



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELL'AQUILA
CORSI DI INGEGNERIA**

**Prof. Francesco Benedettini
Curriculum scientifico**

(Aggiornato il 4/06/2014)

***CURRICULUM VITAE* di Francesco Benedettini**

Notizie generali

Attività didattica, di Dipartimento, di Facoltà:

Attività scientifica

Contratti di ricerca

Corsi, Seminari, Congressi

Lavori scientifici

1)Notizie generali

- Nato a Teramo il 22-01-1956.
- Laureato in Ingegneria Civile sezione Edile presso l'Università degli studi di Padova il 24-07-1979 con voti 110/110 e lode, con una tesi dal titolo "Consolidazione unidimensionale delle argille sotto carichi dipendenti dal tempo", relatore il Prof.Maurizio Soranzo.
- Iscritto all'Albo degli Ingegneri della Provincia di Teramo dall'08-02-1980 con il n. 279
- Dal 14-10-80 al 13-01-82 presta servizio militare di leva quale Ufficiale di Complemento dei Servizi Tecnici del Genio (oggi Corpo Tecnico dell'Esercito, settore Genio).

- Dal 20-06-80 al 14-10-84 svolge attività di collaborazione didattica e scientifica con l'Istituto di Scienza delle Costruzioni della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi dell'Aquila.
- Dal 15-10-84 al 15-10-87 è ricercatore (gruppo di discipline 132) presso l'Istituto di Scienza delle Costruzioni prima, ed in seguito presso il Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno dell'Università degli studi dell'Aquila (DISAT).
- Dal 16-10-87 al 31-10-92 è ricercatore confermato (gruppo di discipline 132) presso il DISAT dell'Università degli Studi dell'Aquila.
- Nel maggio 90 è risultato vincitore di una Borsa di Studio Nato Senior Fellowships per una ricerca da condurre presso la Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, diretta dal Prof. Francis C. Moon, nel settore della sperimentazione di sistemi dinamici nonlineari con particolare riferimento alla interpretazione di moti caotici.
L'attività di ricerca connessa alla borsa di studio citata è iniziata a partire dal 01-10-1990 e si è conclusa nel febbraio 1991.
- Nel maggio 92 è risultato vincitore del concorso a posti di professore universitario di ruolo di II fascia (D.M. 6 maggio 1992) per il gruppo n. H071 Scienza delle Costruzioni ed è stato, in conseguenza di ciò, chiamato dalla Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila per l'insegnamento di Scienza delle Costruzioni.
- Nell'aprile 2000 è risultato vincitore della valutazione comparativa per un posto di professore universitario di ruolo di I fascia (Ordinario/Straordinario) per il settore scientifico disciplinare ICAR08 Scienza delle Costruzioni ed è stato, in conseguenza di ciò, chiamato dalla Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila per l'insegnamento di Scienza delle Costruzioni il 1° Settembre 2000. È stato in seguito confermato Professore Ordinario con decorrenza 1 Settembre 2003.
- Dalla sua istituzione (anno accademico 2001-2002) al 2004 è stato membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in Ingegneria e Modellistica Fisico Matematica Istituto presso L'Ateneo Aquilano.
- Dalla sua istituzione (anno accademico 2004-2005) al 2009 è stato membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile e del Territorio istituito presso L'Ateneo Aquilano.
- Dal 2007 al 2009 è stato Coordinatore del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile e del Territorio istituito presso L'Ateneo Aquilano.
- Nel Giugno 2002 è stato organizzatore (Presidente del Comitato Organizzatore) del Convegno Internazionale "Third Joint Conference of Italian Group of Computational Mechanics and Ibero-Latin American Association of Computational Methods in Engineering" organizzata in ambito AIMETA

- (Associazione Italiana di Meccanica Teorica ed Applicata) ed AMC (associazione Brasiliana di Meccanica) a Giulianova (TE).
- Nel Giugno 2002 è stato eletto membro del Consiglio Direttivo Nazionale del gruppo AIMETA di Meccanica Computazionale (GIMC).
 - Dalla sua istituzione (primavera 2003) è membro del Comitato Scientifico e Didattico del Master Internazionale "Analysis and Control of Vibrations in Civil and Industrial Applications" con sede presso l'Università di Roma 1 "La Sapienza".
 - Dalla sua istituzione è membro del Collegio dei Docenti del "Master in Ingegneria Antisismica (MIA)" con sede presso l'Università dell'Aquila.
 - È Coordinatore del Master di II livello in Ingegneria Antisismica (MIA) dall'edizione edizioni 2010-11 in poi.
 - Nel Marzo 2003 è stato organizzatore in ambito della conferenza GAMM_2003 (Congresso nazionale di Meccanica Teorica ed Applicata Tedesco) del Minisymposium "Nonlinear Dynamics of Engineering Systems) tenutosi ad Abano Terme (PD).
 - È stato membro del Comitato Scientifico del 1° IOMAC "International Operational Modal Analysis Conference, Copenaghen, Aprile 2005.
 - È stato membro del Comitato Scientifico della conferenza CRASC-06 "Crolli ed Affidabilità delle Costruzioni Civili, Messina, Aprile 2006.
 - È stato co-organizzatore e docente del Workshop "Metodi Dinamici per il Monitoraggio e la Diagnosi dei Ponti", tenuto nell'Aprile 2006 presso il CISM (International center for Mechanical Sciences) di Udine.
 - È membro del Comitato Scientifico del 2° IOMAC "International Operational Modal Analysis Conference, Copenaghen, Aprile 2007.
 - È stato organizzatore assieme al Prof. C. Gentile del Politecnico di Milano del Workshop "Modal Analysis of Historical Structures" tenutosi nell'ambito del 2° IOMAC, Copenaghen, Aprile 2007.
 - È stato co-Chairman assieme al Prof. C. Gentile (POLIMI) della conferenza internazionale IOMAC_09 tenuta in Italia nel maggio 2009 a Portonovo, AN.

- E? stato co-organizzatore (con il Prof. A. Morassi Università di Udine) e docente del Corso APT-Advanced Professional Training "Metodi Dinamici per il monitoraggio delle Strutture dell'Ingegneria Civile", tenuto nel Novembre 2006 presso il CISM (International center for Mechanical Sciences) di Udine.
- E? stato co-organizzatore (con il Prof. A. Morassi Università di Udine) e docente di Corso APT-Advanced Professional Training "Monitoring, Control and Identification of Bridges by Dynamic Methods", tenutosi nel Maggio 2010 presso il CISM (International center for Mechanical Sciences) di Udine.
- E? stato co-organizzatore (con il Prof. A. Morassi Università di Udine) della sessione speciale "Dinamica Sperimentale", nell'ambito del Convegno Nazionale AIMETA 2009 che si è tenuta nel Settembre 2010 ad Ancona.
- E? membro del Comitato Scientifico della Conferenza Internazionale EVACES "Experimental Vibration Analysis of Civile Engineering Structures".
- E? stato co-Chairman assieme al Prof. C. Gentile del Politecnico di Milano e presidente del Comitato Organizzatore della conferenza internazionale EVACES_11 "Experimental Vibration Analysis of Civile Engineering Structures, Varenna, CO, ottobre 2011.
- E? Coordinatore della Commissione MIUR (Ministero dell'Università e della Ricerca) "panel Beni Culturali, di valutazione dei progetti PON 2007-2013.
- E? Chairman del Comitato Permanente IOMAC "International Operational Modal Analysis Conference dal 2013.
- E? ETS "Esperto Tecnico Scientifico per conto del MIUR dei seguenti progetti di ricerca industriali e di potenziamento di infrastrutture di ricerca:
 - PON_02283 Sollevamento di edifici appartenenti al patrimonio storico monumentale " Univ. Napoli federico II, CONSTA SPA (circa 6 M di Euro)
 - PON_02324 progetto PROVACI Tecnologie per la PROtezione sismica e la VALorizzazione di Complessi di Interesse culturale, Univ. Napoli federico II, STRESS scarl(circa 19 M di Euro)
 - PON_02710 progetto MASSIMO Monitoraggio in Area Sismica di Sistemi Monumentali, INGV (circa 8 M di Euro)
 - PONa3_00345 progetto LEDA Laboratory of Earthquake Engineering and Dynamic Analysis, Università di Enna KORE (circa 11 M di Euro)
- E? stato coordinatore del corso di *Analisi Nonlineare delle Strutture* tenutosi a Teramo presso l'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Teramo.

- Visiting Fellow nel 2012 presso Aerospace Dept. University of Illinois at Urbana Champaign.
- È stato revisore di progetti di ricerca nazionali ed internazionali, di volumi nel settore dei sistemi dinamici e delle riviste internazionali di seguito specificate nei settori della dinamica lineare e nonlineare e della identificazione strutturale:

Meccanica,

Nonlinear Dynamics,

ASME Journal of Applied Mechanics,

Journal of Sound and Vibration,

Journal of Vibration and Control,

European Journal of Mechanics,

International Journal of Nonlinear Mechanics,

Mechanical Systems and Signal Processing.

Construction and Building Materials Journal.

Engineering Structures

Archive of Mechanics.

- Dalla sua istituzione è responsabile del Laboratorio di Dinamica Nonlineare e prove in situ del DISAT.
- **Ha coordinato ed effettuato più di 600 prove dinamiche (generalmente in operational conditions) su edifici, ponti e monumenti per la determinazione delle caratteristiche dinamiche finalizzate allo Structural Health Monitoring (SHM) ed all'updating di modelli ad Elementi Finiti.**

2)Attività didattica, di Dipartimento, di Facoltà

- Dal 15-10-84 ad oggi, svolge attività didattica ed è membro delle commissioni d'esame degli insegnamenti di Scienza delle Costruzioni, Scienza delle Costruzioni II, Dinamica delle Strutture, Sperimentazione dei Materiali e delle Strutture.
- Dal 1985 al 1991 è membro del Consiglio di Corso di Laurea in Ingegneria Civile.

- Dal 1992 al 1997 è membro del Consiglio di Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio.
- Dal 1997 ad oggi è membro dei Consigli di Corso di Laurea in Ingegneria Civile, Meccanica, Elettrotecnica e Chimica.
- Dal 1985 è membro di commissioni di laurea in Ingegneria Civile.
- Dal 1992 al 1997 è membro della Commissione *Affari didattici generali* della Facoltà,
- Dal 1995 al 1997 è membro della Commissione *Socrates-Erasmus* di Facoltà.
- Dal maggio 1997 al 2001 è stato presidente della Commissione *Socrates-Erasmus* di Facoltà e delegato della Facoltà di Ingegneria presso la Commissione *Socrates-Erasmus* di Ateneo.
- Dal 2001 al 2004 è stato membro della Commissione Paritetica della Facoltà di Ingegneria.
- Dal dicembre 2004 è presidente della Commissione Strutture della Facoltà di Ingegneria
- Dal 1992 è il responsabile del Laboratorio di Dinamica Non Lineare del Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno dell'Università dell'Aquila.
- Nel triennio 1997-2000 è stato presidente del Consiglio di Corso di Laurea (Consiglio di Area Didattica) in Ingegneria Civile e delle Infrastrutture dell'Università dell'Aquila.
- Dall'a.a. 1992-93 è titolare di uno dei corsi di Scienza delle Costruzioni presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila (attualmente per i corsi di laurea in Ingegneria Civile e Gestionale).
- Dall'a.a. 1997-98 è titolare del corso di Dinamica delle Strutture presso la stessa Università per il corso di laurea in Ingegneria Civile.
- Nell'a.a. 2001-2002 ha tenuto per supplenza gratuita il corso Matematica II presso il Corso di Laurea in Statistica della Facoltà di Scienze Politiche dell'Università di Teramo.
- Ha partecipato, in qualità di docente, membro del comitato scientifico e coordinatore scientifico e didattico al Corso di Istruzione e Formazione Tecnica Superiore (IFTS) attivato presso l'Istituto per Geometri Carlo Forti di Teramo avente come obiettivo formativo la creazione di un profilo di diplomato geometra Tecnico del restauro e della conservazione del patrimonio immobiliare con competenze in ambito sicurezza e qualità?.

- Nel periodo Dicembre 2002 - Febbraio 2003 è stato docente e coordinatore del Corso di Formazione Professionale "La progettazione strutturale in zona sismica" tenuto agli Ingegneri dell'Ordine Professionale della Provincia di Teramo.
- Nel dicembre 2006 è stato docente del Corso di Formazione Professionale "La progettazione strutturale in zona sismica ai sensi dell'Ordinanza P.C.M. 3274 e s.m.i." tenuto agli Ingegneri dell'Ordine Professionale della Provincia di Teramo.
- Nel marzo 2007 è stato docente del Corso di Formazione Professionale "La progettazione strutturale in zona sismica ai sensi dell'Ordinanza P.C.M. 3274 e s.m.i. ? corso di approfondimento" tenuto agli Ingegneri dell'Ordine Professionale della Provincia di Teramo.
- Nel Maggio 2009 è stato docente del corso di formazione "Monitoraggio e Manutenzione Ponti" tenutosi a Milano (organizzazione IIR).
- È stato relatore di numerose tesi di laurea prevalentemente nel settore della dinamica lineare e non lineare e di tesi nel settore dell'isolamento sismico delle costruzioni.
- Ha tenuto varie conferenze, seminari, corsi di istruzione su diversi temi principalmente inerenti la dinamica delle strutture. Tra di essi si citano i seguenti principali:
 - o Dinamica lineare e non lineare di elementi strutturali dotati di curvatura iniziale,
 - o Metodologie e tecniche sperimentali nella analisi in laboratorio di sistemi dinamici in regime di spostamenti finiti,
 - o Identificazione modale nel dominio del tempo,
 - o Identificazione modale nel dominio delle frequenze,
 - o Model Updating di modelli ad EF sulla base di misure dinamiche,
 - o L'isolamento sismico delle strutture,
 - o Metodologie di analisi dinamica sperimentale per la diagnosi *in situ* di strutture esistenti,
 - o Bridge management basato su interpretazione di prove dinamiche,
 - o Monitoraggio di classi omogenee di strutture,
 - o Comportamento sismico di edifici con pareti murarie controventanti

3)Attività scientifica

L'attività di ricerca svolta ha riguardato problemi di *meccanica delle strutture* in campo *lineare e nonlineare* con particolare riferimento a tematiche di *dinamica* e di *identificazione* ed è stata condotta con approcci di tipo *analitico, numerico e sperimentale*. Tale attività è compendiate nelle pubblicazioni di cui all'elenco allegato.

I filoni di ricerca nei quali il candidato ha lavorato sono i seguenti:

- *Oscillazioni nonlineari* di sistemi elastici monodimensionali in regime di spostamenti finiti mediante l'utilizzo di tecniche asintotiche.
- *Identificazione* parametrica e non-parametrica nei domini del tempo e delle frequenze di sistemi lineari e di oscillatori isteretici.
- *Biforcazione e caos* in dinamica strutturale: predizione, diagnosi, scenari biforcativi, mediante approcci di tipo numerico-geometrico.
- *Sperimentazione dinamica* di modelli meccanici in regime di spostamenti finiti, tecniche di indagine e di analisi e fenomenologie nonlineari.
- *Dinamica nonlineare* di modelli e strutture soggetti ad *eccitazione random*
- *Analisi modale sperimentale* di modelli e strutture reali ed *identificazione del danno* strutturale.
- *Bridge management*.

Oscillazioni nonlineari di sistemi elastici monodimensionali in regime di spostamenti finiti mediante l'utilizzo di tecniche asintotiche.

In questo ambito l'attività di ricerca ha riguardato inizialmente problemi di *dinamica libera*, successivamente, problemi di *dinamica forzata* ed è stata essenzialmente condotta mediante l'utilizzo di *metodi asintotici*. Sono stati prevalentemente studiati sistemi monodimensionali elastici con curvatura iniziale (cavo sospeso, arco) in regime di spostamenti finiti: tali sistemi presentano alcune caratteristiche principali di strutture, anche più complesse, con configurazione iniziale curva (volte), quali quella di esibire *nonlinearità quadratiche* (non-simmetriche) e *cubiche* (simmetriche), le prime delle quali legate alla curvatura iniziale e le seconde allo stretching dell'asse e/o a termini nonlineari presenti nella curvatura. La presenza contemporanea di tali nonlinearità rende la dinamica ricca di fenomeni stante la fitta sequenza di condizioni di risonanza principale e secondarie esibite dal sistema ($1, \pm 1/2, \pm 1/3$?).

Sono inoltre state analizzate le conseguenze in campo non lineare del fenomeno del *crossover* tipico delle strutture con curvatura iniziale corrispondente ad una *coalescenza delle frequenze* dei primi modi simmetrico ed anti-simmetrico causata da particolari valori assunti da parametri elasto-geometrici caratteristici della struttura.

Dinamica libera

Per quanto riguarda i problemi di dinamica libera, si sono analizzate le oscillazioni di un elemento strutturale monodimensionale elastico in regime di spostamenti finiti (*cavo sospeso*) adottando un modello basato su approssimazioni coerenti del campo di deformazione; successivamente per ottenere un problema differenziale ordinario e quindi più trattabile analiticamente si è utilizzata una discretizzazione alla Galerkin utilizzando quali funzioni di forma le prime autofunzioni del problema linearizzato. Tale modello è idoneo a studiare sia le oscillazioni piane (modello ad 1 g.d.l.) che quelle spaziali (modello a due g.d.l.).

Per lo studio del *caso piano*

è stata adottata quale funzione di forma la prima autofunzione del problema continuo linearizzato che, nel cavo sospeso, risulta essere rispettivamente la prima autofunzione *anti-simmetrica* nel caso di cavi con alta rigidezza assiale e/o con grande rapporto freccia/luce o *simmetrica* nel caso di cavi con minore rigidezza assiale e/o con più basso rapporto freccia/luce. Per il modello ad 1 g.d.l. è stata determinata la relazione *frequenza ampiezza* mediante la scrittura di un integrale primo della equazione di moto ed ottenendo quindi per quadratura il periodo della oscillazione, confrontando inoltre diversi modelli discreti dello stesso sistema continuo (28B,1A).

Per il *caso spaziale*

(primo modo nel piano e primo modo fuori del piano), utilizzando il metodo perturbativo delle scale multiple di tempo, si è studiato l'accoppiamento modale tra i 2 g.d.l. del sistema determinando le modificazioni che subiscono le leggi temporali e le frequenze di oscillazione lineari ed analizzando gli effetti di scambio energetico fra i modi dovuto all'accoppiamento modale legato alla presenza delle nonlinearità di tipo geometrico (1C,29B,2A).

Dinamica forzata

Per quanto riguarda i problemi di dinamica forzata, sono state studiate le oscillazioni forzate in regime di risonanza sotto l'azione di una *eccitazione sinusoidale piana*. Per il caso della *risonanza primaria* sono state determinate le relazioni frequenza-risposta adottando anche in questo caso una tecnica perturbativa di ordine elevato, controllando i risultati ottenuti mediante integrazioni numeriche dell'equazione di moto ed evidenziando le modifiche subite dai risultati del modello al variare delle caratteristiche meccanico-geometriche del cavo sospeso (fenomeno del crossover) (3A).

È stata in seguito studiata la risposta forzata in condizioni di *risonanza superarmonica e subarmonica* evidenziando con procedimenti analitici e numerici la ricca fenomenologia del comportamento dinamico e l'influenza che il tipo di nonlinearità induce su di lui (31B,5A,6A,1D,2D).

Successivamente è stato formulato un modello più ricco di cavo sospeso adatto a studiare le oscillazioni forzate 3D e, mediante una discretizzazione alla Galerkin della componente spaziale, si è poi analizzato un *modello ridotto a 4 g.d.l.*

che tiene in conto i primi due modi (simmetrico ed emisimmetrico) piani e fuori-piano. Con tale modello si sono studiati gli effetti di *risonanze interne multiple* sulla risposta dinamica in condizioni di risonanza esterna primaria e subarmonica (17A,19A,44B). L'analisi è stata condotta con lo scopo di analizzare la varietà e ricchezza delle classi di moto possibili, effettuando quindi una analisi di stabilità delle soluzioni trovate per evidenziare i tipi di biforcazione tra classi di moto regolare adiacenti. Questa analisi è stata anche utilizzata per localizzare, nello spazio dei parametri di controllo del problema, le principali classi di moto in un modello sperimentale di cavo sospeso di confronto che sarà successivamente descritto.

Più recentemente, le tecniche di tipo asintotico precedentemente citate, sono state utilizzate in una analisi comparativa analitico-numerico-sperimentale di un modello nonlineare a 2 g.d.l. di *arco non ribassato* doppiamente incernierato sotto l'azione di una forzante sinusoidale in chiave. Lo studio, oltre alla descrizione del comportamento dinamico globale di tale modello ha riguardato particolarmente il fenomeno della perdita di stabilità della semplice soluzione unimodale simmetrica e l'instaurarsi di un regime accoppiato simmetrico-antisimmetrico avente ampiezze di oscillazione rilevanti. Sono stati tracciati e confrontati tra loro i limiti delle regioni di stabilità delle diverse soluzioni mediante l'utilizzo dei differenti citati approcci (50B,51B,27A).

Identificazione parametrica e non-parametrica nei domini del tempo e delle frequenze di sistemi lineari e di oscillatori isteretici.

In questo ambito la ricerca è stata svolta partendo dallo studio della analisi di sensitività della risposta dinamica di *sistemi lineari a più g.d.l.*

condotta mediante uno sviluppo perturbativo in termini matriciali della equazione caratteristica dei sistemi ricavando le espressioni esplicite degli sviluppi in serie degli autovalori e componenti degli autovettori in funzione del (dei) parametro di controllo analizzati (30B, 4A).

Si è condotta in seguito la identificazione di semplici modelli lineari sia nel dominio del tempo che nel dominio delle frequenze adottando dapprima dati pseudosperimentali ed in seguito i risultati di misure sperimentali condotte su un semplice telaio shear type in acciaio.

Analisi nel dominio del tempo

La analisi nel dominio del tempo

è da preferire nelle situazioni tipiche in cui la analisi nel dominio delle frequenze, la quale comunque introduce fenomeni più o meno controllabili quali il fenomeno di *aliasing* di *leakage*, diviene di più problematica applicazione come nel caso di accoppiamento modale dovuto a risonanze interne,

o situazioni in cui gli smorzamenti strutturali sono elevati. Anche per ovviare a questi motivi recentemente sono state sviluppate diverse tecniche nel dominio del tempo atte alla stima dei parametri modali dei sistemi in esame che superano molti dei problemi legati alla F-trasformazione: modelli AR, ARMA, ARMAX. In questo ambito, mediante l'utilizzo di un modello ARMA testato su dati pseudo-sperimentali, sono state identificate le grandezze modali di una semplice struttura reale (telaio shear type a 2 g.d.l.) (32B).

Analisi nel dominio delle frequenze

Per quanto riguarda la analisi nel *dominio delle frequenze* sono stati adottati *modelli parametrici e non parametrici* per la identificazione rispettivamente, di *sistemi lineari* (un modello di edificio civile a 4 piani) e *non lineari* (un modello di oscillatore elasto-plastico e di un oscillatore isteretico con degrado) utilizzando un approccio di tipo Bayesiano ed un criterio non lineare di stima poiché anche nel caso di modelli parametrici lineari le grandezze modali sono legate non linearmente ai parametri del sistema (33B).

Modelli isteretici

Si è poi studiato la identificazione di *modelli isteretici* semplici mono-variabile adatti ad interpretare e riprodurre la risposta registrata di strutture reali sotto le azioni sismiche al di là del campo elastico così da pervenire a qualche indice sintetico adatto a quantificare il danno strutturale subito; la efficacia dei modelli non-parametrici utilizzati è stata testata verificando nei confronti dei risultati di modelli parametrici di confronto la bontà della predizione della risposta identificando il modello sotto un certo accelerogramma e confrontando poi risposta prevista e risposta reale sotto l'azione di accelerogrammi di diversa natura e/o intensità (34B,38B); i modelli non-parametrici e misti utilizzati sono inoltre stati formulati sia nella forma classica (restoring-force funzione di spostamento e velocità) che in forma incrementale in cui lo spazio di stato del modello viene allargato mediante l'introduzione di una ulteriore equazione che fornisce l'incremento della restoring-force in funzione di velocità e forza e che rende il legame meglio approssimabile in tale spazio (nel senso di funzione ad un sol valore) (12A,20A).

Biforcazione e caos in dinamica strutturale: predizione, diagnosi, scenari biforcativi, mediante approcci di tipo numerico-geometrico.

In questo ambito, l'attività di ricerca è stata condotta analizzando *le evoluzioni della risposta* ad eccitazioni periodiche al variare di alcuni parametri significativi del sistema (ampiezza e frequenza della forzante, smorzamento, condizioni iniziali) e sono stati evidenziati gli strumenti necessari ad interpretare correttamente le perdite di periodicità della soluzione ed a caratterizzare le eventuali transizioni al caos (2C,35B,7A,40B,3D,4D). Sono stati analizzati ambedue gli aspetti dei fenomeni biforcativi, quello *locale* mediante la analisi del tipo *di transizione tra classi di moto adiacenti* con relativa classificazione all'interno dei paradigmi biforcativi noti e quello *globale* mediante la descrizione dell'evoluzione degli *aspetti topologici* dell'intero *spazio di stato* (e dei sottoinsiemi caratteristici) al variare di un parametro di controllo.

Transizione al regime non regolare: dinamica locale

La evoluzione dei punti fissi della mappa di Poincaré è stata ottenuta mediante l'applicazione di tecniche di *path-following* direttamente applicate alle equazioni del moto: con questo approccio, effettuando una analisi di stabilità delle soluzioni nell'ottica di uno studio di tipo locale, sono stati descritti gli *scenari biforcativi* tra classi di moto adiacenti (biforcazioni di tipo saddle-node, pitch-fork, period doubling) ottenendo risultati confrontabili, nel caso di transizioni tra classi di moto periodiche adiacenti, con quelli ottenuti mediante l'utilizzo di tecniche asintotiche.

Sempre mediante l'utilizzo di tali tecniche e di *integrazioni numeriche locali* di supporto sono inoltre stati riconosciuti scenari classici di *transizione al caos* di tipo smooth (*period doubling*) che di tipo sudden (*jump/crisi*) con particolare riguardo ad applicazioni in meccanica strutturale (36B,37B,39B,41B). L'instaurarsi di regimi ad evoluzione temporale complessa, le relative biforcazioni tra risposte periodiche e caotiche ottenute con procedimenti numerici sono state messe in relazione con i risultati ottenibili utilizzando la teoria classica delle oscillazioni nonlineari la quale, sebbene non consenta di seguire la risposta al di là dei punti di biforcazione verso soluzioni caotiche, consente, mediante l'utilizzo di metodi analitici approssimati (metodi perturbativi, metodo del bilancio armonico), di stabilire con ottima approssimazione le frontiere di biforcazione nello spazio dei parametri di controllo dei sistemi analizzati. Questa analisi viene sviluppata determinando dapprima le soluzioni periodiche ed in seguito analizzandone la stabilità mediante l'uso della teoria di Floquet (40B,5D,41B,10A,6D).

Sono state individuate zone critiche nello spazio dei parametri di controllo dei sistemi analizzati, cui corrispondono risposte caotiche del sistema ed utilizzando vari indicatori di caos sia qualitativi (Leggi temporali, Piano delle fasi, Mappa di Poincaré) che quantitativi (FFT, Dimensione frattale, Esponenti di Lyapunov) e sono stati proposti dei criteri di classificazione dei comportamenti non-periodici discutendo i problemi connessi all'uso di tali misure quali indicatori sintetici di complessità del moto (8A,9A).

Transizione al regime non regolare: dinamica globale

Per quanto concerne la analisi di stabilità globale dei sistemi (modificazioni delle proprietà topologiche dello spazio di stato e dei suoi attrattori), utilizzando il metodo del Cell Mapping sono stati costruiti i *bacini di attrazione* delle soluzioni nel piano delle condizioni iniziali (42B,8D,10D) che unitamente al tracciamento delle *varietà stabili ed instabili* dei punti di sella, mettono in luce i differenti aspetti di stabilità, coesistenza e biforcazione di differenti soluzioni stazionarie coesistenti, periodiche e/o caotiche. Anche in questo caso le transizioni sono state classificate secondo i paradigmi biforcativi noti sia di tipo *smooth* (transizione al caos mediante *period doubling*) che di tipo *sudden* (*blue-sky catastrophe, interior crisis, subduction*).

Attraverso l'analisi geometrico-topologica delle tangenze ed intersezioni omo-eterocliniche delle varietà stabili ed instabili dei punti di sella nell'intorno dei punti di biforcazione è stato possibile caratterizzare in modo approfondito le proprietà di stabilità dinamica globale dei sistemi in esame (14A,9D,44B) descrivendo l'evoluzione degli *attractor-basin-phase-portraits* al variare dei parametri di controllo del sistema.

Sperimentazione dinamica di modelli meccanici in regime di spostamenti finiti, tecniche di indagine e di analisi e fenomenologie nonlineari.

La analisi sperimentale in campo dinamico di elementi strutturali a comportamento non lineare ha una importanza fondamentale nello studio di ciascun modello e, condotta di pari passo ad analisi teoriche di tipo analitico-numeriche, va considerata come un passo essenziale nella modellazione stessa. La sperimentazione fornisce infatti la base meccanica di ciascuno studio e diventa motivazione per l'affinamento dei modelli analitici di confronto e strumento indispensabile di convalida di qualunque risultato di tipo analitico.

Nello studio della dinamica dei sistemi continui in regime di grandi spostamenti, il modello analitico di riferimento è infatti quello delle equazioni differenziali non lineari alle derivate parziali. Il primo aspetto essenziale negli studi sia di tipo teorico che applicativo è quello di una corretta discretizzazione del comportamento spaziale: se infatti, da un certo punto di vista, non c'è, di fatto, alcun limite in tal senso, la ricchezza e la difficoltà di comprensione dei vari fenomeni non lineari, orienta verso l'utilizzo di modelli analitici minimi che consentano cioè, con il minimo numero di g.d.l. di cogliere gli aspetti essenziali del fenomeno dinamico. In tale ottica, le tecniche di discretizzazione sono uno strumento utilissimo ma molto delicato da utilizzare. La sperimentazione fornisce pertanto uno strumento di confronto con i modelli analitici sia in caso di risposte periodiche quando il confronto avviene sulla base di analisi comparative effettuate in termini di contenuti modali sia quando le risposte perdono regolarità e si registrano regimi *quasi-periodici* e *caotici*, quando il confronto deve necessariamente avvenire in termini di indicatori di complessità del moto. In quest'ultimo caso la sperimentazione assume importanza fondamentale proprio nella attribuzione di caratteri effettivamente meccanici ai fenomeni osservati. Gli

attributi di complessità delle risposte analitiche calcolate sono infatti ottenuti sulla base di indicatori sintetici atti a quantificare la *caoticità delle leggi temporali* (esponenti di Lyapunov) e la *stranezza degli attrattori del moto*

(differenti misure di dimensione eventualmente frattale). Tali attributi sono spesso riferibili soltanto alle equazioni differenziali che descrivono il comportamento dinamico dei sistemi, o meglio a questioni strettamente inerenti la loro soluzione quali la discretizzazione, il troncamento, le approssimazioni numeriche.

In questo quadro, poter avere un *modello fisico di confronto*

rappresenta l'unico strumento certo che assicuri che il comportamento complesso osservato pertiene effettivamente al modello meccanico analizzato e non alle equazioni differenziali che ne descrivono l'evoluzione temporale. Nella analisi di sistemi meccanici e strutturali flessibili (grandi spostamenti) un ulteriore aspetto da tenere in considerazione è quello della impossibilità pratica di monitorare tutte le componenti dello spazio di stato: si ha a che fare infatti con sistemi continui (infiniti g.d.l.) o comunque con sistemi sui quali, per ragioni di tipo pratico e soprattutto economico, è possibile monitorare solo uno (o comunque pochi) punti. L'utilizzo della tecnica delle *delay map*

che trova il proprio fondamento teorico nel teorema di Takens (1981) fornisce lo strumento per l'accesso ad

uno pseudo-spazio di stato ricostruito da una sola (o poche) leggi temporali sperimentali, topologicamente equivalente all'inaccessibile spazio di stato reale. Si ricostruiscono in sostanza dei *pseudo-vettori di stato* di dimensione voluta mediante gli elementi di una unica serie temporale (scalare), adottando quali componenti dei vettori elementi shiftati della serie temporale a disposizione. La stima dell'entità dello *shift temporale* e la *dimensione dei pseudo-vettori* rappresenta il passo cruciale di una ricostruzione significativa (49B, 22A).

La ricerca in questo settore ha preso avvio durante un periodo trascorso presso la Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering della Cornell University, presso il Laboratorio di Dinamica Nonlineare del Prof. F.C. Moon. Successivamente, è stato allestito presso il DISAT dell'Università dell'Aquila un *Laboratorio di Dinamica Nonlineare* nel cui ambito sono state condotte, e sono al momento in corso, *sperimentazioni sistematiche del comportamento dinamico nonlineare*, in campo *regolare e non regolare*, di diversi *modelli meccanici e strutturali*.

Sistemi cavo/masse

La sperimentazione ha riguardato inizialmente un *sistema filo-masse a 3 g.d.l.*

Dopo aver individuato per tale sistema le zone dello spazio dei parametri di controllo in cui la risposta perde regolarità, sono state utilizzate diverse tecniche sperimentali per la descrizione del moto e per la quantificazione della stranezza della risposta (18A).

In seguito sono stati analizzati sistemi meccanici più sofisticati; si è studiato un *modello discreto di cavo sospeso* (23A) per il quale oltre ad una *analisi locale* della risposta nell'intorno delle zone di risonanza principale e secondarie che descrive gli scenari biforcativi verso soluzioni complesse (24A), è anche stata fatta una *analisi globale* di comportamento su un largo range di ampiezze e frequenze della eccitazione fornendo carte di comportamento nel piano dei parametri di controllo dell'eccitazione (25A). Sono stati messi in evidenza i fenomeni legati all'accoppiamento delle oscillazioni piane con quelle fuori-piano inquadrando sempre le *classi di moti sperimentali osservate* con le *classi teoriche predette* analiticamente mediante l'utilizzo di tecniche asintotiche su modelli ridotti (4 g.d.l.) di cavo sospeso (26A). La diagnosi e la classificazione di soluzioni non periodiche è avvenuta determinando nello *pseudo-spazio di stato* (tecnica delle *delay map*) l'evoluzione degli insiemi caratterizzanti i fenomeni biforcativi (attrattori, manifolds di punti di equilibrio instabile etc) al variare dei parametri di controllo del sistema (52B).

Più recentemente, nell'ottica di applicazione di metodologie di *feedback control*, su un nuovo prototipo di questo sistema è stato applicato un *attuatore* costituito da un motore lineare disposto longitudinalmente e capace di controllare sia il tiro del cavo che di variare il rapporto freccia-luce per la riduzione delle oscillazioni fuori piano del sistema. Accanto alla indagine di tipo teorico che ha fornito buoni risultati in termine di riduzione delle oscillazioni (53B) è in corso di affiancamento una prova sperimentale di supporto basata sulla lettura della componente fuori piano del moto di un punto mediante telecamera ottica di tipo follower e feedback-control mediante il motore lineare disposto su uno dei punti di vincolo del cavo sospeso.

Arco non ribassato

Parallelamente, nell'ambito più generale dello studio dei fenomeni di *instabilità dinamica* di sistemi strutturali si è studiato dapprima un modello di arco circolare doppiamente incernierato con una forzante sinusoidale verticale sull'asse di simmetria. Per questo sistema, si è analizzata la *perdita di stabilità della semplice soluzione unimodale* e l'instaurarsi di un regime fortemente non lineare in cui la componente prevalente del moto è quella non simmetrica (26A,50B,51B,27A,15D). Per la quantificazione della complessità sono state utilizzate diverse tecniche basate sulla tecnica delle *delay maps* messe a punto per i sistemi meccanici in esame (49B,22A).

Trave incastrata

Successivamente si è studiato il fenomeno *dell'accoppiamento non lineare flessione torsionale* in una trave a mensola forzata all'estremo libero lungo uno degli assi principali di inerzia della sezione; accanto alla semplice risposta contenente la sola componente flessionale direttamente forzata appaiono, sotto certe condizioni, *risposte accoppiate flessione-flessione-torsionali* che evolvono subito verso regimi quasi-periodici o caotici (54B, 55B, 32A, 33A).

Modelli in fase di analisi

Sono attualmente allo studio modelli di strutture sottoposte al sollevamento della fondazione sotto la azione sinusoidale orizzontale del supporto quali *blocchi rigidi* (strutture monumentali) e/o *strutture flessibili* (serbatoi sovrelevati) per i quali si sono analizzate in funzione delle caratteristiche del modello e della forzante (ampiezza e frequenza) le tipologie di risposta individuando sperimentalmente risposte di semplice trascinarsi, risposte simmetriche armoniche, risposte simmetriche subarmoniche, oltre che condizioni di ribaltamento. Sono stati inoltre rilevati sperimentalmente fenomeni precursori di comportamenti caotici quali il *breaking* della simmetria della risposta. Per approfondire anche da un punto di vista tecnologico situazioni reali di serbatoi per i quali il modello di massa sovrelevata fissa non è sufficientemente raffinato almeno per le analisi dinamiche, si sta analizzando il comportamento di un fluido (acqua) all'interno di un contenitore rettangolare al quale si impone un moto sinusoidale verticale. Sono state osservate onde (del fluido) di rilevante ampiezza sia di tipo antisimmetrico (1° modo) che simmetrico (2° modo) in risonanza subarmonica con l'eccitazione che sono state messe in relazione con i risultati di previsione di una semplice equazione di Mathieu ad 1 g.d.l. per la quale sono state determinate le classiche zone di instabilità che coincidono bene con le zone di instabilità della soluzione banale del fluido all'interno del contenitore.

Sperimentazione dinamica di modelli leggeri e strutture reali in regime lineare, tecniche di identificazione nel dominio del tempo e delle frequenze.

Il tema di ricerca trova spunto nell'interesse sempre crescente della determinazione delle proprietà modali di strutture reali quali edifici, ponti e monumenti finalizzati alla previsione della risposta dinamica sotto gli effetti di eccitazioni di tipo ambientale (rumore, traffico, vento, sisma). Essendo il comportamento delle strutture sotto tali azioni di tipo prevalentemente dinamico, assume notevole interesse la determinazione delle caratteristiche dinamiche di una struttura reale ad un certo istante preso a riferimento ed il confronto della risposta strutturale allo stesso tipo di eccitazione dopo intervalli di tempo stabiliti.

Infatti, il patrimonio edilizio ed infrastrutturale esistente, pur essendo soggetto naturalmente a diverse forme di degrado dovuto alla concomitanza di numerosi fattori, non è in genere soggetto ad alcuna forma di controllo programmato che garantisca la conservazione nel tempo delle prestazioni strutturali. Questa circostanza diviene spesso cruciale per alcune strutture che, per diversi motivi, devono essere considerate strategicamente significative. Questo è ad esempio il caso di:

- Edifici di interesse strategico quali ospedali, caserme, centri operativi della protezione civile etc. per i quali l'integrità strutturale è condizione imprescindibile per il loro utilizzo, in sicurezza.
- Strutture primarie e secondarie appartenenti alle reti infrastrutturali quali ponti, opere di sostegno delle terre, etc. le quali, in condizioni critiche (sisma, eventi climatici estremi, cause differenti) devono consentire un rapido smaltimento del traffico ed un corretto e snello uso della rete.
- Strutture appartenenti alle reti infrastrutturali di servizio quali acquedotti, serbatoi etc. i quali, in condizioni critiche, debbono consentire prestazioni uguali od addirittura migliori che in condizioni standard,
- Edifici di interesse storico-artistico e/o monumenti per i quali, talvolta, si arriva a condizioni critiche per la stabilità talmente esasperate da rendere in seguito molto difficile una manutenzione conservativa. In questi casi gli interventi di *salvataggio* spesso alterano totalmente le caratteristiche peculiari del costruire di un'epoca o di una particolare tipologia strutturale nell'assunto che solo con un forte rimaneggiamento si garantisce la conservazione del bene.

È invece evidente come sia necessaria una manutenzione programmata delle opere di ingegneria basata sull'effettuazione di prove che debbono essere un efficace strumento di diagnosi sullo stato di salute delle strutture, pur essendo totalmente non distruttive. Occorre peraltro considerare come, oltre alle cause naturali di invecchiamento, il degrado strutturale è legato, come accennato in precedenza, ad azioni non del tutto prevedibili come quelle dovute ai terremoti od ad eventi naturali estremi. Quasi sempre, infatti, le prestazioni strutturali vengono a mancare e sono causa di crisi spesso disastrose, in corrispondenza od in stretta correlazione ad eventi di questo tipo. Solo strutture notevolmente sottodimensionate vanno in crisi per azioni verticali dovuti ai pesi degli elementi portati. Più spesso sono le azioni di tipo straordinario quali il sisma, che inducono fenomeni oscillatori nelle strutture e ne provocano la crisi. È perciò evidente come sia necessario, per testare l'integrità strutturale, riprodurre, in maniera controllata, tali regimi dinamici osservando la risposta e progettando per tempo gli interventi di manutenzione. e software dedicato.

Nell'ambito di tale attività di ricerca, presso il

Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno dell'Università è stato costituito un gruppo di lavoro coordinato dallo scrivente che è in grado di effettuare analisi dinamiche indotte sulle strutture che, ripetute nel tempo sulla base di un programma di manutenzione, consentono di avere un

monitoraggio preciso dell'integrità strutturale.

Tali prove sono state eseguite per strutture di rilevante interesse monumentale e/o strategico. Tra le altre si possono citare:

- Il controllo in fase di collaudo degli impalcati dei viadotti della linea ferroviaria ad alta velocità Roma-Napoli, nei pressi di Caserta, committente Società ICLA.
- Il controllo in fase di collaudo degli impalcati dei viadotti della linea ferroviaria ad alta velocità Roma-Napoli, nei pressi di Cassino, committente Società ICLA e società PEGASO.
- Il controllo dell'avvenuto miglioramento delle prestazioni nei confronti di eventi sismici delle strutture portanti della Basilica di S. Maria di Collemaggio in L'Aquila, committente la Sovrintendenza per i B.A.A.A.S. dell'Abruzzo,
- La valutazione del livello di eccitazione ambientale (traffico ferroviario e/o tranviario e/o automobilistico) prodotto sul tempio della Minerva Medica a Roma, committente un gruppo di professionisti incaricati dalla Sovrintendenza per i B.A.A.A.S. di Roma
- Il controllo ai fini di monitoraggio dell'integrità strutturale dei ponti gestiti dalla Amministrazione Comunale di L'Aquila.
- Il controllo ai fini di monitoraggio dell'integrità strutturale di 100 ponti gestiti dalla Amministrazione Provinciale di Teramo.
- Il controllo ai fini di monitoraggio dell'integrità strutturale dei ponti gestiti dalla Amministrazione Comunale di Teramo.
- Il controllo ai fini di monitoraggio dell'integrità strutturale di un ponte strallato gestito dalla Amministrazione Comunale Cremona.
- Il controllo ai fini di monitoraggio dell'integrità strutturale di ponti e viadotti gestiti dalla Società Autovie venete (attività svolta congiuntamente al Prof. Antonino Morassi dell'Università di Udine).
- Il controllo ai fini di monitoraggio dell'integrità strutturale di un gruppo di serbatoi gestiti dalla Autorità CAFC in Friuli Venezia Giulia (attività svolta congiuntamente al Prof. Antonino Morassi dell'Università di Udine).
- La valutazione delle caratteristiche modali di 2 volte site nel complesso della Biblioteca Classense di Ravenna con il fine di valutare il miglioramento delle prestazioni strutturali a seguito di interventi di consolidamento (Amministrazione Comunale di Ravenna).

Tali prove, potrebbero essere estese, in un prossimo futuro, anche ad edifici ed infrastrutture di tipo tradizionale. Infatti con una attrezzatura mobile di adeguata precisione è possibile effettuare prove dinamiche *in operational conditions* (ovvero senza la necessità di interrompere il normale utilizzo della struttura analizzata) la cui analisi consente una diagnosi precisa, economica, efficace delle caratteristiche modali delle strutture in esame. Tali test sono oggi valutati come estremamente significativi per la diagnosi dello stato di salute dell'oggetto della prova. Ripetendo nel tempo le prove nelle stesse condizioni secondo uno schema di test programmati, si può inoltre avere un efficace monitoraggio delle prestazioni nel tempo,

individuando, con precisione, tempi e modi degli interventi di manutenzione consentendo allo stesso tempo una migliore conservazione del bene ed un risparmio economico di notevole entità.

Attrezzature di prova:

- Sistema di acquisizione a 16 canali per misure di accelerazione,
- Sistema di acquisizione a 35 canali per misure di velocità,
- Accelerometri sismici (basse frequenze) e piezoelettrici (medie-alte frequenze),
- Velocimetri
- Sistemi di eccitazione quali:
 - Martello strumentato per eccitazioni di tipo impulsivo,
 - Apparecchiatura per il rilascio di una massa (eccitazione di tipo impulsivo),
 - Vibrodina da 150 N ad 1 Hz (costante $k=15$, $F_{dinamica}=k*(frequenza)^2$ Newton), eccitazione di tipo periodico ed a sweep sinusoidale,
 - Sistemi di elaborazione portatili e software dedicato.

Dinamica nonlineare di modellie strutture soggetti ad eccitazione random.

Sono stati studiati sistemi dinamici soggetti ad eccitazioni random e deterministiche, in regime di spostamenti finiti. In ambito deterministico ed utilizzando un'ottica di tipo perturbativo, il metodo delle scale multiple è stato largamente utilizzato per l'analisi dei sistemi non lineari, al fine di ottenere equazioni differenziali ordinarie che descrivono l'evoluzione temporale dell'ampiezza e della fase della risposta. In questo filone di ricerca viene esteso il metodo delle scale multiple al caso aleatorio derivando per la prima volta una equazione frequenze-ampiezza stocastica in cui compaiono le statistiche delle ampiezze e la densità spettrale di potenza della risposta. Si assume che l'intensità dell'eccitazione sia sufficientemente bassa da consentire la separazione del moto medio dalla sua fluttuazione. Inoltre, le equazioni differenziali che reggono l'evoluzione delle medie delle ampiezze e della fase sono state ottenute e risolte utilizzando un metodo di linearizzazione equivalente. La tecnica è stata verificata tramite simulazioni Monte Carlo su un oscillatore Duffing-Rayleigh e su un modello di trave di Antman in regime non lineare.

Analisi modale sperimentale di modelli e strutture reali (prevalentemente ponti), identificazione del danno strutturale e bridge management

In questo settore sono stati affrontati diversi problemi connessi con la identificazione modale sperimentale e del monitoraggio della integrità strutturale nel tempo di diversi modelli e strutture reali:

Si è partiti da una esperienza di modellazione teorica e sperimentale di un edificio in acciaio a 4 piani in scala 1:10 realizzato presso il Laboratorio di Dinamica Nonlineare del Dipartimento di afferenza per il quale, oltre al problema della identificazione modale sperimentale è stato affrontato il problema della formulazione e successivo adattamento (*model updating*) di un modello numerico ad elementi finiti di supporto. Si è condotta infine la analisi di un danno localizzato in un pilastro al primo livello del modello sperimentale riuscendo con una tecnica basata sul *model updating* a localizzare il danno strutturale da misure sperimentali in accelerazione dei quattro impalcati presenti nella struttura.

Si è estesa la analisi modale sperimentale ad un insieme piuttosto numeroso di ponti gestiti da diversi Enti Pubblici Territoriali per i quali si sono intrapresi due programmi di ricerca finalizzati. La ricerca in questo settore è stata finalizzata alla formulazione di un programma di manutenzione ottima delle opere e sono basati sia su una analisi visiva ripetuta nel tempo (*visual inspections*) sia sulla esecuzione di prove dinamiche ripetute con lo stesso lay-out sperimentale al passare del tempo. In questo ambito di ricerca sono stati inoltre suddivisi i ponti in esame in differenti tipologie strutturali rimarcando le similitudini comportamentali emerse dalla campagna estensiva di indagini.

Per i ponti ad archi gemelli (una sottoclasse esaminata) il lavoro è stato spinto fino all'ottenimento mediante *manual tuning* basato sui risultati delle prove sperimentali, di modelli ad elementi finiti accurati e realmente rappresentativi del comportamento delle strutture reali.

Inoltre nel Laboratorio di Dinamica del DISAT è stato realizzato un modello in acciaio in scala 1:100 di ponte strallato onde valutare la sensibilità della risposta dinamica a modifiche strutturali con il fine di sperimentare su prototipo l'effetto di strategie progettuali applicabili anche su strutture reali al fine di controllarne (orientarne) le caratteristiche dinamiche. Sullo stesso modello si sono effettuate prove dinamiche sotto la azione di carichi mobili schematizzanti la tipica azione dinamica indotta dal traffico sui ponti.

Un modello sperimentale più recente di volta a botte ha consentito la determinazione della risposta dinamica ed il *tuning* di un modello numerico predittivo ad *ef*.

Analisi sperimentale e numerica di strutture appartenenti al patrimonio storico-culturale al fine di valutare gli effetti di azioni dinamiche (sisma, traffico superficiale, traffico in galleria), progettazione di sistemi di monitoraggio.

La analisi modale sperimentale di beni monumentali rappresenta la applicazione delle tematiche classiche della sperimentazione dinamica ad una classe di strutture estremamente diversificate e molto complesse dal punto di vista della compagine strutturale. Non di meno, tali tecniche si sono dimostrate fortemente valide anche per la calibrazione di *modelli statici*

. Un bene monumentale, se si escludono i casi particolari delle torri campanarie e di altre possibili realizzazioni *esili*, è sempre una struttura generalmente massiccia e costituita da materiali che quasi sempre impongono una schematizzazione difficile che quasi sempre sfocia in modellazioni di legami costitutivi a carattere non lineare. Tuttavia, se si affronta il problema con la dovuta cura, le prove dinamiche si rivelano, forse alquanto inaspettatamente, un mezzo di indagine e caratterizzazione fortemente potente. Quando però i modelli da realizzare servono allo studio della risposta dinamica (sisma o azioni ambientali naturali ed antropiche), le prove dinamiche, da condursi sempre *in operational conditions* onde non indurre nei beni monumentali sollecitazioni diverse e forse maggiori di quelle naturali, sono uno strumento irrinunciabile di conoscenza e valutazione.

In questo filone di ricerca sono inquadrabili una serie di lavori condotti recentemente su strutture monumentali rilevanti quali:

- il Colosseo

- la Basilica di Massenzio

- la Basilica di Santo Stefano Rotondo
- la Colonna Traiana
- l'Acquedotto Celimontano
- le Mura Aureliane in Porta Metronia
- le Mura Aureliane in Porta Asinaria
- le Colonnacce del Foro di Nerva
- il Foro di Cesare
- la Torre Campanaria del Duomo di Teramo
- la Torre Campanaria del Duomo di Atri (TE)
- il Tempio della Minerva Medica
- la Basilica di San Clemente a Vomano

In particolare, per i primi nove monumenti siti in Roma, la analisi ha riguardato la previsione dei livelli vibrazionali attesi a causa della costruzione di una nuova tratta ferroviaria metropolitana. Tale azione è stata eseguita mediante modellazione numerica dei monumenti, prove dinamiche *in operational conditions*, model updating del modello EF, analisi nel dominio delle frequenze della risposta ad un input dinamico caratterizzato da uno spettro tridimensionale di ingresso. Inoltre, per essi, è stato progettato in grande dettaglio un sistema di monitoraggio dinamico continuo che consente una interrogazione estremamente sofisticata della risposta dinamica alle diverse condizioni ambientali che si realizzano.

Per le torri campanarie ed il Tempio della Minerva Medica, la analisi ha riguardato la caratterizzazione della risposta dinamica dinamica.

Per la Basilica di San Clemente a Vomano la analisi è stata condotta al fine di valutare (mediante una analisi pushover effettuata sul modello EF validato da risultati di prove dinamiche) le performance sismiche del monumento (PGA di collasso/PGA di progetto nel sito).

4) Contratti di ricerca

- Negli ultimi anni è stato promotore di alcuni contratti di ricerca nel settore della identificazione dinamica di strutture reali (ponti) e del bridge management.

In particolare:

1. Contratto di ricerca finalizzata con L'Amministrazione Comunale di L'Aquila per il monitoraggio della integrità strutturale dei ponti Belvedere e S.Apollonia.
2. Contratto di ricerca finalizzata con L'Amministrazione Provinciale di Teramo per il monitoraggio della integrità strutturale dei 100 ponti più importanti gestiti dall'Ente Pubblico Territoriale in questione e formulazione di un programma di manutenzione programmata.
3. Contratto di ricerca finalizzata con L'Amministrazione Comunale di Teramo per il monitoraggio della integrità strutturale dei 4 principali ponti in carico all'Amministrazione Comunale.
4. Contratto di ricerca finalizzata con La Soprintendenza per i beni Architettonici ed il Paesaggio d'Abruzzo per la valutazione delle condizioni strutturali della Basilica di San Clemente a Vomano, Guardia Vomano, Teramo.

5) Corsi e Seminari seguiti, Congressi ai quali ha presentato (talvolta su invito) delle memorie.

1. Vibration of Engineering structures course, tenuto presso il Computational Mechanics Center di Southampton (Prof. Brebbia) nel marzo 1982.
 - Corso di base di analisi modale della LMS Leuven Measurement and Systems a Milano nel giugno 1985.
3. Corso di aggiornamento Costruzioni in zona sismica , L'Aquila 1985.
4. Applications of System Identification in Engineering, CISM Udine Luglio 1986 (Prof. H.G. Natke)
 - Chaotic Motions in Nonlinear Dynamical Systems, CISM Udine Luglio 1986 (Prof. W.Szemplinska-Stupnika).
 - Engineering Applications of Dynamics of Chaos, CISM Udine Luglio 1990 (Prof. W.Szemplinska-Stupnika, Prof. H. Troger).
 - Problemi di Instabilità delle Strutture: Corso di aggiornamento AIMETA Roma Febbraio 1988 (Prof. M. Pignataro).
 - VIII Congresso CTA - Giornate Italiane della Costruzione in Acciaio -Palermo 1981.
9. Congressi AIMETA di Trieste 1984, Torino 1986, Bari 1988, Trento 1992, Napoli 1995, Siena 1997, Como 1999, Taormina 2001, Ferrara 2003, Brescia 2007, Ancona 2009, Torino 2013 (membro Comitato Scientifico).

- Congressi del Gruppo AIMETA di Meccanica Computazionale di Milano 1986, Roma 1987, Padova 1989, Arcavacata di Rende 1990, Brescia 1991, Trieste 1993, Giulianova 2002.

11. Congresso del Gruppo AIMETA di Meccanica Stocastica, Taormina Luglio 1993, Ustica Giugno 2012.

12. Convegni C.N.R. - G.I.S. di Udine 1983, Milano 1985, Ancona 1987.

13. IUTAM Symposium on Nonlinear Dynamics in Engineering Systems, Stoccarda 1989.

14. 1st European Solid Mechanics Conference, Monaco, Settembre 1991.

15. Workshop "Bifurcation and Chaos in Mechanical Systems", L' Aquila, Maggio 1992.

16. IUTAM Symposium on Nonlinearity and Chaos in Engineering Systems, Londra, Luglio 1993.

17. EUROMECH 325 "Bifurcation and Chaos in Solid and Structural Dynamics, L' Aquila, Settembre 1993.

- IV Pan American Congress of Applied Mechanics, Buenos Aires, Gennaio 1995.
- II Congresso nazionale di Meccanica, Casablanca, Aprile 1995.
- XV Biennial ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise, Boston, MA, Settembre, 1995.
- International Symposium on Cable Dynamics, Liege, Belgium, Oct. 1995.

22. IUTAM Symposium on Interaction between dynamics and control in advanced mechanical system, Eindhoven, Aprile 1996.

- ICTAM International Conference on Theoretical and Applied Mechanics, Kyoto, Agosto 1996.

24. IUTAM Symposium on Nonlinear and Chaotic Dynamics in Engineering Systems, Cornell University, Ithaca, NY, Luglio 1997.

- XVI Biennial ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise, Sacramento, CA, Settembre, 1997.
- 26.IUTAM Symposium on Recent Developments in Nonlinear Dynamics of Mechanical Systems, Hanoi, Vietnam, Febbraio 1999.
- XVII Biennial ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise, Las Vegas, Ne, Settembre, 1999.
 - XVIII Biennial ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise, Pittsburg, PA, Settembre, 2001.
- 29.IUTAM Symposium on Chaotic Dynamics and Control of Systems and Processes in Mechanics, Rome, Italy, June 2003.
- 30.Congressi IMAC 2008, 2009 (Orlando Fl), 2012 (Jacksonville, Fl), 2013 (Garden Grove, Ca)
- 31.Congressi IOMAC 2005, 2007 (Copenhagen, Dn), 2009 Ancona (Presidente Comitato Organizzatore), 2011 Istanbul, 2013 Porto (lavoro accettato).
- 32.Congressi EVACES (Experimental Vibration Analysis of Civile Engineering Structures) di Bordeaux (2005), Porto (2007), Varenna (2011, Presidente Comitato Organizzatore), Ouro Preto (Brasile 2013, lavoro accettato).

7) Lavori scientifici di Francesco Benedettini

Elenco A: Riviste internazionali ed Edited volumes

- ?Parametric analysis of large amplitude free vibrations of a suspended cable?, *Int. J. of Solids and Structures*, **20**, 95-105, 1984. (in collaborazione con G.Regia e F.Vestroni)
2. ?Modal coupling in the free nonplanar finite motion of an elastic cable?, *Meccanica*, **21**, 38-46, 1986. (in collaborazione con G.Regia e F.Vestroni)

- ?Non-linear dynamics of an elastic cable under planar excitation?, *Int. J. Non-Linear Mechanics*, **22**, n. 6, 497-509, 1987. (in collaborazione con G.Regà)
- ?A perturbation technique in sensitivity analysis of structures?, *Meccanica*, **23**, 5-10, 1988. (in collaborazione con D.Capecchi)
- ?Planar non-linear oscillations of elastic cables under subharmonic resonance conditions?, *Journal of Sound and Vibration*, **132** (3), 367-381, 1989. (in collaborazione con G.Regà)
- ?Planar non-linear oscillations of elastic cables under superharmonic resonance conditions?, *Journal of Sound and Vibration*, **132** (3), 353-366, 1989. (in collaborazione con G.Regà)
- ?Chaotic Motion of Elastic Suspended Cables?, in *ASME Offshore and Arctic Operations Symposium*, (Eds: A. Ertas, D. Hui, R.G. Urquhart), PD-26, 27-33, 1989. (in collaborazione con G.Regà)
- ?1/2 Subharmonic Resonance and Chaotic motions in a Model of Elastic Cable?, in *IUTAM Symposium Nonlinear Dynamics in Engineering Systems*, (Ed: W. Schiehlen), 27-34, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1990. (in collaborazione con G.Regà)
- ?Numerical simulations of chaotic dynamics in a model of elastic cable?, *Nonlinear Dynamics*, **1**, 23-28, 1990. (in collaborazione con G.Regà)
- ?Periodic solutions leading to chaos in an oscillator with quadratic and cubic nonlinearities?, *International Series of Numerical Mathematics* (Eds: R.Seydel, F.W. Schneider, T. Kupper, H. Troger), **97**, 59-65, Birkhauser Verlag Basel, 1991. (in collaborazione con G.Regà)
- ?Periodic and chaotic motions of an unsymmetrical oscillator in nonlinear structural dynamics?, *Chaos, Solitons & Fractals*, **1**, 39-54, 1991. (in collaborazione con G. Regà ed A. Salvatori)
- ?Use of different state variables in nonparametric identification of hysteretic systems?, in *Identification of Nonlinear Mechanical Systems from Dynamical Tests* (Ed: L. Jezequel & C.H. Lamarque), 103-109, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1991. (in collaborazione con D. Capecchi e F. Vestroni)

- ?Prediction of bifurcation and chaos for an asymmetric elastic oscillator?, *Chaos, Solitons & Fractals*, **2**, 303-321, 1992. (in collaborazione con G. Rega ed A. Salvatori).
- ?Basin bifurcation and chaotic attractors in an elastic oscillator with quadratic and cubic nonlinearities?, *ASME Nonlinear Vibrations*, (Eds: L.A. Ibrahim, N.Sri Namachchivaya, A.K. Bajaj), DE 50/AMD-**144**, 7-13, 1992. (in collaborazione con G. Rega ed A. Salvatori)
- ?Nonlinearity and chaos in the finite dynamics of cable models?, *in Nonlinearity and Chaos in Engineering Dynamics*, (Eds. J.M.T. Thompson, S.R. Bishop), 215-229, John Wiley & Sons, 1994. (in collaborazione con G. Rega ed A. Salvatori)
- ?Analysis of finite oscillations of elastic cables under internal-external resonance conditions?, *ASME Nonlinear and Stochastic Dynamics*, (Eds: A.K. Bajaj, N.Sri Namachchivaya, L.A. Ibrahim), AMD-**192**, 39-46, 1994. (in collaborazione con G. Rega)
- ?Numerical and Geometrical Analysis of Bifurcation and Chaos for an Asymmetric Elastic Nonlinear Oscillator?, *Nonlinear Dynamics*, **7**, 249-272, 1995. (in collaborazione con G. Rega ed A. Salvatori)
- ?Experimental Dynamics of a Hanging Cable Carrying Two Concentrated Masses?, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **5** (1), 145-157, 1995. (in collaborazione con F.C. Moon)
- ?Nonlinear Oscillations of a Four-Degree-of-Freedom Model of a Suspended Cable Under Multiple Internal Resonance Conditions?, *Journal of Sound and Vibration*, **182**(5), 775-798, 1995. (in collaborazione con G. Rega ed R. Alaggio)
- ?Identification of Hysteretic Oscillators under Earthquake Loading by Nonparametric Models?, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, **121** (5), 606-612, 1995. (in collaborazione con D.Capecchi e F.Vestroni)
- ?Nonlinearity and Chaos in the Dynamics of Hanging Cables?, *ZAMM Z. Angew. Math. Mech.*, **76**, 197-200, 1996. (in collaborazione con G. Rega, R. Alaggio ed A. Salvatori)
- ?An experimental time series analysis approach in the classification of non periodic motions in nonlinear structural dynamics? in *Structural Dynamics: EURO DYN 96* (Eds: G. Augusti, C. Borri and P. Spinelli), A.A. Balkema, Rotterdam, 415-421.

- ?Experimental and theoretical investigation of nonlinear dynamics in an elastic system with initial curvature?, in *IUTAM Symposium on Interaction between Dynamics and Control in Advanced Mechanical Systems*, (Ed: D.H. van Campen), 337-344, Kluwer, 1997. (in collaborazione con G.Regà)
 - ?Experimental investigation of the nonlinear response of a hanging cable. Part I: Local Analysis?, *Nonlinear Dynamics*, **14**, 89-117, 1997. (in collaborazione con G. Regà ed R. Alaggio)
 - ?Experimental investigation of the nonlinear response of a hanging cable. Part II: Global Analysis?, *Nonlinear Dynamics*, **14**, 119-138, 1997. (in collaborazione con G. Regà)
26. ?Nonregular regimes of monodimensional mechanical systems with initial curvature: experiments and time series analysis?, in *IUTAM Symposium New Applications of Nonlinear and Chaotic Dynamics in Mechanics*, (Ed. Francis C. Moon), 139-148, Kluwer, 1999. (in collaborazione con G.Regà).
- ?Theoretical and experimental evidence of symmetric-response instability in the finite, planar dynamics of a circular arch?, in *IUTAM Symposium on Recent development in Nonlinear Oscillations of Mechanical Systems (Eds. E. Kreuzer, N. van Dao)*, 11-22, 2000.
 - ?The Role of Experimental Tests in the Formulation of Reduced Order Analytical Models in the Planar Dynamics of Circular Arches?, in *Recent Research in Structural Dynamics* (Ed. A. Luongo), 2003. (in collaborazione con R. Alaggio).
 - ?Post-critical finite, planar dynamics of a circular arch: Experimental and theoretical characterization of transitions to non regular motions?, *Proceedings of the IUTAM Symposium on Chaotic Dynamics and Control of Systems and Processes in Mechanics*, Rome, June 2003. (in collaborazione con R. Alaggio).
 - ?Sensitivity-based operational mode shape normalization: application to a bridge?, *Mechanical Systems and Signal Processing (MSSP)*, 19 (3), 43-55, 2005. (in collaborazione con Parloo E., Cauberghe B., Alaggio R., Guillaume P.).
 - ?Analysis of the nonlinear response of a cantilever beam and of the Duffing-Rayleigh oscillator under combined deterministic and random excitation by multiple time scale method?, *Nonlinear Dynamics*, **46** (4), 375-385, 2006. (in collaborazione con M.Vasta e D. Zulli).
 - ?Nonlinear Dynamics of a Curved Beam. Part I: Formulation?, *International Journal of Nonlinear Mechanics*, 44 (2009) 623-629, 2009. (in coll. con D.Zulli e R. Alaggio).

- "Nonlinear Dynamics of a Curved Beam. Part II: Numerical Analysis and Experiments", *International Journal of Nonlinear Mechanics*, 44 (2009) 630-643, 2009. (in coll. con D.Zulli e R. Alaggio).
- "Lezioni dal terremoto dell'Abruzzo: il comportamento degli edifici visto dall'angolo prospettico della "regola d'arte" nel costruire", *Energia Ambiente Innovazione*, 3, 2009. (in collaborazione con A. Salvatori, A. Martinelli, P. Bazzurro, P. Clemente).
- "Monumenti Dannati", *Il Giornale dell'Arte*, Ottobre 2009. (in collaborazione con E. Antonacci, M. Centofanti, V. Gattulli, A. Martinelli, M. Pezzuti, F. Vestroni).
- "Partial collapses in L'Aquila due to the soft storey mechanism during the 6 April earthquake", in *The Dynamic Interaction of Soil and Structure, Proceedings of the Workshop DISS_10 (L'Aquila, 19 March 2010)* isbn 978-88-548-3693-8, 2010. (in collaborazione con A. De Sortis and Giuliano Milana).
- "Operational modal testing and FE model tuning of a cable-stayed bridge", *Engineering Structures*, 33 (2011) 2063-2073. (in collaborazione con C. Gentile).
- "Nonlinear coupling and instability in the forced dynamics of a non-shallow arch: Theory and experiments", *Nonlinear Dynamics* 19-10-2011, [Volume 68, Number 4\(2012\)](#), 505-517, DOI 10.1007/s11071-011-0232-y. (in coll. con D.Zulli e R. Alaggio).
- "Vibration analysis and structural identification of a curved multi-span viaduct", submitted for publication on MSSP (Mechanical System and Signal Processing) 2012. (in coll. con A. Morassi e M. Dilena).

- ?Modelli approssimati per il calcolo delle frequenze nonlineari di oscillazione di un cavo sospeso?, *VIII Congresso C.T.A.*,
Palermo, Ottobre 1981, 71-82. (in collaborazione con A.Luongo, G.Regà, F.Vestroni)
- ?Nonlinear coupling in the free nonplanar motion of an elastic cable?,
VII Congresso Nazionale AIMETA., Trieste Ottobre 1984, 157-168. (in collaborazione con G.Regà e F.Vestroni)
- "Tecniche perturbative per l'analisi di sensitività di problemi strutturali",
I Congresso Italiano di Meccanica Computazionale,
Milano Giugno 1986. (in collaborazione con D.Capecchi)
- ?Nonlinear resonant motions of elastic cables?, *VIII Congresso nazionale AIMETA.*,
Torino, Ottobre 1986, 367-372. (in collaborazione con G.Regà)
- "Determinazione delle grandezze modali mediante modelli ARMA",
II Congresso Italiano di Meccanica Computazionale,
Roma, Giugno 1987. (in collaborazione con D.Capecchi)
- ?On identification of linear and nonlinear structural systems?,
Proceedings of the 3rd International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics,
Southampton, 309-318, July 1988. (in collaborazione con D.Capecchi e F.Vestroni)
- ?Identification of hysteretic structures using non parametric models? *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, V, 343-348, August 1988. (in collaborazione con D. Capecchi e F. Vestroni)
- ?Moti periodici e caotici di un oscillatore con nonlinearità quadratiche e cubiche?,
IX Congresso Nazionale AIMETA., Bari, I, 65-68, Ottobre 1988. (in collaborazione con G.Regà)
- ?Sull' uso di criteri di caos in dinamica strutturale?, *Atti del Convegno Nazionale di Meccanica dei Materiali e delle Strutture*,
Roma, 365-374, 1989. (in collaborazione con G.Regà)
- "Problemi computazionali in dinamica caotica", *IV Congresso Italiano di Meccanica Computazionale*,
Padova, Giugno 1989. (in collaborazione con G.Regà ed A.Salvatori)

- "Modelli non parametrici in variabili di stato per lo studio della risposta di un sistema meccanico", *IV Congresso Italiano di Meccanica Computazionale*, Padova, Giugno 1989 (in collaborazione con D.Capecchi e F.Vestroni)
- "Tecniche numeriche per la descrizione sintetica della risposta di oscillatori non lineari", *V Congresso Italiano di Meccanica Computazionale*, 133-137, Arcavacata di Rende, Giugno 1990. (in collaborazione con A.Salvatori)
- "Un modello approssimato di transizione al caos per un oscillatore elastico nonlineare?", *X Congresso nazionale AIMETA.*, **1**, 191-194, Pisa, Ottobre 1990. (in collaborazione con G.Regà ed A.Salvatori)
- "Approximate criteria and quantitative measures for chaotic response in structural dynamics?", *Proceedings of the International Meeting on New Developments in Structural Mechanics*, 307-324, Catania, July 4-6, 1990. (in collaborazione con G.Regà)
- "Stabilità e bacini di attrazione del moto di un oscillatore non simmetrico sottoposto ad eccitazione armonica", *VI Convegno Italiano di Meccanica Computazionale*, mem. 36, Brescia, Ottobre 1991. (in collaborazione con A.Salvatori)
- "Modelli per lo studio delle oscillazioni non lineari di elementi monodimensionali elastici dotati di curvatura iniziale?", *Atti del XI Congresso Nazionale AIMETA*, 61-66, Trento, Settembre 1992. (in collaborazione con A. Salvatori)
- "Classi di Moto ed Analisi di Stabilità nella Dinamica 3D di un Modello Nonlineare di Cavo Sospeso", *VII Convegno Italiano di Meccanica Computazionale*, 34-39, Trieste, Giugno 1993. (in collaborazione con R. Alaggio)
- "Meccanismi di Biforcazione e Transizione al Caos in un Oscillatore con Nonlinearità Quadratiche e Cubiche?", *Atti del Convegno Italiano di Meccanica Stocastica '93*, 71-80, Taormina Luglio 1993. (in collaborazione con A. Salvatori)
- "Finite oscillations of elastic cables as a case study for bifurcation, chaotic and interaction phenomena in structural dynamics?", *Proceedings of IV Pan American Congress of Applied Mechanics*, 248-253, Buenos Aires, January 1995. (in collaborazione con G. Regà ed A. Salvatori)
- "Experimental Analysis of the Finite Dynamics of a Suspended Cable?", *Proceedings of XV Biennial ASME Conference on Vibration and Noise*, DE-84-1, 543-552, Boston, MA, Sep. 1995. (in collaborazione con G.Regà ed R.Alaggio)

- ?Nonlinear Interaction, Bifurcations and Chaos in Multidegree-of-freedom Cable Models?, *Proceedings of the International Symposium on Cable Dynamics*, 141-148, Liege, Belgium, Oct. 1995. (in collaborazione con G. Rega)
 - ?Sperimentazione dinamica di modelli leggeri in regime di grandi spostamenti: strumenti, metodi di analisi, prospettive?, *Atti del XII Congresso Nazionale AIMETA*, Napoli, **1**, 161-166, Ottobre 1995.
 - ?Planar, finite, forced dynamics of a double hinged circular arch: theory and experiments?, (CD Rom) *Proceedings of the XVI Biennial ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise*, Pap. VIB4092, Sacramento, CA, Sep. 1997.
 - ?Oscillazioni forzate di un arco circolare doppiamente incernierato in regime di spostamenti finiti: analisi teorica e sperimentale?, *Atti del XIII Congresso Nazionale AIMETA*, **IV**, 241-246, Siena, Settembre 1997.
 - ?Experimental Characterization of Transition to Chaos Scenarios in a Continuous System?, *Proceedings of VI PACAM DINAME 99*, Rio de Janeiro, Jan 1999. (in collaborazione con G. Rega ed R. Alaggio)
65. ?Nonlinear feedback control for the stabilization of cable oscillations: analytical and experimental models?, (CD Rom) *Proceedings of the XIII ASCE Engr. Mechanics Division Conference*, Baltimore, MD, June 1999. (in collaborazione con V. Gattulli)
66. ?Theoretical and experimental finite forced dynamics of a cantilever beam: dynamic instability and modal coupling?, (CD Rom) *Proceedings of the XVII Biennial ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise*, Las-Vegas, NE, Sept. 1999. (in collaborazione con A. Di Egidio)
67. ?Modelli analitici e sperimentali per l'analisi dinamica dell'accoppiamento flessione-torsionale in una trave incastrata, atti (CD Rom) del *XIV Congresso Nazionale AIMETA*, Como, Ottobre 1999. (in collaborazione con G. Vecchi e R. Alaggio).
- ?L'utilizzo di indagini sperimentali per la formulazione di modelli ridotti nell'analisi dinamica non lineare di archi nel piano?, *XIII Convegno Italiano di Meccanica Computazionale*, Brescia, Novembre 2000. (in collaborazione con R. Alaggio ed E. Antonacci)
 - ?Stochastic Response Analysis of Non-Linear Oscillators to Combined Deterministic and Random Excitation by Multiple Time Scaling?, *ICOSSAR Conference in Newport Beach, California*, June 2001.

- ?Sensibilità alle imperfezioni iniziali nel problema dell'accoppiamento dinamico flessio-torsionale di una trave elastica incastrata: analisi teorica e sperimentale? atti (CD) del *XV Congresso Nazionale AIMETA*, Taormina, Settembre 2001. (in collaborazione con R. Alaggio e D. Zulli)
- ?The use of experimental tests in the formulation of analytical models for the finite forced dynamics of planar arches?, proceedings of *XVII Biennial ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise*, Pittsburg, VA, Sept. 2001. (in collaborazione con R. Alaggio)
- ?Nonlinear parametric identification of oscillating cables using wavelets? ,proceedings of *XVII Biennial ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise*, Pittsburg, VA, Sept. 2001. (in collaborazione con F.Romeo and V.Gattulli).
- ?Instability and post critical evolution in the finite, planar, forced dynamics of a circular arch?, *III Joint Conference between the Italian Group of Computational Mechanics and the Ibero-Latin_American Association of Computational Methods in Engineering*, Giulianova, TE, Giugno 2002. (in collaborazione con R. Alaggio).
- ?Damage localization on a 1:10-scale model of a steel frame?, *III Joint Conference between the Italian Group of Computational Mechanics and the Ibero-Latin_American Association of Computational Methods in Engineering*, Giulianova, TE, Giugno 2002. (in collaborazione con E. Antonacci).
- ?Analisi postcritica di un pendolo doppio rovescio?, *III Joint Conference between the Italian Group of Computational Mechanics and the Ibero-Latin_American Association of Computational Methods in Engineering*, Giulianova, TE, Giugno 2002. (in collaborazione con R. Alaggio e D: Zulli).
- ?Sensibilità alle imperfezioni iniziali nella dinamica libera di una trave nello spazio?, *III Joint Conference between the Italian Group of Computational Mechanics and the Ibero-Latin_American Association of Computational Methods in Engineering*, Giulianova, TE, Giugno 2002. (in collaborazione con R. Alaggio, D. Zulli ed M. Vasta).
- ?Analysis of the Nonlinear Response of a Cantilever Beam under Deterministic and Random Excitations?, Proceedings of IMECE '03 - ASME International Mechanical Engineering Conference, Washington, November 15-21 2003. (in collaborazione con M. Vasta e D. Zulli)
- ?The Role of Experimental Tests in the Formulation of Reduced Order Analytical Models in the Planar Dynamics of Circular Arches?, in *Recent Research in Structural Dynamics* (Ed. A. Luongo), 2003. (in collaborazione con R. Alaggio)

- ?Flexural-torsional post critical behavior of a dynamically excited cantilever beam: theoretical model and experimental tests?, proceedings of XVIII Biennial ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise, Chicago, MI, Sept. 2003. (in collaborazione con R. Alaggio e D. Zulli)
- ?Dinamica Flesso Torsionale di una Trave in Parete Sottile: Aspetti Teorici e Sperimentali?, atti (CD) del XVI Congresso Nazionale AIMETA, Ferrara, Settembre 2003. (in collaborazione con R. Alaggio e D. Zulli)
- ?Modal Testing on a Retrofitted Concrete Arch Bridge for Structural Identification and Conditions Assessment?, atti (CD) del XVI Congresso Nazionale AIMETA, Ferrara, Settembre 2003. (in collaborazione con V. Gattulli e R. Alaggio)
- ?Sensitivity-based operational mode shape normalization: application to a bridge?, proceedings of the IMAC XXII Dearborn, MI, January 2004. (in collaborazione con E. Parloo, B. Cauberghe, R. Alaggio, P. Guillaume)
- ?Repeated Modal Testing on the Bridges of a Local Public Territorial Authority for Structural Identification and Condition Assessment?, to be presented at the 5th International Conference on Quality, Reliability and Maintenance, Oxford, England, UK, April 2004. (in collaborazione con R. Alaggio, F. Fusco)
- ?Test dinamici, identificazione modale e modelli numerici di confronto dei ponti ad archi gemelli in c.a. in provincia di Teramo?, Atti (in preparazione) del 2° Workshop - Problemi di Vibrazioni nelle Costruzioni Civili e nelle Costruzioni Meccaniche, Perugia, Giugno 2004. (in coll. Con P. Manetta e R. Alaggio)
- ?Test Dinamici Ripetuti sui Ponti Gestiti da un Ente Pubblico Territoriale: Identificazione Modale e Monitoraggio delle Condizioni Strutturali?, Presentato al 2° Workshop - Problemi di Vibrazioni nelle Costruzioni Civili e nelle Costruzioni Meccaniche, Perugia, Giugno 2004. (in coll. con P. Manetta e R. Alaggio)
- ?Dinamica Flesso-Torsionale in una Trave Curva in Parete Sottile?, Atti del XV Convegno del Gruppo AIMETA di Meccanica Computazionale (GIMC), Genova, 2004. (in coll. con D. Zulli e R. Alaggio)
- ?Analysis of the nonlinear response of a cantilever beam under deterministic and random excitation by multiple time scale method?, Meccanica Stocastica '04, convegno nazionale del gruppo AIMETA di meccanica aleatoria e affidabilità strutturale, Pantelleria, Luglio 2004. (in coll. con M. Vasta e D. Zulli).

- ?Analisi della risposta dinamica 3D di una trave spaziale affetta da un campo di imperfezioni iniziali?, Atti del XVIII Convegno Nazionale AIMETA, Firenze, Ottobre 2005.
- ?Arch bridges in Provincia di Teramo: tests, identification and numerical models?, Overview paper included in the Proceedings of the 1st IOMAC (International Operational Modal Analysis Conference), Copenhagen, April 26-27, 2005.
- ?Correlating the dynamic behavior of a cable-stayed bridge from ambient vibration testing and f.e. models?, proceedings of the EVACES Conference ? Experimental Vibration Analysis of Civil Engineering Structures, Bordeaux, Oct. 2005. (in coll. con R. Alaggio, F. Caiazzo, C. Gentile)
- Un programma di manutenzione programmata per I ponti gestiti da Enti Pubblici Territoriali: 1- aspetti generali?, atti del Convegno CRASC-06, Messina, Aprile 2006. (in coll. C. Gentile).
- Un programma di manutenzione programmata per I ponti gestiti da Enti Pubblici Territoriali: 2-casi di studio?, atti del Convegno CRASC-06, Messina, Aprile 2006. (in coll. C. Gentile).
- "Analysis of the bridges mantained by a Local Public Territorial Authority in Italy: modal identification and condition assessment", presented to the SAMCO (European Project on Structural Assessment, Monitoring and Control) Meeting, Prague, September 2006.
- ?Ambient Vibration Testing and Operational Modal Analysis of a Masonry Tower?, Proceedings of the 2nd IOMAC (International Operational Modal Analysis Conference), Copenhagen, April 30-May 02, 2007, (in coll. C. Gentile).
- ?F.E. Modeling of a Cable-stayed Bridge Based on Operational Modal Analysis?, proceedings of the IMAC XXVI Orlando, Fl, February 2008. (in collaborazione con C. Gentile)
- ?Modal and Structural Identification of Old Masonry Towers?, Tutorial on ? Applications of Operational Modal for Civil Structures? at the IMAC XXVI Orlando, Fl, February 2008.
- ?Dynamical Tests on a Damaged Bridge?, Proceedings of the 3rd IOMAC (International Operational Modal Analysis Conference), Portonovo, AN, Italy, May 4-6, 2009, (in coll. A. Morassi, M. Dilena, F. Eusani).
- ?Frequency veering and mode hybridization in arch bridges?, IMAC XXVII Orlando, Fl, February 2009.

- "Modal and Structural Identification of a Masonry Chimney", Proceedings of the Italian Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Ancona, September 2009. (in coll. con F. Eusani).
- "Frequency-avoiding in arch bridges: a possible structural health monitoring approach", Proceedings of the Italian Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Ancona, September 2009. (in coll. con D.Zulli e R. Alaggio)
- "Dynamical tests and Analysis for the Assessment of Structural Conditions of Bridges", Proceedings of the 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering, Venice, Italy, September 22-24, 2010. (in coll. F. Vestroni)
- "Dynamic testing, structural identification and damage detection on Dogna's bridge", Proceedings of the Eighth International Conference on Structural Dynamics EURODYN 2011, Leuven, July 2011. (in coll. A. Morassi).
- "A case study about the influence of infilled walls on the behaviour of r.c. buildings during the 6 April 2009 L'Aquila earthquake", Proceedings of the 4th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures ? EVACES 2011, Varenna, October 2011. (in coll. De Sortis, Milano)
- "Structural identification of monuments in Rome using ambient vibration measurements", Proceedings of the 4th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures ? EVACES 2011, Varenna, October 2011. (in coll. con Alaggio, De Sortis, Lucarelli)

105. "Dynamic Testing and Structural Identification of a Curved Multi-Span Viaduct", Proceedings of the 4th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures ? EVACES 2011, Varenna, October 2011. (in coll. con Alaggio, Dilella, Morassi)

- "The Valle Castellana twin-arch bridge: Dynamical tests, identification, seismic performances", Proceedings of the IMAC XXX Jacksonville, FL, February 2012. (in coll. con Alaggio, Dilella, Morassi).
- "Structural assessment of bridges and health monitoring programs based on visual inspections and dynamical tests", Proceedings of the 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2012), Villa Erba, Lake Como, Italy, July 8-12, 2012, (in coll. A. Morassi and F. Vestroni).
- "Dynamic Methods for Health Monitoring and Structural Identification of Bridges", Proceedings of the Conference IALCCE 2012 ? Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, MS 3-1 "Vibration-based Health Monitoring, Damage Identification, and Parameter Estimation for Civil

Engineering Structures', Vienna, Ottobre 2012, (in coll. A. Morassi and F. Vestroni).

- 'Forced 3D nonlinear dynamics of a hanging cable under multiple resonance conditions?', Proceedings of the IMAC XXXI Garden Grove, Orange County, Los Angeles, CA, February 2013. (in coll. con Alaggio, Rega, Zulli).
- 'Nonlinear forced dynamics of planar arches?', Proceedings of the IMAC XXXI Garden Grove, Orange County, Los Angeles, CA, February 2013. (in coll. con Alaggio, Zulli).
- 'The tanks of the water supply net in Provincia di Udine-Italy: dynamical tests, modal identification and numerical models?', Proceedings of the 5th International Operational Modal Analysis Conference IOMAC 2013, Guimaraes (Portugal), May 13-15, 2013 (8 pp). Book of extended abstracts, A. Cunha, L.F. Ramos, E. Caetano, P.B. Lourenco (Eds.), ISBN 978-972-8692-83-4 (pp. 35-36) (in coll. con Alaggio, Dilena, Morassi).
- 'Dynamic Testing for structural assessment of existing bridges: two case studies?', Proceedings of the 5th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures EVACES 2013, Ouro Preto (Brazil) 28-30 October 2013, F. Barbosa, A. Cury (eds.), Universidade Federal de Ouro Preto, Brazil, pp. 183-192, (in coll. con Alaggio, Dilena, Morassi).
- 'Modal and Structural Identification of a Skew, Cable Stayed, Arch Bridge?', Proceedings of IMAC XXXII, Orlando, FL, February 3-6, 2014, (in coll. con Alaggio, Dilena, Morassi).
- 'Dynamical testing and FE model tuning of a two-arch cable-stayed bridge?', to appear on the Proceedings of the IX International Conference on Structural Dynamics EUROLYN 2014, Porto, June 2014. (in coll. R. Alaggio, M. Dilena, A. Morassi).

Elenco C: Atti di Dipartimento

- 'Accoppiamento modale nel moto libero di un modello nonlineare di cavo sospeso?', *Pubbl.n.57 Atti dell' Istituto di Scienza delle Costruzioni, Univ. L'Aquila, L'Aquila Maggio 1982.*
- 'Transizione da moti periodici a moti caotici in un oscillatore elastico nonlineare?', in *Omaggio a Giulio Ceradini*, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Esagrafica, 111-123, Roma, Settembre 1988. (in collaborazione con G.Regà)

Book reviews

- Per *Meccanica*:
?Non-linear Dynamics: New Theoretical and Applied Results?, Jan Awrejcewicz (Ed.),
Akademie Verlag, Berlin, 1995.
- Per *Meccanica*:
?Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures ? Vol. 1:
Basic Concepts, Columns, Beams and Plates?, J. Singer, J. Arbocz and T. Weller, *John Wiley & Sons*
, Chichester, 1997.
- Per la casa editrice John Wiley & Sons Ltd: ?Introduction to Operational Modal Analysis?, R.
Brinker.