kg. Presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano è stata intrapresa un'estesa fase di indagine finalizzata alla messa a punto di un nuovo iter di progettazione e ottimizzazione mirato alla riduzione delle vibrazioni meccaniche. Una dettagliata campagna di misura sperimentale si è dimostrata fondamentale sia per la ricerca delle cause responsabili dell'eccitazione delle vibrazioni nei pannelli sia come strumento di validazione dei modelli numerici proposti al fine di introdurre soluzioni costruttive migliorative nel sistema.

*Curriculum vitae:*

Federico Cheli: Professore Ordinario di Meccanica Applicata dal 2000. L'attività scientifica è prevalentemente svolta nel campo della dinamica e della stabilità dei sistemi meccanici, con applicazione ai veicoli terrestri, alla dinamica di grandi strutture, alla dinamica dei rotori e a problemi di vibrazioni delle macchine.

Ferruccio Resta: Professore Straordinario di Meccanica Applicata dal 2005. L'attività scientifica è prevalentemente svolta nel campo della dinamica e della stabilità dei sistemi meccanici con particolare riferimento ai sistemi di controllo.

Marco Belloli: Ricercatore di Meccanica Applicata. L'attività scientifica è prevalentemente svolta nell'ambito dell'interazione fluido-struttura

Alessandro Tosi: Dottorando in Ingegneria dei Sistemi Meccanici Meccanica Applicata. L'attività di ricerca è rivolta alla dinamica delle strutture.

# Bilanciamento statico di manipolatore parallelo mediante pantografo

Andrea Russo, Rosario Sinatra e Michele Lagagnina  
*Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica*  
*Università di Catania*  
*Viale A. Doria 6, 95125 Catania, Italy*

Fengfeng Xi  
*Department of Aerospace Engineering*  
*Ryerson University*  
*Toronto, Ontario, Canada, M5B 2K3*

**Keywords:** Static balancing, hexapod, counterweight, pantograph.

**RIASSUNTO:** Nel presente articolo viene studiato il bilanciamento statico di un robot ad architettura parallela. Il bilanciamento statico è definito dalla condizione nella quale il peso dei link non produce alcuna forza sugli attuatori, per qualunque configurazione del manipolatore. Allo scopo di ottenere il bilanciamento, la posizione del centro di massa totale è espressa come funzione della posizione e dell'orientamento della piattaforma e dei giunti prismatici. In seguito, le condizioni per il bilanciamento sono derivate dalle espressioni ottenute. Due metodi realizzano il bilanciamento statico, un primo metodo con l'utilizzo di contrappesi ed un secondo usando delle molle. In entrambi i metodi, il meccanismo risulta completamente bilanciato agli effetti della gravità. In questo studio è stato implementato il primo metodo.

Il bilanciamento statico e dinamico è un problema classico nella teoria dei meccanismi. In particolare, quando un meccanismo non è staticamente bilanciato, il peso dei link produce forze e coppie sugli attuatori in condizioni statiche e gli attuatori devono contribuire a sopportarne il peso. Il problema diviene più grave per i manipolatori paralleli impiegati come piattaforme di volo dove il peso della piattaforma mobile è molto grande rispetto alle masse dei link. Il bilanciamento statico è anche chiamato gravity compensation. Se le forze e le coppie esercitate dai giunti attuati sono ridotte, le prestazioni della macchina migliorano.

Numerosi studi sono stati effettuati e riportati in letteratura per il bilanciamento statico. Per esempio, nel caso dei manipolatori seriali, Nathan ed Hervé hanno applicato i contrappesi per la gravity compensations. Streit propose un approccio al bilanciamento statico di un corpo rotante a due gradi di libertà usando molle. Streit e Shin hanno presentato un approccio generale per bilanciare cinematismi planari usando delle molle. Ulrich e Kumar hanno presentato un metodo di compensazione del peso usando appropriate carrucole, mentre Kazerooni e Kim hanno un metodo con bracci a comando diretto.

Nel seguente studio, seguendo lo stesso approccio presentato da Gosselin, si è ottenuto il bilanciamento statico di un 6 g.d.l. robot parallelo con gambe a lunghezza fissa. Il robot consiste in una piattaforma mobile, da sei link scorrevoli su guide per mezzo di giunti prismatici ed universali, i link sono collegati alla piattaforma mobile tramite giunti sferici. Nel presente articolo si propone un metodo per trovare la soluzione al questo problema. Basato sui metodi proposti in letteratura, il robot può essere bilanciato usando dei contrappesi con l'aggiunta di un pantografo. Per mezzo di questo design, è possibile ottenere un manipolatore con centro di massa stazionario, per qualunque configurazione.



# An elastic interface model with nonlocal integral damaging effects

Guido Borino

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica Università di Palermo, Palermo.  
CIRMAC- Centro Interdipartimentale di Ricerca sui Materiali Compositi, Palermo.  
E-mail: borino@unipa.it*

Boris Failla

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Palermo, Italia  
E-mail: bfailla@diseg.unipa.it*

*Keywords:* interface, elasticity, decohesion, non local damage, integral non locality

The paper presents an elastic interface model with damaging behaviour developed with constitutive relations based on nonlocal concepts. The main motivation for accepting to pay the cost of the extra complexities induced by nonlocal features is rooted on the observation that, in many mechanical circumstances, the process zone length, where decohesion develops, involves a spatially extended microstructure, which produces complex bridging spatial effects. Typically, spatial constitutive interactions can be effectively modelled by integral nonlocal models (strong nonlocality) where the damage at a certain point affects the further development of damage to a neighbour point by means of an integral relation. Along the paper, the interface constitutive relations are developed following a thermodynamic consistent approach. Nonlocal damage interface is able to ensure regularization and then no solution jumps are produced and a mesh objective solution is expected, even without invoking viscous regularization procedures.

The evolution of the damage along the interface and the subsequent decohesion are driven by nonlocal damage laws. Namely, a spatial average (nonlocal) energy release rate is responsible for the local damage activation function and the damage flow rules are nonlocal as well.

The paper presents a numerical application for the Double Cantilever Beam (DCB) test in which the delamination of a simple composite beam is analyzed. Nonlocal damage interface is adopted to simulate the interlaminar ligaments. Finally, on the basis of the numerical results obtained some comparative observations are reported.

*Acknowledgements:* The paper has been realized with the financial support of the Ministry of Education (MIUR) under the grant PRIN-2003 “Interfacial damage failure in structural systems: Applications to civil engineering and emerging research fields”.

# Damage in domains and interfaces

Francesco Freddi

*Dept. of Civil-Environmental, University of Parma, Italy*

*E-mail: freddi@nemo.unipr.it*

Michel Frémond

*Laboratoire Lagrange, LCPC, Paris*

*E-mail: michel.fremond@lcpc.fr*

*Keywords: domain damage, interface damage, principle of virtual power*

The degradation process of the mechanical properties of quasi-brittle materials is usually traced back to micro-cracking mechanisms. Continuum damage mechanics, based upon general principles which govern the evolution of the variables representative of the material state, is an effective tool for the analysis of this kind of behaviour. Furthermore, the theory of damage model can be successfully used for describing the phenomenon of adhesion of solids Frémond (2001) , Freddi (2004).

The present work deal with the structural response of quasi-brittle domains glued on one another, taking into account both volume and interface damaging behaviour. The damage models adopted herein for the description of domain and interface behaviour have been proposed in Frémond (2001) and are based on the adaptation of the principle of virtual power. In particular, starting from the assumption that damage results from microscopic movements, the power of these motions are included into the principle of virtual power. This power contribution is assumed to depend, besides on the strain rate (displacement discontinuity for interface), both on the rates of damage and gradient of damage. The latter is introduced to account for the local interaction between the damage at a material point on the damage of its neighbourhood. Correspondingly, also two new quantity are introduced: the internal work of damage and the flux vector of the internal work of damage (adhesion energy and energy flux vector of the contact surface).

The adopted constitutive law permit to control the energy dissipated during solids degradation and separation in order to avoid stiffness recovery and cohesive state restoration. Suitable free energy permits to write non standard fields conjugated to the damage rate and the gradient damage rate. Then, a pseudo-potential of dissipation is introduced to characterize the damage evolution.

Different numerical simulations are proposed, whose purpose consists into correctly determine the zone affected by a greater damage: the interface or a narrow region inside the domains. Particularly, the case of two concrete elements glued together is considered.

## *References:*

Frémond M.(2001), “Non-smooth themomechanics”, Springer Verlag, Heidelberg.

Freddi F. (2004), “Cohesive interface analysis via boundary integral equations”, Ph.D. thesis, University of Bologna, Italy.

# Simulazione di prove di adesione mediante un modello d'interfaccia a danno anisotropo

Ilaria Monetto

*DISEG – Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Genova, Italia*

*E-mail: monetto@diseg.unige.it*

*Keywords:* prova di adesione, interfaccia, meccanica del danno, compositi laminati

Nella presente memoria si analizza un modello strutturale 1D semplificato per la simulazione di prove di adesione. Si tratta di un tipo di prove usualmente condotte per indagare sulle modalità di trasferimento delle sollecitazioni tra strati di diverso materiale in sistemi compositi. Basti citare le strutture in calcestruzzo, muratura o legno rinforzate con strisce di materiali fibrorinforzati, dove l'interfaccia tra il rinforzo ed il relativo supporto costituisce la parte più critica ai fini della caratterizzazione meccanica del sistema, in quanto potenziale sede di fenomeni di degrado per l'innescò e propagazione di zone di decoesione.

Il presente lavoro ripercorre recenti studi riportati in letteratura, dai quali differisce per la tipologia del legame costitutivo adottato per l'interfaccia e/o per la formulazione seguita in controllo di spostamenti. Aspetto caratteristico del semplice modello strutturale sviluppato è la capacità di cogliere il danno incipiente, ma anche di seguire i successivi sviluppi del distacco sulla base di un legame costitutivo d'interfaccia elasto-danneggiativo.

Il modello viene utilizzato per produrre stime quantitative della "lunghezza ottimale di ancoraggio", definita come la minima lunghezza di ancoraggio in corrispondenza della quale viene trasmesso il massimo sforzo in condizioni di interfaccia perfettamente integra. La buona concordanza dei risultati così ottenuti con quelli di origine empirica suggeriti in letteratura ha, infine, consentito la validazione del modello sviluppato.

## *References:*

Borri, A. & Corradi, M. 2000. *Consolidamento di strutture lignee*, L'Edilizia n. 5-6, Editrice De Lettera, Milano: 62-67.

Di Nardo, E. & Feo, L. 2003. *La sicurezza dei placcaggi strutturali con FRP nei confronti dei meccanismi di collasso prematuro*, AIAS 2003 – XXXII Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, 14 pagine.

Schreyer, H.L. & Peffer, A. 2000. *Fiber pullout based on a one-dimensional model of decohesion*, Mechanics of Materials 32: 821-836.

*Curriculum vitae:* Ilaria Monetto ha conseguito il titolo di dottore di ricerca ed attualmente ricopre la carica di ricercatore universitario non confermato. L'attività di ricerca spazia su temi diversificati inquadrati in svariate discipline facenti capo al settore di Scienza delle Costruzioni: dalla meccanica dei solidi e delle strutture, alla meccanica della frattura, del danno e computazionale, fino alle teorie nonlocali per la caratterizzazione della risposta costitutiva di materiali dotati di microstruttura.

# Eddy current-based experimental analysis to investigate the mechanism of damage in ductile materials

Michele Buonsanti

*Department of Mechanics and Materials, Mediterranean University, Reggio Calabria, Italy*

*E-mail: buonsanti@ing.unirc.it*

Domenico Costantino

*Department D.I.M.E.T. Mediterranean University, Reggio Calabria, Italy*

Mario Versaci

*Department D.I.M.E.T. Mediterranean University, Reggio Calabria, Italy*

*Keywords:* eddy-current, bi-phase materials, fuzzy methods

The up-to-date structural designing makes by now widely use of high performances numerical codes, mainly in terms of computational powerful, cost and sizing, only available till some time before to limited groups of users.

This allowed the experts to focus their attention on a qualifying aspect of the designing, i.e. an employment of the materials very close to the their limit behaviour.

Late innovative approaches in material mechanics gave in addition the opportunity to build models very close to the actual behaviour but without introducing heavy computational aspects.

In this paper some classical models were taken into consideration, verifying their small-scale reliability, by an highly effective eddy current-based experimental technology, where a novel sensor was employed to perform magnetic field local measurements.

## *Reference:*

Blitz, J. 1997, *Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing*, 2<sup>nd</sup> ed. Chapman & Hall, London.

Dally, W. J. et al. 1993, *Instrumentation for Engineering Measurements*, 2<sup>nd</sup> edition, John. Wiley & Sons, Inc. New York.

Nadai, A. 1950, *Theory of Flow and Fracture of Solids*, McGraw-Hill, New York.

Felbeck, D.K. and Atkins, A.G. 1996, *Strength and Fracture of Engineering Solids*, Prentice Hall, Upper Sadle River, New York

Dickerson, J.A. and Kosko, B. 1996, Fuzzy Function Approximation with Ellipsoidal Rules, *IEEE Transaction on System Man and Cybernetics* part B, vol 26, (4).

Pavo, J., et al. 1996, Eddy Current Testing with Fluxset Probe, *Applied Electromagnetic and Mechanics*, JSAEM, Tokyo

*Curriculum vitae:* Michele Buonsanti, assistant professor in Mechanics of Materials. Interest fields: constitutive models in non linear elasticity, magneto-chemo-elastic interaction, materials degradation.

# Un approccio alle equazioni integrali applicato all'analisi non locale del danno

Vincenzo Mallardo, Claudio Alessandri  
*Facoltà di Architettura, Università di Ferrara, Italy*  
*E-mail: mlv@unife.it, ale@unife.it*

*Keywords:* equazioni integrali, BEM, danno, non locale.

Elementi strutturali di materiale fragile possono esibire un degrado delle proprietà meccaniche dovuto a fenomeni legati allo sviluppo di micro-fessure e alla loro interazione. Questi meccanismi dissipativi possono essere fenomenologicamente rappresentati da modelli continui di danno. Il problema risulta mal posto ed è fonte di difficoltà teoriche e computazionali. Molti sono i rimedi proposti in letteratura. Tra questi l'approccio regolarizzante più robusto è sembrato essere quello cosiddetto non locale, sia nella sua versione integrale forte sia in quella più debole a gradiente.

Molto lavoro è stato fatto nell'ambito degli Elementi Finiti, vedi per esempio Bažant *et al.* 2002. Nell'ambito degli Elementi di Contorno, invece, solo recentemente sono stati pubblicati alcuni lavori in plasticità non locale mentre non ci sono pubblicazioni sulla localizzazione e sugli approcci non locali per modelli di danno.

Sulla scia di alcuni recenti risultati (vedi Mallardo & Alessandri 2004), gli Autori intendono presentare un approccio alle equazioni integrali per modelli di danno non locale. Saranno presentati alcuni risultati numerici per validare la procedura. Tale applicazione può risultare estremamente interessante dal punto di vista computazionale; infatti, in conseguenza della localizzazione, l'area interessata dal processo non lineare tende a ridursi con l'evolversi del danno, fino a diventare una macro-fessura.

## *References:*

- Bažant, Z.P. & Jirásek, M. 2002. *J Eng. Mech. ASCE*, **128**, 1119-1149.  
Mallardo, V. & Alessandri, C. 2004. *Eng. An. Bound. Elem.*, **28**, 547-559.

*Curriculum vitae:* Vincenzo Mallardo è ricercatore universitario di Scienza delle Costruzioni presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Ferrara. Ha ottenuto il PhD in Ingegneria delle Strutture nel 1996 presso l'Università di Napoli "Federico II". Si è occupato di identificazione di difetti interni a solidi e di plasticità e danno. Ha trascorso periodi di studio presso il Wessex Institute of Technology (UK), il Queen Mary College (UK) e la Czech Technical University di Praga (CZ).

*Curriculum vitae:* Claudio Alessandri è Professore Ordinario di Scienza delle Costruzioni presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Ferrara. È autore o co-autore di circa novanta lavori su riviste nazionali e internazionali. La sua ricerca riguarda la formulazione di problemi della meccanica attraverso equazioni integrali e l'interfacciamento tra programmi FEM di analisi strutturale e acquisizione dati attraverso laser scanner, con particolare riferimento alle architetture storiche.

# Numerical simulations of the flow in a mechanical heart valve

Antonio Cristallo

*DIMeG and CEMeC, Politecnico di Bari, Italy*

*E-mail: a.cristallo@poliba.it*

Roberto Verzicco

*DIMeG and CEMeC, Politecnico di Bari, Italy*

*E-mail: verzicco@poliba.it*

Elias Balaras

*Dipartment of Mechanical Engineering, University of Maryland, College Park, MD, USA*

*E-mail: balaras@eng.umd.edu*

*Keywords:* Mechanical heart valves; Computational fluid dynamics; Immersed boundaries.

**SUMMARY:** Valvular heart disease is a life-threatening disease that afflicts millions of people worldwide and leads to approximately 250,000 valve repairs and/or replacement each year. Artificial heart valves have been used since 1960 to replace diseased native valves and have saved millions of lives. Unfortunately these devices are less than ideal and lead to many complications mainly related to the fluid mechanics issues. High levels of shear stresses are generally accepted as responsible of hemolysis and platelet activation. Highly resolved, fully 3-D CFD simulations are required to accurately predict the flow in prosthetic mechanical heart valve. The numerical method developed achieves simulations with fixed and moving boundaries. Direct numerical simulations are carried out using an Immersed Boundary (IB) approach and a cost/efficient geometrical routine is used to calculate the interpolation data required for the IB. A preliminary comparison with experimental data is also addressed.

## *References:*

1. Smith R, Blick E, Coalson J, Stein P (1972), *Trhombus Production by Turbulence*, J. Appl. Physiol. 32, 261-264.
2. Verzicco R, Orlandi P (1996), *A finite difference scheme for three-dimensional incompressible flows in cylindrical coordinates*, J. Comput. Phys. 123,402.
3. Fadlun EA, Verzicco R, Orlandi P, Mohd-Yusof J (2000), *Combined immersed boundary/finite-difference methods for three-dimensional complex flow simulations*, J. Comput. Phys. 161,35-60.
4. Peskin CS (1972), *Flow patterns around heart valves: a numerical method*, J. Comput. Phys. 10,252-271.

**Curriculum vitae:** Antonio Cristallo earned his degree in Mechanical Engineering in 2002 from Politecnico di Bari with a specialization in fluid dynamics. He is currently pursuing his doctorate at the same university, in conjunction with the Scuola Interpolitecnica di Dottorato (XXVII cycle) program. As part of his studies, he has spent the past year at the University of Maryland concentrating on bio-fluid dynamics.

# On the left ventricle fluid dynamics

Federico Domenichini

*Department of Civil Engineering, University of Firenze, Italy*

*E-mail: federico@ingfi1.ing.unifi.it*

Gianni Pedrizzetti

*Department of Civil Engineering, University of Trieste, Italy*

*E-mail: giannip@dic.univ.trieste.it*

*Keywords:* left ventricle, vorticity dynamics, dissipation

Following previous studies (Baccani et al. 2002a, 2002b, 2003), the work is focussed on the mathematical and numerical modelling of the fluid dynamics inside of a left ventricle. The three-dimensional Navier-Stokes equation is written and solved in a half prolate spheroid with moving walls. The spectral representation of the solution along the azimuthal coordinate leads to a series of two-dimensional problems solved in the meridian plane. The presence of a singular axis requires a careful definition of the boundary conditions to satisfy the regularity of the solution; an original mathematical method, previously introduced and validated (Domenichini & Baccani 2004; Domenichini et al. 2005), is used. The physical parameters required by the model are taken from a clinical echocardiographic study of a healthy prematurely born child.

The work analyses the intraventricular flow evolution; evidence of clinically observed patterns are given and interpreted in terms of vorticity dynamics. It appears that the filling phase (diastole) is naturally optimised to best comply with the following ejection phase (systole). Such a much debated question is analysed in details artificially varying the characteristics of the incoming diastolic flow. The general hypothesis about a natural optimisation is confirmed by the quantification of the viscous dissipation that takes place during the diastole. The natural geometric arrangement is associated with a reduction of the power dissipated, thus leading to a less onerous work required to the cardiac muscle to eject the blood in the primary circulation.

## *References:*

- Baccani, B., Domenichini, F. & Pedrizzetti, G. 2002a. *Vortex dynamics in a model left ventricle during filling*, Eur. J. Mech.-B/Fluids 21(5), 527-543.
- Baccani, B., Domenichini, F., Pedrizzetti, G. & Tonti, G. 2002b. *Fluid dynamics of the left ventricular filling in dilated cardiomyopathy*, J. Biomech. 35(5), 665-671.
- Baccani, B., Domenichini, F. & Pedrizzetti, G. 2003. *Model and influence of mitral valve opening during the left ventricular filling*, J. Biomech. 36(3), 355-361.
- Domenichini, F. & Baccani, B. 2004. *A formulation of Navier-Stokes problem in cylindrical coordinates applied to the 3D entry jet in a duct*, J. Comput. Phys. 200(1), 177-191.
- Domenichini, F., Pedrizzetti, G. & Baccani, B. 2005. *Three-dimensional filling flow into a model left ventricle*, J. Fluid Mech., to appear.

*Curricula vitae:* FD is researcher in Hydraulics at the Department of Civil Engineering, University of Firenze. His activity is focussed on the mathematical and numerical modelling of fluid problems. GP is professor of Hydraulics at the Department of Civil Engineering, University of Trieste. Topics of research: turbulence, vorticity dynamics, biological flows.

# Studio sperimentale di un modello da laboratorio del ventricolo umano

Giorgio Querzoli

*Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Università degli studi di Cagliari, Italia*

*E-mail: querzoli@unica.it*

Antonio Cenedese

*Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade, Università degli studi di Roma "La Sapienza", Italia*

*E-mail: antonio.cenedese@uniroma1.it*

Zaccaria Del Prete

*Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Università degli studi di Roma "La Sapienza", Italia*

*E-mail: delprete@dma.ing.uniroma1.it*

*Keywords: Emodinamica, Particle Tracking, Turbolenza*

La comprensione dei fenomeni che coinvolgono i flussi ventricolari è divenuta oggi molto importante per due motivi fondamentali: l'incessante progresso tecnologico manifestato dalla strumentazione per le diagnosi cardiache e l'aumento cospicuo del numero di impianti di valvole cardiache artificiali sui pazienti. E' indubbio che la disponibilità diffusa di strumenti di indagine sperimentale più accurati offre la possibilità di diagnosticare le patologie cardiache con anticipo rispetto al passato, prima che esse possano diventare pericolose per la salute dei pazienti. L'utilizzo sempre maggiore delle valvole artificiali richiede invece una accurata definizione quantitativa della loro efficienza ed affidabilità, ma anche la determinazione preventiva delle possibili alterazioni del campo fluidodinamico ventricolare introdotte da questi dispositivi.

La presente ricerca è incentrata sullo studio sperimentale del flusso dentro un modello da laboratorio di ventricolo sinistro. A tal fine è stato realizzato un modello concettuale semplificato di ventricolo sinistro, costituito da una sacca elastica trasparente di forma semiellissoidale, fissata su di un piattello rigido, entro il quale sono alloggiati due valvole artificiali. La cavità ventricolare è collegata per mezzo di tubazioni ad un serbatoio posto ad una quota regolabile al fine di ottenere dentro la cavità stessa pressioni di base opportune. La sacca ventricolare è posta all'interno di un contenitore rettangolare in plexiglas pieno di acqua distillata. Il volume del contenitore viene fatto variare per mezzo di un pistone cilindrico sevocontrollato posto ad uno dei lati. Controllare la corsa del pistone significa quindi variare il volume della cavità ventricolare in vitro. Il piano medio della sacca ventricolare è illuminato per mezzo di un laser infrarosso da 12W e il fluido interno al ventricolo è inseminato con particelle in sospensione di diametro medio pari a 80 $\mu$ m. Una video camera digitale ad alta velocità acquisisce 500 immagini/s che vengono poi elaborate mediante un algoritmo di "feature tracking" per la determinazione dei campi di velocità. È possibile ricavare i campi adimensionali di velocità e di vorticità con una risoluzione temporale e spaziale tale da identificare le strutture vorticosi che si generano e seguire la loro evoluzione durante tutto il ciclo cardiaco. Modificando sia la frequenza della pulsazione cardiaca che il volume ventricolare corrente è stato possibile studiare l'influenza di questi parametri sulla struttura del campo di velocità.



# Moto pulsante di liquidi pseudoplastici

Irene Daprà

*DISTART, Università di Bologna*

*E-mail: irene.dapra@mail.ing.unibo.it*

Giambattista Scarpi

*DISTART, Università di Bologna*

*E-mail: Giambattista.scarpi@mail.ing.unibo.it*

*Keywords:* liquidi non newtoniani, moto pulsante meccanica dei fluidi.

Viene esaminato il moto piano laminare di un liquido non newtoniano pseudoplastico, sottoposto all'azione di un gradiente di pressione costante cui viene sovrapposta una perturbazione pulsante di piccola ampiezza. Questo tipo di moto non stazionario è interessante anche per le applicazioni tecniche, perché sfruttando la non linearità del mezzo è possibile ottenere un incremento della portata media. Dal punto di vista analitico l'equazione del moto non è risolubile in forma chiusa proprio per la non linearità della legge costitutiva del materiale. In un precedente lavoro, gli autori (I. Daprà, G. Scarpi, *XXIX Conv. Idr. e Costr. Idr.*, 2004), adoperando il modello di Williamson a due parametri per descrivere il comportamento del fluido, hanno fornito una soluzione analitica approssimata per il campo di velocità, che risulta espresso come sviluppo in serie di potenze dell'ampiezza del disturbo; e hanno anche valutato l'incremento della portata media nel periodo al variare della frequenza della perturbazione.

In questa nota viene proposto il confronto tra i risultati ricavabili dalla soluzione analitica e quelli ottenuti mediante una soluzione numerica diretta (col metodo delle differenze finite) dell'equazione del moto. Il liquido preso in esame è una sospensione in acqua di pigmento giallo (*milling yellow dye*) (F.N. Peebles, J.W. Prados, E.H. Honeycutt Jr, *Journal of Polymer Science*, 1963) con concentrazione 1.296%, di cui sono note le caratteristiche reologiche. Il confronto mette in evidenza che la soluzione analitica limitata alla seconda approssimazione dà risultati completamente sovrapponibili a quelli ottenuti per via numerica, rendendo quindi superfluo il calcolo di termini di ordine superiore.

Si è poi proceduto a confrontare i risultati analitici forniti dall'uso del modello di Williamson a due parametri con quelli numerici che si ottengono facendo ricorso a quattro altre relazioni costitutive di uso frequente in campo tecnico: Williamson a tre parametri, Oldroyd, Prandtl-Eyring e Ostwald-de Waele. Il valore numerico dei parametri in essi contenuti è stato determinato approssimando col metodo dei minimi quadrati i dati sperimentali disponibili in letteratura per il liquido in esame.

Nonostante le forti differenze della viscosità alle basse velocità di deformazione ossia in corrispondenza dell'asse dello strato, i valori delle velocità e delle portate che si ottengono con i vari modelli differiscono fra loro di poche unità per cento. Il ricorso a modelli eccessivamente complicati per problemi di questo tipo, trova quindi scarsa giustificazione.

# Dynamics of the vitreous humour during saccadic eye movements

Chiara Cafferata

*Dipartimento di Ingegneria Ambientale, Università di Genova*

*E-mail: caffec@diam.unige.it*

Rodolfo Repetto

*Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno, University of L'Aquila*

Alessandro Stocchino

*Dipartimento di Ingegneria Ambientale, Università di Genova*

*E-mail: jorma@diam.unige.it*

*Keywords: eye, vitreous motion, PIV measurements*

The vitreous chamber is the region of the eye comprised between the lens and the retina. This portion of the eye globe is filled by a viscoelastic material, the vitreous body, whose characteristics are significantly variable with age. In young people the vitreous is a gel like material and, with ageing, it typically deteriorates, losing its elastic properties and showing areas of partially or totally liquefied vitreous. During saccadic eye movements the vitreous body exerts a time dependent shear stress on the eye wall. This action, associated to retinal breaks or tears, is a possible cause of retinal detachment.

We present experimental results on the vitreous dynamics, achieved employing a magnified model of the vitreous chamber. The model consists of a cavity carved in a perspex cylindrical container which is filled with glycerol. Two different models have been used: in the first one the cavity is perfectly spherical, in the second one the sphere is deformed by a protrusion which simulates the presence of the lens. The eye model has been mounted on the shaft of a computer controlled motor which rotates with a prescribed time law. We first modelled the eye movements with a sinusoidal time law and then with a more complex time law reproducing real saccadic movements.

The vitreous motion induced by the wall is essentially confined on planes perpendicular to the axis of rotation, as proved by visualisations of the three dimensional flow. Measurements of the two-dimensional flow field on such planes have been carried out through the PIV technique. For the spherical model, theoretical results, based on a simplified solution, are in very good agreement with experimental findings. Results show that the maximum value of the shear stress at the wall does not significantly depend on the amplitude of saccadic movements. This suggests that relatively small eye rotations, being much more frequent than large movements, are mainly responsible for vitreous stresses on the retina. Preliminary results on the deformed model underline the generation of more complex flows. In particular the formation of a vortex in the neighbourhood of the lens is invariably observed. The implications of vortex shedding on the shear stresses acting on the retina are being analysed.



Mercoledì 14 settembre

---

MINI SIMPOSIO – *Nanotechnologies: Building up Structures at the Nano and Meso-Scales* 275



# Annulare i coefficienti di dilatazione termica dei laminati in composito: ottimizzazione con il metodo polare-genetico

Angela Vincenti

*LM<sup>2</sup>S, Université Paris 6 “Pierre et Marie Curie”*

*Case 161 – 4, place Jussieu – 75252 Paris, France*

*E-mail: vincenti@ccr.jussieu.fr*

Paolo Vannucci

*LEMA, Université de Versailles et Saint-Quentin en Yvelines*

*Bât. Descartes – 45, av. des Etas Unis – 78035 Versailles, France*

*E-mail: paolo.vannucci@meca.uvsq.fr*

**Keywords:** laminates, composite materials, polar method, genetic algorithm

**SUMMARY:** This paper deals with the design of composite laminates for zero thermal and hygral expansion and/or curvature coefficients in one or two directions. The problem is stated as a typical non linear optimization problem in the framework of the polar-genetic approach: solutions are minima of the objective function in terms of the laminate polar parameters, and a genetic algorithm is the solving technique. It is worth noting that the formulation is totally general, because we avoid all simplifying hypothesis and the new design problem of thermo-elastic properties of composite laminates can be stated as a unique unconstrained optimization problem, being possible to include several design criteria in one objective function. In this paper we give a detailed description of the theoretical statement of the problem and we show a great number of numerical results.

## *References:*

Goldberg, D.E. 1994. *Genetic algorithms*. New York: Addison and Wesley.

Jones, R. M. 1975. *Mechanics of composite materials*. New York: Mc Graw-Hill.

Ishikawa T. & Fukunaga H. 1986. *Taylored laminates with null or arbitrary coefficient of thermal expansion*. Proc. of Composites 86: Recent advances in Japan and the United States, Tokyo.

Le Riche R. & Gaudin J. 1998. *Design of dimensionally stable composites by evolutionary optimization*. Compos Struct, 41: 97-111.

Tsai S.W. & Hahn T. 1980. *Introduction to composite materials*. Technomic.

Vannucci P. 2002. *Tesi di HDR*, Université de Bourgogne, France (in francese).

Vannucci P. 2002. *Designing the elastic properties of laminates as an optimization problem : a unified approach based on polar tensor invariants*. Presentato a Struct Multidiscipl Optimization nel 2002.

Verchery G. 1982. *Les invariants des tenseurs d'ordre 4 du type de l'élasticité*. Proc. of Colloque Euromech 115, 1979, Villard-de-Lans (France). Published by Editions du CNRS, Paris, 93-104.

Vincenti A. 2002. *Conception et optimisation de composites par méthode polaire et algorithmes génétiques*. Tesi di dottorato, Université de Bourgogne, France (in francese).

Vincenti A., et al. 2003. *Design of composite laminates as an optimization problem: a new genetic algorithm approach based upon tensor polar invariants*. Proceedings del WCSMO5, Lido di Jesolo (Italia).

Curriculum vitae di Angela Vincenti, nata il 24 Marzo 1974 a Viterbo (Italia)

1999 Laurea in Ingegneria Meccanica, Università di Pisa

2002 Dottorato in Meccanica, Università della Borgogna, Nevers (Francia)

2005 Nomina a Maître de Conférences (ricercatrice universitaria), Université Paris 6 “Pierre et Marie Curie”

# Elasto-optic properties of $\text{PbWO}_4$ by means of Laser Techniques

F. Daví

Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni  
Università Politecnica delle Marche, 60131 Ancona

Sommario – Taluni materiali ferroelettrici sono anche otticamente attivi, ovvero le loro proprietà ottiche possono essere modificate mediante l'applicazione di azioni meccaniche od elettrostatiche. Nel primo caso si parla dei materiali “elasto-ottici” o fotoelastici, mentre nel secondo caso si parla di materiali “elettro-ottici”.

In questa memoria formuliamo una teoria del comportamento elettromeccanico di questi materiali mostrando come il più generale modello di continui ferroelettrici abbracci anche alcuni tipici effetti elettro- ed elasto-ottici come ad esempio gli effetti Kerr e Pockels. Applichiamo quindi i risultati ottenuti allo studio delle proprietà ottiche di monocristalli macroscopici di  $\text{PbWO}_4$ . In particolare mostriamo come la presenza di sforzi residui e di difettosità locali possano essere evidenziati mediante birifrangenza in luce laser e diffusa.

Abstract – Some ferroelectric materials are optically active, *i.e.* their optical properties can be changed by the application of an electric field (electro-optically active materials) or by means of a mechanical strain (elasto-optically active materials), a property which is at the basis of the well-known “photoelastic effect”.

In this paper we give a continuum mechanics formulation of these properties and show how some typical effects, namely the Kerr and Pockels effects as well as many others, can be encompassed in a continuum model of ferroelectric materials. The results we obtain are applied to the study of the optical properties of macroscopic single crystal of  $\text{PbWO}_4$ . In particular we shall show how local defects and residual stresses can be detected by laser and diffuse light induced birifrangence.

## References

- [1] E. Collett, *Polarized light: fundamentals and applications*. Marcel Dekker, Inc. New York, 1993.
- [2] J.F. Li, D. Viehland, X.H. Dai and Z.Xu, *Effect of quenched disorder on la-modified lead zirconate titanate: Long- and short-range ordered structurally incommensurate phases, and glassy polar clusters*, J. Appl. Phys. **84** (1998), no. 1, 458-471.

- [3] F. Daví and R. Rizzoni, *On Twinning and Domain Switching in Ferroelectric  $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ . Part I: twins and domain walls*, J. Mech. Phys. of Solids (2003), in print.
- [4] A. DeSimone and P. Podio Guidugli, *On the continuum theory of deformable ferromagnetic solids*, Arch. Rat. Mech. Anal. **136** (1996), 201-233.
- [5] G.R. Fowles, *Modern optics*, Dover Publications Inc., New York, 1975.
- [6] G.H. Haertling and C.E. Land, *Hot pressed  $(Pb,Lu)(Zr,Ti)O_3$  ferroelectric ceramics for electro-optic applications*, J.Am.Ceramic Soc. 54(1971), no. 1.
- [7] A. Chow, J.-F. Li, X. Dai and D. Vielhand, *Polarization switching mechanisms and electromechanical properties of La-modified lead zirconate titanate ceramics*, J. Mater. Res. 10 (1995), no. 4, 926-938.
- [8] C.S. Lynch, *The effect of uniaxial stress on the electro-mechanical response of 8/65/35 PLZT*, Acta mater. 44 (1996), 4137-4148.
- [9] I.M. Reaney, M.A. Akbas and W.E. Lee, *Domain structure-property relations in lead lanthanum zirconate titanate ceramics*, J. Mater. Res. **11** (1996), no. 9, 2293-2301.
- [10] G.A. Maugin, *Continuum mechanics of electromagnetic solids*. N.H. Series in Applied Mathematics and Mechanics, North-Holland, Amsterdam, 1988.
- [11] A.R. Michelson, *Physical optics*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
- [12] S. Müller, *Variational models for microstructure and phase transitions*, Springer Lecture Notes, Springer Verlag, Berlin, 1999.
- [13] Y.C. Shu and K. Bhattacharya, *Domain patterns and macroscopic behavior of ferroelectric materials*, Phil. Mag. B (2001), 2021-2054.
- [14] Q. Tan and D. Vielhand, *ac-field-dependent structure-property relationships in La-modified lead zirconate titanate: Induced relaxor behavior and domain breakdown in soft ferroelectrics*. Physical Review B **53** (1996), no. 21, 14103-14111.
- [15] Z. Xu, X. Dai and D. Vielhand, *Long-Time Relaxation from Relaxor to Normal Ferroelectric States in  $Pb_{0.91}La_{0.06}(Zr_{0.65}Ti_{0.35})O_3$* , J. Am. Ceramic. Soc. **79** (1996), no. 7, 1957-60.



# Computation of Strained Epitaxial Growth by Kinetic Monte Carlo

Giovanni Russo

Dipartimento di Matematica e Informatica  
Università di Catania  
Viale A.Doria 6, 95125 Catania, Italy  
russo@dmi.unict.it

Peter Smereka

Department of Mathematics  
University of Michigan  
Ann Arbor, MI 48109-1109, USA  
psmereka@umich.edu

Keywords: Strained Epitaxial Growth, Kinetic Monte Carlo, Multigrid methods

A numerical method for the computation of heteroepitaxial growth in the presence of strain using kinetic Monte Carlo has been presented. A solid-on-solid model is used and the elastic effects are incorporated using a linear ball and spring model. It is assumed that the film is mechanical equilibrium. The strain field in the substrate is computed by an exact solution which is efficiently evaluated using the fast Fourier transform. The strain field in the growing film is computed directly. The resulting coupled system is solved iteratively using the conjugate gradient method. We introduce various approximations in the implementation of the KMC to improve the computation speed. Numerical results show that layer-by-layer growth is unstable if the misfit is large enough resulting in the formation of three dimensional islands. Our results are in agreement with previous studies (see [1–3]).

Currently, we are in the process of solving the elastic equations for the deposited atoms using multigrid and then coupling the multigrid solver to the exact solution in the substrate. The multigrid is applied on a rectangular domain, in which the unoccupied site is filled with fictitious atoms, linked to real atoms by a spring of zero strength. A suitable connectivity matrix associated to each atom is defined to establish the strength of the spring between two atoms. The displacement of the atoms as well as the connectivity matrix are coarse-grained in the multigrid process. Preliminary results on a two dimensional model indicate that the multigrid approach is about one order of magnitude faster (on a typical case) with respect to conjugate gradient.

- [1] M. Biehl, M. Ahr, W. Kinzel, and F. Much, Kinetic Monte Carlo simulations of heteroepitaxial growth, *Thin Solid Films*, 428, pp.52–55 (2003).
- [2] C.Ratsch, P.Šmilauer, D.D.Vvedensky, A.Zangwill, Mechanism for Coherent Island Formation during Heteroepitaxy, *J. Phys. I France*, 6, 575–581 (1996).
- [3] C.H. Lam, C.K. Lee, and L.M. Sander, Competing Roughening Mechanisms in Strained Heteroepitaxy: A Fast Kinetic Monte Carlo Study, *Phys. Rev. Lett.*, 89, 16102 (1–4) (2002).

G.Russo is a full professor of Numerical Analysis at the University of Catania. He is associate editor of *SIAM J. Numer. Anal.* and author of more than 60 scientific publications on international journals. His research interests are: numerical methods for conservation and balance laws, and for kinetic equations, computational methods in crystal growth.

# Numerical Analysis of interface problems

Giulio Alfano (\*), Luciano Rosati

Dipartimento di Scienza delle Costruzioni, Università di Napoli 'Federico II', Italia

e-mail: gialfano@unina.it

*Keywords:* interfaces; cohesive zone; different scales.

Many engineering problems concern initiation and propagation of cracks along interfaces, which may be situated between two different, adhesively bonded solids of the same or different materials, or may represent weak joint surfaces within the same material. These types of problem can be posed at different scale: at large scale, e.g. for crack propagation in concrete dams [1]; at macro-scale, e.g. for crack propagation within brick masonry [2]; at meso-scale, e.g. for delamination of laminated composites [3-4]; at micro-scale, e.g. for fiber-matrix debonding [2]; or at nano-scale, e.g. for modelling nanotube-polymer interfaces [5]. Such different problems, though defined at so different scales, share common features and can be treated with similar approaches. In particular, a finite process zone can be individuated for many of these problems in the vicinity of the propagating crack, where the cohesive forces on the interface gradually decrease from a maximum value to zero. This observation led in the early sixties to the development of the so-called cohesive-zone models.

In this work it is shown that three different interface laws formulated in [1-4], originating from the Crisfield's mixed-mode cohesive-zone model, can be derived from a more general interface model which accounts for interface damage, plasticity or viscoplasticity and friction. The possible applications of the model to problems defined at very different scales is reviewed. Finally, computational, technical and theoretical issues related to the applicability of the interface model to micro- and nanoscale structures is discussed.

## *References*

- [1] Alfano G., Marfia S., Sacco E.. A cohesive damage-friction interface model accounting for water pressure effect on crack propagation. Submitted to Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005.
- [2] Alfano, G., Sacco E. Combining interface damage and friction in a cohesive-zone model, Submitted to Int. J. Num. Meth. Eng. 2005
- [3] Alfano G., Crisfield M.A. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues, Int. J. Num. Meth. Eng., 50(7): 1701-1736, 2001.
- [4] Alfano, G., Rosati L. Analysis of interface debonding through a damage/visco-plastic model, Proc. of COMPLAS VII. CIMNE, Barcelona, 2003.
- [5] Namila, S. Deformation mechanisms at atomic scales: role of defects in thermomechanical behaviour of materials, Ph.D dissertation, Florida State University, 2004.

(\* *Corresponding author's curriculum vitae:*

Lecturer of Structural Mechanics (Nov. 2001 to present); Post-doctoral researcher at Imperial College, London (1998-2001); Post doctoral researcher at University of Naples 'Federico II': (1996-1998); Ph.D. in Structural Engineering at University of Naples 'Federico II' (1997); Degree (with honours) in Civil Engineering, (1993).

# Non-local structural interfaces

Katia Bertoldi, Davide Bigoni, Walter J. Drugan<sup>1</sup>

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università di Trento*

*E-mail: katia.bertoldi@ing.unitn.it*

*Keywords:* structural interface, elliptical inclusion, crack

There are many mechanical problems involving interfaces joining different parts of a continuous body. Examples taken from biomechanics include: fibrous joints (suture, syndesmosis and gomphosis) and web-like trabeculae suspending the brain within the meninges. In solid mechanics, discrete structures joining continuous bodies can be found in cracks bridged by fibers, in the description of atomic interactions in contact (Movchan et al. 2003) and fracture (Gao et al. 2001) mechanics. These transition zones are characterized by well-defined microstructures.

Usually, mechanical interfaces are modeled by employing the concept of a zero-thickness imperfect interface. However, mechanical interfaces are in reality characterized by a finite thickness and structural properties, which are often overly simplified by the zero-thickness model. Two different efforts have been made to provide more refined models of thick interfaces, namely, Rubin and Benveniste (2004) have introduced a ‘transition-layer interface’ based on a Cosserat-shell description, whereas Bigoni and Movchan (2002) have suggested modelling of the interface as a truly discrete structure. In particular, the concept of structural interface has been introduced, possessing a finite width and specific mechanical properties. The interest in the proposal is that the incorporation of a specific structure in general introduces *non-local effects* and that these follow from the description in a natural and rational way. In other words, while a *zero-thickness* interface model is a phenomenological model, a structural interface provides a direct description of the relevant microstructure. The model proposed by Bigoni and Movchan (called ‘BM-model’ in the following) defines a quasi-local interface in the sense that non-locality is confined to opposite points on the interface. However, the BM-model is generalized in the present paper to incorporate the full non-locality induced by a generic truss structure joining two continuous media.

## *References:*

- Bigoni, D., Movchan, A.B., 2002. *Static and dynamics of structural interfaces in elasticity*. Int. J Solids Structures 39, 4843-4865.
- Movchan, A.B., Bullough, R., Willis, J.R., 2003. *Two-dimensional lattice models of the Peierls type*. Phil. Mag. 83, 569-587
- Rubin, M.B., Benveniste, Y., 2004. *A Cosserat shell model for interphases in elastic media*. J. Mech. Phys. Solids 52, 1023-1052

<sup>1</sup> On leave of absence from Department of Engineering Physics, University of Wisconsin Madison, USA

# Macroscopic effects of atomic modes in quasicrystals

Massimiliano Gei

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università degli Studi di Trento, Italia*

*E-mail: mgei@ing.unitn.it*

Paolo Maria Mariano

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza", Italia*

*E-mail: paolo.mariano@uniroma1.it*

*Keywords:* quasicrystals, phonon-phason interaction, wave localization, multifield theory

The linear dynamic behaviour of a planar quasicrystalline body with fivefold symmetry in infinitesimal deformation regime is analyzed. The spectral properties of a generalized acoustic tensor, including phason activity, are investigated, by varying the coupling coefficient between phonon and phason modes within the limits suggested by experimental uncertainties.

Some aspects of the variegated dynamical landscape are summarized below. They correspond to the special case in which phonon and phason circular frequencies coincide (other cases are treated in Mariano and Gei, 2005). i) In the limit case of vanishing phason friction, harmonic waves can propagate only below a critical threshold, so that a sort of wave localization accrues. ii) In addition to quasi-longitudinal and quasi-transversal waves, another wave appears and becomes prominent in a certain range of phason friction. We call *quasi-phasonic* this wave on the basis of the properties of the associated wave-vector. We show the existence of quasi-phasonic *standing* waves at a certain critical value of the coupling coefficient between phonon and phason modes. iii) The influence of phason friction is prominent only in a certain range. Moreover, beyond a certain finite value of phason friction, phason degrees of freedom are essentially frozen. iv) No quasi-phasonic waves exist when phason and phonon wave-vectors are aligned. v) Quasi-phasonic and quasi-longitudinal waves interact at certain values of phason friction.

## *References:*

Mariano, P. M., Gei, M. (2005), "Dynamic coupling between phonon and phason modes in quasicrystals", *submitted*.

# The polar method as a tool for the analysis and design of plane anisotropic problems

Paolo Vannucci

*Laboratoire d'Etudes Mécaniques d'Assemblages (LEMA) – Université de Versailles et S. Quentin  
Bât Descartes – 45, avenue des Etats-Unis – 78035 Versailles (France)  
E-mail: paolo.vannucci@meca.uvsq.fr*

*Keywords:* polar method, anisotropy, plane elasticity, laminates, optimal design.

**ABSTRACT.** As well known, anisotropy is the dependence of a physical property on the direction, and usually this implies some difficulties. A first one is the dependence of the response upon an increased number of parameters. Another difficulty is the dependence of such parameters upon the reference frame chosen to describe the phenomenon. A last typical difficulty of anisotropy is the mathematical transformation of the anisotropy parameters themselves after a change of frame, which is rather cumbersome.

The two last difficulties are not intrinsic to anisotropy, but to the kind of tensor representation. Normally, Cartesian components are used, which, as a matter of fact, are frame-dependent. So, it seems to have a certain interest to use, at least in some cases, a different tensor representation, based upon tensor invariants. This approach can be interesting *per se*, because able, in some cases, to shed a light on some physical aspects, but it can be useful also in some practical problems, where invariant quantities may reveal to be advantageous.

This paper is a general short presentation of the so-called polar method for plane anisotropy, presented as early as 1979 by G. Verchery; this approach is based upon a complex variable method, a technique once widely used in physical mathematics, see for instance Muskhelishvili, 1933, and Green and Zerna, 1954.

## REFERENCES.

- Vannucci, P., 2001. *On bending-tension coupling of laminates*. J. of Elasticity, **64**, 13-28.  
Vannucci, P., 2002<sub>a</sub>. *Thèse pour l'Habilitation à Diriger les Recherches*, Université de Bourgogne, Nevers (in French).  
Vannucci, P., 2002<sub>b</sub>. *A special planar orthotropic material*. J. of Elasticity, **67**, 81-96.  
Vannucci, P., Verchery, G., 2001<sub>a</sub>. *Stiffness design of laminates using the polar method*, Int. J. Solids Str., **38**, 9281-9294.  
Verchery, G., 1979. *Les invariants des tenseurs d'ordre 4 du type de l'élasticité*. Colloque Euromech 115, Villard-de-Lans. Published in 1982 by Editions du CNRS, Paris, 93-104 (in French).  
Vincenti, A., Vannucci, P. & Verchery, G., 2003. *Influence of orientation errors on quasi-homogeneity of composite laminates*, Composites Science and Technology, **63**, 739-749.

## CURRICULUM VITAE DI PAOLO VANNUCCI.

42 anni, Ingegnere Civile (Università di Pisa, 1991), Dottore di Ricerca in Ingegneria delle Strutture (Università di Pisa, 1996), *Habilitation à Diriger les Recherches* (Université de Bourgogne, 2002).

*Professeur des Universités (Mécanique)*, Université de Versailles et Saint Quentin dal 2003.

Ricerca: materiali compositi, ottimizzazione strutturale, algoritmi genetici, materiali piezoelettrici.

# Nano-pores in thermoelastic materials

Lucia Fiorino and Pasquale Giovine

*Università “Mediterranea” di Reggio Calabria, Italy*

*E-mail: giovine@unirc.it*

*Keywords:* continua with microstructure, nano-pores, thermoelasticity, acceleration waves

For many years the voids theory [4] has been the basis for the study of elastic materials with spherical lacunae finely dispersed in the matrix for which only the volume fraction of the pores has been introduced as an additional degree of kinematical freedom. But the scalar microstructure is not sufficient to describe the microdeformation of the holes when they are large; in fact the linear voids theory does not predict size effects in torsion of bars in an isotropic material, while they occur both in bending and in torsion, as observed [3] for bones and polymer foam materials.

A better refinement of the Cauchy theory is necessary to characterize the more complex structure, even if some problem of physical concreteness arises [2]. Hence, in [1] a mechanical theory for a medium with ellipsoidal structure has been developed to study porous solids with big vacuous cavities, that do not diffuse through the skeleton, for which the deformation of the pores is a pure strain.

In this work we use that idea and suppose that each material element of the body contains a nano-pore that can have a microstretch different from, and independent of, the local affine deformation ensuing from the macromotion. We obtain the balance equations for a thermoelastic continuum with nano-pores in presence of discontinuity surfaces. After we propose the appropriate constitutive equations in the case of an homogeneous centrosymmetric isotropic material, in order to derive the propagation conditions and the growth equations governing the motion of the homothermal macro-acceleration waves and to discuss the eventual couplings between the discontinuities. In particular, we observe that the shear optical micro-wave does not cause any disturbance in the mechanical and thermal fields, while the transverse and extensional micro-waves are coupled to the macro-acceleration transverse and longitudinal waves, respectively.

## *References:*

- [1] Giovine, P. (1996), Porous Solids as Materials with Ellipsoidal Structure, in Contemporary Research in the Mechanics and Mathematics of Materials, eds. Batra, R.C. and Beatty, M.F., CIMNE, Barcelona, 335-342.
- [2] Grioli, G. (2003), Microstructures as a Refinement of Cauchy Theory. Problems of Physical Concreteness, Continuum Mech. Thermodyn, 15, 441-450.
- [3] Lakes, R.S. (1986), Experimental Microelasticity of Two Porous Solids, Int. J. Solids Structures, 22, 55-63.
- [4] Nunziato, J.W., Cowin, S.C. (1979), A Nonlinear Theory of Elastic Materials with Voids, Arch. Rational Mech. Anal., 72, 175-201.

# Formulazioni deboli miste per solidi piani con microstrutture

Paolo Venini

*Dipartimento di Meccanica Strutturale, Università di Pavia, Italia*

*E-mail: paolo.venini@unipv.it*

Matteo Bruggi

*Dipartimento di Meccanica Strutturale, Università di Pavia, Italia*

*E-mail: matteo.bruggi@unipv.it*

*Parole chiave:* teoria multicampo, continui microfessurati, elementi finiti misti

**SOMMARIO:** con riferimento al modello multicampo di continuo piano microfessurato di Mariano, questo lavoro ne presenta due formulazioni deboli miste alla Hellinger-Reissner con le relative discretizzazioni agli elementi finiti misti. Vengono presentate simulazioni numeriche i cui risultati sono in pieno accordo con quelli originali di Mariano per quanto riguarda i campi di macro e micro spostamento. In più, grazie alla natura mista della formulazione utilizzata, vengono derivati e commentati i campi di sforzo e microsforzo non trattati nell'ambito delle formulazioni agli spostamenti presenti in letteratura.

## *Riferimenti bibliografici:*

Arnold D.N., Brezzi F., Douglas J.D. (1984), "PEERS: a new mixed finite element for plane elasticity", *Japan Journal of Applied Mathematics*, 1, pag. 347-367.

Brezzi F., Fortin M. (1991). *Hybrid and Mixed Finite Element Methods*, Springer.

Capriz G., (1989). *Continua with microstructures*, Springer Tracts in Natural Philosophy, 35.

Gurtin M.E., (2000). *Configurational forces as basic concepts of continuum physics*, Springer.

Johnson C., Mercier B., (1978), "Some equilibrium finite element methods for two dimensional elasticity problem", *Numerische Mathematik*, 30, pag. 103-116.

Mariano P.M., Stazi F.L. (2001), "Strain localization in elastic micro-cracked bodies", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 190, pag. 5657-5677.

Maugin G.A. (1995). "Material forces: concepts and applications", *Appl. Mech. Rev.*, 48, pag. 213-245.

Nascimbene R., Venini P., (2002), "A new locking-free equilibrium mixed element for plane elasticity with continuous displacement interpolation", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191, pag. 1843-1860.

Venini P., Nascimbene R., (2003), "A new fixed-point algorithm for hardening plasticity based on nonlinear mixed variational inequalities", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 57, pag. 83-102.

Paolo Venini - Professore associato di Scienza delle Costruzioni

Matteo Bruggi - Dottorando in Ingegneria Civile

# On-chip tests for the mechanical characterization of polysilicon at the micro-scale

Fabrizio Cacchione, Alberto Corigliano

*Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano. P. L. da Vinci, 32. 20133 Milano, Italy*

*E-mail: alberto.corigliano@polimi.it*

Biagio De Masi, Caterina Riva

*MEMS Business Unit, STMicroelectronics, via Tolomeo 1. 20010 Cornaredo, (Mi), Italy*

*E-mail: biagio.demasi@st.com*

*Keywords:* Microsystems, polysilicon, Young's modulus, rupture strength

The issue of mechanical characterization of polysilicon used in Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (Sharpe, 1999) is discussed in this paper. An innovative approach based on a fully on-chip testing procedure (Corigliano et al., 2004) is described; two ad hoc designed electrostatically actuated microsystems are used in order to experimentally determine the Young's modulus and the rupture strength of polysilicon. The first device is based on a rotational test structure actuated by a system of comb finger capacitors which load up to rupture a couple of tapered beams under bending in the plane parallel to the substrate. The second microsystem is based on a large holed plate forming with the substrate a parallel plate capacitor which moves in the direction orthogonal to the substrate. A couple of tapered beams placed at the centre of the plate is loaded up to rupture in bending in the plane orthogonal to the substrate. By means of the two devices, experimental data are obtained which allow for the determination of Young's modulus and rupture strength. The rupture values are interpreted by means of the Weibull approach.

## *References:*

Corigliano, A., B. De Masi, A. Frangi, A. Comi, A. Villa, M. Marchi. 2004 Mechanical characterization of polysilicon through on chip tensile tests, *J. Microelectromechanical Systems*, 13, 2, 200-219.

Sharpe, W.N., K.T. Turner, R.L. Edwards, 1999 Tensile testing of polysilicon, *J. Experimental Mechanics*, 39, 162-170.

## *Curriculum vitae:*

F. Cacchione graduated in 2003 at the Politecnico di Milano in Materials Engineering. He is now student of the PhD School in Structural, Earthquake and Geotechnical Engineering.

A. Corigliano graduated in 1988 (cum laude) at the Politecnico di Milano in Structural Engineering. He is now Full Professor at the Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano.

B. De Masi graduated in 1998 at the University of Pisa in Solid State Physics. He is now at the MEMS Business Unit of ST-Microelectronics, Cornaredo, Italy.

C. Riva graduated in 1993 in Physics at the University of Milano. She is now at the MEMS Business Unit of ST-Microelectronics, Cornaredo, Italy.



# Dissipation-function based modeling of shape memory effects

Davide Bernardini

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica - Università di Roma 'La Sapienza'*

Thomas J. Pence

*Department of Mechanical Engineering - Michigan State University*

*Keywords:* shape memory alloys, thermomechanics, hysteresis, dissipation function

Peculiar feature of Shape Memory Materials is the possibility to undergo thermally or stress-induced Phase Transformations (PT) among an austenitic phase (A) and multiple variants of Martensite (M). Models for the macroscopic behavior of SMM can be conveniently built within the Ziegler-Green-Naghdi framework where all the constitutive information follows from two constitutive functions: the free energy and the dissipation function. The transformation kinetic needs not to be assumed a priori but follows from the restrictions induced by the balance equations [1].

In a previous work [1] simple expressions of the two constitutive functions were proposed and explicit computations were carried out to show how increasing detail in the representation of the dissipation function provide for the incorporation of additional physical effects. Such refinement to the constitutive description can be made on a physical basis and the associated modifications communicate throughout the structure of the theory in a simple way.

In the present work new and more refined expressions for the dissipation functions are proposed. The new constitutive functions allow for the modeling of internal subloops in the pseudoelastic range as well as of the shape memory effects arising from the thermally induced transformations.

## *References*

- [1] Bernardini D., Pence T. J.: Models for one-variant shape memory materials based on dissipation functions. *Int. J. Non-Linear Mech.*, 37 (2002), pp. 1299-1317

# Flutter instability in elastoplastic solids with nonassociative flow rule: a dynamical interpretation

Davide Bigoni, Andrea Piccolroaz

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale*

*Università di Trento*

*Via Mesiano 77 – 38050 Trento*

*E-mail: bigoni@ing.unitn.it; andrea.piccolroaz@ing.unitn.it*

John R. Willis

*Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics*

*Centre for Mathematical Sciences,*

*Cambridge University*

*Wilberforce Road, Cambridge CB3 0WA U.K.*

*Keywords:* flutter instability; granular media, nonassociative elastoplasticity

Flutter instability in an infinite medium is a form of material instability corresponding to the occurrence of complex conjugate squares of the acceleration wave velocities. Although its occurrence is known to be possible in elastoplastic materials with nonassociative flow law and to correspond to some dynamically growing disturbance, its mechanical meaning has to date eluded a precise interpretation. This is provided here by constructing the infinite-body, time-harmonic Green's function for the loading branch of an elastoplastic material in flutter conditions. Used as a perturbation, it reveals that flutter corresponds to a spatially blowing-up disturbance, exhibiting well-defined directional properties, determined by the wave directions for which the eigenvalues become complex conjugate. Flutter is shown to be connected to the formation of localized deformations, a dynamical phenomenon sharing geometrical similarities with the well-known mechanism of shear banding occurring under quasi-static loading. Differently from the latter phenomenon, flutter may occur much earlier in a process of continued plastic deformation.



## Giovedì 15 settembre

---

ST14 – MECCANICA DELLE STRUTTURE	291
ST15 – MECCANICA DELLE STRUTTURE	297
SO10 – MECCANICA DEI SOLIDI	305



# Subcritical crack propagation in concrete structures

Fabrizio Barpi

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino, Torino*

*E-mail: fabrizio.barpi@polito.it*

Silvio Valente

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino, Torino*

*E-mail: silvio.valente@polito.it*

*Keywords:* cohesive, concrete, crack, dam, fatigue, size-effect, softening

The safety of cracked concrete dams is fundamentally affected by their mechanical behaviour under cyclic loading conditions. It is well known that concrete presents a diffused damage zone within which micro-cracking increases and stresses decrease as the overall deformation increases. This results in the *softening* of the material in the so-called *fracture process zone* (FPZ), whose size is comparable to that of a characteristic dimension of the structure. This dimension is not constant and may vary during the evolutionary process. In this context, a numerical method has to be used together with the *cohesive* or *fictional* crack model, also known as Barenblatt, Dugdale and Hillerborg model.

The proposed approach combines a micromechanical model for the static softening behaviour of cracked concrete in the fracture process zone (Huang & Li (1989)) with a local model along the FPZ for the hysteresis loop under unloading-reloading conditions (see Hordijk (1991)).

The loading process analysed in this paper is based on a first monotonic step stopped before reaching the peak load. Afterwards, a series of cyclic loading phases is applied, at increasing load levels, until collapse occurs. The results of numerical analyses appear in good agreement with the experimental data obtained in the case of wedge splitting tests.

## REFERENCES

- Hordijk, D. (1991), Local approach to fatigue of concrete, PhD thesis, Delft University (The Netherlands).
- Huang, J. & Li, V. (1989), 'A meso-mechanical model of the tensile behaviour of concrete', *Composites* **20**, 370–378.

*Curriculum vitae:* S. Valente is full professor of Structural Mechanics; F. Barpi is assistant professor of Structural Mechanics. Both work at Politecnico di Torino.

# A variational approach to limit analysis in elastic plastic beams

Giovanni Buratti

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Pisa*

*E-mail: g.buratti@ing.unipi.it*

Gianni Royer-Carfagni

*Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura, Università di Parma*

*E-mail: gianni.royer@unipr.it*

*Keywords:* Limit analysis, plastic hinge, non-convex minimization, holonomic plasticity.

A jump from the so called *Oberestreckgrenze* (upper yield point) to the *Unterstreckgrenze* (lower yield point) is well evident in strain-driven tests on low-carbon steel bars. In the constitutive equations commonly used to model the inelastic flexure of beams, such as in the elastic perfectly-plastic model, this jump is usually neglected, but here we show instead that it may drastically vary the structural response. In fact, when the constitutive equation presents such a gap at yielding, the moment-curvature relationship deduced from the Bernoulli-Navier hypothesis exhibits a strain-softening branch, while the associated flexural strain potential becomes non convex and with oblique asymptotes. Under the further hypothesis of holonomic plasticity, stable equilibrium configurations can be investigated as energy minimizers, but the particular form of the energy, i.e., its linear growth at infinity, allows for the possibility of discontinuities in the rotation fields of the beam axis. In fact, following a process similar to a phase transition, strain may suddenly localize as concentrated rotations [Del Piero] likewise in classical plastic hinges. Indeed, the notion of perfect plastic hinges, referred to as an “approximate” or “technical” model in classical limit analysis, is now rigorously contemplated by the possibility of discontinuities in the minimizing fields. Quite surprisingly, strain localizations of this type have been observed in inflexed I-shaped steel profiles in some old, but perhaps forgotten, experimental work [Nakanishi *et Al.*]. Moreover, through the proposed variational approach, the classical static and kinematic theorems of limit analysis follow immediately as variational inequalities. From this viewpoint ingenious methods, such as the technical approach by Neal and Symonds, can be interpreted in the language of non convex minimization and phase transitions.

## *References:*

Del Piero, G. 2003. *Structured deformation in plasticity*, Proceedings of 16th AIMETA Congress, Ferrara (Full text in CD-Rom).

Nakanishi, F., Ito, M., Kitamura, K. 1934. *On the yield point of mild steel beams under uniform bending*, ARIR, n.8(104), pp. 273-290. Also in: Selected papers by Nakanishi 1966, Department of Aeronautics, University of Tokyo Press, Japan.

*Curriculum vitae:* Giovanni Buratti, born in 1971, received his civil engineering degree from the University of Pisa in 1996, and his PhD degree from the University of Florence in 2001. He is presently Research Contractor. Gianni Royer-Carfagni is Professor of Scienza delle Costruzioni in the University of Parma.

## Comportamento di lastre di vetro stratificato

Silvia Briccoli Bati  
Giovanna Ranocchiai  
Cristina Reale  
Luisa Rovero

*E-mail: silvia.briccolibati@unifi.it*  
*E-mail: giovanna.ranocchiai@unifi.it*  
*E-mail: mc.francescareale@libero.it*  
*E-mail: luisa.rovero@ unifi.it*

*Facoltà di Architettura, Università di Firenze, Italia.*

*Parole chiave:* vetro strutturale, vetro stratificato, intercalare, PVB

Negli ultimi anni si assiste all'utilizzazione sempre più diffusa in architettura di lastre di vetro stratificato anche con funzione strutturale. Il comportamento stratificato (vetro-intercalare-vetro) è influenzato fortemente dal grado di collaborazione che l'intercalare è capace di instaurare fra le due lastre, attraverso tensioni tangenziali. La valutazione di tale collaborazione non è facile da definire perché dipende da molte variabili, fra cui le caratteristiche fisiche e meccaniche dell'intercalare, le variazioni di temperatura e la velocità e durata del carico. Oltre ai numerosi studi su piastre secondo la normativa americana, sono state svolte analisi teoriche e sperimentali su travi di vetro stratificato soggette a flessione (tra cui Hooper 1973, Albrecht et al. 2004, Briccoli Bati et al. 2005).

Il presente lavoro riguarda la caratterizzazione meccanica di travi di vetro stratificato soggette a flessione, con l'obiettivo principale di valutare il grado di collaborazione che l'intercalare instaura fra le lastre. In particolare sono state effettuate prove di flessione su quattro punti su travi di vetro stratificato con intercalari di tipo diverso e i risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti con un modello teorico (Hooper, 1973) e con un modello numerico in cui si tiene conto anche del comportamento viscoso dell'intercalare. Inoltre sono state svolte prove di taglio su campioni di stratificato per caratterizzare i parametri meccanici dell'intercalare.

### *Riferimenti bibliografici:*

Albrecht, G., et al. 2004. *Application and testing of laminated safety glass*, Costruire con strutture in vetro, Tipografia Editrice Pisana, Pisa.

Briccoli Bati S., et al. 2005, *Comportamento meccanico di lastre di vetro strutturale*, VI workshop sulle strutture composte, Trieste 22-23 novembre 2004, in stampa.

Hooper, J. A. 1973. *On the bending of architectural laminated glass*, Int. J. mech. Sci., Pergamon Press, G.B., vol. 15, pp. 309-328.

*S. Briccoli Bati* è professore ordinario di Scienza delle Costruzioni presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Firenze e svolge ricerca nell'ambito della meccanica dei materiali e delle strutture.

*G. Ranocchiai* è ricercatore presso il Dipartimento di Costruzioni dell'Università di Firenze e svolge attività di ricerca nell'ambito della meccanica sperimentale e dei materiali da costruzione.

*M.C. Reale* è dottorando presso il Dipartimento di Costruzioni dell'Università di Firenze e si occupa di materiali innovativi con particolare riguardo al vetro strutturale.

*L. Rovero* è ricercatore presso il Dipartimento di Costruzioni dell'Università di Firenze e svolge attività di ricerca nell'ambito della meccanica delle murature.



# Valutazione della sicurezza di grandi dighe mediante analisi globale inversa e reti neurali artificiali

Giulio Maier

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano,*

*E-mail: giulio.maier@polimi.it*

Roberto Fedele, Bartosz Miller

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano*

*Keywords:* dighe in calcestruzzo; diagnosi di danni; prove non distruttive; identificazione parametrica; reti neurali artificiali.

Le grandi dighe sono solitamente dotate di alcuni strumenti di misura in grado di fornire informazioni riguardanti la risposta deformativa a variazioni del livello di invaso. Questi strumenti diagnostici sono principalmente di due tipi: (i) collimatori, che misurano lo spostamento assoluto di alcuni punti del coronamento, in direzione ortogonale alla linea retta congiungente due punti fissi nei dintorni della diga; (ii) pendoli, situati nel corpo della diga in appositi tunnel, il cui numero e posizione sono stati normalmente previsti in sede di progetto. Il numero di tali strumenti nelle dighe esistenti è, allo stato attuale, piuttosto esiguo.

In questo studio, viene descritta una metodologia numerico-sperimentale finalizzata a stimare posizione ed intensità di possibili danni in dighe esistenti: i dati raccolti in situ mediante strumentazioni diagnostiche tradizionali sono stati analizzati attraverso simulazioni al computer e metodologie di identificazione parametrica non-convenzionali.

Si assume che il danno locale del calcestruzzo supposto isotropo sia rappresentato da un deterioramento della rigidità, vale a dire una riduzione del modulo di Young in una o più zone all'interno della diga, mentre il modulo di Poisson viene assunto a priori (Ardito et al., 2005; Maier et al., 2005). In molti casi, il deterioramento del modulo elastico e della resistenza è imputabile a processi chimico-fisici piuttosto estesi dal punto di vista temporale, come la reazione alcali-aggregati. Lungo decenni di vita di servizio di una diga, la reazione alcali-aggregati determina nel calcestruzzo, in misura correlata, un degrado sia della resistenza che della rigidità (Ahmed et al., 2003).

La diga in studio è stata suddivisa in dieci regioni omogenee, in ciascuna delle quali il modulo di Young viene assunto costante. Tale suddivisione è da intendersi come puramente esemplificativa e non appare costituire una seria limitazione dal punto di vista computazionale. La diga così suddivisa è stata discretizzata mediante elementi finiti convenzionali: i nodi appartenenti ad una regione opportunamente ampia intorno alla diga, le cui proprietà elastiche sono definite a priori, sono stati condensati a costituire dei vincoli elastici alla base della struttura. I dieci moduli di Young vengono assunti come parametri di danno, da identificare sulla base degli spostamenti relativi misurati dagli strumenti diagnostici disponibili (undici, tra pendoli e collimatori) in seguito ad un significativo abbassamento del livello di invaso (di breve durata, in modo da ritenere trascurabili gli effetti termici).

Allo scopo di stimare posizione ed intensità del danno in una grande diga, è stata qui utilizzata una metodologia recente, le reti neurali artificiali, le cui potenzialità e limitazioni di impiego sono state criticamente valutate con riferimento ad un caso concreto (ad esempio, si veda: Haykin, 1999; Mróz e Stavroulakis, 2005; Fedele et al., 2005). Tale procedura per analisi inversa differisce dalle tradizionali tecniche di identificazione parametrica, tanto nella formulazione del problema come nell'algoritmo risolutivo. In particolare, le reti neurali artificiali sono state impiegate con successo in presenza di scarsa informazione, quando cioè i dati forniti dagli strumenti diagnostici siano inferiori in numero ai parametri di danno da stimare, e/o particolarmente disturbati.

# Interazione fra fluido e struttura nell'analisi sismica di dighe in calcestruzzo

Guido Borino e Francesco Parrinello

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica Università di Palermo, Palermo.*

*E-mail: borino@unipa.it, parrinel@diseg.unipa.it*

*Keywords:* dinamica delle dighe, sismica, interazione fluido-struttura, danno nonlocale.

Il lavoro presenta un approccio agli elementi finiti per l'analisi dinamica di dighe in calcestruzzo soggette a sismi. L'analisi dinamica è sviluppata considerando le accelerazioni sismiche agenti sull'intero sistema diga-bacino. La discretizzazione spaziale impiega un approccio unitario agli elementi finiti sia per la struttura che per il fluido, mentre nello spazio dei tempi si opera con una tecnica di integrazione implicita al passo. Il corpo diga in calcestruzzo è discretizzato con elementi finiti agli spostamenti, mentre per il fluido presente nel bacino si adotta una particolare tecnica di discretizzazione con elementi finiti agli spostamenti, seguendo una descrizione di tipo Lagrangiano.

Il problema dinamico evolutivo è formulato nell'ambito degli spostamenti infinitesimi e delle piccole deformazioni, sia per la componente solido (corpo della diga) che per il fluido (acqua nell'invaso). L'adozione dello spostamento, come unica variabile, porta a semplici condizioni di accoppiamento; cioè, la componente normale di spostamento all'interfaccia solido-fluido è uguale nei due domini.

La diga in calcestruzzo è modellata da leggi non lineari di elasticità con danno che consentono di descrivere efficacemente sia la fratturazione diffusa, che la localizzazione delle deformazioni lungo superfici di rottura. Il "softening" indotto dal danno, non porta tuttavia un problema mal posto, ed il modello discreto risulta oggettivo con riferimento alla mesh di elementi finiti impiegati nell'analisi. Ciò è garantito dalla adozione di un legame di tipo non locale integrale per la sola variabile del danno.

Il fluido nel bacino è considerato compressibile, non viscoso e, al fine di eliminare i modi deformativi spuri, la condizione di campo irrotazionale negli spostamenti è imposta come vincolo interno mediante un approccio di tipo "penalty". Si considera inoltre la possibilità di effetti di cavitazione nel fluido, mediante una semplice relazione non lineare pressione-deformazione volumetrica.

Il lavoro presenta una dettagliata simulazione numerica bidimensionale, in stato piano di deformazione, agli elementi finiti di un sistema diga-bacino, soggetto ad una eccitazione sismica. Il sisma è considerato come una registrazione di accelerazioni imposte sul fondo rigido del bacino. Si riportano la storia degli spostamenti, degli sforzi indotti sulla diga, oltre alla distribuzione del danno nella struttura con l'obiettivo di qualificare e quantificare lo stato di sicurezza sismica del corpo diga.

*Acknowledgements:* La ricerca è stata effettuata con il contributo finanziario del MIUR tramite il progetto PRIN-2002 "Sistemi diga in calcestruzzo, fondazione e bacino: analisi di integrità strutturale in presenza di interazioni".

# Algorithms for the evaluation of the ultimate flexural limit state of RC sections

Luciano Rosati

Dipartimento di Scienza delle Costruzioni, Università degli Studi di Napoli *Federico II*, Italia

E-mail: [rosati@unina.it](mailto:rosati@unina.it)

*Keywords:* Limit states - RC sections - Non linear solution algorithms

The vast majority of modern building codes are based upon the limit state approach to the design of new structures and to the analysis and assessment of the existing ones. A renewed interest in such topic has developed in Italy after the recent proposal of a new seismic code [1].

However, in spite of its importance in everyday engineering practice, a detailed documentation of algorithms for the ultimate strength analysis of reinforced concrete sections subject to axial force and biaxial bending is rather exceptional [2-4].

Moreover, a thorough investigation on the numerical performances of each algorithm, in terms of convergence, computational efficiency and accuracy of the results is still lacking in the literature.

For this reason we here present a comparison between the performances of the secant algorithm presented in [5], which represents an enhanced version of the original algorithm formulated in [6], and the ones pertaining to a recently developed tangent algorithm [7]. The main motivation for addressing two completely different algorithms is to dispose of a robust solution scheme which can always provide a solution to the highly nonlinear problem under examination.

## *References:*

- [1] Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3270 del 20.03.2003, Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zone sismiche.
- [2] J. L. Bonet, M. L. Romero, P. F. Miguel, M. A. Fernandez, A fast stress section integration algorithm for reinforced concrete sections with axial loads and biaxial bending, *Computers & Structures*, **82**, 213-225, (2004).
- [3] W.A. Thanoon, A.M.M. Hamed, J. Noorzaei, M.S. Jaafar, B.J. Al-Silayvani, Inelastic analysis of composite sections, *Computers & Structures*, **82**, pp. 1649-1656, (2004).
- [4] M. G. Sfakianakis, Biaxial bending with axial force of reinforced, composite and repaired concrete sections of arbitrary shape by fiber model and computer graphics", *Adv. in Engrg. Software*, **33**, 227-242, (2002).
- [5] L. Rosati, G. Alfano, F. Marmo, Computational issues on the ultimate strength analysis of RC sections subject to axial force and biaxial bending, to be submitted, (2005).
- [6] L. De Vivo, L. Rosati, Ultimate strength analysis of reinforced concrete sections subject to axial force and biaxial bending, *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, **166**, pag.261-287, (1998).
- [7] G. Alfano, F. Marmo, L. Rosati, A tangent approach to the ultimate limit state analysis of RC sections, in preparation, (2005).

*Curriculum vitae:* Full professor of structural mechanics. Member of the National Secretary of the scientific area ICAR/08 "Scienza delle Costruzioni". Member of the Research Task Committee "Instructions for the Design, Construction and Control of Static Strengthening by means of fiber-reinforced composites", hosted by C.N.R. (National Research Council). Member of Excellence National Center "Structural composites for innovative applications".

# Un modello lineare di trave curva per l'analisi delle oscillazioni galoppanti di cavi sospesi

Angelo Luongo

*Disat, Università degli Studi dell'Aquila, Monteluco di Roio, AQ*

*E-mail: luongo@ing.univaq.it*

Daniele Zulli

*Disat, Università degli Studi dell'Aquila, Monteluco di Roio, AQ*

*E-mail: danzulli@ing.univaq.it*

Giuseppe Piccardo

*Diseg, Università degli Studi di Genova*

*E-mail: piccardo@diseg.unige.it*

*Parole chiave:* Galoppo dei cavi, aeroelasticità, instabilità, biforcazione, torsione dei cavi.

L'analisi delle oscillazioni galoppanti di cavi ghiacciati richiede un'accurata formulazione del modello meccanico. In letteratura, la struttura è generalmente modellata come cavo perfettamente flessibile, cioè come continuo monodimensionale suscettibile di sole traslazioni. Tuttavia, modelli semplificati di cavo hanno messo in luce l'importanza della rotazione torsionale nella determinazione delle forze aerodinamiche, e quindi sul comportamento dinamico del sistema. È dunque d'interesse formulare un modello coerente di cavo-trave, che porti in conto tutte le rigidità in gioco.

In questo lavoro si analizza la stabilità aeroelastica di cavi sospesi ghiacciati attraverso un modello continuo di trave curva indeformabile a taglio. Il modello permette di esprimere il contributo dell'angolo di torsione alle forze aerodinamiche. Si assume che il cavo, quando soggetto a peso proprio e alla componente stazionaria dell'azione eolica, assuma una configurazione piana, funzione nonlineare delle velocità del vento. Si sviluppano le equazioni che governano le piccole oscillazioni del sistema intorno a tale configurazione. Tenendo conto delle condizioni di vincolo interno, si ottengono quattro equazioni differenziali scalari nelle tre componenti di traslazione e nell'angolo di torsione. Effettuata un'analisi dell'ordine di grandezza dei diversi termini, si ottengono equazioni ridotte identiche a quelle del cavo perfettamente flessibile, alle quali si aggiunge un'equazione che determina il moto torsionale, una volta noto il moto fuori piano. Tenendo conto dell'elevata frequenza torsionale in rapporto a quella flessionale del cavo, si condensa staticamente l'angolo di torsione. Si adotta poi un modello approssimato di forza aerodinamica, impiegando la teoria quasi-statica e facendo uso della nozione di raggio caratteristico della sezione. Le equazioni del moto sono poi discretizzate alla Galerkin ed utilizzate per analizzare la stabilità dell'equilibrio del percorso nonlineare. Si presentano infine dei risultati numerici preliminari relativi ad una sezione ghiacciata inizialmente simmetrica rispetto alla direzione del flusso.

# A constitutive model for nonhomogeneous nonlocal elastic material

Aurora Pisano

*Faculty of Architecture, University 'Mediterranea' of Reggio Calabria, Italy*

*E-mail: aurora.pisano@unirc.it*

Paolo Fuschi

*Faculty of Architecture, University 'Mediterranea' of Reggio Calabria, Italy*

*E-mail: paolo.fuschi@unirc.it*

Castrenze Polizzotto

*Faculty of Engineering, University of Palermo, Italy*

*E-mail: cpoli@diseg.unipa.it*

*Keywords:* nonlocal elasticity, nonhomogeneous materials, nonlocal thermodynamics

A constitutive model for nonhomogeneous nonlocal elasticity, recently proposed by the authors (Polizzotto *et al.* [2005] ), is presented and discussed. Basically, a two-component local/nonlocal model is envisaged in which the stress is the sum of two contributions, one of which is the local stress, the other is of nonlocal nature. A central ingredient of the formulation is the *nonlocality energy residual* (Polizzotto [2001]) complying with two conditions: i) the *global insulation condition*, i.e. no energy is interchanged between the material and the exterior world due to nonlocality; ii) the pointwise *locality recovery condition*, i.e. the material behaves as a local one in any uniform strain state. These conditions, together with the Clausius-Duhem inequality, are used to derive thermodynamic restrictions upon the constitutive equations, including those on the residual and the free energy potential. An additional feature of the model is constituted by the concept of *equivalent distance*, argument of the attenuation (or influence) function, which accounts for the particle interaction attenuation effects caused by the nonhomogeneities both of the elastic moduli and the internal length.

## *References:*

Polizzotto, C. 2001. *Nonlocal elasticity and related variational principles*, Int. J. Solids and Struct., 38, 7359-7380.

Polizzotto, C., Fuschi, P., Pisano, A.A. 2005. *A thermodynamic framework for nonhomogeneous nonlocal elasticity*, Eur. Jour. of Mech. A/Solids, (submitted to).

## *Curriculum vitae:*

Aurora Pisano is Associate Professor of Solid and Structural Mechanics. She is Author of several scientific papers. Her more recent research interests are mainly focused on problems related to the constitutive material modelling either with a theoretical or a numerical approach.

# Caratterizzazione di proprietà meccaniche e di stati tensionali con prove locali in situ e reti neurali artificiali

Giulio Maier

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano*

*E-mail: giulio.maier@polimi.it*

Roberto Fedele

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano*

*Key-words:* prove non distruttive; diagnosi di danni; identificazione parametrica; reti neurali artificiali.

In questo studio vengono presentate due nuove metodologie numerico-sperimentali per la valutazione in situ di proprietà del calcestruzzo da dighe soggetto a fenomeni di degrado (soprattutto in conseguenza di reazioni alcali-aggregati, AAR), e per la stima degli stati di sollecitazione locali. La metodologie qui proposte come sinergica confluenza di sperimentazione in situ, simulazione al computer ed analisi inversa mediante reti neurali artificiali (ANNs) mostrano novità promettenti per il monitoraggio delle dighe esistenti.

- (1) La prima tecnica sperimentale può essere considerata un miglioramento del “pressure tunnel test”, da tempo impiegato nell’ingegneria geotecnica. Le principali novità proposte possono essere così descritte: ( $\alpha$ ) un piccolo foro (8-10 cm di diametro), che indicheremo con A, viene scavato nella diga; ( $\beta$ ) un secondo foro B viene praticato in una direzione parallela al foro A, e tre diametri sono misurati (in più sezioni su cui mediare) nel foro A dopo lo scavo sotto gli stati di sforzo pre-esistenti; ( $\gamma$ ) il foro B viene pressurizzato in campo elastico, e le variazioni dei tre diametri orientati come sopra vengono misurate in entrambi i fori; ( $\delta$ ) si incrementa il livello di pressione finché una frattura si propaga tra i due fori. I parametri locali che si riescono a stimare con questa prova sono: le due componenti di sforzo locali,  $\sigma_h$  e  $\sigma_v$ ; nell’ipotesi di isotropia, il modulo di Young  $E$  (il modulo di Poisson viene assunto a priori); la resistenza a trazione  $p_c$  e l’energia di frattura  $G_f$ .
- (2) Prove sperimentali con martinetti piatti vengono impiegate di frequente nell’ingegneria civile, allo scopo di stimare lo stato di sforzo locale ed il modulo di Young: esse presentano, tuttavia, serie limitazioni. La seconda metodologia sperimentale qui proposta consta di due fasi distinte: la fase A riguarda la identificazione delle proprietà elastiche e dello sforzo pre-esistente; la fase B riguarda le proprietà di frattura. Nella fase A i passi operativi sono i seguenti: (a) posizionamento delle basi di misura; (b) taglio verticale e misura degli spostamenti di quattro coppie di punti a cavallo di esso; (c) inserimento dei martinetti piatti nel taglio verticale e misure dei conseguenti spostamenti di quattro coppie di punti, dovuti alla pressione esercitata dai martinetti in pressione; (d) ed (e) sono gli stessi, rispettivamente, di (b) e (c) ma coinvolgono il taglio verticale. La fase B consiste nella pressurizzazione di un martinetto collocato opportunamente, che porti allo sviluppo di una frattura in una sorta di provino tipo “wedge-splitting test” generato da tagli aggiuntivi, e sulla misura di spostamenti relativi ai lati del percorso di propagazione della frattura. Questa fase può essere suddivisa in due parti: (f) vengono effettuati alcuni tagli aggiuntivi, in modo che una opportuna regione di materiale risulti praticamente isolata dal resto della diga e scarica, tranne che per la zona retrostante; (g) uno speciale martinetto piatto (progettato ad-hoc) viene inserito nell’intaglio, e alcuni spostamenti relativi vengono misurati lungo il percorso della fessura, a differenti livelli di pressione nei martinetti.

# Identificazione di parametri costitutivi con durometro, calco, simulazione ed analisi inversa

Enzo Josef Chiarullo

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano,*

*E-mail: chiarullo@stru.polimi.it*

Massimiliano Bocciarelli, Gabriella Bolzon, Giulio Maier

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano*

*Keywords:* durometri; prove non distruttive; identificazione parametrica; analisi inversa.

Le prove di durezza sono tradizionali esperimenti intesi a quantificare proprietà di materiali quali durezza e attraverso formule semiempiriche moduli elastici ed altri parametri costitutivi. In tempi recenti prove dette di “small punch” sono state studiate ai fini di determinare parametri costitutivi ancora mediante formule semiempiriche operando su provini estratti da componenti di impianti di cui occorra valutare eventuali danni strutturali.

In questa comunicazione si intende presentare una tecnica numerico-sperimentale che implica sostanziali innovazioni rispetto a le metodologie sopra accennate. La tecnica proposta si può delineare come segue: (a) uno strumento simile al tradizionale durometro viene impiegato in situ per produrre una impronta nella zona di interesse diagnostico sulla componente strutturale in esame; (b) viene registrato accuratamente il massimo carico applicato al dispositivo di penetrazione detto nel seguito indentatore; (c) una sostanza capace di cambiamento di fase da fluido viscoso a solido per abbassamento della temperatura a livello ambientale viene versata sull'impronta e ne costituisce un calco di alta precisione; (d) il calco così ottenuto viene portato in laboratorio dove la geometria dell'impronta viene accuratamente rilevata in termini digitali mediante profilometro laser o mediante strumento che rappresenta la controparte alla macroscale del “microscopio a forza atomica” (AFM) alla microscala e nanoscala; (e) la prova condotta in situ viene simulata con modello di elementi finiti in regime di grandi deformazioni con modello costitutivo contenente i parametri del materiale da identificare ai fini diagnostici o a fini di successive analisi strutturali fondate sul modello così calibrato; (f) viene effettuata analisi inversa ai minimi quadrati generalizzati, cioè viene minimizzata rispetto ai parametri da identificare una opportuna norma, pesata con la matrice di covarianza invertita delle misure, delle differenze tra quantità geometriche misurate e calcolate sull'impronta residua.

Il procedimento sopra delineato rappresenta uno sviluppo del filone di ricerca della microindentazione che ha dimostrato l'efficacia pratica dell'abbinamento di indentazione e rilievo di impronta per l'identificazione di parametri di materiali nelle microtecnologie. L'attuale innovazione consiste nella rinuncia alle curve di indentazione ai fini della analisi inversa che pertanto si focalizza sui rilievi di impronta.

La tecnica qui proposta presenta i seguenti vantaggi rispetto alla prassi attualmente adottata in sede industriale: è “non-distruttiva” ed economica nel senso che non richiede estrazione di provini dalla struttura in esame; richiede indentatore portatile molto più economico dei consueti indentatori da banco intesi a produrre “le curve di indentazione”; risultano ottenibili come dimostrato da questo studio preliminare parametri di modelli di materiali elastici ed anelatici o/e tensioni residue presenti nel sito esaminato.

In questa comunicazione si presentano i risultati di studi parametrici comparativi condotti in ambito elastoplastico in base a dati “pseudo-sperimentali” ottenuti con simulazioni di prove con indentatori di varia geometria. Sono in corso sviluppi ulteriori in cui si effettuano esperimenti con varie sostanze adatte al calco e vengono adottate reti neurali artificiali (ANN) da addestrare mediante insiemi di coppie di vettori contenenti parametri da identificare e dati sperimentali e da impiegare in termini di routine industriale in sostituzione delle analisi inverse computazionalmente onerose.

# Un approccio continuo all'analisi di stabilità aeroelastica di cavi sospesi in risonanza interna 1:2

Angelo Luongo

*DISAT, Università degli Studi de L'Aquila*

*E-mail: luongo@ing.univaq.it*

Giuseppe Piccardo

*DISEG, Università degli Studi di Genova*

*E-mail: piccardo@diseg.unige.it*

*Parole chiave:* oscillazioni galoppanti, dinamica dei cavi, aeroelasticità, biforcazione.

Cavi ghiacciati soggetti all'azione del vento, già a velocità relativamente basse, soffrono un fenomeno d'instabilità aeroelastica noto come galloping. Esso è generalmente ben descritto da un modello ad un grado di libertà (detto attivo), ottenuto con riferimento ad un modello sezionale oppure dedotto da un modello continuo discretizzato. Infatti, i modi stabili ignorati (detti passivi), spesso apportano un contributo marginale al moto; la forma di instabilità è perciò detta di galloping monomodale. Tuttavia, se il sistema è in condizioni di risonanza interna, più modi sono coinvolti nel moto. Accade infatti che, per il forte accoppiamento modale dovuto alla risonanza, il modo instabile ecciti significativamente anche i modi stabili, dando luogo a galloping multimodale.

Il presente lavoro si propone quale affinamento dell'analisi condotta in Luongo e Piccardo (1998) su un modello discreto di cavo sospeso in risonanza interna 1:2, ed è basato su un trattamento perturbativo al continuo delle equazioni non lineari del cavo. In particolare, adottando un modello continuo di cavo elastico ribassato, si descrive preliminarmente il percorso di equilibrio della struttura sotto l'azione della forza media del vento. Assunta una distribuzione uniforme delle forze, il cavo si dispone su un piano inclinato il cui angolo con la verticale è funzione della velocità del vento. Le equazioni del moto intorno a tale posizione di equilibrio risultano formalmente identiche a quelle del cavo soggetto al solo peso proprio, salvo introdurre una forza di gravità fittizia, funzione della velocità media del vento. Si effettua poi un'analisi perturbativa alle scale multiple dell'equazione integro-differenziale del moto. Adottando una soluzione generatrice a due componenti, costituita dai due modi risonanti, si determinano le modificazioni della forma spaziale dell'oscillazione, principalmente indotte dalle non linearità meccaniche quadratiche. Si perviene ad un sistema ridotto di tre equazioni differenziali ordinarie nel tempo (dette equazioni di modulazione, o di biforcazione). Queste governano l'evoluzione temporale delle due ampiezze incognite e della differenza di fase dei due modi, e sono asintoticamente equivalenti al sistema continuo originario. Un'analisi di stabilità del sistema ridotto rivela l'esistenza di più cicli limite (soluzioni periodiche) e di biforcazioni successive.

## *Riferimenti bibliografici*

Luongo, A. & Piccardo, G. 1998. *Non-linear galloping of sagged cables in 1:2 internal resonance*, Journal of Sound and Vibration, 214(5): 915-940.



# Nanodynamics: resonance of boron nanowires

Lorenzo Calabri

*Department of Mechanics and Industrial Technology (DMTI), Università di Firenze, Italy*  
*E-mail: lorenzo.calabri@unifi.it*

Weiqiang Ding, Xinqi Chen, Kevin Kohlhaas

*Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, IL, USA*  
*E-mail: w-ding@northwestern.edu, xchen@northwestern.edu, k-kohlhaas@northwestern.edu*

Nicola Pugno

*Department of Structural Engineering and Geotechnics, Politecnico di Torino, Italy*  
*E-mail: nicola.pugno@polito.it*

Rodney Ruoff

*Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, IL, USA*  
*E-mail: r-ruoff@northwestern.edu*

*Keywords:* nanowires; resonance; nano dynamics; experiments; mechanical properties.

Crystalline boron (B) nanowires (NWs) have been synthesized by the CVD method with preformed metal catalyst particles (Otten et al. 2002). We have investigated the mechanical resonance of B NWs. The mechanical resonances of cantilevered B NWs were excited and the resonance peak frequencies were used to obtain their bending modulus. The following effects have been considered: the presence of (i) intrinsic curvature, (ii) non-ideal clamps (boundary conditions), spurious masses (iii) and (iv) large displacements. The effect of the presence of nano-cracks on the oscillations could be also in principle detected (Pugno et al. 2000). An energy-based analytical analysis has been developed to treat such effects (i-iv) and their interactions; its effectiveness has been confirmed by numerical FEM analyses. After a correction based on this treatment, the Young modulus can be compared with that obtained from tensile tests. A parallax method was used to obtain the three-dimensional geometry of the NW based on two SEM images acquired at different tilt angles (Huang et al. 2004), and with this method, (i) the intrinsic curvature was quantified.

## *References:*

- Huang, Z., et al. 2004. *Three-dimensional representation of curved nanowires*, Journal of Microscopy **216**, 206.
- Otten, C. J., et al. 2002. *Crystalline boron nanowires*, Journal of the American Chemical Society 124(17), pp.4564-4565.
- Pugno, N., et al. 2000. *Evaluation of the non-linear dynamic response to harmonic excitation of a beam with several breathing cracks*, Int. J. of Sound and Vibration, 235, pp. 749-762.

*Curriculum vitae:* Lorenzo Calabri, Engineer and PhD student.

2004: During my Ph.D student activity, I collaborated with the “Northwestern University” (Chicago,IL,USA), working in their labs as a member of the prof. Ruoff group.

2004-2005: During my Ph.D student activity, we’ve opened a Nanotechnology Lab (LIN – Laboratory of industrial Nanotechnology).

# Identificazione dei parametri autoregressivi di un modello ARMA vettoriale attraverso algoritmi evolutivi

Loris Vincenzi, Marco Savoia\*

*DISTART – Tecnica delle costruzioni, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna*

*E-mail: loris.vincenzi@mail.ing.unibo.it*

*Keywords:* modelli ARMA, identificazione, algoritmi evolutivi

I modelli autoregressivi quali i modelli ARMAV (Auto Regressive Moving Average Vectors) sono modelli per l'analisi di sistemi multi-ingresso e multi-uscita (MIMO), proposti nella teoria dei sistemi [Guidorzi, 2003] e recentemente utilizzati anche per la caratterizzazione dinamica di strutture ad uso civile (ponti, edifici...) soggetti a eccitazione ambientale [Bodeux 2001]. La peculiarità di tali modelli consiste nella capacità di estrarre i parametri modali della struttura (frequenze proprie, smorzamenti e deformate modali) direttamente dai segnali ottenuti dalle registrazioni sperimentali provenienti da sensori posti sulla struttura, senza la necessità di misurare l'entità della forza eccitante. Per valutare le proprietà modali della struttura occorre risolvere il modello ARMA Vettoriale ricercando i coefficienti autoregressivi attraverso una procedura iterativa di ottimizzazione non lineare. La funzione "errore di predizione" è definita come la differenza tra il valore del segnale in uscita (ad esempio le accelerazioni misurate sulla struttura) rispetto al valore del segnale predetto attraverso il modello. La predizione è accompagnata dalla costruzione dell'associato filtro di Kalman [Bittanti, 2000].

Nel presente studio, per l'identificazione dei coefficienti del modello ARMA Vettoriale è stato adottato un algoritmo evolutivo, il Differential Evolution Method (DE) [Storn & Price, 1997]. Il DE è un algoritmo di ottimizzazione stocastico di ricerca diretta e parallela del punto ottimo che utilizza NP vettori contemporaneamente di dimensioni pari al numero dei parametri da identificare. Il vettore "popolazione" al passo generico è scelto attraverso la combinazione pesata dei vettori appartenenti alla popolazione al passo precedente. Tale metodo è stato utilizzato per caratterizzare la risposta dinamica di una struttura a telaio sottoposta a oscillazioni ambientali, utilizzando i segnali provenienti dalle registrazioni accelerometriche sperimentali forniti da sensori disposti opportunamente sulla struttura.

## Bibliografia

- Bittanti, S. 2002. *Identificazione dei modelli e sistemi adattivi*. Pitagora editrice, Bologna.
- Bodeux, J.B. & Golinval, J.C. 2001. *Application of ARMAV model to the identification and damage*
- Guidorzi, R. 2003. *Multivariable System Identification*, Bonomia University Press, Bologna.
- Storn, R., & Price, K. 1997. *Differential Evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces*. Journal of Global Optimization, 11 (4): 341-359.

*Curriculum vitae:* Loris Vincenzi è dottorando presso l'Università di Bologna. I suoi principali interessi di ricerca riguardano l'identificazione strutturale e problemi di ingegneria sismica. Marco Savoia è Professore Ordinario di Tecnica delle costruzioni presso l'Università di Bologna, e coordinatore del Laboratorio Prove Strutture. I suoi principali interessi di ricerca riguardano l'affidabilità strutturale, i materiali compositi, le strutture in calcestruzzo armato.

# Nanotube based NEMS

N. Pugno

*Department of Structural Engineering and Geotechnics, Politecnico di Torino, Italy;  
nicola.pugno@polito.it*

*Keywords:* NEMS, pull-in voltage, vibrations, nanotubes

A singly or doubly clamped nanotube suspended over an electrode, from which a difference in the electrostatic potential is imposed, can be considered an example of nanoelectromechanical system (NEMS). If the potential difference between nanotube and ground plane reaches a certain critical value (the so-called pull-in voltage) the nanotube becomes unstable and collapses onto the ground plane. It corresponds to an ON (conductive) state. When the nanotube and the ground plane are separated the device is said to be in the OFF (not conductive) state. The potential of NEMS is tremendous, reaching an integration level of the order of  $10^{12}$  elements per square centimeter and switching frequency in the GHz band.

In this paper oscillations (e.g., thermal) and instability of nanotube based NEMS are investigated. The role of the van der Waals forces, significant only for very small gaps (e.g.,  $\sim 10\text{nm}$ ), is also discussed; Pauli's repulsion must be considered only at the "contact", i.e., for gaps of  $\sim 1\text{nm}$ . Instead of solving numerically the elastic line equation of the nanotube in the finite kinematic and dynamic regimes, we equivalently study the oscillations taking place around the static configuration, deduced by minimizing the potential energy of the NEMS, by balancing the potential energy with the kinetic one. The kinetic energy (of the fundamental mode) is evaluated according to the Equipartition Theorem for finite temperature or according to the Uncertainty Principle at 0K.

Instead of imposing a voltage (force) control of the NEMS, an interesting current (displacement) control for singly clamped device can also be achieved thanks to the quantum mechanical effect of tunneling arising at the tip of the nanotube. Other types of control are also discussed.

In addition, the structural instability is predicted by setting to zero the oscillating frequency, i.e., by setting to zero the second order derivative of the NEMS potential energy. Such a simple prediction of the pull-in voltage is shown to be fundamental, since it represents the key design parameter, describing the ON/OFF transition of the device. Thus, the pull-in voltage estimated theoretically is compared with numerical simulations and with experimental results obtained by means of the realization of the nanodevice. A good agreement emerges, showing that our analysis could help in the design of NEMS.

## *References:*

- Pugno N., 2004. Non-linear dynamics of nanotube based NEMS. Recent Research Developments in Sound and Vibrations, Transworld Research Network, 2, 197-211.
- Pugno N., Ke C.H., Espinosa H., 2005. Analysis of doubly-clamped nanotube devices in the finite deformation regime, Journal of Applied Mechanics, 72, 445-449.
- Ke C.H., Pugno N., Peng B., Espinosa H., 2005. Experiments and modeling of carbon nanotube NEMS device, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 53/6, 1314-1333.

*Curriculum vitae:* Assistant Professor of Structural Mechanics

# Indentation size effect in poly-crystalline materials: a fractal geometry interpretation

Alberto Carpinteri, Simone Puzzi

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino*

*Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italy*

*E-mail: alberto.carpinteri@polito.it, simone.puzzi@polito.it*

*Keywords:* indentation size effect, size-scale effects, hardness, micro- and nano-indentation, fractals

Since the 1950's (Tabor [1951]), the hardness measurements have been recognized to be size dependent; a hardness increase with decreasing indentation depth (or indenter size) is always observed. In this paper, we propose an original interpretation of the Indentation Size Effect (ISE) in single crystal and polycrystalline metals, which is based on the experimental evidence of the formation of fractal cellular dislocation patterns during the plastic deformation of metals (Hähner et al. [1998]). When fractal patterns are present, the microstructure cannot be characterized at the meso-scale through an average dislocation density. In fact, the dislocation structure, which is the damage domain, is a lacunar fractal of dimension  $D$  comprised between 2 and 3. In this case, the same arguments already proposed by Carpinteri [1994] to derive the Multifractal Scaling Law (MFSL) for the tensile strength in brittle and quasi-brittle materials can be applied. As a consequence, the hardness of metals, evaluated by micro- and nano-indentation, can be interpreted by means of a power-law. Formally, the proposed equation is identical to the one already proposed by Stelmashenko et al. [1993] and Nix and Gao [1998], but the underlying physical model is completely different.

Eventually, some experimental hardness data from micro-indentation on copper have been fitted with the MFSL, showing a very good agreement.

## *References:*

Carpinteri, A. 1994. *Mechanics of Materials*, **18**, 89-101; *Internal Report*, Laboratory of Fracture Mechanics, Politecnico di Torino, N. 1/92 (1992).

Hähner, P., Bay, K. & Zaiser, M. 1998. *Physical Review Letters*, **81**, 2470-2473.

Nix, W.D. & Gao, H. 1998. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **46**, 411-425.

Stelmashenko, N.A. et al. 1993. *Acta Metallurgica et Materialia*, **41**, 2855-2865.

Tabor, D. 1951. *The hardness of metals*, Oxford University Press, Oxford.

## *Curriculum vitae:*

Alberto Carpinteri is Chair of Structural Mechanics at the Department of Structural and Geotechnical Engineering of the Politecnico di Torino.

Simone Puzzi is actually a Postdoctoral Fellow at the Department of Structural and Geotechnical Engineering of the Politecnico di Torino.

# Detection of a rigid inclusion in an elastic body by boundary measurements

Antonino Morassi

*University of Udine, Italy*

*E-mail: antonino.morassi@uniud.it*

Edi Rosset

*University of Trieste, Italy*

*E-mail: rossedi@units.it*

*Keywords:* inverse problems, linearized elasticity, stability estimates

We consider the inverse problem of determining a rigid inclusion inside an isotropic elastic body  $\Omega$ , from a single measurement of traction and displacement taken on the boundary of  $\Omega$ . For this severely ill-posed problem we prove uniqueness and a conditional stability estimate of log–log type.

*Curriculum vitae:* The scientific activity of the authors is mainly based on the study of general and applied inverse problems.

# Non-Isothermal Shear Band Localization in Finite-Deformation Crystal Plasticity

Daniele Rosato and Christian Miehe

*Institute of Applied Mechanics in Civil Engineering, Universität Stuttgart, Germany*

*E-mail: rosato@mechbau.uni-stuttgart.de, cm@mechbau.uni-stuttgart.de*

Antonio DeSimone

*SISSA, Trieste, Italy*

*E-mail: desimone@sissa.it*

*Keywords:* crystal plasticity, stored energy, dissipated energy, hardening, shear bands

In this work we analyze the formation of shear bands in single crystals within the framework of rate-independent plasticity under non-isothermal quasi-static loading conditions.

In particular we use a formulation of large strain rate-independent multisurface thermo-plasticity for single crystal. The theoretical framework is the continuum slip theory based on the multiplicative decomposition of the deformation gradient into a plastic part solely due to multislip on given crystallographic planes and a remaining part which describes elastic distortions and rigid rotations of the lattice.

A key feature of the present work is the use of constitutive equations which govern the slip resistance and the slip evolution which are motivated by micromechanical investigations of defects in crystals. The formulation of micromechanically motivated hardening laws for multislip is a cornerstone of the continuum slip theory and still an area of intensive research. We put particular emphasis on comparative investigations of hardening/softening effect of crystals under non-isothermal conditions, including aspects of latent energy storage.

Following classical arguments, Hull et al. [1984] and Kocks et al. [1975], we decompose the slip resistance into a so-called athermal part and a thermally activated part corresponding to short-range and long-range barriers to the dislocation motion, respectively. This distinction is based on the idea that short-range obstacles are thermally activated obstacles to slip, while long-range obstacles are athermal obstacles to slip.

We present and describe a numerical algorithm within the framework described above. We test the performance of our numerical algorithm on a typical benchmark example of finite-strain single-crystal thermoplasticity, namely, the localization of deformation into a shear band for the case of a rectangular strip. Experimental evidence for this problem is well documented. In the present work we analyze the deformation of the specimen and the temperature distribution within the deformed specimen. In particular, we compare the former with the deformation obtained within a rate-independent isothermal formulation in order to show the importance of the thermomechanical coupling in triggering the localization process.

## *References*

Hull D. and Bacon D. J. [1984], *Introduction to Dislocations*, 3rd Edition, Pergamon Press, Oxford.

Kocks U. F., Argon A. S. and Ashby M. F. [1975], *Thermodynamics and Kinetics of Slip*, Progress in Material Science, 19.

# Analisi sperimentale del legno strutturale antico

Mario Rosario Migliore, Felicita Ramundo

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università degli Studi di Napoli ITALIA*

*E-mail: mario.migliore@unina2.it, felicita.ramundo@unina2.it*

Giorgio Frunzio

*Dipartimento di Cultura del Progetto, Seconda Università degli Studi di Napoli ITALIA*

*E-mail: giorgio.frunzio@unina2.it*

*Keyword:* wood, restoration, mechanical behaviour, experimental testing

Si analizza il comportamento meccanico del legno strutturale antico, in fase elastica e alla crisi, al fine di una corretta modellazione del materiale e della valutazione dello stato di conservazione e di sollecitazione delle strutture in opera, avvalendosi dei risultati ottenuti da una campagna sperimentale.

Il lavoro si origina dallo studio delle caratteristiche anatomiche del materiale naturale ai diversi livelli di osservazione, che si presenta costituito da una microstruttura di tipo fibroso organizzata secondo anelli concentrici e contraddistinta da difetti intrinseci ed alterazioni degradative, particolarmente evidenti in elementi antichi.

Le proprietà di disomogeneità ed anisotropia e la particolare microstruttura permettono di modellare il materiale attraverso un solido dotato di ortotropia cilindrica in un riferimento cartesiano costituito dalle sue principali direzioni anatomiche. In tale riferimento si è definita la legge di comportamento elastico del materiale e sono stati individuati i parametri necessari alla definizione del suo legame costitutivo e alla valutazione delle resistenze più probabili nelle diverse condizioni di servizio.

La determinazione di tali parametri è stata perseguita nel caso di legno di castagno (*Castanea sativa* Mill.) proveniente da capriate risalenti al XVII sec., attraverso una serie di prove meccaniche effettuate su campioni di legno netto, privo di difetti ed alterazione degradative, in condizioni termogravimetriche standard, condotte secondo i criteri indicati nelle normative vigenti in materia riguardo alla geometria dei provini, agli schemi statici di prova, alla posizione degli appoggi e dei punti di misura.

La campagna ha previsto l'esecuzione di prove statiche di compressione, trazione, flessione e taglio lungo la direzione parallela alla fibratura e prove di compressione e trazione lungo la direzione ad essa ortogonale. I risultati ricavati dalle 121 prove effettuate sono stati elaborati su base statistica al fine di individuare dei valori di riferimento per i parametri elastici e di resistenza.

Le prove condotte fino a rottura hanno messo in evidenza le diverse modalità di crisi al variare dei tipi di sollecitazione e delle direzioni di anisotropia fornendo, inoltre, un notevole contributo alla realizzazione di modelli meccanici per lo studio del materiale alle diverse scale.

## *Riferimenti bibliografici*

Gibson L.J., Ashby, M.F.(1988), *Cellular solids: structure and properties*, Pergamon Press, Oxford.

Lemaitre J., Chaboche J.L. (1996), *Mecanique des materiaux solides*, Dunod, Paris.

Giordano, G. (2001), *Tecnica delle costruzioni in legno*, Hoepli, Milano.

Lemaitre, J. (2001), *Handbook of materials behaviour*, Academic Press, Londra.

Eberhardsteiner, J. (2003), *Mechanisches Verhalten von fichtenholz*, Springer, Wien.

ISO -UNI EN, *Norme tecniche sul legno strutturale*.

# Some thoughts on the motive power of chemical transformations

Roger Fosdick

*Department of Aerospace Engineering and Mechanics, University of Minnesota, Usa*

*E-mail: fosdick@aem.umn.edu*

Gianni Royer-Carfagni

*Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura, Università di Parma*

*E-mail: gianni.royer@unipr.it*

**Keywords:** Chemical transformation, phase transition, chemomechanics, chemomechanical engine, efficiency, cyclic process, nonconvex energy, nonconvex minimization.

The classical basic concepts of cyclic processes and the efficiency of heat engines are used here to conjecture about the laws of thermodynamics for open systems, i.e., systems that can exchange matter with a surrounding environment. No formal theory as a modification or alternative to the classical theories is presented: we limit ourselves to conjecture on what the concepts needed for a possible extension of the fundamental principles of thermodynamics to open system might be.

As a *Gedankenexperiment*, we draw upon earlier work [Buonsanti *et al.*] and consider an ideal chemomechanical elastic bar that changes its stiffness while undergoing a chemical transformation. This is caused by the mass transport from a surrounding environment of some substance that reacts with the material of which the bar is made. The reaction is supposed to follow a prescribed stoichiometric relationship and the system is “ideal”, in the sense that the chemical transformation is reversible. The volume of the bar, as well as its elastic modulus, varies with the degree of chemical reaction and, if the bar is loaded axially, this load will affect not only the bar strain, but also its chemical affinity and, consequently, the degree of reaction. In nature there are materials for which the ideal chemomechanical system described above represents a fair approximation. Stable equilibrium states are identified as minimizers of the total energy, which is assumed to be nonconvex in type. If the bar is loaded and then alternatively placed in environments at normalized chemical potentials either  $\mu_i$  or  $\mu_s > \mu_i$ , a reversible cycle analogous to the classical Carnot cycle may be traced. In this case, the environmental chemical potential plays the role of the temperature and the transported mass the role of entropy. For the system, the main form of interaction with the exterior, other than mechanical work, is the exchange of mass of a component at different environmental chemical potentials. It is then possible to obtain an elementary theory of chemomechanical engines in which efficiency estimates and related pertinent issues can be discussed. In particular, the maximum efficiency obtainable from any chemomechanical engine operating with chemical reservoirs at normalized chemical potentials  $\mu_i$  and  $\mu_s > \mu_i$  results to be  $eff = 1 - \mu_i/\mu_s$ , in close analogy with the efficiency  $eff = 1 - T_{min}/T_{max}$  for heat engines operating between the two different temperatures  $T_{min}$  and  $T_{max} > T_{min}$ .

## References

Buonsanti, M., Fosdick, R., Royer-Carfagni, G. (2005) Chemo-mechanical equilibrium of bars. *Journal of Elasticity*, Accepted for Publication.



# Acoustic emission due to compression of brittle materials: friction vs frictionless boundary condition

Giuseppe Lacidogna

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino*

*E-mail: giuseppe.lacidogna@polito.it*

Nicola Pugno

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino*

*E-mail: nicola.pugno@polito.it*

Alberto Carpinteri

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino*

*E-mail: alberto.carpinteri@polito.it*

*Keywords:* acoustic emission, structural monitoring, concrete compression test, damage mechanics

The diagnosis and monitoring techniques are assuming an increasing importance in the whole process of reliability assessment. Among these methods, the nondestructive methodology based on Acoustic Emission (AE), originally developed for industrial steel components, is nowadays being applied also in the field of civil structures. The focus of the paper is the analysis of the compression phenomenon in brittle materials, with an eye to the damage accumulation process, experimentally detected by AE sensors. The novelty is here represented by the experimental investigation on the influence of friction or frictionless boundary conditions, on compression of specimens composed by brittle materials and presenting different slendernesses. The energy dissipation is demonstrated to be strongly dependent on boundary conditions, in agreement with the numerical analysis performed by Carpinteri *et al.* (2001). Thus, the space-time scaling of the energy dissipated is analysed in depth and, consequently, a procedure for the prediction of the damage level and of the specimen life-time is proposed, including the effects of friction and slenderness.

## *References:*

Carpinteri A., Ciola F., Pugno N. 2001. *Boundary element method for the strain-softening response of quasi brittle materials in compression*, Computers and Structures, 79, 389-401.

Carpinteri A., Lacidogna G., Pugno N. 2003. *Acoustic emission during fragmentation of quasi-brittle materials in compression*, Atti del XVI Congresso Nazionale di Meccanica Teorica ed Applicata (AIMETA), Ferrara, Italy.

*Curriculum vitae:* G. Lacidogna Arch. Ph.D. Researcher in Structural Engineering. Member of the Italian Group on Fracture (IGF), and of the European Structural integrity Society (ESIS). Affiliated to the International Institute of Acoustic and Vibration (IIAV). Has published articles on international journals and presented papers at international conferences on creep of concrete structures, fracture mechanics and monitoring of concrete and masonry structures.

# Multi-material junctions with functionally graded materials

Marco Paggi

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: marco.paggi@polito.it*

Alberto Carpinteri

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: alberto.carpinteri@polito.it*

**Keywords:** Multi-material junctions; Interfaces; Functionally graded materials; Asymptotic analysis; Stress-singularity; Fracture.

Composites frequently involve situations where nonhomogeneous materials are either present naturally, or used intentionally to attain a required mechanical performance. Starting from Bogy (1968), bi- and multi-material junctions between different homogeneous materials have been characterized from the stress-singularity point of view. In these studies, the material parameters were assumed to be constant inside each material region and an abrupt discontinuity of the elastic properties at the interfaces was allowed.

More recently, another class of materials, conventionally referred to as functionally graded materials (FGMs), has been proposed, which involves materials whose elastic properties vary continuously. When two materials are joined together, an abrupt discontinuity of the elastic parameters, which is usually assumed for analytical purposes, does not exist in reality. On the contrary, materials in the proximity of the interface possess continuous, rapidly varying elastic moduli (Eischen (1987), Paulino (2002)).

In this paper the problem of stress-singularity due to multi-material junctions composed of angularly nonhomogeneous elastic wedges in plane elasticity is addressed. For this new type of grading the governing equation for the Airy stress function is derived and, by applying the eigenfunction expansion method, a fourth order ODE with nonconstant coefficients for the eigenequation is obtained. The solution to this ODE permits to formulate an eigenvalue problem similar to that valid for material junctions between homogenous different materials. Moreover, it is mathematically demonstrated that the angular grading influences the order of the stress-singularity. The potentials of the use of this new class of materials in joining technology are carefully investigated and some illustrative examples involving three-material junctions are deeply discussed. Comparisons with the corresponding results obtained from homogeneous materials are also proposed.

## *References:*

Bogy D.B. 1968. Edge-bonded dissimilar orthogonal elastic wedges under normal and shear loading. *ASME Journal of Applied Mechanics* 25, 460-466.

Eischen J.W. 1987. Fracture of nonhomogeneous materials. *International Journal of Fracture* 34, 3-22.

Paulino G.H., Ed. 2002. Special Issue on Fracture of Functionally Graded Materials. *Engineering Fracture Mechanics* 69.

**Curriculum vitae:** Marco Paggi is Post-Doctoral Research Fellow. Alberto Carpinteri is the Chair of Structural Mechanics at the Politecnico di Torino.

# Cyclic micro-slip and energy dissipation on elastic rough interfaces

Mauro Borri-Brunetto,

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: mauro.borribrunetto@polito.it*

Stefano Invernizzi

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: stefano.invernizzi@polito.it*

Marco Paggi

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: marco.paggi@polito.it*

Alberto Carpinteri

*Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy*

*E-mail: alberto.carpinteri@polito.it*

*Keywords:* cyclic tangential contact, rough interfaces, fractals.

A generalized approach is proposed, following the Mindlin and Deresiewicz procedure, to study the cyclic behavior of surfaces in contact under a small oscillating tangential force. In order to make the procedure straightforward and as general as possible, a non-dimensional formulation, based only on the normal contact load-displacement curve, has been provided. It turns out that the non-dimensional behavior under normal or tangential loading, as well as the energy dissipation involved in cyclic loading, strongly depends on the exponent  $\alpha$ . This exponent can be calculated explicitly in the case of profiles described by mathematical expressions (e.g. cylinders and spheres), or can be determined from best fitting of experimental or numerical data (e.g. from ICARUS simulations).

The larger is the exponent  $\alpha$ , the larger is the energy dissipated in small amplitude (partial-slip) tangential cycles.

Moreover, a comparison has been provided, without any claims of completeness, among some of the theoretical models for the tangential interaction of rough surfaces available in the literature. The calculation of the exponent  $\alpha$  allows us to show the influence of different statistical distribution assumptions of surface heights on the hysteretic energy dissipation.

Finally, the stick-slip behavior of rough surfaces subjected to oscillating loads has been interpreted in terms of an analogy with the shake-down phenomenon described by the theory of plasticity.

*Curriculum vitae:* Mauro Borri-Brunetto and Stefano Invernizzi are Assistant Professors of Structural Mechanics. Marco Paggi is Post-Doctoral Research Fellow and Alberto Carpinteri is Professor of Structural Mechanics at the Politecnico di Torino.

## Indici



# Indice degli Autori

- Adamini R. 231  
Addressi D. 238  
Ageno A. 67, 159  
Ahn-Vu P. 139  
Aiello M. 53  
Aimi A. 233  
Alaggio R. 190  
Alessandri C. 266  
Alfano G. 279  
Alfi S. 97  
Allotta B. 177, 178  
Almondo A. 138  
Angeles J. 19  
Antoci C. 240  
Antonini M. 231  
Argentini G. 184  
Aristodemo M. 11, 35, 36  
Artioli E. 109  
Ascione F. 129, 131  
Auricchio F. 109  
Bachschmid N. 45, 46, 54, 232  
Badalassi P. 27  
Balaras E. 267  
Baldini A. 50  
Barpi F. 291  
Bartoli I. 145  
Basili M. 16, 173  
Bassani R. 20, 132, 133, 225  
Bassi A. 187  
Beccari A. 24  
Bechi A. 224  
Beirão Da Veiga L. 109  
Belforte P. 94  
Belloli M. 260  
Benati M. 116  
Benedettini F. 190  
Benfratello S. 246, 248  
Benvenuti E. 235  
Berardi V.P. 131  
Bernardeschi K. 124  
Bernardini D. 286  
Bertoldi K. 280  
Betti M. 163, 251  
Biagini P. 150, 163  
Bigoni D. 29, 280, 287  
Bilotta A. 84, 216  
Bisegna P. 31  
Blondeaux P. 186  
Bocciarelli M. 300  
Bolzon G. 300  
Bonisoli E. 221, 222  
Bonneau D. 253  
Bono G. 187  
Bonori G. 229  
Borboni A. 106  
Borino G. 83, 262, 295  
Borri C. XXV, 156, 167, 251  
Borri-Brunetto M. 312  
Bortolotti L. 236  
Boscolo M. 8  
Bosia F. 115  
Botte V. 183  
Bottoni M. 42  
Braghin F. 92, 228  
Brancaleoni F. 250  
Brasile S. 219  
Briccoli Bati S. 293  
Brigante M. 70, 172  
Brighenti R. 71, 143  
Bruggi M. 7, 284  
Bruni S. 48, 98  
Bruno D. 43, 65  
Bruzzone L. 77  
Bucca G. 48  
Buffoni M. 158  
Buonsanti M. 206, 265  
Buratti G. 292  
Buresti G. 155  
Bussola R. 106, 231  
Cacchione F. 285  
Caddemi S. 63, 90  
Caffarelli A. 14  
Cafferata C. 271  
Calabri L. 80, 302  
Calderini C. 123  
Callegari M. 79, 105, 174  
Cammalleri M. 24  
Camposaragna M. 117, 198  
Capecchi D. 202  
Capizzano F. 153  
Caporale A. 56  
Capuani D. 29  
Carannante F. 13, 89  
Carbone G. 23, 47, 134  
Carini A. 147, 187, 233  
Carli M. 133  
Carloni D. 178  
Carmignani C. 27  
Carpino R. 65, 127  
Carpinteri A. 32, 64, 86, 115, 128, 142, 143, 305, 310, 311, 312  
Carrera E. 8  
Carta G. 15, 107  
Carta S. 236  
Caruso G. 31  
Carvelli V. 113  
Casciaro R. 216, 219  
Casciola C.M. 209, 211, 241  
Casini P. 188  
Casolo F. 117, 198  
Catalano P. 153  
Cattaneo B. 198  
Cavacece M. 17  
Cavaleri L. 248  
Cavicchi A. 121  
Caviglia G. 146  
Cazzani A. 112  
Cecati F.P. 124  
Ceccarelli M. 134  
Cecchi A. 122  
Cenedese A. 269  
Cercignani C. 148  
Cerri M.N. 88  
Chatterton S. 78, 96, 104, 135  
Cheli F. 92, 93, 199, 201

Cheli R. 177, 260  
 Chen X. 80, 302  
 Chiaia B.M. 179  
 Chiarullo E.J. 300  
 Ciampi V. 173, 238  
 Ciampoli M. 164  
 Ciaravino L. 243  
 Cinquemani S. 198  
 Cinquini C. 7  
 Cireddu D. 236  
 Ciucci M. 173  
 Ciulli E. 20, 132, 133, 225  
 Cluni F. 189, 217  
 Cocetta M. 117  
 Collina A. 48, 94, 200  
 Colombo L. 142  
 Comi C. 141  
 Corigliano A. 58, 285  
 Cornetti P. 64, 179  
 Corradi R. 97  
 Costa C. 167  
 Costantino D. 265  
 Cottone A. 41  
 Cottone G. 162  
 Cowin S.C. 205  
 Cristallo A. 267  
 Cucco F. 144  
 D'Ottavio M.  
 Daprà I. 270  
 Davì F. 276  
 De Angelis E. 211  
 De Angelis F. 108  
 De Angelis M. 16, 173  
 De Cicco S. 203  
 De Divitiis N. 118  
 De Donato O. 147  
 De Falco D. 74  
 De Masi B. 285  
 De Miranda S. 9, 182  
 De Simone A. 307  
 De Stefano G. 183  
 Del Piero G. 208  
 Del Prete Z. 269  
 Dell'Isola F. 110, 171  
 Delprete C. 221, 222  
 Denaro F.M. 183  
 Desimone H.J. 49  
 Di Cicca G.M. 214  
 Di Gioia A. 114  
 Di Paola M. 162  
 Di Puccio F. 18, 224, 252  
 Diligenti M. 233  
 Ding W. 80, 302  
 Domenichini F. 268  
 Donelli R. 214  
 Doria A. 91  
 Drugan W.J. 280  
 Fabbrocino F. 70, 172  
 Fabris D. 91  
 Facchinetti A. 97  
 Facchini L. 150, 163  
 Faggioni M. 229  
 Fagiano C. 8  
 Faglia R. 79, 106  
 Failla B. 262  
 Failla G. 85  
 Falsone G. 161, 247  
 Fassi I. 103  
 Fedele R. 294, 299  
 Feo L. 129, 131  
 Feriani A. 147, 187, 233  
 Ferracuti B. 68  
 Ferraresi C. 79, 102  
 Ferro G. 247  
 Figliolini G. 19, 175  
 Fileccia Scimemi G. 220  
 Fiorino L. 283  
 Foglia M. 25, 26, 231  
 Formica G. 84, 219  
 Fornarelli F. 185  
 Forte P. 27, 224, 252  
 Forte S. 120  
 Fosdick R. 34, 309  
 Foti P. 34  
 Fotia G. 181  
 Fraldi M. 13, 89, 205  
 Frangi A. 114  
 Fraraccio G. 173  
 Freddi F. 10, 263  
 Frémond M. 263  
 Frendo F. 252  
 Frigo B. 179  
 Frosini L. 223, 259  
 Frunzio G. 308  
 Fuschi P. 298  
 Gabiccini M. 18  
 Gabriele S. 250  
 Gallati M. 240  
 Galletti B. 158  
 Galvanetto U. 53, 59, 66  
 Gambini E. 180  
 Gaspari D. 35  
 Gattulli V. 87  
 Gei M. 33, 281  
 Gentile A. 25, 26  
 Gesualdo A. 140, 234  
 Gherardi F.  
 Ghisi A. 58  
 Ghoneam S.M. 55  
 Giacopini M. 50  
 Giambanco G. 14, 41, 220, 246  
 Giangulio E. 92  
 Giannini O. 188  
 Giberti H. 78, 96, 101, 104, 135  
 Gigli G. 242  
 Giordano A. 131  
 Giovine P. 283  
 Gray L. 139  
 Greco A. 43, 63  
 Greco F. 127  
 Grimaldi R. 238  
 Gualtieri P. 209, 241  
 Guarracino F. 140  
 Guida D. 215  
 Guiggiani M. 18, 252  
 Gusella V. 217  
 Ianiro N. 110  
 Iannucci L. 53  
 Incerti G. 134, 136  
 Invernizzi S. 312  
 Iollo A. 158  
 Iovieno M. 210  
 Ippolito M. 142  
 Iudicone D. 183  
 Iungo G.V. 155  
 Iuso G. 214  
 Jacob B. 209  
 Kahraman A. 4  
 Khan A. 77  
 Kohlhaas K. 80, 302  
 La Ragione L. 204  
 Lacarbonara W. 193  
 Lacidogna G. 86, 128, 310  
 Lagagnina M. 261  
 Lagomarsino S. 123  
 Lampis M. 148  
 Lancioni G. 174  
 Lanza Di Scalea F. 145  
 Lanzo A.D. 216  
 Lanzoni L. 30  
 Laudiero F. 130  
 Le Baratoux Y. 253  
 Leardini A. 226  
 Legnani G. 76, 101, 103, 119,  
 198  
 Lenci S. 174

Leo E. 200, 228  
 Leonetti L. 11  
 Lepidi M. 87  
 Limone C. 252  
 Lippiello M. 203  
 Lombardi G. 154  
 Lonetti P. 43, 127  
 Lopez S. 38  
 Lorenzani S. 148  
 Lorenzi V. 137  
 Lourenço P. 218  
 Lucchesi M. 237  
 Luchini P. 239, 244, 245  
 Luciano R. 56  
 Lucifredi A. 257  
 Luisi A. 179  
 Luongo A. 297, 301  
 Maier G. 294, 299, 300  
 Makris N. 3  
 Malena M. 216  
 Mallardo V. 266  
 Malvezzi M. 73  
 Manconi E. 72  
 Mancusi G. 129  
 Manfredi E. 20  
 Manganiello F. 181  
 Mangialardi L. 23, 47, 75  
 Mantriota G. 23  
 Marati N. 211  
 Marfia S. 40  
 Margonari M. 37  
 Mariani S. 57, 58, 141  
 Mariano P.M. 281  
 Marmo F.  
 Marongiu C. 153  
 Marzani A. 145  
 Marzano S. 34  
 Maso M. 91  
 Mattiazzo G. 255, 256  
 Mattoni A. 142  
 Maurini C. 171  
 Mauro S. 255, 256  
 Mazza M. 36  
 Mazzotti C. 42  
 Melzi S. 48, 199, 201  
 Meschini A. 254  
 Mieke C. 307  
 Migliore M.R. 308  
 Milana V. 39  
 Milani G. 218  
 Milella A. 26  
 Miller B. 294  
 Mimmi G. 176, 223  
 Minghini F. 130  
 Minutolo V. 89  
 Modano M. 70, 172  
 Molari L. 182  
 Molari P.G. 253  
 Molfino R.M. 77, 79  
 Monetto I. 264  
 Morassi A. 63, 84, 90, 306  
 Morgando A. 194, 195, 196, 197  
 Morro A. 116, 146  
 Muscolino G. 168  
 Musolino A. 225  
 Nappa L. 203  
 Navarra G. 248  
 Negri A. 176, 223  
 Nevone Blasi P. 65  
 Niccolini G. 86  
 Niro L. 97  
 Novati G. 37, 114  
 Nunziantè L. 13, 140, 234  
 Olivieri A. 213  
 Omodei A. 119  
 Orlandi P. 242  
 Ottoboni A. 226  
 Padovani C. 124  
 Paganelli D. 100  
 Paggi M. 32, 128, 311, 312  
 Paglietti A. 107  
 Palizzolo L. 14  
 Palmeri A. 168  
 Palpacelli M. 105  
 Pandolfi A. 57, 181  
 Panzeca T. 39, 144  
 Paolone A. 192, 193  
 Paoloni M. 102  
 Papa E. 125  
 Papini S. 178  
 Pappatico M. 85  
 Parenti Castelli V. 226  
 Parrinello F. 83, 295  
 Pascazio G. 212  
 Pasquinelli G. 124  
 Pasquino M. 70, 172  
 Pastorelli S. 102, 138, 175, 255, 256  
 Pavani R. 57  
 Pedrinelli M. 93  
 Pedrizzetti G. 268  
 Pedrocchi N. 101, 119  
 Pellicano F. 229  
 Pence T.J. 286  
 Pennacchi P. 21, 28, 45, 46, 232, 258, 259  
 Pennestri E. 17, 20  
 Pescarmona F. 102  
 Piana E. 231  
 Picano F. 241  
 Piccardo G. 297, 301  
 Piccigallo B. 132  
 Piccolroaz A. 287  
 Pignataro M. 69  
 Pirrotta A. 165  
 Pirrotta S. 254  
 Pisano A. 298  
 Piva R. 211  
 Pizzigoni B. 94  
 Placidi L. 110  
 Poggi C. 113  
 Polacco A. 20  
 Poli F. 180  
 Polizzotto C. 298  
 Porcu M.C. 15, 107  
 Porfiri M. 171  
 Pozzi A. 215, 239  
 Pralits J.O. 244  
 Prati E. 44, 52  
 Principi M. 105  
 Pugi L. 73, 177, 178  
 Pugliese G. 20  
 Pugno N. 64, 80, 81, 115, 142, 302, 304, 310  
 Pulci Doria G. 243  
 Puzzi S. 305  
 Querzoli G. 269  
 Radi E. 30  
 Ramundo F. 308  
 Ranieri N. 173  
 Ranocchiai G. 293  
 Rea P. 175  
 Reale C. 293  
 Regazzoni M. 176, 223  
 Reina G. 25, 26  
 Renzi E. 16  
 Repetto R. 271  
 Resta F. 200, 228, 260  
 Ricciardelli F. 160  
 Righettini P. 78, 96, 101, 104, 135  
 Rinchi A. 177  
 Rindi A. 73, 177, 180  
 Ripamonti F. 98  
 Riva C. 285



Riva R. 137  
 Rivasi S. 50  
 Rizzi N.L. 69, 122, 126  
 Rizzo R. 225  
 Rizzo S. 220  
 Rizzoni R. 208  
 Robaldo A. 8  
 Robinson P. 59  
 Rocchi D. 98  
 Romani M.  
 Romeo F. 192  
 Romeo M. 149  
 Rosati L. 207, 279, 296  
 Rosato D. 307  
 Rosi R. 50  
 Rosset E. 306  
 Rottenbacher C. 176, 223  
 Rovati M. 111, 112  
 Rovero L. 293  
 Royer-Carfagni G. 10, 12, 292, 309  
 Ruoff R. 80, 81, 302  
 Russo A. 261  
 Russo G. 278  
 Ruta G.C. 69, 202  
 Sabbioni E. 92, 199, 201  
 Sacco E. 40  
 Salerno M. 39  
 Salvatore F. 241  
 Salvadori A. 139, 233  
 Salvatori L. 156  
 Santini A. 85  
 Santoro R. 165  
 Savoia M. 42, 68, 303  
 Sburlati R. 82  
 Scarpi G. 270  
 Scarpulla F. 83  
 Schiavi W. 252  
 Schipani C. 180  
 Sepe V. 166  
 Serpieri R. 207  
 Sibilla S. 240  
 Šilhavý M. 237  
 Silvestri M. 12, 44, 52, 72  
 Silvestri P. 257  
 Sinatra R. 79, 254, 261  
 Sinopoli A. 67, 159  
 Smereka P. 278  
 Sorge F. 51, 230  
 Soria L. 23, 75  
 Sorli M. 138, 175, 255, 256  
 Sornioti A. 194, 195, 196, 197  
 Spinelli D.  
 Springhetti R. 37  
 Spuria M. 253  
 Stadler K. 133  
 Stefanelli R. 22  
 Stocchino A. 271  
 Strada R. 137  
 Stringano G. 212  
 Strozzi A. 50  
 Strzelecki S. 55, 99  
 Symonds P.S. 187  
 Taliercio A. 111, 125  
 Tanzi E. 54, 232  
 Tasora A. 44, 52, 72  
 Tazzioli R. 202  
 Tazzoli R.  
 Terravecchia S. 144  
 Tiboni M. 134, 136, 231  
 Tognaccini R. 215, 245  
 Tomasini G. 200  
 Tordella D. 210  
 Tosi A. 260  
 Tosi D. 101, 103, 106  
 Towarek Z. 99  
 Tralli A. 30, 218, 235  
 Troiani G. 213  
 Tullini N. 130  
 Turco E. 84  
 Turetta T. 41  
 Tuzi R. 186  
 Ubertini F. 9, 182  
 Vaccari A. 257  
 Valente S. 250, 291  
 Valentini P.P. 22  
 Valoroso N. 207  
 Vania A. 21, 28, 45, 46, 258  
 Vannucci D. 73  
 Vannucci P. 275, 282  
 Vantadori S. 143  
 Varano V. 126  
 Vasta M. 166  
 Vatta F. 227  
 Veber D. 111  
 Velardocchia M. 194, 195, 196, 197  
 Venini P. 7, 284  
 Versaci M. 265  
 Verzicco R. 212, 267  
 Vestroni F. 87, 88, 188, 193  
 Vidoli S. 88, 171  
 Vighiani A. 221, 222, 227  
 Vignoli A. 163  
 Vincenti A. 275  
 Vincenzi L. 303  
 Viola E. 145  
 Violaris G. 66  
 Visioli A. 76, 119  
 Vita L. 17, 22  
 Vitagliano P.L. 153  
 Vittori G. 185  
 Willis J.R. 287  
 Xi F. 261  
 Zani N. 237  
 Zannetti L. 157  
 Zappa B. 137  
 Zavarise G. 32  
 Zavelani Rossi A. 125  
 Ziliani G. 76, 119  
 Zingales M. 165, 249  
 Zito L. 144  
 Zoppi M. 77  
 Zorzutti A. 93  
 Zuin A. 201  
 Zulli D. 190, 297

# Indice delle Keywords

- 4WS 199
- acceleration waves 283
- acoustic emission 86, 128, 310
- active protection 179
- active vibration isolation system 172
- adattamento elastico 14
- adesione 83
- adhesion 47
- advanced simulation 164
- aerodynamic coefficient 118
- aerodynamics 154
- aeroelastic stability 166
- aeroelasticity 156, 167, 180
- aeroelasticità 297, 301
- affidabilità 68
- agricultural robotics 26
- air entrainment 243
- algoritmi evolutivi 303
- algoritmi genetici 106
- algoritmo 254
- allenamento in-door 176
- analisi ad intervalli 250
- analisi cinematica 105
- analisi delle curvature 18
- analisi di dati bivariati 258
- analisi dinamica 246
- analisi inversa 300
- analisi limite 121
- analisi limite elastica 246
- analisi modale 260
- analisi per sottodomini 35
- analisi sismica 15
- analisi statica 124
- analisi tensionale 144
- analytical model 113, 243
- analytical series solution 50
- anelli di tenuta 52
- anisotropia 110, 123, 209, 234
- anisotropia limite elastico 107
- anisotropic elasticity 112
- anisotropic material 149, 181
- anisotropic media 205
- anisotropy 282
- apprendimento iterativo 119
- archi 126
- armamenti ferroviari 98
- array microfonico 98
- artificial neural networks
- asperities 220
- asymmetry
- asymptotic analysis 311
- atomistic simulations 142
- attrito 125
- attrito misto viscoso-coulombiano 230
- attrito visco-secco
- attuatori pneumatici 104
- attuatori ridondanti 78
- autodeformazione
- automazione agricola 25
- automotive 201
- axisymmetric bodies 237
- backlash 229
- banco prova 96, 134
- beam damage 88
- BEM 10, 233, 266
- bending stiffness 33
- bi-dimensional equilibrium 206
- bi-phase materials 265
- biforcazione 297, 301
- biforcazione flesso-torsionale 69
- bifurcation 34, 229
- biomeccanica 117, 176, 223
- blocky structures 220
- bluff bodies 157
- bluff body aerodynamics 155
- Boltzmann equation 148
- boundary elements 37
- bridge dynamics 156
- bridges 167
- brittle fracture 142
- buckling 71
- calcolo numerico 7
- calibration 158
- cam synthesis 137
- cambio sequenziale 178
- camma ad S 178
- camme 134, 135, 138
- campo aleatorio 68
- capillarity 239
- captazione 177
- carichi statici
- carrelli elevatori a forche 75
- cars 154
- casco 53
- catenaria 48, 177
- cavi 87
- cavi sospesi
- CFD 154
- CFL condition 184
- channel flows 215
- chaos 187
- characteristic function 162
- chemical transformation 309
- chemomechanical engine 309
- chemomechanics 309
- ciclo-ergometro 223
- cinematica 198
- cinematica parallela 78, 104
- civil structures
- classes of elastic symmetry 112
- co-rotational formulation 38
- codici numerici 20
- coesione 125
- cohesive 291
- cohesive crack 141
- cohesive zone 279
- combustione 241
- comfort 91, 200, 224
- complementarità 72
- complex systems 164
- comportamento hardening 228
- composite laminate 40
- composite materials 275
- composites 57, 58

compositi (FRP)  
 compositi laminati 264  
 compressible jets 210  
 computational fluid dynamics 245, 267  
 computational plasticity 109, 207  
 concentrated load 50  
 concrete 291  
 concrete compression test 310  
 condizioni di interfaccia 240  
 conglomerato 236  
 consistent tangent 207  
 constitutive problem 108  
 contact mechanics 82  
 contatto 44  
 contatto ruota-rotai 98  
 continua with microstructure 283  
 continui microfessurati 284  
 continui micropolari 111  
 continuously variable transmission 23  
 contour tracking 76, 119  
 controllo 177  
 controllo di forza 76, 119  
 controllo passivo e semi attivo  
 controllo strutturale semi attivo 16  
 controllore LQR 199  
 coppie rotoidali 44  
 counterweight 261  
 crack 54, 280, 291  
 crack arrester 179  
 cracked tensioned plates 71  
 crank mechanism 253  
 creep 128, 131  
 cricca 232  
 criterio di rottura 236  
 critical wind curves 200  
 crystal plasticity 307  
 cupole in muratura 124  
 curvatura iniziale 190  
 curved laminated 65  
 CVT 23, 24  
 cyclic process 309  
 cyclic tangential contact 312  
 dam 291  
 damage 238  
 damage and friction nonlinear behaviors 219  
 damage mechanics 310  
 damage of glued concrete structures  
 damaged detection 85  
 damping 171  
 damping forces 114  
 danneggiamento 63  
 danneggiamento strutturale 66  
 danno 87, 90  
 danno biologico 75  
 danno nonlocale 266, 295  
 danno ortotropo 216  
 debonding 56  
 dechoesion 262  
 decomposizione del dominio 11  
 decomposizione di Cartan 120  
 deformabilità 130  
 deformabilità tagliante 129  
 delamination 43, 65, 128  
 delaminazione 41, 59  
 delimitazioni 14  
 destrezza 78  
 deterioration 164  
 determinazione del volume di inclusioni 84  
 diagnosi di danni 294, 299  
 diagnostica 21, 28, 136, 231, 257  
 diamagnetici 222  
 different scales 279  
 differenziale autobloccante 22  
 differenziali 194  
 dighe in calcestruzzo 294  
 dinamica 87, 198, 254, 257  
 dinamica autoveicolo 93  
 dinamica dei cavi 189, 301  
 dinamica dei rotori 27, 45, 46, 227, 258, 259  
 dinamica delle dighe 295  
 dinamica di marcia 97  
 dinamica di sistemi meccanici 138  
 dinamica discontinua 67, 159  
 dinamica forzata 190  
 dinamica libera 190  
 dinamica non lineare 228  
 direct method of multiple scales 193  
 direct numerical simulation 183, 185  
 discontinuous Galerkin 182  
 discretization procedures 193  
 disordered structures 163  
 dispositivi magnetoreologici 16, 173  
 dissipated energy 307  
 dissipation 268  
 dissipation function 286  
 distributed sensors 89  
 DNS 212  
 domain damage 263  
 doppia via 24  
 dual algebra 19  
 dual inertia operator 116  
 dual vectors 116  
 durabilità 131  
 durometri 300  
 duttilità 12, 14  
 dynamic characteristics 55  
 dynamic loads 160  
 dynamic response 30  
 earthquakes 86  
 eddy-current 265  
 edge detection 52  
 effetto giroscopico 221  
 efficiency 309  
 EHD lubrication 253  
 eigenvalue problems 145  
 Einstein-Smoluchowsky equation 162  
 elastic  
 elastic foundation 99  
 elastic solutions 13, 205  
 elastic stability 208  
 elasticity 82, 204, 262  
 elasticità non lineare 124  
 elasticità piana 11, 120  
 elasto-hydrodynamic lubrication 133  
 elasto-optic properties 276  
 electric circuits 171  
 electric networks 31  
 elementi di contorno 11, 35, 39  
 elementi di contorno simmetrici 36  
 elementi finiti 42, 56, 68, 83, 123  
 elementi finiti equilibrati 125  
 elementi finiti misti 7, 284  
 elementi finiti stocastici 247  
 elementi misti 216  
 elliptical inclusion 280  
 elongation  
 emodinamica 269  
 energy flux 146

energy release rate 65  
 energy release rate evaluation 43  
 enumeration of mechanisms 17  
 equazione di Duffing 228  
 equazioni integrali 266  
 errori strumentali 63  
 esponenti di Lyapunov 67  
 esponenti di scala 213  
 exact integration 109  
 excavators 99  
 experimental data 243  
 experimental measurements 188  
 experimental testing 308  
 experiments 80, 302  
 exponential map 109  
 extended finite elements 141  
 eye 271  
 face-milling 18  
 fast multipole algorithms 235  
 fatica 59  
 fatigue 291  
 fattori di scalatura 92  
 FEM 140  
 fibra di carbonio 236  
 film sottili 83  
 film thickness 133  
 filtro di Kalman 199  
 finite differences 184  
 finite element 8, 37, 128, 150, 174  
 finite element damaged model 88  
 finite element method 32, 181  
 finite fracture mechanics 64  
 fisica matematica 202  
 flight simulation 255, 256  
 flow fluctuations 155  
 flow-structure interaction 180  
 fluid mechanics 239, 244  
 fluoroelastomero 52  
 flusso oscillante 185, 186  
 flusso pulsante 186  
 flutter instability 287  
 forzanti campionatoate 246  
 forze di contatto pneumatico-strada 92  
 fractals 305, 312  
 fractional absolute moments 162  
 fractional derivatives 162  
 fracture 311  
 fracture mechanics 71, 139, 141, 143, 179  
 fracture toughness 64  
 frattura 140  
 frattura meccanica 144  
 free surface 239  
 friction 188  
 FRP 129, 131  
 FRP retrofitting 128  
 FRP strengthening 127  
 functionally graded materials 13, 141, 311  
 fundamental solutions 203  
 funzioni modulanti 27  
 fuzzy methods 265  
 g.d.l. disaccoppiati 103  
 Galerkin 10, 39  
 Galerkin approach 163  
 galoppo dei cavi 297  
 Gauss principle 74  
 gear 229  
 gear dynamics 4  
 gear wear 4  
 generatore 259  
 genetic algorithm 275  
 gioco 44  
 giroscopio MEMS 228  
 granular material 204  
 granular media 287  
 gravity 239  
 Griffith theory 142  
 gruppo di simmetria 120  
 handling autoveicolo 199  
 hardening 307  
 hardness 305  
 hardware in the loop 96, 197  
 heat transfer 212  
 helicoidal 54  
 hexapod 261  
 higher order spectra 136  
 HIL 178  
 holonomic plasticity 292  
 homogenization 31  
 hot wire 214  
 human cornea 181  
 human knee 226  
 hybrid stress finite elements 9  
 hydrodynamic lubrication 55  
 hydrophobicity 47  
 hyper-singular integrals 233  
 hysteresis 286  
 identification techniques 88  
 identificazione 63, 87, 90, 303  
 identificazione di guasti 28  
 identificazione parametri 201  
 identificazione parametrica 294, 299, 300  
 identificazione sperimentale 27  
 ILC 119  
 immersed boundaries 267  
 impact factor 200  
 impact loading 187  
 impatto 53  
 impedenza 224  
 impianti frenanti 195  
 incertezza dei parametri meccanici 250  
 incordatura 117  
 incrudimento 107  
 indentation size effect (ISE) 305  
 indicial functions 156, 167  
 infinite domains 174  
 infinitesimal rigid body displacement  
 influenza del taglio 51  
 ingobbamenti termici 45, 46  
 inhomogeneous materials 205  
 initial-value mechanical problems 147  
 input stocastico 159  
 instability 33  
 instabilità 297  
 integral equations 139, 235  
 integral non locality 262  
 integration algorithm 109  
 integrazione mecatronica 175  
 integrazione nuclei ipersingolari 36  
 intelligent structures 171  
 interaction box 115  
 interazione dinamica ruota-rotaia 94  
 interazione fluido-struttura 240, 295  
 interazione veicolo-armamento 168  
 intercalare 293  
 interfacce 41  
 interfaccia 83, 264  
 interfaccia aptica 78  
 interface 33, 65, 262  
 interface damage 263  
 interface debonding 32  
 interface models 127, 220  
 interfaces 279, 311  
 intergrid algorithms 180  
 intralaminar damage 43

inverse problems 306  
 isotropia 103  
 isotropic material 34  
 Jourdain principle 74  
 Kalman filter 58  
 Karhuen-Loeve expansion 249  
 kayak 176  
 kinematic analogue 147  
 kinematics 19  
 kinetic Montecarlo 278  
 kit selespeed 178  
 lagrangian formulation 253  
 laminates 275, 282  
 large eddy simulation 183  
 laser techniques 276  
 lastra di Kirchoff 36  
 lavabiancheria 260  
 leaky waves 244  
 least squares method 86  
 left ventricle 268  
 legame costitutivo 123  
 leggi di scala 209, 211  
 lifting platform 137  
 limit analysis 218, 292  
 limit states 296  
 linear programming 218  
 linear viscoelasticity 149  
 linearized elasticity 306  
 linked interpolation 9  
 liquidi non newtoniani 270  
 local energy minima 208  
 localisation 86  
 localizzazione  
 logica di controllo 196  
 long span bridges 166  
 low-order models 158  
 lubrificazione 135, 277  
 M-DOF system control 70  
 macchine a cinematica parallela 105  
 macchine agevolatrici 25  
 macchine agricole 25  
 macchine rotanti 21, 28  
 machine dynamics 99  
 machine vision 26  
 maggiorazione errore 15  
 magic formula di Pacejka 92  
 MAGLEV 225  
 magneti permanenti 221, 222  
 maneggevolezza 252  
 manipolabilità 105  
 manipolatori paralleli 103  
 manipulators 100  
 masonry 218, 237  
 materiali compositi 56, 59  
 materiali eterogenei con microstruttura non periodica 217  
 materiali policristallini 110  
 materiali pultrusi 42  
 meccanica 257  
 meccanica del continuo 110, 202  
 meccanica del danno 264  
 meccanismi paralleli 77  
 mechanical behaviour 308  
 mechanical heart valves 267  
 mechanical properties 80, 113, 302  
 mechanically driven mass diffusion 182  
 medicina dello sport 223  
 memoria di forma  
 MEMS 114, 198  
 metal and dry hybrid V-belt 23  
 metodi inversi 250  
 metodo degli elementi finiti 124  
 metodo del simplesso 72  
 micro and nano-indentation 305  
 micro-structured composites 32  
 micromeccanica 123  
 microstruttura 122  
 microsystems 285  
 Mindlin-Reisner 122  
 minirobotica 79  
 misalignment 132  
 misure di profondità 258  
 misure rumore pass-by 98  
 mixed formulation 238  
 mixed methods 8  
 mixed mode interfacial fracture 127  
 MLCP 72  
 modal analysis 91  
 Mode I 143  
 mode partition 65  
 modellazione 195  
 modellazione a parametri concentrati 175  
 modellazione numerica 201  
 modelli ARMA 303  
 modelli di veicolo 194  
 modelli monodimensionali 69, 126  
 modellistica dinamica della turbolenza 183  
 modello 134  
 modello di pilota 252  
 modello di Zener 168  
 modello numerico 97, 189  
 modello rigido-plastico 15  
 modulazione PWM 175  
 molle pneumatiche 138  
 monitoraggio 257, 258  
 Montecarlo 68  
 Morse theory 100  
 motion cueing 255, 256  
 moto pulsante meccanica dei fluidi 270  
 motorcycle 91  
 motore 254  
 motors 116  
 multi-coupled periodic structures 192  
 multi-material junctions 311  
 multi-well potential 206  
 multibody 72  
 multibody analysis 73  
 multibody dynamics 74  
 multibody system analysis 75  
 multifield theories 281  
 multigrid methods 278  
 multilevel approach 219  
 multipole accelerators 114  
 multiscale analysis 40, 57  
 multiscale approach 43  
 muratura 122, 123, 125, 217, 234, 236  
 murature in vetro 12  
 nano dynamics 302  
 nano-pores 283  
 nanoindentation 82, 83  
 nanostructures  
 nanotubes 80, 81, 304  
 nanowires 80, 81, 302  
 NEMS 304  
 neural network 118  
 no-tensile material 163  
 non linear material behaviour 238  
 non linear solution algorithms 296  
 non local damage 262  
 non local regularization 238  
 non locale  
 non-linearità 259  
 non-linearità geometrica 189  
 non-local elasticity 235, 298

non-shallow cables 193  
 non-smooth 229  
 non-smooth mechanics 251  
 non-standard bifurcations 188  
 nonassociative elastoplasticity 287  
 nonconvex energy 309  
 nonconvex minimization 292, 309  
 nonhomogeneous materials 298  
 nonlinear dynamics 57, 58, 174  
 nonlinear elasticity 29, 34, 208  
 nonlinearity 115  
 nonlocal elasticity  
 nonlocal thermodynamics 298  
 number synthesis 17  
 numerical accuracy 184  
 numerical algorithms 108  
 numerical methods 156  
 ODF 110  
 oil flow interruption 132  
 omogeneizzazione 56, 217, 234  
 optical fibre sensor 13  
 optical fibres 89  
 optical interferometry 133  
 optimal design 282  
 optimisation 143  
 ordinary differential equation 204  
 Orr-Sommerfeld 244  
 ortotropia 120  
 oscillatore elasto-plastico  
 oscillatore rigido-plastico  
 oscillatori viaggianti 168  
 oscillazioni galoppanti 301  
 ottimizzazione 106  
 ottimizzazione topologica 7, 111  
 out-of-plane homogenization 218  
 pagaia-ergometro 176  
 pantografo 48, 177, 261  
 parallel manipulator 101  
 parallel mechanism 226  
 parallel structure 255, 256  
 parameter identification 58  
 parete scabra 185  
 parete sottile 130  
 particle tracking 269  
 passive control 225  
 passive motion 226  
 passive shunts 171  
 passive vibration damping  
 patch repair 143  
 path-following analysis 219  
 PC structures 164  
 percorribilità ferroviaria 200  
 permanent magnets 225  
 phase transition 206, 309  
 phonon-phason interaction 281  
 piastra di Kirchhoff 39  
 piattabande 126  
 pick and place 104  
 piezoelectric actuators 31  
 piezoelectric actuators and sensors 70, 172  
 piezoelectric plates 8  
 pin-lug connection 50  
 piston-pin motion 253  
 pitch surfaces 19  
 PIV measurements 271  
 PKM 103  
 plain journal bearings 132  
 plane elasticity 282  
 plane stress 150  
 plastic hinge 292  
 plasticità 107, 140  
 plasticità alternata 14  
 plates 187  
 pneumatic actuation 255, 256  
 pneumatica 177  
 Poiseuille and Couette flow 148  
 Poisson's ratio 112  
 polar method 275, 282  
 polimeri 211  
 polysilicon 285  
 pompe acqua 231  
 ponti ad arco 12  
 ponti in muratura 12, 121  
 poroelasticity 30  
 postharvest processing 26  
 potential models 248  
 pre-stressed solids 29  
 premistoppa 231  
 pressure angle 137  
 previsione usura 44  
 primary resonances 193  
 principle of virtual power 263  
 probabilistic analysis 249  
 problemi inversi 84  
 profile error 229  
 progettazione funzionale 25  
 progetto ottimale 14  
 proper orthogonal decomposition 66, 160  
 prova di adesione 264  
 prove in galleria del vento 189  
 prove non distruttive 84, 294, 299, 300  
 prove dinamiche 173  
 prove statiche 90  
 pseudoinversa 106  
 pull-in voltage 304  
 pultruso 129  
 PVB 293  
 quantized fracture mechanics 80, 81, 142  
 quasicrystals 281  
 radial basis functions  
 random field discretization 161  
 random processes 160, 165  
 RANS 153  
 rate-dependent plasticity 108  
 Rayleigh-Bénard convection 212  
 RBF 150  
 RC sections 296  
 reflection-transmission process 146  
 recovery procedure 182  
 redundant 101  
 regioni di accettabilità 258  
 rendimento meccanico 22  
 residual stress 33, 49  
 resistenze aleatorie 246  
 resonance 302  
 restoration 308  
 retaining wall 30  
 reti neurali artificiali 136, 294, 299  
 return mapping 207  
 Reynolds equation 148  
 riabilitazione 223  
 riduzione delle vibrazioni 260  
 rigid body motion 10  
 rigidità flessionale 51  
 rinforzo nella direzione dello spessore 41  
 rinforzo strutturale 131  
 risposta dinamica esatta 247  
 risposta in frequenza 230  
 robot 104, 105  
 robot industriali 76, 119  
 robot paralleli 102  
 robot ridondante 106  
 robotica parallela 79  
 robotica sottomarina 77  
 roll over 75

rolling contacts 49  
 rotationally periodic structures 31  
 rotorcraft 118  
 rotore 232  
 rough interfaces 312  
 roughness 47  
 rugosità superficiale 20  
 ruote dentate 20  
 ruote spiroconiche 18  
 rupture strength 285  
 sbavatura 76  
 screw mechanisms 17  
 screw motion 19  
 seismic analysis 30  
 seismicity 128  
 semi-analytical finite element method 145  
 separated flow 157  
 servosistemi a fluido 138  
 sezioni miste 35  
 sezioni sottili aperte 129  
 SG-BEM 144  
 shakedown analysis 49  
 shape memory alloy 40, 286  
 shear bands 29, 307  
 shear deformable plates 9  
 shear locking 9  
 shell finite element 38  
 shifting dynamics 23  
 sicurezza di marcia 97  
 sicurezza stradale 198  
 sidebands 232  
 simulatore di guida 198  
 simulazione 134, 254  
 simulazione dinamica 252  
 simulazione handling veicolo 93  
 simulazione numerica 48  
 simulazione real time 178  
 singular fundamental solution 29  
 singular stress fields 237  
 singularity 100, 101  
 sismica 15, 295  
 sistema mano-braccio 224  
 sistemi attivi 196, 197  
 sistemi sterzanti 201  
 size effect 64, 291  
 size-scale effects 305  
 skew-gears 19  
 smoothed particle hydrodynamics 240  
 smorzatore magnetoreologico 27  
 smorzatore variabile 96  
 smorzatori dinamici 230  
 snap-back instability 32  
 snow avalanche 179  
 softening 291  
 solenoide 175  
 sollecitazioni di componenti ferroviari 97  
 sospensioni semi-attive 96  
 spazi di lavoro 102  
 sperimentazione 16, 20  
 sport-medicine 176  
 stabilità 159, 186, 221, 222, 227, 241  
 stabilità di marcia 73  
 stabilità orbitale 67  
 stability 239  
 stability analysis 244  
 stability estimates 306  
 static balancing 261  
 static displacement response 85  
 statistical methods 215  
 steady oscillations 203  
 stick-slip oscillations 188  
 stochastic analysis 165  
 stochastic dynamics  
 stochastic finite element 161  
 stochastic loading 251  
 stokes flow 114  
 stored energy 307  
 strain localization  
 strain softening 12  
 strained epitaxial growth 278  
 strato limite laminare 242  
 streaks 242  
 strength 81  
 stress concentrations 50  
 stress intensity factors 139  
 stress singularities 127, 311  
 stress wave 204  
 strisciamento tre rotore e statore 45, 46  
 structural health monitoring 145  
 structural interface 280  
 structural monitoring 310  
 structural reliability 164  
 structural uncertainties 161  
 structure assessment 89  
 structure testing 89  
 strutture a parametri incerti 247  
 strutture adiacenti 173  
 strutture di parete  
 sub-grid scale model 210  
 subharmonic vibrations 115  
 substrate effects 82  
 superficie di risposta 68  
 superficie-libera 213  
 superplasticity 32  
 surface waves 149  
 symmetric-Galerkin BEM 10  
 synthetic jet 214  
 system identification  
 taglio 35, 130  
 taglio laser 106  
 technical textile 113  
 teleoperazione 102  
 tennis 117  
 teorema statico 121  
 teoria dell'elasticità 202  
 teoria dell'ingranamento 18  
 teoria di Cosserat 111  
 teoria multiscala 284  
 termodinamica 110  
 test rig 132  
 test sperimentali 135  
 test vibro-acustici 231  
 thermoelasticity 283  
 thermomechanics 286  
 thermomicro-polar elastic solids 203  
 thermoviscoelasticity 146  
 thin film 82  
 tilting-pad journal bearing 55  
 time-domain simulations 167  
 tip over 75  
 torsion 208  
 torsione 35  
 torsione dei cavi 297  
 total lagrangian description 38  
 transfer matrix 192  
 transient conditions 133  
 transient dynamics 158  
 transition 210, 244  
 transizione 185  
 trasmissione 93  
 trasmissioni a cinghia 51  
 trasmissioni ad ingranaggi 21  
 trasmissioni meccaniche 24  
 trave 3D 190  
 travi 90, 130  
 travi di spessore sottile 69  
 travi elastiche 63  
 trazione integrale 93  
 triangulation 86

tribology 47  
 tricept 105  
 turbolenza 185, 186, 209, 213, 269  
 turbolenza di parete 211  
 turbolenza marina  
 turbolenza oceanografica  
 turbomachinery 180  
 turbulence 153, 210, 212, 214, 215  
 two-fiber reinforced material 181  
 ultrasonic guided waves 145  
 ultrasonico 254  
 unbalanced magnetic pull 259  
 unbounded domains 233  
 uncertain beams 249  
 unconstrained contours 10  
 unilateral Winkler soil 174  
 uniqueness 10  
 unsteady flow 154  
 U-RANS 153  
 urto 117  
 usura 20, 48, 94  
 validazione sperimentale 194, 195  
 valvola digitale pneumatica 175  
 variable loading 49  
 variational formulation 147  
 variational principle 251  
 VDC 196, 197  
 vegetable identification 26  
 veicoli a due ruote 224, 252  
 vento trasversale 200  
 verifica sismica  
 verifiche 236  
 vetro stratificato 293  
 vetro strutturale 12, 293  
 vibration control 31, 171  
 vibrations 28, 66, 136, 230, 257, 304  
 vibrations active control 70  
 vibrazioni auto-eccitate 231  
 vibrazioni sull'uomo 224  
 vibrazioni torsionali 21  
 vincoli unilateri 72  
 virtual distortion method 165, 249  
 virtual test 53  
 viscoelastic damping 145  
 viscoelasticity 30  
 viscoelasticità 52, 56, 168  
 viscosità 42  
 visione artificiale 77  
 vitreous motion 271  
 volumetric method 243  
 vortex dynamics 157, 245  
 vorticity dynamics 268  
 wakes 155  
 wave localization 281  
 wave propagation 192  
 wavelet analysis 85  
 wavelet-Hilbert procedures 155  
 waves 239  
 weak coupling 37  
 wettability 47  
 white noise  
 wind engineering 166  
 wind excitation 156  
 windmilling 132  
 wood 308  
 workspace 101  
 wrinkling 71  
 Young's modulus 285  
 zero side slip controller 199



