

PROGRAMMI DI RICERCA SCIENTIFICA DI RILEVANTE INTERESSE NAZIONALE
RICHIESTA DI COFINANZIAMENTO (D.M. 19 marzo 2010 n. 51)

PROGRAMMA DI RICERCA - MODELLO A
Anno 2009 - prot. 2009AJ3PC9

1 - Titolo del Progetto di Ricerca

Testo italiano

INSTABILITA' E DANNO IN STRUTTURE SOTTILI

Testo inglese

INSTABILITY AND DAMAGE IN THIN STRUCTURES

2 - Area Scientifico-disciplinare

08: *Ingegneria civile ed Architettura* 90% *

09: *Ingegneria industriale e dell'informazione* 10%

* Area prescelta ai fini della valutazione

3 - Settori scientifico-disciplinari interessati dal Progetto di Ricerca

ICAR/08 - Scienza delle costruzioni

3 bis Settori di ricerca ERC (European Research Council) interessati dal Progetto di Ricerca

PE Mathematics, physical sciences, information and communication, engineering, universe and earth sciences

PE8 Products and process engineering: product design, process design and control, construction methods, civil engineering, energy systems, material engineering

PE8_3 Civil engineering, maritime/hydraulic engineering, geotechnics, waste treatment

PE8_9 Materials engineering (biomaterials, metals, ceramics, polymers, composites, ...)

4 - Parole chiave

Testo italiano

INSTABILITÀ STATICA E DINAMICA

MECCANICA DEL DANNO

STRUTTURE SOTTILI

Testo inglese

STATIC AND DYNAMIC INSTABILITY

DAMAGE MECHANICS

THIN STRUCTURES

5 - Coordinatore Scientifico

LUONGO

ANGELO

Professore Ordinario

12/04/1954

LNGNGL54D12F839T

Università degli Studi de L'AQUILA

Facoltà di INGEGNERIA

Dipartimento di INGEGNERIA DELLE STRUTTURE, DELLE ACQUE E DEL TERRENO

6 - Curriculum scientifico

Testo italiano

Il prof. Angelo Luongo è ordinario di Scienza delle Costruzioni presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di L'Aquila.

Nel 1978 si è laureato presso l'Università di Roma "La Sapienza".

Dal 1981 al 1988 è stato Ricercatore Confermato presso l'Università di Roma "La Sapienza".

Dal 1988 al 1990 è stato professore Associato di Scienza delle Costruzioni presso l'Università di L'Aquila.

Dal 1990 è professore Ordinario presso la stessa Università.

Dal 1994 al 2003 è stato Direttore del Dipartimento di Ingegneria delle Strutture delle Acque e del Terreno dell'Università di L'Aquila.

Dal 1997 al 2003 è stato membro del Senato Accademico dell'Università di L'Aquila.

Dal 1989 al 2000 è stato membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in 'Ingegneria delle Strutture', sedi consorziate Roma "La Sapienza" e L'Aquila.

Dal 2000 è membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in 'Modellistica Fisico-Matematica per l'Ingegneria' dell'Università di L'Aquila.

Dal 2007 è pro-rettore con delega alle relazioni con l'industria.

Dal 2007 è associate editor della rivista internazionale 'Mathematical Problems in Engineering'.

Dal 2007 al 2009 è stato coordinatore del Consorzio Europeo SICON, finanziato dall'Unione Europea.

Dal 2007 al 2008 è stato coordinatore di un gruppo internazionale di ricerca, finanziato dall'Unione Europea (Progetto INTAS).

Il prof. Luongo svolge ricerca nei settori della Dinamica e della Stabilità delle Strutture Elastiche, con particolare riguardo all'analisi dei sistemi geometricamente nonlineari. Ha pubblicato circa 150 memorie scientifiche, di cui molte (più di 60) su riviste internazionali. È revisore di alcune importanti riviste nei settori d'interesse. Ha sviluppato i seguenti filoni di ricerca:

- °oscillazioni libere linearizzate dei cavi sospesi;
- °oscillazioni nonlineari di elementi strutturali monodimensionali (fili e travi);
- °comportamento critico e postcritico di membri prismatici a parete sottile;
- °interazione nonlineare tra modi di buckling quasi-simultanei;
- °dinamica nonlineare di sistemi orbitanti a filo;
- °fenomeni di localizzazione in problemi di dinamica e di biforcazione dell'equilibrio;
- °sensibilità di sistemi dinamici difettivi e quasi-difettivi;
- °fenomeni di instabilità aeroelastica in sistemi lineari e nonlineari;
- °controllo passivo di oscillazioni aeroelastiche con dispositivi a massa accordata;
- °metodi perturbativi per l'analisi di biforcazioni multiple di sistemi a più parametri;
- °dinamica e buckling di sistemi periodici lineari e nonlineari;
- °dinamica di fili e travi percorsi da masse viaggianti.

È coautore di cinque libri didattici, di cui uno in lingua inglese.

Testo inglese

Full Professor of Solid and Structural Mechanics at University of L'Aquila (Italy).

1978: degree in Civil Engineering at "La Sapienza" University (Rome)

1981-1988: Assistant Professor at "La Sapienza" University

1988-1990: Associate Professor at L'Aquila University

1990-date: Full Professor at L'Aquila University

1989-1990: President of the educational committee of the Engineering Faculty of L'Aquila

1994-2003: Head of Department of Civil Engineering (DISAT)

1997-2003: member of the University Senate of L'Aquila

1989-2000: member of the doctorate school of 'Structural Mechanics' of La Sapienza and L'Aquila Universities associated.

2000-date: member of the doctorate school of 'Mathematical Models for Engineering' of University of L'Aquila.

2007-date: pro-rector for relationships with industries

2007-date: associate editor of the International Journal 'Mathematical Problems in Engineering'

2007-2009: coordinator of the Scientific European Consortium SICON, financed by the EU

2007-2008: coordinator of an international scientific team financed by EU (INTAS Project)

Professor Angelo Luongo mainly works on Dynamics and Stability of Elastic Structures, with particular interest to geometrically nonlinear systems. He is author of about 150 scientific papers, most of which (more than 60) published on International Journals. He is reviewer of several international journals on the field. His main research topics are:

- °Linear free oscillations of elastic suspended cables;
- °Nonlinear oscillations of one dimensional, elastic, structural systems (wires, beams);
- °Critical and post-critical behavior of thin-walled beams;
- °Nonlinear interaction among nearly-simultaneous buckling modes;
- °Nonlinear dynamics of wires orbiting systems;
- °Localization phenomena in Dynamics and Buckling;
- °Sensitivity analysis of defective and nearly-defective dynamical systems;
- °Aero-elastic stability phenomena in linear and nonlinear systems;
- °Passive control of aero-elastic oscillations by Tuned Mass Dampers;
- °Perturbation methods for multiple-bifurcations analysis of multi-parameter systems;
- °Dynamics and buckling of linear and nonlinear periodic systems;
- °Dynamics of strings and beams with travelling masses.

He is co-author of five educational books, one of which published in English.

7 - Pubblicazioni scientifiche più significative del Coordinatore Scientifico

1. BELYAKOV A.O., SEYRANIAN A.P., LUONGO A. (2009). Dynamics of the pendulum with periodically varying length. *PHYSICA D-NONLINEAR PHENOMENA*, vol. 238(16); p. 1589-1597, ISSN: 0167-2789
2. LUONGO A., ZULLI D., PICCARDO G. (2009). On the effect of twist angle on nonlinear galloping of suspended cables. *COMPUTERS & STRUCTURES*, vol. 87(15-16); p. 1003-1014, ISSN: 0045-7949
3. LUONGO A., PICCARDO G. (2008). A continuous approach to the aeroelastic stability of suspended cables in 1:2 internal resonance. *JOURNAL OF VIBRATION AND CONTROL*, vol. 14(1-2); p. 135-157, ISSN: 1077-5463

4. LUONGO A., ZULLI D., PICCARDO G. (2008). Analytical and numerical approaches to nonlinear galloping of internally resonant suspended cables. *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION*, vol. 315(3); p. 375-393, ISSN: 0022-460X
5. VESTRONI F., LUONGO A., PAOLONE A. (2008). A perturbation method for evaluating nonlinear normal modes of a piecewise linear two-degrees-of-freedom system. *NONLINEAR DYNAMICS*, vol. 54(4); p. 379-393, ISSN: 0924-090X
6. DI EGIDIO A., LUONGO A., PAOLONE A. (2007). Linear and nonlinear interactions between static and dynamic bifurcations of damped planar beams. *INTERNATIONAL JOURNAL OF NON-LINEAR MECHANICS*, vol. 42; p. 88-98, ISSN: 0020-7462
7. LUONGO A., ZULLI D., PICCARDO G. (2007). A linear model of curved beam for the analysis of galloping oscillations in suspended cables. *JOURNAL OF MECHANICS OF MATERIALS AND STRUCTURES*, vol. 2(4); p. 675-694
8. LUONGO A., DI EGIDIO A. (2006). Divergence, Hopf and Double-Zero Bifurcations of a Nonlinear Planar Beam. *COMPUTERS & STRUCTURES*, vol. 84/24-25; p. 1596-1605, ISSN: 0045-7949
9. LUONGO A., ROMEO F. (2006). A Transfer matrix-perturbation approach to the dynamics of chains of nonlinear sliding beams. *JOURNAL OF VIBRATION AND ACOUSTICS*, vol. 128/2; p. 190-196, ISSN: 1048-9002
10. PAOLONE A., VASTA M., LUONGO A. (2006). Flexural-Torsional Bifurcations of a Cantilever Beam Under Potential And Circulatory Forces: Part I Nonlinear Model and Stability Analysis. *INTERNATIONAL JOURNAL OF NON-LINEAR MECHANICS*, vol. 41/4; p. 586-594, ISSN: 0020-7462
11. PAOLONE A., VASTA M., LUONGO A. (2006). Flexural-Torsional Bifurcations of a Cantilever Beam Under Potential And Circulatory Forces: Part II Post-Critical Analysis. *INTERNATIONAL JOURNAL OF NON-LINEAR MECHANICS*, vol. 41/4; p. 595-604, ISSN: 0020-7462
12. LUONGO A., DI EGIDIO A. (2005). Bifurcation equations through multiple-scales analysis for a continuous model of a planar beam. *NONLINEAR DYNAMICS*, vol. 41(1-3); p. 171-190, ISSN: 0924-090X
13. LUONGO A., DI EGIDIO A., PAOLONE A. (2005). Qualitative analysis of classes of motion for multiresonant systems II. A geometrical method. *ACTA MECHANICA*, vol. 174(1-2); p. 91-107, ISSN: 0001-5970
14. LUONGO A., PAOLONE A., DI EGIDIO A. (2005). Classes of Motion Qualitative Analysis for Multiresonant Systems: II. A Geometrical Method. *ACTA MECHANICA*, vol. 174/1-2; p. 109-124, ISSN: 0001-5970
15. LUONGO A., PICCARDO G. (2005). Linear Instability Mechanisms for Coupled Translational Galloping. *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION*, vol. 288; p. 1027-1047, ISSN: 0022-460X
16. LUONGO A., ROMEO F. (2005). Real wave vectors for dynamic analysis of periodic structures. *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION*, vol. 279; p. 309-325, ISSN: 0022-460X
17. GATTULLI V., DI FABIO F., LUONGO A. (2004). Nonlinear tuned mass damper for self-excited oscillations. *WIND AND STRUCTURES*, vol. 7/4; p. 251-264, ISSN: 1226-6116
18. LUONGO A., DI EGIDIO A., PAOLONE A. (2004). Multiscale Analysis of Defective Multiple-Hopf Bifurcations. *COMPUTERS & STRUCTURES*, vol. 82/31-32; p. 2705-2722, ISSN: 0045-7949
19. VASTA M., LUONGO A. (2004). Dynamic Analysis of Linear and Non-linear Oscillations of a Beam under Axial and transversal Random Poisson Pulses. *NONLINEAR DYNAMICS*, vol. 36; p. 421-435, ISSN: 0924-090X
20. DI EGIDIO A., LUONGO A., VESTRONI F. (2003). A Nonlinear Model for Open Cross-Section Thin-Walled Beams - Part II: Forced Motion. *INTERNATIONAL JOURNAL OF NON-LINEAR MECHANICS*, vol. 38/7; p. 1083-1094, ISSN: 0020-7462
21. GATTULLI V., DI FABIO F., LUONGO A. (2003). One to one double Hopf bifurcation in aeroelastic oscillators with tuned mass dampers. *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION*, vol. 262(2); p. 201-217, ISSN: 0022-460X
22. LUONGO A., DI EGIDIO A., PAOLONE A. (2003). Multiple Time Scale Analysis for Bifurcation from a Multiple-Zero Eigenvalue. *AIAA JOURNAL*, vol. 41; p. 1143-1150, ISSN: 0001-1452
23. LUONGO A., PAOLONE A., DI EGIDIO A. (2003). Multiple Time Scales Analysis for 1:2 and 1:3 Resonant Hopf Bifurcations. *NONLINEAR DYNAMICS*, vol. 34/3-4; p. 269-281, ISSN: 0924-090X
24. ROMEO F., LUONGO A. (2003). Vibration Reduction in Piecewise Bi-Coupled Periodic Structures. *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION*, vol. 268; p. 601-615, ISSN: 0022-460X
25. LUONGO A., DI EGIDIO A., PAOLONE A. (2002). On the proper form of the amplitude modulation equations for resonant system. *NONLINEAR DYNAMICS*, vol. 27; p. 237-254, ISSN: 0924-090X
26. ROMEO F., LUONGO A. (2002). Invariant Representation of Propagation Properties for Bi-Coupled Periodic Structures. *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION*, vol. 257/5; p. 869-886, ISSN: 0022-460X
27. GATTULLI V., DI FABIO F., LUONGO A. (2001). Simple and double Hopf bifurcations in aeroelastic oscillators with Tuned Mass Dampers. *JOURNAL OF THE FRANKLIN INSTITUTE*, vol. 338; p. 187-201, ISSN: 0016-0032
28. LUONGO A. (2001). Mode Localization in Dynamics and Buckling of Linear imperfect Continuous Structures. *NONLINEAR DYNAMICS*, vol. 25; p. 133-156, ISSN: 0924-090X
29. LUONGO A., PAOLONE A., DI EGIDIO A. (2000). Sensitivities and linear stability analysis around a double zero eigenvalue. *AIAA JOURNAL*, vol. 38; p. 702-710, ISSN: 0001-1452
30. LUONGO A., PAOLONE A. (1999). On the reconstitution problem in the multiple time scale method. *NONLINEAR DYNAMICS*, vol. 14; p. 133-156, ISSN: 0924-090X

8 - Elenco delle Unità operative

Unità	Responsabile dell'Unità di Ricerca	Qualifica	Ente	Disponibilità temporale indicativa prevista mesi/persona previsti
I	LUONGO Angelo	Professore Ordinario	Università degli Studi de L'AQUILA	16.23
II	PEREGO Umberto	Professore Ordinario	Politecnico di MILANO	17.7
III	LENCI Stefano	Professore Ordinario	Università Politecnica delle MARCHE	21.95
IV	CUOMO Massimo	Professore Ordinario	Università degli Studi di CATANIA	18.82
V	DELL'ISOLA Francesco	Professore Straordinario	Università degli Studi di ROMA "La Sapienza"	26.19
VI	PICCARDO Giuseppe	Professore Associato confermato	Università degli Studi di GENOVA	8.1

9 - Abstract del Progetto di Ricerca

Testo italiano

La valutazione della funzionalità e della capacità portante di una struttura sono obiettivi primari dell'ingegneria strutturale, resi oggi più difficili dal crescente impiego di materiali innovativi (intelligenti), di nuove tecnologie e di strutture di nuova generazione a cui si richiedono elevate prestazioni. La complessa problematica necessita talvolta del contributo di competenze multi-disciplinari.

Tra i numerosi fattori che condizionano il comportamento meccanico di una struttura, e ne complicano l'analisi, il danno e l'instabilità sono tra i più importanti, per le conseguenze spesso catastrofiche che producono. Il danno deteriora la qualità del materiale, aumentandone la deformabilità e riducendone la resistenza. E' indotto da sollecitazioni meccaniche, termiche o chimiche, spesso di tipo ciclico, che producono formazione di discontinuità (micro fessure, microcavità, distacchi tra strati aderenti) che si propagano e causano progressivo degrado del materiale. L'instabilità, invece, modifica la qualità dell'equilibrio della struttura, spesso già in fase elastica. E' indotta da sollecitazioni statiche o dinamiche, di origine ambientale o antropica, che causano un repentino cambiamento della posizione di equilibrio della struttura (buckling), ovvero eccitano oscillazioni di grande ampiezza (biforcazione dinamica), che portano la struttura al collasso, o la rendono comunque non funzionale.

La rilevanza dei fenomeni di danno e instabilità, è esaltata dalla snellezza della struttura. Elementi strutturali quali i laminati sottili, in materiale composito, fibrorinforzato, in cartone o vetro, così come i tubi multistrato in acciaio-gomma, sono estremamente sensibili a fenomeni di fatica, frattura, delaminazione, abrasione, così come a fenomeni d'instabilità, locale (imbozzamento) o globale (instabilità euleriana o flessione-torsionale). Analogamente, strutture snelle quali cavi isolati, reti di cavi, membrane, profilati sottili, passerelle pedonali, sono particolarmente vulnerabili a danni localizzati o diffusi, così come ad instabilità da galloping, flutter, risonanza esterna o parametrica.

Danno ed instabilità, poi, possono anche interagire. Il danno, infatti, produce 'difetti strutturali' che possono favorire l'instabilità. In regime statico, riducendo il carico critico di strutture sensibili alle imperfezioni; in regime dinamico, modificando le frequenze della struttura. Viceversa, l'effetto geometrico che è alla base del fenomeno d'instabilità può esaltare il danno, favorendo, ad esempio, la delaminazione.

Per tali ragioni appare di forte ed attuale interesse scientifico condurre una ricerca sugli effetti, indipendenti o combinati, di danno ed instabilità in strutture sottili. Il presente progetto si propone: (1) di analizzare, attraverso modelli analitici, numerici e sperimentali, le cause e l'evoluzione del danno/instabilità nelle strutture, in campo statico e dinamico, con particolare riguardo a materiali innovativi; (2) di mettere a punto strategie di controllo avanzate per il monitoraggio e la mitigazione degli effetti connessi alla perdita di stabilità o al danneggiamento.

Il progetto è organizzato nei seguenti Work Packages (WP).

Nel WP-A si analizzeranno i fenomeni di frattura e danno in laminati sottili, sia sotto il profilo metodologico, con lo sviluppo di modelli teorici d'analisi, sia sotto quello tecnico, indirizzando lo studio alle strutture in cartone, vetro o gomma-acciaio, anche con l'ausilio d'indagini numeriche e sperimentali.

Nel WP-B si studierà la risposta dinamica e l'instabilità di strutture snelle, sia integre, sia danneggiate. Si analizzerà il buckling e post-buckling di travi e gusci, nonché l'instabilità dinamica di travi e fili, con particolare attenzione a fenomeni d'interazione uomo-struttura, vento-struttura, massa viaggiante-struttura, struttura impattante un ostacolo, il tutto anche in presenza di difetti o degrado del materiale.

Nel WP-C si affronterà il problema del miglioramento delle prestazioni delle strutture attraverso dispositivi elettro-meccanici. Si svilupperanno tecniche di rilevamento del danno e di diagnosi delle capacità prestazionali della struttura, da condursi con sistemi piezo-elettro-meccanici, e si proporranno metodi di controllo della risposta, da realizzarsi con dispositivi meccanici oppure elettro-controllati.

Testo inglese

The assessment of the capabilities and of the carrying capacity of a structure is a primary objective of structural engineering, nowadays made more difficult by the increasing use of innovative (smart) materials, new technologies and new generation structures, which are demanded for high performance. Complex problems sometimes require multi-disciplinary skills.

Among the many factors influencing the mechanical behavior of a structure, and complicating the analysis, damage and instability are crucial, producing consequences often catastrophic. The damage impairs the performance of the material, increasing its deformability and weakening its strength. It is induced by mechanical, thermal or chemical stress, often cyclic, that produces breaks (micro-cracks, micro-cavities, gaps between adherents layers) which propagate and cause progressive degradation of the material. The instability, however, changes the quality of the equilibrium of the structure, often already in the elastic regime. It is induced by static or dynamic loads, due to environmental or anthropogenic actions, causing a sudden change in the equilibrium position of the structure (buckling), or exciting large amplitude oscillations (dynamic bifurcation), that bring the structure to collapse, or otherwise to become non-functional.

The relevance of the two phenomena, damage and instability, is enhanced by the slenderness of the structure. Structural elements such as thin laminates, made of composite or fiber reinforced materials, cardboard or glass, as well as multilayer steel-rubber pipes, are extremely susceptible to fatigue, fracture, delamination, abrasion, likewise to phenomena of instability, local (swellings) or global (Eulerian or flexural-torsional instability). Similarly, slender structures such as insulated cables, network cables, membranes, thin section bars, airfoils, footbridges, are particularly vulnerable to localized or widespread damage, as well as instability by galloping, flutter, external or parametric resonance.

Damage and instability, then, may also interact. The damage, in fact, produces "structural faults" which could cause instability. In the static regime, by reducing the critical load of structures sensitive to imperfections, in the dynamic regime by changing the frequency of the structure. Conversely, the geometric effect that underlies the phenomenon of instability may enhance the damage, promoting, for example, delamination.

For these reasons it is of great current scientific interest to conduct research on independent or combined effects of damage and instability in thin structures. This project aims at: (1) analyzing, through analytical, numerical and experimental models, the causes and evolution of damage/instability in the structures, in both the static and the dynamic fields, with particular focus on innovative materials, (2) developing advanced control strategies for monitoring and mitigating the effects of loss of stability or damage.

The project is organized in the following Work Packages (WP).

In WP-A the phenomena of fracture and damage in thin laminates will be addressed, both in methodological terms, by the development of theoretical models for analysis, and in technical terms, directing the study to cardboard, glass or rubber-steel structures, even with the help of numerical and experimental investigations.

In WP-B the dynamic response and instability of slender structures, both intact and damaged, will be studied. The buckling and post-buckling of beams and shells, the dynamic instability of beams and wires, with particular attention to human-structure, wind-structure and moving-mass-structure interaction phenomena as well as impact of the structure with an obstacle, will be analyzed, in all cases, also in the presence of defects or deterioration of the material.

In WP-C the challenge of improving the performance of the structures through electro-mechanical devices will be addressed. Techniques for damage detection and diagnosis of the structural performance by means of piezo-electro-mechanical systems will be developed, and methods for testing the response by means of mechanical or electro-controlled devices will be proposed.

10 - Obiettivi finali che il Progetto si propone di raggiungere

Testo italiano

Il progetto di ricerca (curiosity driven) si propone, da un lato, di sviluppare strumenti metodologici d'indagine, finalizzati all'approfondimento della conoscenza di aspetti complessi del comportamento strutturale, e dall'altro di proporre strategie e tecniche d'intervento migliorative delle prestazioni meccaniche, anche con l'ausilio di materiali innovativi e dispositivi intelligenti, mutuati da settori dell'Ingegneria diversi da quello strutturale.

Nello specifico, il progetto si pone i seguenti obiettivi:

- (A) migliorare l'attuale cognizione dei fenomeni di frattura e danno nelle strutture sottili, e della possibile interazione tra instabilità e danno;
- (B) approfondire la conoscenza dei fenomeni d'instabilità statica e dinamica che insorgono in strutture sottili, integre o danneggiate;
- (C) sviluppare tecniche d'intervento diagnostiche e di miglioramento prestazionale di strutture sottili danneggiate.

Ai fini del raggiungimento dell'obiettivo (A), la ricerca s'indirizzerà, da un lato, (A1), allo sviluppo di teorie ed algoritmi per l'analisi del danno nei laminati sottili, e, dall'altro, (A2), allo studio di strutture costituite da materiali specifici, di particolare rilevanza tecnica, oppure scelti per esemplificare e validare le teorie sviluppate. Il maggiore obiettivo di (A1) è la formulazione di nuovi modelli analitici e numerici idonei a modellare l'insorgenza di danni localizzati all'interfaccia, nonché il distacco tra gli strati, che si manifestano in elementi strutturali laminati. I modelli dovranno contemplare una varietà di situazioni, quali l'esistenza di uno strato intermedio forte, oppure debole, e la simulazione di processi industriali di taglio mediante lame sottili. Dovranno inoltre simulare il regime cinematico di piccoli o grandi spostamenti, nonché il comportamento meccanico complesso dell'interfase, tenendo conto della presenza simultanea di danno, elasticità, plasticità, attrito e

viscosità. L'obiettivo di (A2) è la formulazione di modelli teorici, supportati dalla risultanze di prove sperimentali appositamente pianificate, atti a predire il comportamento meccanico di elementi funzionali in cartone, lastre di vetro e tubi stratificati, al fine di ottimizzarne le prestazioni ed allungarne, se possibile, la vita utile. Allo scopo, i modelli dovranno essere in grado di descrivere la risposta degli elementi a diverse sollecitazioni, in presenza di varie forme di danneggiamento, quali difetti, cordonature, abrasione, usura. Dovranno simulare: processi industriali di formatura di contenitori alimentari in cartone, sollecitazioni nel piano e fuori piano di lastre di vetro stratificate con intercalare visco-elastico, nonché cicli di elevata pressione e temperatura in tubi multistrato, ad esempio costituiti da gomma e treccia d'acciaio.

Per raggiungere l'obiettivo (B), l'indagine sarà finalizzata da un lato, (B1), all'analisi dei fenomeni d'instabilità statica (buckling), sia di tipo locale sia globale, che si verificano in travi e gusci laminati, e dall'altro, (B2), allo studio della risposta/instabilità dinamica e dell'evoluzione del danno, che si manifestano in travi e fili. Obiettivo primario di (B1) è la formulazione di modelli analitici, numerici e sperimentali per lo studio dei seguenti problemi: comportamento critico e post-critico di travi di sezione aperta sottile, affette da difetti localizzati o diffusi, o degrado del materiale, ad esempio conseguente ad incendio; instabilità locale di gusci molto sottili, che prelude alla formazione di curvature fortemente localizzate, quali pieghe indesiderate o imperfette, oppure grinze che si formano ad esempio durante la lavorazione dei contenitori alimentari in cartone; instabilità di laminati in vetro, globale (flesso-torsionale), oppure locale (delaminazione). Gli obiettivi di (B2) sono molteplici e variegati, e riguardano la formulazione di modelli atti a descrivere aspetti diversi, ma complementari, del comportamento dinamico di travi e fili, e precisamente: caratterizzazione deterministica e stocastica dell'interazione uomo-struttura, che si verifica in passerelle soggette al transito dei pedoni, e conseguente analisi della risposta; descrizione del comportamento meccanico di cavi o travi di lunghezza infinita (ad esempio cavi sottomarini), di materiale degradato, appoggiati monolateralmente su un substrato; analisi della dinamica non regolare di travi soggette ad impatti ripetuti contro un ostacolo, ad esempio conseguente al distacco (perdita di bilateralità) di un vincolo; determinazione delle regioni d'instabilità dinamica di travi, fili tesi e cavi percorsi da treni di masse; valutazione degli effetti prodotti da danno localizzato sulla risposta dinamica nonlineare dei cavi sospesi; formulazione di modelli di evoluzione del danno provocato da reazione alcali-aggregati nei ponti in calcestruzzo. E' pure obiettivo di (B2) la valutazione dell'azione esercitata dal vento su cavi e stralli, reti di funi e profili alari, sollecitazione che causa instabilità della struttura, per galloping, flutter o distacco dei vortici. I modelli formulati dovranno essere in grado di simulare: l'instabilità aeroelastica di cavi sospesi ghiacciati, di stralli asciutti oppure percorsi da un rivolo di pioggia, sotto vento stazionario o turbolento, e sotto l'eventuale moto imposto dal traffico al supporto; l'imbozzamento ed il corrugamento di membrane sottili e reti di funi; lo stallo dinamico dei profili alari.

L'obiettivo (C) consiste nel miglioramento delle prestazioni meccaniche delle strutture sottili, suscettibili di danneggiamento. Per raggiungerlo, si rende necessario: (C.1), mettere a punto metodi e strumenti per la rilevazione del danno; (C.2) implementare strategie di controllo semi-attivo, basate sull'impiego di dispositivi intelligenti; (C.3) studiare procedure per il controllo passivo delle strutture, mediante impiego di dissipatori, più convenientemente realizzati con materiali innovativi. In particolare, sono obiettivi di (C1): lo sviluppo di metodi non distruttivi per il monitoraggio delle prestazioni strutturali, basato sull'esame dell'alterazione temporale delle caratteristiche modali; l'impiego, da testarsi in laboratorio ed in scala reale, di sensori intelligenti dotati di microprocessori programmabili, in grado di consentire l'auto-aggiornamento in tempo reale del modello dinamico, ovvero di dispositivi elettrici che si interfacciano con la struttura mediante attuatori piezoelettrici. Sono obiettivi di (C2), la realizzazione di sistemi piezo-elettromeccanici per il controllo delle vibrazioni e dell'emissione acustica di piastre sottili, nonché la modellazione costitutiva di ceramiche ferro-elettriche da impiegarsi nella realizzazione di sensori ed attuatori. E' infine obiettivo di (C3) progettare e realizzare in laboratorio un dissipatore elasto-plastico che faccia uso di materiali innovativi (quali leghe Nitinol a memoria di forma oppure schiume di alluminio), capace di superare i problemi di buckling sino a qui rilevati.

Per il raggiungimento dei susposti obiettivi, ampi e molteplici, si è reso necessario allestire un pool di ricercatori numerosi, di elevata qualificazione scientifica, che includesse competenze complementari e multidisciplinari. A giudizio dei proponenti, le unità di ricerca impegnate nel progetto garantiscono il pieno raggiungimento di tutti gli obiettivi dichiarati, nell'arco temporale previsto dalla ricerca.

Testo inglese

The (curiosity-driven) research project is proposed, first, to develop methodological tools of investigation, aimed at deepening the understanding of complex aspects of structural behavior, and secondly to suggest strategies and intervention techniques for improvement of the mechanical performance, also with the help of innovative materials and smart devices, borrowed from engineering fields other than structural.

Specifically, the project has the following objectives:

- (A) improve the current knowledge of the phenomena of fracture and damage in flexible structures, and possible interaction between instability and damage;
- (B) provide insight into static and dynamic instability phenomena arising in flexible, undamaged or damaged, structures;
- (C) developing diagnostic and intervention techniques for improving performance of flexible damaged structures.

In order to achieve the goal (A), the research will be focused, on the one hand, (A1), on development of theories and computational models for the analysis of damage in thin laminates, and, (A2) on the study of structures made of specific materials of particular technical relevance or chosen to exemplify and validate the developed theories and tools. The major aim of (A1) is the formulation of new analytical and numerical models capable to predict the onset of local damage at the interface and the gap between the layers that occur in structural laminates. The models will cover a variety of situations, such as the existence of an intermediate strong or weak layer, and simulation of industrial processes using thin cutting blades. They will also account for the kinematic regime of small or large displacements, and the complex mechanical behavior of the interphase, taking into account the simultaneous presence of damage, elasticity, plasticity, friction and viscosity. The objective of (A2) is the formulation of theoretical models, supported by the findings of specifically planned experiments, aimed at predicting the mechanical behavior of functional cardboard, glass sheets and laminated pipes in order to optimize performance and to extend, if possible, useful life. To do that, models must be able to describe the response of elements to various loading conditions, in the presence of various forms of corruption such as defects, creases, abrasion, wear and tear. Models will also be able to simulate: industrial processes of cardboard food containers forming, in-plane and out-of-plane stresses in laminated glass plates with visco-elastic interlayer, and cycles of high pressure and temperature in multi-layer pipes, for example made of rubber and braid steel.

To achieve the target (B), the investigation will focus, on the one hand, (B1), on the analysis of phenomena of both local and global static instability (buckling), that occur in laminated beams and shells and secondly, (B2), on the study of dynamic response, instability and evolution of the damage, occurring in beams and wires. The primary objective of (B1) is the formulation of analytical, numerical and experimental models, to study the following problems: critical and post-critical behavior of thin open section beams, with local or widespread defects, or material degradation, e.g. as a result of fire; local buckling of thin shells, which is a prelude to the formation of highly localized curvature, such as unwanted or imperfect folds or wrinkles that are formed during the processing of cardboard food containers; global (bending-torsion) or local (delamination) instability of laminated glass. The objectives of (B2) are many and varied, and include the formulation of models to describe different, but complementary, aspects of the dynamic behavior of beams and wires, namely: deterministic and stochastic characterization of human-structure interaction, which occurs in footbridge subjected to the transit of pedestrians, and subsequent analysis of the response; description of the mechanical behavior of cables or beams of infinite length (e.g. undersea cables) with degraded material, resting on a unilateral substrate; analysis of the not smooth dynamics of beams subject to repeated impacts against an obstacle, like that subsequent to the failure (loss of bilaterality) of a constraint; determining the regions of dynamic instability of beams, wires and cables with trains of moving masses; evaluation of the effects of localized damage on the nonlinear dynamic response of suspended cables; formulation of models of evolution of the damage caused by alkali-aggregate reaction in concrete bridges. It is also objective of (B2) the evaluation of the effects of wind exerted on wires, cables, network of cables and airfoils, able to cause structure instability due to galloping, flutter or detachment of vortices. The formulated models must be able to analyze: the aeroelastic instability of suspended iced cables, dry or wet (by a rain rivulet) stay-cables, under steady or turbulent wind, and under support movement imposed by the traffic; the formation of bumps and the wrinkling of thin membranes and networks of cables and dynamic stall of airfoils.

The objective (C) consists of improving the mechanical performance of thin structures, subject to damage. To achieve that, it is necessary: (C.1) to develop methods and tools for the detection of damage, (C.2) to implement semi-active control strategies based on the use of smart devices, (C.3) to study procedures for passive control of structures by use of dampers, more conveniently made of innovative materials. In particular, targets of (C1) are: the development of non-destructive methods for monitoring structural performance, based on the examination of temporal alteration of modal characteristics; the use, to be tested in laboratory and in real scale, of smart sensors with programmable microprocessors, capable of enabling the auto-update in real time of the dynamic model, or electrical devices that interface with the structure using piezoelectric actuators. Objectives of (C2) are: realization of piezo-electro-mechanical systems to control vibrations and acoustic emissions of thin plates, and constitutive modeling of ferro-electric ceramics for use in the construction of sensors and actuators. Finally, target of (C3) is to design and implement in laboratory an elastic-plastic damper making use of innovative materials (such as Nitinol shape memory alloys or aluminum foams), which overcomes the known problems of buckling.

To achieve the above extensive and varied objectives, it has been necessary to set up a pool of numerous, highly qualified, researchers, with multidisciplinary and complementary skills. In the view of the proponents, the involved research units ensure the full attainment of all stated goals, in the time frame provided by the project.

11 - Stato dell'arte

Testo italiano

Il problema dell'instabilità, del danno, e della loro interazione nelle strutture sottili, ha ricevuto di recente notevole attenzione, cosicché appare oggi un tema scientifico emergente della Meccanica dei Materiali e delle Strutture. Qui si fornisce una descrizione sintetica del contesto scientifico internazionale nel quale si è sviluppata la tematica. Lo stato dell'arte e la bibliografia relativi ai temi specifici del progetto sono invece descritti nei modelli B delle UR.

Un quadro abbastanza esaustivo dei molteplici aspetti del problema 'Instabilità & Danno', è offerto dalla 'call for papers' dell'imminente evento ASME, 'Symposium on the Mechanics of Slender Structures' [1], nella quale si legge: "a holistic approach is needed in the analysis and design of the entire system. The symposium will bring together experts from various fields: structural mechanics, thermo-mechanics, dynamics, electro-dynamics, vibration and control, structural health monitoring, artificial intelligence, and materials science to discuss the current state of research as well as rising trends and direction for future research in the area of mechanics of slender structures. The meeting is aimed at improving the understanding of structural and thermo-mechanical properties and behaviour of slender structures. More specifically, the methods for the suppression of adverse dynamic responses of such systems will be addressed. The scope covers analytical, numerical, and experimental research into the mechanics of ropes, cables, tethers, chains, yarns and fibres ..." Quasi tutte le parole chiave del convegno sono pertinenti alla ricerca qui proposta. Riguardo il WP-A: Composite materials, Contact and friction models, Intelligent materials and structures, Stress and fatigue, Residual strength and endurance prediction; riguardo il WP-B: Dynamic stability, Flow-induced vibrations and fluid-structure interactions, Non-linear dynamic interactions, Non-stationary dynamic phenomena; riguardo il WP-C: Intelligent materials and structures, Electro-mechanical interactions, Vibro-acoustics, Structural integrity and damage assessment, Inspection monitoring and sensor techniques. Active and passive damping strategies.

Dall'analisi della bibliografia, una delle prime opere in cui le interazioni tra instabilità e danno sono descritte in modo ampio e sistematico è il libro di Bazant e Cedolin [2], i cui aspetti fondamentali sono sintetizzati in [3]. In questi lavori si fornisce un'ampia panoramica del vasto campo della stabilità delle strutture, elastiche ed anelastiche, in regime statico e dinamico, lineare e non-lineare, accostando alle trattazioni classiche del buckling, post-buckling ed instabilità dinamica, tematiche proprie della meccanica dei materiali, quali termomeccanica, viscosità, frattura e danno, presentati quali cause o facilitatori dell'instabilità delle strutture. Viene discusso come, in presenza di danno o frattura, l'instabilità possa manifestarsi anche senza la presenza di non-linearità geometrica. Grande enfasi viene data al fenomeno della localizzazione da deformazione soffice, e ai modelli matematici che la limitano ad uno spessore minimo, assunto quale proprietà del materiale.

Nell'arco degli ultimi sei anni, Khoroshun, Babich e coautori hanno sviluppato una ricchissima bibliografia sulla stabilità di strutture bidimensionali soggette a danno. I lavori più recenti riguardano: piastre rettangolari di materiale omogeneo soggette a danno a lungo termine [4]; gusci di rivoluzione di materiale composito, con inclusioni danneggiabili [5] o con matrice danneggiabile [6]; gusci cilindrici di materiale composito, con inclusioni danneggiabili [7] o con matrice danneggiabile [8]; piastre e gusci di materiale omogeneo o composito, soggette a danno progressivo [9]. Precedentemente gli autori avevano studiato le stesse strutture, ma di materiale elastico non lineare danneggiabile [10-13], ovvero laminate con componenti danneggiabili [14-16], oppure fibrose a matrice danneggiabile [17-19], o anche granulari con componenti micro-danneggiabili [20,21].

Un altro gruppo di lavori riguarda gli effetti sul buckling prodotti dal danno locale interlaminare. Tra questi, si sono analizzate travi sandwich composite [22] e piastre ortotrope laminate, dove il buckling si verifica in fase plastica [23]. Delaminazioni tra piastra e costolatura di rinforzo sono state analizzate in [24], dove si è tenuto pure conto delle tensioni termiche residue.

Attenzione è stata poi rivolta alla riduzione del carico critico prodotta da danno per impatto su strutture sottili. In [25] si è studiato l'effetto di indentazione locale del materiale connettivo di travi sandwich compresse sulla rigidità e sul carico euleriano locale. In [26] si è sviluppato un modello analitico per predire la resistenza all'impatto di piastre laminate fibro-rinforzate. Si sono determinate le condizioni per la propagazione stabile della delaminazione, e la sua influenza sul comportamento critico e post-critico globale della piastra.

L'influenza del danno sulla stabilità di strutture sottili è stata ampiamente studiata anche in dinamica. Un approccio metodologico è stato presentato in [27], dove l'apparato matematico della Teoria dei Sistemi Dinamici è stato applicato allo studio della stabilità delle relazioni costitutive di materiali a danno fragile. Si sono poi studiate strutture sottili danneggiate soggette a diverse forme di eccitazione dinamica. In particolare, si sono indagate le biforcazioni ed il caos prodotti da una forzante trasversale periodica agente su una piastra viscoelastica danneggiata [28], nonché le zone d'instabilità dinamica di una mensola pre-deformata a torsione, soggetta a danno localizzato, sollecitata assialmente da una forza pulsante [29].

Un altro filone di ricerca concerne la stabilità dinamica di strutture sottili intelligenti. Sulla base della teoria del danno anisotropo e della teoria del piezoelettrico, si è analizzata la stabilità dinamica non lineare di piastre laminate danneggiate, eccitate parametricamente [30]. Si sono investigate le biforcazioni ed il caos di piastre piezoelettriche soggette a forze trasversali periodiche, dove il danno è costituito da fratture diffuse, trattate come variabile interna tensoriale continua [31].

L'interazione tra danno ed instabilità è stata infine oggetto di prove sperimentali, finalizzate a monitorare l'evoluzione del danno in pannelli curvi rinforzati di materiale composito, soggetti a forze di compressione cicliche, oltre la soglia d'instabilità elastica [32].

I ricercatori delle UR propongono profonde conoscenze su tutti i temi della ricerca, sin qui sviluppati in modo per lo più indipendente. Circa il WP-A, hanno formulato modelli per l'analisi a danneggiamento di corpi elastici compositi [33] ed elasto-plastici [34], anche includendo l'effetto chimico e termico [35] ed hanno messo a punto strumenti e procedure per l'analisi della frattura [36] e del taglio di gusci sottili [37]. Riguardo il WP-B, hanno sviluppato metodi e modelli per l'analisi di biforcazione di sistemi autonomi, con riferimento a travi [38], cavi [39] e stralli [40], o sistemi non autonomi, con interazione uomo-struttura [41,42]; hanno inoltre studiato la dinamica di oscillatori ad impatto [43]. Riguardo il WP-C, hanno affrontato il problema del rilevamento del danno [44] e del controllo acustico [45]. Il presente progetto si propone di travasare e integrare tutte queste competenze, e di stimolare lo studio dell'interazione tra i fenomeni.

Bibliografia

- [1] Symposium on the Mechanics of Slender Structures, Donostia - San Sebastián, Euskadi, Spain 21-23 July 2010, <http://www.mondragon.edu/MoSS2010/symposium.shtml>
- [2] Bazant, Z.P., Cedolin, L., 1991. *Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories*. Oxford University Press, New York.
- [3] Bazant, Z.P. *Structural stability* (2000) *International Journal of Solids and Structures*, 37 (1-2), pp. 55-67.
- [4] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. *Stability of rectangular plates subject to long-term damage* (2009) *International Applied Mechanics*, 45 (7), pp. 754-761.
- [5] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. *Stability of convex shells of revolution made of particulate composites with physically nonlinear matrix and damageable inclusions* (2008) *International Applied Mechanics*, 44 (6), pp. 653-661.
- [6] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. *Stability of shells of revolution made of a particulate composite with nonlinear elastic inclusions and damageable matrix* (2007) *International Applied Mechanics*, 43 (11), pp. 1228-1235.
- [7] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. *Stability of cylindrical shells made of a particulate composite with nonlinear elastic matrix and damaged inclusions* (2007) *International Applied Mechanics*, 43 (8), pp. 893-902.
- [8] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. *Stability of cylindrical shells made of a particulate composite with nonlinear elastic inclusions and damageable matrix* (2007) *International Applied Mechanics*, 43 (10), pp. 1123-1131.
- [9] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. *Stability of plates and shells made of homogeneous and composite materials subject to short-term microdamage* (2008) *International Applied Mechanics*, 44 (3), pp. 239-267.
- [10] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. *Stability of plates made of a particulate composite with nonlinear elastic matrix and damaged inclusions* (2007) *International Applied Mechanics*, 43 (7), pp. 772-779.
- [11] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. *Stability of shells of revolution made of a damageable nonlinear elastic material* (2007) *International Applied Mechanics*, 43 (5), pp. 504-511.
- [12] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. *Stability of cylindrical shells made of a damageable physically nonlinear material* (2006) *International Applied Mechanics*, 42 (10), pp. 1129-1136.
- [13] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. *Stability of plates made of a damageable physically nonlinear material* (2006) *International Applied Mechanics*, 42 (9), pp. 1029-1035.
- [14] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. *Stability of laminated convex shells of revolution with microdamages in laminate components* (2006) *International Applied Mechanics*, 42 (7), pp. 810-817.
- [15] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. *Stability of cylindrical shells made of a laminate material with damageable components* (2006) *International Applied Mechanics*, 42 (6), pp. 677-683.
- [16] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. *Stability of rectangular plates made of a laminate material with damageable components* (2006) *International Applied Mechanics*, 42 (5), pp. 548-554.
- [17] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. *Stability of shells of revolution made of fibrous composite with damageable matrix* (2005) *International Applied Mechanics*, 41 (10), pp. 1149-1155.
- [18] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. *Stability of cylindrical shells made of fibrous composite with damageable matrix* (2005) *International Applied Mechanics* 41(6), pp.675-681.
- [19] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. *Stability of plates made of fibrous composite with damageable components* (2005) *International Applied Mechanics* 41(5),

pp.532-537.

- [20] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of shells of revolution made of granular composite with damageable components (2004) *International Applied Mechanics*, 40 (9), pp. 1028-1036.
- [21] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of plates made of a granular composite with damageable components (2004) *International Applied Mechanics* 40(7) pp. 803-809.
- [22] Skvortsov, V.R., Koysin, V.E., Shipsha, A.V. Stability of the face layer of sandwich structures with a local interlaminar damage (2002) *Mechanics of Composite Materials*, 38 (6), pp. 515-524.
- [23] Tian, Y., Fu, Y. Elasto-plastic buckling analysis of laminated plates including interfacial damage (2009) *Archive of Applied Mechanics*, pp. 1-16.
- [24] De Almeida, S.F.M., Hansen, J.S. Buckling of composite plates with local damage and thermal residual stresses (2002) *AIAA Journal*, 40 (2), pp. 340-345.
- [25] Koissin, V., Skvortsov, V., Shipsha, A. Stability of the face layer of sandwich beams with sub-interface damage in the foam core (2007) *Composite Structures*, 78 (4), pp. 507-518.
- [26] Huang, K.Y., De Boer, A., Akkerman, R. Analytical modeling of impact resistance and damage tolerance of laminated composite plates (2008) *AIAA Journal*, 46 (11), pp. 2760-2772.
- [27] Sun, X.a, Karr, D.G.b A dynamical systems approach to bifurcation and instability of constitutive relations for brittle damage materials (2001) *International Journal of Damage Mechanics*, 10 (4), pp. 279-299.
- [28] Zheng, Y., Fu, Y. Effect of damage on bifurcation and chaos of viscoelastic plates (2005) *International Journal of Nonlinear Sciences & Numerical Simulation*, 6 (1), pp. 87-92.
- [29] Mohanty, S.C. Parametric instability of a pretwisted cantilever beam with localised damage (2007) *International Journal of Acoustics & Vibrations*, 12 (4), pp. 153-161.
- [30] Zheng, Y., Fu, Y., Wang, F. Nonlinear dynamic stability for piezoelectric laminated plates with damage (2006) *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 38 (4), pp. 570-576.
- [31] Fu, Y.-M., Wang, X.-Q. Analysis of bifurcation and chaos of the piezoelectric plate including damage effects (2008) *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 9 (1), pp. 61-74.
- [32] Degenhardt, R., Wilckens, D., Klein, H., Kling, A., Rohwer, K., Hillger, W., Goetting, H.C., Gleiter, A. Experiments to detect damage progression in axially compressed CFRP panels under cyclic loading (2008) *Key Engineering Materials*, 383, pp. 1-24.
- [33] Lenci S., 2004, "Elastic and damage longitudinal shear behaviour of highly concentrated long fiber composites," *Meccanica*, 39(5), 415-439.
- [34] L. Contraffatto, M. Cuomo, A framework of elastic-plastic damaging model for concrete under multiaxial stress states, *International Journal of Plasticity*, Vol. 22, Issue 12, 2006, pages 2272-2300.
- [35] Comi, C., Fedele, R., Perego, U., (2009). A chemo-thermo-damage model for the analysis of concrete dams affected by alkali-silica reaction, *Mechanics of Materials*, 41 (3), 210-230.
- [36] D. Ciancio, I. Carol, M. Cuomo, Crack opening conditions at 'corner nodes' in FE analysis with cracking along mesh lines, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, n.13, 1963-1982 (2007).
- [37] Frangi, A., Pagani, M., Perego, U., Borsari, R. (2010). "Directional Cohesive elements for the simulation of blade cutting of thin shells". *Computer Modeling in Engineering & Science*, 57 (3), 205-224.
- [38] Luongo A., Di Egidio, A., 'Divergence, Hopf and Double-Zero Bifurcations of a Nonlinear Planar Beam, *Computers & Structures*, 84, 1596-1605, 2006.
- [39] Luongo A., Zulli D., Piccardo G., "Analytical and numerical approaches to nonlinear galloping of internally-resonant suspended cables", *Journal of Sound and Vibration*, 315(3), 375-393, 2008.
- [40] L. Carassale, L. Freda, A., Piccardo, G. (2005), "Aeroelastic forces on yawed circular cylinders: quasi-steady modeling and aerodynamic instability". *Wind and Structures* 8(5), pp. 373-388.
- [41] Belyakov, A.O., Seyranian A.P., Luongo A., 'Dynamics of the pendulum with periodically varying length', *Physica D*, 238, 1589-1597, 2009.
- [42] Piccardo, G., Tubino, F. (2008), "Parametric Resonance of Flexible Footbridges under Crowd-Induced Lateral Excitation". *Journal of Sound and Vibration* 311(1-2), pp. 353-371.
- [43] Andreaus, U., Placidi, L. Rega, G., Numerical simulation of the soft contact dynamics of an impacting bilinear oscillator, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(9) pp. 2603-2616, 2010.
- [44] Galvanetto U., Surace C., Tassotti A., 2008, "Structural damage detection based on proper orthogonal decomposition: experimental verification," *AIAA Journal*, 46(7), 1624-1630.
- [45] Rosi, G., Pouget, J. dell'Isola, F., Control of sound radiation and transmission by a piezoelectric plate with a optimized resistive electrode, *European Journal of Mechanics/A Solids*, published on line, 2010.

Testo inglese

The problem of instability, damage, and their interaction in thin structures, has recently received considerable renewed attention in the literature, so that it can now be considered as one of the most timely topics in the Mechanics of Materials and Structures. Here a brief description of the international scientific context in which the theme has been developed is reported. Models B of the single UR will present the description of the state of the art relevant to the specific themes of the project. A fairly exhaustive list of the many aspects of the problem "Instability & Damage", is offered by the "call for papers" of the next ASME event, "Symposium on the Mechanics of Slender Structures" [1], which states "a holistic approach is needed in the analysis and design of the entire system. The symposium will bring together experts from various fields: structural mechanics, thermo-mechanics, dynamics, electro-dynamics, vibration and control, structural health monitoring, artificial intelligence, and materials science to discuss the current state of research as well as rising trends and direction for future research in the area of mechanics of slender structures. The meeting is aimed at improving the understanding of structural and thermo-mechanical properties and behaviour of slender structures. More specifically, the methods for the suppression of adverse dynamic responses of such systems will be addressed. The scope covers analytical, numerical, and experimental research into the mechanics of ropes, cables, tethers, chains, yarns and fibres ...". Almost all of the keywords of the conference are relevant to the research proposed here. About WP-A: "Composite materials, Contact and friction models, Intelligent materials and structures, Stress and fatigue, Residual strength and endurance prediction"; about WP-B: "Dynamic stability, Flow-induced vibrations and fluid-structure interactions, Non-linear dynamic interactions, Non-stationary dynamic phenomena"; about WP-C: "Intelligent materials and structures, Electro-mechanical interactions, Vibro-acoustics, Structural integrity and damage assessment, Inspection monitoring and sensor techniques, Active and passive damping strategies".

By an analysis of the bibliography, one of the first works in which the interactions between instability and damage are broadly and systematically described is the book by Cedolin and Bazant [2], whose key aspects are summarized in [3]. Those works provide an extensive overview of the vast field of stability of elastic and inelastic structures, even under static and dynamic, linear and nonlinear regimes, matching the classical treatment of buckling, postbuckling and dynamic instability, with topics relevant to the mechanics of materials such as thermomechanics, viscosity, fracture and damage, presented as causes or promoters of the instability of structures. There, it is discussed how, in presence of damage or fracture, instability can occur even without the presence of geometric nonlinearity. Great emphasis is given to the phenomenon of localization from deformation in the softening regime, and to mathematical models that restrict it to a minimum thickness, assumed as characteristic of the material.

Over the past six years, Khoroshun, Babich and co-authors have developed a rich literature on the stability of two-dimensional structures subject to damage. The most recent works include: rectangular plates of homogeneous material subjected to long-term damage [4]; composite shells of revolution, with damageable inclusions [5] or with damageable matrix [6]; composite cylindrical shells with damageable inclusions [7] or with damageable matrix [8]; plates and shells of homogeneous or composite material, subjected to progressive damage [9]. Previously the authors had studied the same structure but constituted of damaged non-linear elastic material [10-13], or laminated with damageable components [14-16] or fibrous damageable matrix [17-19], or granular with micro-damageable components [20,21].

Another group of works is devoted to the effects on the buckling produced by local interlaminar damage. Among those, composite sandwich beams [22] and orthotropic laminated plates were analyzed, in which buckling occurs in the plastic phase [23]. Delaminations between the plate and crease reinforcement were analyzed in [24] where also the thermal residual stresses were considered.

Attention has been paid to the reduction of critical load produced by impact damage on thin structures. In [25] the effect of local grip of the core of sandwich beams on the stiffness and local Eulerian load have been studied, validating the results with experimental tests. In [26] an analytical model to predict the impact resistance of fiber-reinforced laminated plates has been developed. Conditions for the stable propagation of delamination, and its influence on critical and overall postcritical behavior of the plate have been determined.

The influence of the damage on the stability of thin structures has been widely studied in dynamics. A methodological approach was presented in [27], where the mathematical apparatus of Dynamic Systems Theory has been applied to study the stability of the constitutive laws of materials capable of fragile damage. Damaged thin structures under various forms of dynamic excitation have been studied too. In particular, bifurcations and chaos produced by a transverse periodic force acting on a viscoelastic damaged plate have been analyzed [28] as well as the regions of dynamic instability of a pre-twisted shaft, subject to localized damage, axially excited by a pulsating force [29].

Another line of research concerns the dynamic stability of smart thin structures. On the basis of anisotropic damage theory and the theory of piezoelectric, the nonlinear dynamic stability of parametrically excited, damaged, laminated plates has been analyzed [30]. Bifurcations and chaos of piezoelectric plates subjected to

transverse periodic forces, where the damage is made up of widespread fractures, treated as continuous internal tensor variable have been studied [31]. The interaction between damage and instability was eventually the subject of experimental tests designed to monitor the evolution of damage in curved panels of reinforced composite material, subjected to cyclic compressive forces, beyond the threshold for elastic instability [32]. The researchers of the UR have deep knowledge on all topics of proposed research, developed so far almost independently. About WP-A, UR have formulated models for the analysis of damage in composite elastic [33] and elasto-plastic [34] bodies, even including the chemical and thermal effect [35] and have developed tools and procedures for analysis of the fracture [36] and the cutting of thin shells [37]. About WP-B, UR have developed methods and models for bifurcation analysis of autonomous systems, with reference to beams [38], suspended [39] and stay [40] cables or non-autonomous systems with human-structure interaction [41,42]; UR have also studied the dynamics of impact oscillators [43]. About WP-C, UR have addressed the problem of damage detection [44] and acoustic control [45]. This project aims to transfer and integrate all these skills, and stimulate the study of the interaction among phenomena.

Bibliografia

- [1] Symposium on the Mechanics of Slender Structures, Donostia - San Sebastián, Euskadi, Spain 21-23 July 2010, <http://www.mondragon.edu/MoSS2010/symposium.shtml>
- [2] Bazant, Z.P., Cedolin, L., 1991. *Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories*. Oxford University Press, New York.
- [3] Bažant, Z.P. Structural stability (2000) *International Journal of Solids and Structures*, 37 (1-2), pp. 55-67.
- [4] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of rectangular plates subject to long-term damage (2009) *International Applied Mechanics*, 45 (7), pp. 754-761.
- [5] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. Stability of convex shells of revolution made of particulate composites with physically nonlinear matrix and damageable inclusions (2008) *International Applied Mechanics*, 44 (6), pp. 653-661.
- [6] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. Stability of shells of revolution made of a particulate composite with nonlinear elastic inclusions and damageable matrix (2007) *International Applied Mechanics*, 43 (11), pp. 1228-1235.
- [7] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. Stability of cylindrical shells made of a particulate composite with nonlinear elastic matrix and damaged inclusions (2007) *International Applied Mechanics*, 43 (8), pp. 893-902.
- [8] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. Stability of cylindrical shells made of a particulate composite with nonlinear elastic inclusions and damageable matrix (2007) *International Applied Mechanics*, 43 (10), pp. 1123-1131.
- [9] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of plates and shells made of homogeneous and composite materials subject to short-term microdamage (2008) *International Applied Mechanics*, 44 (3), pp. 239-267.
- [10] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. Stability of plates made of a particulate composite with nonlinear elastic matrix and damaged inclusions (2007) *International Applied Mechanics*, 43 (7), pp. 772-779.
- [11] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. Stability of shells of revolution made of a damageable nonlinear elastic material (2007) *International Applied Mechanics*, 43 (5), pp. 504-511.
- [12] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. Stability of cylindrical shells made of a damageable physically nonlinear material (2006) *International Applied Mechanics*, 42 (10), pp. 1129-1136.
- [13] Khoroshun, L.P., Babich, D.V., Shikula, E.N. Stability of plates made of a damageable physically nonlinear material (2006) *International Applied Mechanics*, 42 (9), pp. 1029-1035.
- [14] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of laminated convex shells of revolution with microdamages in laminate components (2006) *International Applied Mechanics*, 42 (7), pp. 810-817.
- [15] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of cylindrical shells made of a laminate material with damageable components (2006) *International Applied Mechanics*, 42 (6), pp. 677-683.
- [16] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of rectangular plates made of a laminate material with damageable components (2006) *International Applied Mechanics*, 42 (5), pp. 548-554.
- [17] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of shells of revolution made of fibrous composite with damageable matrix (2005) *International Applied Mechanics*, 41 (10), pp. 1149-1155.
- [18] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of cylindrical shells made of fibrous composite with damageable matrix (2005) *International Applied Mechanics* 41(6), pp.675-681.
- [19] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of plates made of fibrous composite with damageable components (2005) *International Applied Mechanics* 41(5), pp.532-537.
- [20] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of shells of revolution made of granular composite with damageable components (2004) *International Applied Mechanics*, 40 (9), pp. 1028-1036.
- [21] Khoroshun, L.P., Babich, D.V. Stability of plates made of a granular composite with damageable components (2004) *International Applied Mechanics* 40(7) pp. 803-809.
- [22] Skvortsov, V.R., Koysin, V.E., Shipsha, A.V. Stability of the face layer of sandwich structures with a local interlaminar damage (2002) *Mechanics of Composite Materials*, 38 (6), pp. 515-524.
- [23] Tian, Y., Fu, Y. Elasto-plastic buckling analysis of laminated plates including interfacial damage (2009) *Archive of Applied Mechanics*, pp. 1-16.
- [24] De Almeida, S.F.M., Hansen, J.S. Buckling of composite plates with local damage and thermal residual stresses (2002) *AIAA Journal*, 40 (2), pp. 340-345.
- [25] Koissin, V., Skvortsov, V., Shipsha, A. Stability of the face layer of sandwich beams with sub-interface damage in the foam core (2007) *Composite Structures*, 78 (4), pp. 507-518.
- [26] Huang, K.Y., De Boer, A., Akkerman, R. Analytical modeling of impact resistance and damage tolerance of laminated composite plates (2008) *AIAA Journal*, 46 (11), pp. 2760-2772.
- [27] Sun, X.a , Karr, D.G.b A dynamical systems approach to bifurcation and instability of constitutive relations for brittle damage materials (2001) *International Journal of Damage Mechanics*, 10 (4), pp. 279-299.
- [28] Zheng, Y., Fu, Y. Effect of damage on bifurcation and chaos of viscoelastic plates (2005) *International Journal of Nonlinear Sciences & Numerical Simulation*, 6 (1), pp. 87-92.
- [29] Mohanty, S.C. Parametric instability of a pretwisted cantilever beam with localised damage (2007) *International Journal of Acoustics & Vibrations*, 12 (4), pp. 153-161.
- [30] Zheng, Y., Fu, Y., Wang, F. Nonlinear dynamic stability for piezoelectric laminated plates with damage (2006) *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 38 (4), pp. 570-576.
- [31] Fu, Y.-M., Wang, X.-Q. Analysis of bifurcation and chaos of the piezoelectric plate including damage effects (2008) *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 9 (1), pp. 61-74.
- [32] Degenhardt, R., Wilckens, D., Klein, H., Kling, A., Rohwer, K., Hillger, W., Goetting, H.C., Gleiter, A. Experiments to detect damage progression in axially compressed CFRP panels under cyclic loading (2008) *Key Engineering Materials*, 383, pp. 1-24.
- [33] Lenci S., 2004, "Elastic and damage longitudinal shear behaviour of highly concentrated long fiber composites," *Meccanica*, 39(5), 415-439.
- [34] L. Contraffatto, M. Cuomo, A framework of elastic-plastic damaging model for concrete under multiaxial stress states, *International Journal of Plasticity*, Vol. 22, Issue 12, 2006, pages 2272-2300
- [35] Comi, C., Fedele, R., Perego, U., (2009). A chemo-thermo-damage model for the analysis of concrete dams affected by alkali-silica reaction, *Mechanics of Materials*, 41 (3), 210-230.
- [36] D. Ciancio, I. Carol, M. Cuomo, Crack opening conditions at 'corner nodes' in FE analysis with cracking along mesh lines, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, n.13, 1963-1982 (2007).
- [37] Frangi, A., Pagani, M., Perego, U., Borsari, R. (2010). "Directional Cohesive elements for the simulation of blade cutting of thin shells". *Computer Modeling in Engineering & Science*, 57 (3), 205-224.
- [38] Luongo, A., Di Egidio, A., "Divergence, Hopf and Double-Zero Bifurcations of a Nonlinear Planar Beam, *Computers & Structures*, 84, 1596-1605, 2006.
- [39] Luongo A., Zulli D., Piccardo G., "Analytical and numerical approaches to nonlinear galloping of internally-resonant suspended cables", *Journal of Sound and Vibration*, 315(3), 375-393, 2008.
- [40] L. Carassale, L. Freda, A., Piccardo, G. (2005), "Aeroelastic forces on yawed circular cylinders: quasi-steady modeling and aerodynamic instability". *Wind and Structures* 8(5), pp. 373-388.
- [41] Belyakov, A.O., Seyranian A.P., Luongo A., 'Dynamics of the pendulum with periodically varying length', *Physica D*, 238, 1589-1597, 2009.
- [42] Piccardo, G., Tubino, F. (2008), "Parametric Resonance of Flexible Footbridges under Crowd-Induced Lateral Excitation". *Journal of Sound and Vibration* 311(1-2), pp. 353-371.
- [43] Andreaus, U., Placidi, L. Rega, G., Numerical simulation of the soft contact dynamics of an impacting bilinear oscillator, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(9) pp. 2603-2616, 2010.
- [44] Galvanetto U., Surace C., Tassotti A., 2008, "Structural damage detection based on proper orthogonal decomposition: experimental verification," *AIAA Journal*,

12 - Articolazione del Progetto e tempi di realizzazione

Testo italiano

Il progetto è organizzato in tre Work Packages (A,B,C), ciascuno articolato in tasks (A.1,...) e sub-tasks (A.1.1,...). Il seguente indice offre una panoramica completa delle ricerche.

A. Frattura e danno in laminati sottili

A.1 - Aspetti metodologici dell'analisi del danno

A.1.1 - Modelli di interfaccia per danni localizzati e delaminazione in strutture multistrato

A.1.2 - Modelli per l'analisi della frattura in strutture laminate

A.2 - Analisi del danno in strutture multistrato in cartone, vetro e gomma

A.2.1 - Analisi dei processi di formatura di strutture in cartone

A.2.2 - Modelli analitici, numerici e sperimentali per l'analisi dei laminati in vetro

A.2.3 - Analisi del comportamento termo-meccanico a fatica e ad usura interlaminare di tubi flessibili multistrato

B. Instabilità statica e dinamica in strutture sottili, integre o danneggiate

B.1 - Buckling locale e globale di travi e gusci

B.1.1 - Analisi critica e post-critica di travi sottili in presenza di difetti o degrado del materiale

B.1.2 - Instabilità locale di gusci laminati

B.1.3 - Instabilità di laminati in vetro

B.2 - Dinamica e danno in travi e fili

B.2.1 - Modelli matematici di interazione uomo-struttura e risposta dinamica di passerelle pedonali

B.2.2 - Dinamica, instabilità ed analisi del danno di travi e fili

B.2.3 - Instabilità aerodinamica di cavi e stralli, reti di funi e profili alari

C. Miglioramento delle prestazioni di strutture sottili tramite dispositivi intelligenti o innovativi

C.1 - Metodi e strumenti per la rilevazione del danno in strutture sottili

C.2 - Controllo semi-attivo di strutture sottili tramite dispositivi piezoelettrici

C.3 - Controllo passivo di strutture tramite dissipatori elastoplastici suscettibili di instabilità

Si fornisce una descrizione sintetica dei contenuti dei singoli punti, nonché dello sviluppo temporale delle attività.

A. Frattura e danno in laminati sottili

I moderni materiali compositi sono sempre più usati in vari campi dell'ingegneria, grazie alla maggior flessibilità rispetto ai materiali tradizionali, alle caratteristiche meccaniche e termiche, e, complice il design, alla possibilità di essere modellati in forme complicate, per fini funzionali (ad esempio, le strutture in cartone) oppure semplicemente estetiche (ad esempio, il vetro). Tuttavia, nonostante molti passi siano stati fatti dalla tecnologia, questi materiali sono ancora abbastanza sensibili al danneggiamento, che può manifestarsi sotto varie forme.

La ricerca nel WP-A si propone, da un lato (task A.1), di sviluppare metodi d'indagine per l'analisi del danno in strutture multistrato, con particolare riguardo ai fenomeni di delaminazione e frattura; dall'altro (task A.2), di studiare il comportamento meccanico di specifici compositi, quali laminati in cartone, vetro, gomma, acciaio, alluminio, polimeri, ... Poiché le UR coinvolte nel WP-A posseggono competenza specifica su tutta la problematica, si prevede che entrambi i filoni di ricerca verranno affrontati sin dall'inizio delle attività. Il travaso in A.2 delle metodologie sviluppate in A.1 avverrà invece nel secondo anno.

In A.1.1 si svilupperanno nuovi modelli d'interfaccia per l'analisi dei danni localizzati (quali ad esempio derivanti da operazioni di piegatura) e della delaminazione, proponendo strategie per incorporare la fatica e la rottura dinamica. Si studierà inoltre la delaminazione di pannelli multistrato con strato sottile intermedio "forte", o, con riferimento a lastre in vetro stratificate, con strato intermedio "debole", costituito dall'intercalare viscoso, anche in regime di grandi spostamenti.

In A.1.2, si applicheranno modelli numerici all'analisi di strutture laminate costituite da strati o fibre con diverse proprietà elastiche e di frattura, e si dedurranno teorie strutturali di piastre e travi fragili. Si studierà inoltre il taglio di membrane con lame sottili. In particolare, si svilupperà ulteriormente un approccio semplificato recentemente proposto in letteratura, basato sulla nozione di "elemento coesivo direzionale".

In A.2.1, utilizzando i modelli sviluppati in A.1.1, si analizzerà il processo di piegatura e taglio di laminati in cartone per la formatura di contenitori alimentari. La presenza di cordonature nel laminato, atte a favorirne la piegatura, e ottenute per punzonatura, costituisce un danno localizzato che condiziona il comportamento della struttura. L'apertura del contenitore mediante taglio, pone problemi di integrità del pacchetto a causa della possibile propagazione di delaminazioni innescate dal taglio. Si definiranno semplici problemi di dimensioni ridotte, ma atti alla validazione delle procedure di simulazione sviluppate nei task precedenti. In modo particolare si studierà l'influenza di parametri geometrici e costitutivi di progetto sullo sviluppo di meccanismi dissipativi tra loro in competizione (plasticità, delaminazione, frattura).

In A.2.2, utilizzando i modelli d'interfaccia sviluppati in A.1.1, si indagherà il comportamento meccanico, lineare e non lineare, di lastre di vetro stratificato con polimero intercalare, in campo sia statico, sia dinamico, con metodi numerici e sperimentali, al fine di migliorare la ridotta conoscenza del materiale che si ha oggi in letteratura. Uno di questi modelli consentirà di simulare lo sviluppo di linee di frattura all'interno del vetro, e d'investigare su come il fenomeno sia influenzato dalla presenza di coatings e polimeri nel laminato.

In A.2.3 si studierà il comportamento termo-meccanico di tubi flessibili multistrato, ad esempio di gomma ed acciaio in treccia, soggetti a cicli termici e di pressione, che soffrono fenomeni di fatica e di usura interlaminare per abrasione, al fine di stimarne la vita utile.

B. Instabilità statica e dinamica in strutture sottili, integre o danneggiate

Le strutture sottili sono molto sensibili ai fenomeni d'instabilità, sia statica, sia dinamica. Questi sono spesso dovuti a varie forme d'interazione, con uomini, masse, ostacoli, o vento. Il valore critico dell'azione esterna dipende fortemente dalle imperfezioni geometriche, dalla presenza di difetti localizzati o diffusi, da usura, impatto o invecchiamento naturale del materiale. In questo filone di ricerca si vogliono indagare i molteplici aspetti del fenomeno d'instabilità e la sua possibile dipendenza dal danno.

L'attività del WP-B sarà articolata in due tasks. Nel task B.1 si analizzeranno fenomeni di buckling locale e globale di travi e gusci, in presenza o meno di danno; nel task B.2 si effettuerà un'analisi dinamica e di danno di travi e fili, finalizzata a descrivere la risposta e la stabilità della struttura. Alcune delle attività, che s'innestano su filoni già avviati in passato dalle UR (buckling di profilati, dinamica ed aerodinamica di travi e fili, modelli di evoluzione del danno), avranno inizio sin dal primo anno; altri, comparativamente nuovi (instabilità di laminati in cartone o vetro), saranno affrontati a partire dal secondo anno.

In B.1.1 si studierà il comportamento critico e post-critico di travi in spessore sottile, tenendo conto dell'eventuale presenza di difetti o degrado del materiale, ad esempio prodotto da incendio.

In B.1.2 si studierà l'imbozzamento di gusci molto sottili, che si manifesta con curvature localizzate lungo linee, che preludono all'insorgenza di fratture. Si specializzerà poi l'analisi ai gusci in cartone laminato cordonato, già descritti in A.2.1, dove la presenza delle linee di pre-danneggiamento favorisce l'imbozzamento durante il processo (dinamico) di formatura.

In B.1.3 si analizzerà il comportamento critico e post-critico di laminati in vetro sollecitati nel piano e fuori piano, e si valuterà l'influenza, sulla perdita di stabilità, della composizione e del livello di danneggiamento dello strato intercalare, delle variazioni termiche e della durata dei carichi.

In B.2.1 si affronterà lo studio, di grande attualità, dell'instabilità dinamica prodotta da eccitazioni antropiche su passerelle pedonali flessibili, dove, causa il fenomeno dell'interazione (ad esempio, ma non solo, di sincronizzazione) tra il moto dell'uomo e le vibrazioni della struttura, possono verificarsi oscillazioni laterali di grande ampiezza, tali da compromettere la funzionalità dell'opera.

In B.2.2 si affronteranno diverse problematiche relative a travi e fili. (a) Si studierà la risposta dinamica di elementi di lunghezza infinita, in presenza di degrado del materiale e di contatto monolatero con un substrato (ad esempio, cavi sottomarini); (b) si analizzerà la risposta dinamica di travi soggette ad impatti ripetuti; (c) si analizzerà il fenomeno dell'instabilità dinamica prodotta da treni di masse viaggianti su travi, fili tesi, e cavi di piccola freccia; (d) si studieranno gli effetti prodotti da danno localizzato sulla risposta dinamica dei cavi in regime di grandi ampiezze; (e) si effettuerà un'analisi del danno nei ponti in calcestruzzo, provocato da reazione alcali-aggregati, al fine di prevedere nel tempo l'evoluzione delle caratteristiche modali della struttura.

In B.2.3 si studieranno diverse problematiche concernenti l'aerodinamica di strutture sottili. (a) Si studierà l'instabilità aeroelastica di cavi sospesi ghiacciati, di stralli asciutti comunque inclinati rispetto al vento, oppure percorsi da un rivolo di pioggia, sotto l'azione di vento stazionario o turbolento; (b) si analizzerà l'imbozzamento ed il corrugamento dovuto a vento/neve di pannellature di chiusura in vetro, modellate come membrane sottili irrigidite da travi flessibili e reti di funi; (c) si studierà un fenomeno aerodinamico non stazionario esibito dai profili alari, noto come stallo dinamico, caratterizzato dalla formazione, propagazione e distacco dei vortici.

C. Miglioramento delle prestazioni di strutture sottili tramite dispositivi intelligenti o innovativi

Il monitoraggio ed il controllo strutturali sono preziosi strumenti, rispettivamente diagnostico e terapeutico, per la segnalazione di inattese riduzioni delle capacità meccaniche ed il miglioramento prestazionale di opere d'ingegneria. Il formidabile sviluppo dell'ICT mette oggi a disposizione della ricerca sensori ed attuatori intelligenti di nuova generazione, capaci di auto-adattamento e auto-diagnosi, che aprono prospettive nuove, ed interdisciplinari, alla meccanica delle strutture, con particolare riguardo a quelle sottili. Lo stesso controllo passivo, di più antica concezione, può giovare oggi di materiali innovativi che ne possono esaltare l'efficienza.

La ricerca nel WP-C è organizzata in tre tasks, rispettivamente dedicati alla diagnosi (C.1), al controllo semi-attivo (C.2) ed al controllo passivo (C.3). Tutti i temi sono basati su specifiche conoscenze pregresse delle UR coinvolte, cosicché le indagini teoriche avranno inizio sin dal primo anno di attività, mentre quelle sperimentali partiranno nel secondo anno.

In C.1, si svilupperanno metodi non distruttivi per il monitoraggio del degrado delle strutture, basati sull'analisi dell'alterazione nel tempo delle proprietà dinamiche (in particolare dei modi, perché più sensibili al danno). Procedure ed algoritmi saranno implementati a bordo di sensori intelligenti dotati di microprocessori programmabili, con l'obiettivo di realizzare un sistema integrato di monitoraggio, basato su una rete distribuita non cablata di sensori. Un diverso approccio al problema sarà rappresentato da sistemi di rilevazione del danno effettuati mediante dispositivi elettrici che si interfacciano con la struttura mediante attuatori piezoelettrici.

In C.2 si svilupperanno due temi: (a) si progetteranno e realizzeranno sistemi piezo-elettro-meccanici per il rilevamento del danno e per il controllo della propagazione di onde vibrazionali e radiazioni acustiche in strutture elastiche lineari; (b) si indagherà circa l'impiego di ceramiche ferro-elettriche nella realizzazione di sensori ed attuatori, attraverso la formulazione di idonei modelli costitutivi.

In C.3 si progetteranno e realizzeranno dissipatori elastoplastici costituiti da un pannello sottile irrigidito, e s'indagherà circa l'utilizzo di materiali innovativi capaci di estenderne il funzionamento, oggi limitato dall'insorgenza di fenomeni di buckling.

Testo inglese

The project is divided into three Work Packages (A, B, C), each divided tasks in (A.1, ...) and sub-tasks (see A.1.1, ...). The following index provides a complete overview of the research.

A. Fracture and damage in thin laminated structures

A.1 - Methodological aspects of damage analysis

A.1.1 - Interface models for localized damage and delamination in multilayered structures

A.1.2 - Models for fracture analysis in laminated structures

A.2 - Damage analysis of cardboard, glass and rubber multi-layered structures

A.2.1 - Analysis of forming processes of cardboard structures

A.2.2 - Analytical, numerical and experimental models for laminated glass panels

A.2.3 - Modellization of the thermo-mechanical behaviour of flexible multi-layered tubes affected by interface fatigue and wear

B. Static and dynamic instability in thin structures, with or without damage

B.1 - Local and global buckling of beams and shells

B.1.1 - Critical and post-critical analysis of thin structures affected by defects or material degradation

B.1.2 - Local instability of laminated shells

B.1.3 - Instability of laminated glass panels

B.2 - Dynamics and damage in beams and cables

B.2.1 - Mathematical models for pedestrian-structure interaction and dynamic response of footbridges

B.2.2 - Dynamics, instability and damage analysis of beams and cables

B.2.3 - Aerodynamic instability of cables and stays, cable nets and airfoils

C. Performance enhancement of thin structures through smart and innovative devices

C.1 - Methods and tools for damage detection in thin structures

C.2 - Semi-active control of thin structures through piezoelectric devices

C.3 - Structural control through passive elastoplastic dampers subject to instability

A summary of the contents of individual points and the temporal sequence of activities development is provided.

A. Fracture and damage in thin laminated structures

Modern composite materials are increasingly used in various fields of engineering, due to their greater flexibility than traditional materials, their mechanical and thermal properties, and taking into consideration the design too, the ability to be molded into complicated shapes, for functional (for example, structures in cardboard) or simply aesthetic (e.g. glass) reasons. However, despite many steps have been taken by technology, these materials are still quite sensitive to the damage that can occur in various ways.

Research in the WP-A is proposed, first (task A.1), to develop survey methods for the analysis of damage in multilayer structures, with particular regard to delamination and fracture; on the other hand (task A.2), to study the mechanical behavior of specific composite laminates such as cardboard, glass, rubber, steel, aluminum, polymers, ... Because UR involved in WP-A possess know-how on the whole issue, it is expected that both lines of research will be addressed at the beginning of the work. The transfer in task A.2 of the methods developed in task A.1 will happen in the second year.

In sub-task A.1.1 new models of interface for the analysis of local damage (e.g. arising out of folding) and delamination will be developed, suggesting strategies to take into account the effects of fatigue and fracture dynamics. The study will also be addressed to the delamination of multilayer panels, with "strong" thin interlayer or, with reference to stratified glass sheets, with "soft" viscoelastic interlayer, in presence of large displacements.

In sub-task A.1.2 numerical models will be applied to the analysis of laminated structures consisting of layers or fibers with different elastic properties and fracture, and structural theories of fragile plates and beams will be deduced. The cutting of membranes with thin blades will be studied. In particular, a simplified approach recently proposed in the literature, based on the concept of "directional cohesive element" will be further developed and validated.

In sub-task A.2.1, using models developed in sub-task A.1.1, the processes of folding and cutting of laminated paperboard for forming food containers will be analyzed. The presence of crease lines in the laminate, used to help the folding process, and obtained by punching, is a localized damage that affects the behavior of the structure. The opening of the package by cutting raises questions about integrity of the package due to the possible spread of delamination triggered by the cut. Small simple problems, useful to validate the simulation procedures developed in previous sub-tasks, will be analyzed. In particular the influence of geometric and constitutive parameters on the development of dissipative mechanisms, in competition with each other (plasticity, delamination, fracture), will be studied.

In sub-task A.2.2, using the interface models developed in sub-task A.1.1, the mechanical behavior, in linear and nonlinear regimes, of laminated glass plates with polymer interlayer, both in statics and dynamics, will be investigated by using numerical and experimental methods, to improve the weak knowledge of this material that the literature provides. One of these models will simulate the development of fracture lines within the glass, and will allow to detect how the phenomenon is influenced by the presence of coatings and laminated polymers.

In sub-task A.2.3 the thermo-mechanical behavior of multilayer flexible pipes, such as rubber and steel braid pipes will be studied, considering the effect of thermal cycling and pressure, suffering from fatigue and interlaminar abrasion, in order to estimate the life.

B. Static and dynamic instability in thin structures, with or without damage

Thin structures are very sensitive to static and dynamic instability phenomena. These are often due to various forms of interaction: men, masses, obstacles, wind. The critical value of the external excitation is highly dependent on geometric imperfections, on the presence of localized or widespread defects, on wear, on impact or natural aging of the material. In this line of research the many aspects of the phenomenon of instability and its possible dependence on the damage will be investigated.

The activity of the WP-B will be divided into two tasks. In task B.1 the phenomena of local and global buckling of beams and shells, in the presence or absence of damage, will be investigated; in task B.2 dynamic and damage analysis of beams and wires will be carried on, which aims to describe the response and stability of the

structure. Some of the activities, which belong to research lines previously well-established by the UR (buckling of rods, dynamics and aerodynamics of beams and wires, models for the evolution of damage), will start from the first year; other newer topics (instability of laminated cardboard or glass) will be covered from the second year.

In sub-task B.1.1 the critical behavior and post-buckling of thin beams, taking into account the possible presence of defects or deterioration of material, for example produced by fire, will be studied.

In sub-task B.1.2 the buckling of very thin shells, which occur with localized curvature along lines that precede the onset of fracture, will be addressed. Then the analysis will be specialized to the laminated cardboard creased shells, already described in sub-task A.2.1, where the presence of lines of pre-damage promotes buckling during the (dynamic) forming process.

In sub-task B.1.3 the critical and postcritical behavior of laminated glass subjected to in-plane and out-of-plane excitations will be analyzed, and the influence, on the loss of stability, of the composition and level of damage of the interlayer, of the thermal variations and duration of loads, will be assessed.

In sub-task B.2.1 the study, of topical interest, of the dynamic instability produced by anthropogenic excitations on flexible footbridges will be addressed, where, due to the phenomenon of human-structure interaction (e.g. synchronization), lateral oscillations of large amplitude, which diminishes the functionality of the structure, may occur.

In sub-task B.2.2 different problems for beams and wires will be faced: (a) the dynamic response of elements of infinite length, in the presence of material degradation and monolateral contact with a substrate (e.g., undersea cables); (b) the dynamic response of beams subjected to repeated impact; (c) the phenomenon of dynamic instability produced by moving mass on beams, wires and taut cables; (d) the effects of localized damage on the dynamic response of cables under large displacements; (e) the damage in concrete bridges, caused by alkali-aggregate reaction, in order to predict the temporal evolution of the modal characteristics of the structure as the consequence of damage development.

In sub-task B.2.3 various issues regarding the aerodynamics of thin structures will be studied: (a) the aeroelastic instability of suspended iced cables, inclined dry or wet (by a rain rivulet) stay-cables, under the action of steady or turbulent wind; (b) the buckling and wrinkling due to wind/snow of closure panels of glass, modelled as thin membranes stiffened by beams and flexible networks of cables; (c) the aerodynamic phenomenon, exhibited by unsteady airfoils, known as dynamic stall, characterized by the formation, propagation and detachment of vortices.

C. Performance enhancement of thin structures through smart and innovative devices

Structural monitoring and control are valuable tools, of diagnostics and therapeutic type, respectively, for the reporting of unexpected reductions in carrying capacity and for the improvement of the mechanical performance of engineering works. The tremendous development of ICT makes available for research, nowadays, new generation smart sensors and actuators, capable of self-adaptation and self-diagnosis, which open new and interdisciplinary perspectives to the mechanics of structures, in particular of thin structures. Even the passive control, of older design, can now take advantage of new materials that may enhance its efficiency.

The research topic in WP-C will be organized into three tasks, respectively dedicated to the diagnosis (C1), semi-active control (C2) and the passive control (C3). All topics are based on specific prior knowledge of the involved UR, so that the theoretical investigations will start from the first year of work, while the experimental ones will start in the second year.

In task C.1, non-destructive methods for monitoring the degradation of structures, based on analysis of alteration in the time of the dynamic properties (the modes in particular, because more sensitive to damage) will be developed. Procedures and algorithms will be implemented on smart sensors with programmable microprocessors, with the objective of achieving an integrated monitoring system, based on a distributed network of wireless sensors. A different approach to the problem will be addressed by the damage detection systems operated by electronic devices that interface with the structure using piezoelectric actuators.

In task C.2 two topics will be developed: (a) design and manufacture of piezo-electro-mechanical systems to detect damage and to control the vibrational wave and acoustic radiation propagation in linear elastic flexible structures; (b) investigation about the use of ceramics in the production of ferro-electric sensors and actuators, using appropriate constitutive models.

In task C.3 elastoplastic dashpots consisting of a stiffened thin plate will be designed and manufactured, and the use of new materials capable of extending their operation conditions, now limited by buckling phenomena, will be addressed.

13 - Ruolo di ciascuna unità operativa in funzione degli obiettivi previsti e relative modalità di integrazione e collaborazione

Testo italiano

Per il raggiungimento degli obiettivi di progetto, si è costituito un pool di sei UR, complessivamente formate da: 12 professori ordinari, 6 professori associati, 5 ricercatori Universitari, 2 di Enti di Ricerca, 4 di Università estere, 7 assegnisti, 6 dottorandi; è inoltre previsto l'impiego di ulteriori 8 assegnisti/borsisti, che portano a 50 il numero complessivo. La maggior parte dei componenti le UR, ed in particolare tutti i coordinatori, afferiscono al SSD ICAR/08. Tuttavia, stanti gli aspetti interdisciplinari della ricerca, e coerentemente con il contesto internazionale già descritto al punto 11, si è ritenuto opportuno includere competenze diverse e complementari, cosicché il team comprende: 15 membri del settore ICAR/08 ed 1 dell'ICAR/09, 1 del settore della matematica (MAT/07), 1 della fisica (FIS/03), 4 dell'Ingegneria Meccanica ed Aeronautica (ING-IND/04, ING-IND/13, ING-IND/14) ed 1 dell'Ingegneria dell'Informazione (ING-INF/01).

Tutte le UR lavoreranno in sinergia, su aspetti contigui dello stesso tema, ovvero in stretta e diretta collaborazione sullo stesso argomento. Undici dei quattordici sub-tasks verranno sviluppati da almeno due UR.

Nel seguito si descrivono, per ciascuno dei sub-tasks elencati al punto 12, i compiti delle UR coinvolte, mettendo in luce gli elementi d'integrazione e collaborazione.

A.1.1 - Modelli di interfaccia per danni localizzati e delaminazione in strutture multistrato

Il sub-task verrà sviluppato dalle UR di AN, MI e CT, che formuleranno, in sinergia e per confronto, diversi modelli d'interfaccia.

L'UR-AN formulerà un modello per l'analisi della delaminazione di strutture multistrato, in grado di descrivere fatica e rottura dinamica. Facendo uso di metodi asintotici, svilupperà modelli d'interfaccia quasi-fragile, che tengano conto del contatto unilaterale, dell'attrito a scala microscopica, del danno e della viscosità. Studierà inoltre la delaminazione di pannelli a strato intermedio 'forte'. Sulla base di un principio di minima energia, formulerà un modello di crescita stabile delle fessure, sia lineare, sia nonlineare, e lo implementerà in un codice agli elementi finiti.

L'UR-MI svilupperà un elemento d'interfaccia da interporre tra elementi di guscio contigui, ed un elemento di interfaccia da interporre tra strati adiacenti di uno stesso elemento finito, capaci di trasmettere forze coesive, atti alla simulazione di danni localizzati, ad es. dovuti a piegature, e di delaminazioni.

L'UR-CT formulerà un modello numerico di interfaccia coesiva che possa essere utilizzato sia per l'analisi della delaminazione del vetro stratificato, sia per l'evoluzione della frattura, atto a valutare la resistenza residua del laminato.

A.1.2 - Modelli per l'analisi della frattura in strutture laminate

Il sub-task verrà sviluppato dalle UR di AN e MI.

L'UR-AN svilupperà modelli numerici per l'analisi della frattura di strutture laminate. Facendo uso di metodi asintotici, e a partire da modelli tridimensionali, dedurrà teorie strutturali di piastre e travi fragili multistrato. Analizzerà film sottili incollati su substrati elastici a comportamento monolaterale sollecitati dinamicamente, investigando il fenomeno dello scollamento ed il comportamento a fatica dell'incollaggio.

L'UR-MI svilupperà ulteriormente un elemento coesivo "direzionale", recentemente proposto in letteratura per la simulazione del taglio di fogli sottili. Svilupperà test di validazione del modello e implementerà un elemento di guscio elastoplastico in grandi deformazioni, dotato di un criterio per la propagazione della frattura.

A.2.1 - Analisi dei processi di formatura di strutture in cartone

Il sub-task verrà sviluppato autonomamente dalla UR-MI, sfruttando tuttavia i risultati ottenuti dalle altre UR in A.1.1 ed A.1.2. L'UR-MI studierà la formatura ed il taglio di contenitori alimentari, costituiti da laminati in cartone. Formulerà, in regime di grandi rotazioni, un modello costitutivo per l'elemento finito d'interfaccia del punto A.1.1, atto a simulare il comportamento della linea di cordonatura. Definirà problemi di riferimento di dimensioni ridotte, sui quali testare le metodologie proposte e studiare la dipendenza dai parametri dei diversi meccanismi dissipativi in competizione: plasticità, danno e frattura.

A.2.2 - Modelli analitici, numerici e sperimentali per l'analisi dei laminati in vetro

Il sub-task verrà sviluppato dalle UR di AN e CT. La sinergia riguarderà soprattutto la formulazione di modelli analitici e numerici.

L'UR-AN svilupperà metodi analitico-numerici e sperimentali per l'analisi del danno su strutture in vetro laminato. I modelli terranno conto d'imperfezioni, non linearità geometriche e variazioni termiche, nonché del deterioramento nel tempo dello strato plastico intercalare. La campagna sperimentale permetterà di determinare i parametri modali degli elementi in vetro, e la loro sensibilità al danno.

L'UR-CT svilupperà un modello analitico e numerico per l'analisi di elementi strutturali in vetro stratificato, in presenza di non linearità geometriche e materiali, anche in dipendenza della durata del carico.

A.2.3 - Analisi del comportamento termo-meccanico a fatica e ad usura interlaminare di tubi flessibili multistrato

Il sub-task verrà sviluppato autonomamente dalla UR-AQ, che si gioverà tuttavia delle ricerche delle altre UR sviluppate in A.1.1. L'UR-AQ formulerà modelli analitici e numerici per la descrizione del comportamento a fatica e ad usura all'interfaccia di tubi multistrato, soggetti a variazioni cicliche di temperatura e pressione. L'analisi sarà condotta con un modello continuo a danneggiamento, e sarà finalizzata a valutare come lo scorrimento circonferenziale e longitudinale tra gli strati incida sulla vita utile del tubo.

B.1.1 - Analisi critica e post-critica di travi sottili in presenza di difetti o degrado del materiale

Il sub-task verrà sviluppato dalle UR di AQ e GE, in totale collaborazione.

L'UR-AQ formulerà una versione modificata del metodo GBT (Generalized Beam Theory), per lo studio del comportamento critico e post-critico di profilati in parete sottile, facendo uso di procedimenti perturbativi. L'UR-GE implementerà il modello in un codice di calcolo. Le due UR, in collaborazione, effettueranno un'analisi parametrica, finalizzata alla valutazione degli effetti di imperfezioni localizzate o diffuse, o di degrado del materiale, ad esempio prodotto da incendio.

B.1.2 - Instabilità locale di gusci laminati

Il sub-task verrà sviluppato dall'UR-CT per materiali generici, e dalle UR- MI ed AQ per il cartone.

L'UR-CT studierà l'imbozzamento di gusci molto sottili, con particolare attenzione al corrugamento delle membrane. Determinerà i domini di stabilità del guscio in funzione delle sollecitazioni e della curvatura gaussiana locale.

Le UR-MI ed UR-AQ, in sinergia, studieranno i fenomeni d'imbozzamento, con formazione di grinze, che si possono verificare durante la formatura di gusci in cartone, favoriti dalle linee di pre-danneggiamento. La UR-MI utilizzerà elementi finiti di guscio e l'elemento d'interfaccia descritto in A.1.1; parallelamente, l'UR-AQ svilupperà un modello analitico semplice, basato su metodi perturbativi, per approfondire la conoscenza del problema.

B.1.3 - Instabilità di laminati in vetro

Il sub-task verrà sviluppato dalle UR di AN, CT, utilizzando i risultati ottenuti in A.2.2, ed effettuando prove sperimentali specifiche.

L'UR-AN analizzerà il comportamento a compressione di laminati in vetro. Effettuerà una sperimentazione su campioni con diverso numero di strati, composizione dell'intercalare, dimensioni e vincoli. Otterrà diagrammi costitutivi che permetteranno di identificare i parametri meccanici del vetro e validare modelli interpretativi sviluppati in A.2.2. Terrà conto di imperfezioni geometriche, grandi spostamenti, variazioni termiche, durata del carico, degrado e delaminazione.

L'UR-CT effettuerà l'analisi del comportamento critico e post-critico di lastre di vetro stratificato, sollecitate nel piano o fuori piano. Otterrà soluzioni analitiche per geometrie semplici, e svilupperà metodi numerici per casi più complessi. Studierà poi l'interazione dell'instabilità con il danneggiamento dell'interfaccia.

B.2.1 - Modelli matematici di interazione uomo-struttura e risposta dinamica di passerelle pedonali

Il sub-task verrà sviluppato dalle UR di AN e GE.

L'UR-AN svilupperà un nuovo modello non lineare d'interazione dinamica ponte-pedone, che contempla, come caso limite, la sincronizzazione di tutti i pedoni con il ponte. Determinerà un limite d'instabilità strutturale, in termini di numero di pedoni e caratteristiche modali della struttura. Confronterà i risultati del modello con prove sperimentali di letteratura e con modelli numerici esistenti.

L'UR-GE perfezionerà un modello di interazione uomo-struttura basato su un meccanismo di eccitazione parametrica, applicandolo a casi reali che presentano instabilità laterale senza evidenza di sincronizzazione; utilizzerà approcci spettrali per modellare forze verticali continue, e per ottenere soluzioni in forma chiusa con tecniche di dinamica aleatoria lineare.

B.2.2 - Dinamica, instabilità ed analisi del danno di travi e fili

Il sub-task verrà sviluppato dalle UR di AN, RM, AQ, GE e MI, che affronteranno, ciascuna, aspetti diversi e complementari della vasta problematica.

L'UR-AN analizzerà, con metodi analitici e numerici, la dinamica libera e forzata di strutture monodimensionali di lunghezza infinita. Indagherà le proprietà delle onde progressive e delle onde stazionarie. Studierà l'influenza, sul regime di propagazione, del danneggiamento locale o globale e del contatto monolatero con un substrato, risolvendo con procedimenti perturbativi un problema non lineare a frontiera libera.

L'UR-RM studierà la risposta dinamica forzata di una mensola che urta su un appoggio, reso monolatero dal danno, posto ad un estremo e ad una certa distanza ("gap", misura del danno), rappresentato da una molla lineare a tratti. Effettuerà un'analisi parametrica in termini di gap, frequenza ed ampiezza della forzante e rigidità a compressione della molla. Effettuerà una verifica sperimentale del modello proposto.

L'UR-AQ e l'UR-GE, in stretta collaborazione, studieranno l'instabilità indotta da un treno di masse viaggianti su un filo o cavo sospeso. Determineranno numericamente le regioni d'instabilità nello spazio dei parametri. Utilizzeranno un metodo perturbativo per la descrizione asintotica delle regioni d'instabilità, al tendere a zero del rapporto di massa. Dediceranno particolare attenzione al problema della singolarità della deformata prodotta dalla massa concentrata.

L'UR-AQ studierà gli effetti prodotti da danno localizzato sulla risposta dinamica dei cavi in regime di grandi ampiezze, innescate da instabilità dinamica. Con l'ausilio di modelli basso-dimensionali, effettuerà un'analisi di sensitività delle frontiere d'instabilità ai parametri descrittivi del danno, incluso l'effetto di variazioni termiche. Lo studio permetterà la diagnosi precoce del danno.

L'UR-MI s'impegnerà nella modellazione del danno da reazione alcali-aggregati nei ponti in calcestruzzo. Svilupperà un modello costitutivo, dipendente da temperatura e umidità, che simuli l'evoluzione del danneggiamento nel materiale. Implementerà il modello in un codice ad elementi finiti, col quale verranno eseguite analisi evolutive per predire la riduzione di rigidità e la conseguente variazione nel tempo delle prestazioni dinamiche della struttura.

B.2.3 - Instabilità aerodinamica di cavi e stralli, reti di funi e profili alari

Il sub-task verrà sviluppato dalle UR di AQ, GE, CT ed AN.

Le UR-AQ e UR-GE, in sinergia, studieranno, con procedimenti perturbativi, fenomeni lineari e nonlineari d'instabilità aeroelastica di cavi sospesi ghiacciati e di stralli percorsi da un rivolo di pioggia. Analizzeranno la turbolenza come causa di eccitazione parametrica del sistema. L'UR-AQ studierà le interazioni tra vento stazionario, componente turbolenta e moto assegnato al supporto (traffico), che conducono a contemporanea autoeccitazione, eccitazione esterna e parametrica.

L'UR-GE studierà l'instabilità per galloping di elementi asciutti inclinati rispetto al vento, adottando formulazioni quasi-stazionarie generalizzate, in grado di tener conto della geometria tridimensionale. Effettuerà inoltre indagini sperimentali in galleria del vento su elementi inclinati rispetto al flusso e su modelli rigidi ad elasticità concentrata.

L'UR-CT analizzerà il corrugamento di membrane sottili irrigidite. Determinerà la configurazione d'equilibrio iniziale, assimilando la membrana ad una rete di funi. Svilupperà un elemento finito di fune pesante per studiare la risposta del sistema a forze conservative e non conservative, prodotte dall'interazione con un fluido.

L'UR-AN studierà lo stallo dinamico non lineare di profili alari. Svilupperà un modello aeroelastico ad elasticità concentrata, utilizzando diversi modelli semi-analitici non lineari di forze aerodinamiche. Le equazioni discontinue, che simulano il distacco dei vortici, permetteranno di giustificare alcuni aspetti non regolari della dinamica, quali la sparizione di attrattori.

C.1 - Metodi e strumenti per la rilevazione del danno in strutture sottili

Il sub-task verrà sviluppato dalle UR di AN, AQ e RM.

L'UR-AN svilupperà metodi non distruttivi di tipo globale per il monitoraggio delle strutture danneggiate. Farà uso della teoria dei modi propri normali, per risalire alla posizione del danno attraverso l'analisi dei punti angolosi.

L'UR-AQ formulerà modelli dinamici di strutture danneggiate, con materiali degradanti nel tempo, e svilupperà procedure di diagnostica nei domini del tempo e delle frequenze. Implementerà gli algoritmi a bordo di sensori intelligenti dotati di microprocessori programmabili. Studierà la possibilità di auto-aggiornamento in tempo reale dei modelli dinamici. Effettuerà prove di laboratorio ed in scala reale.

L'UR-RM metterà a punto strategie di rilevazione del danno tramite reti di sensori piezoelettrici. Progetterà le impedenze della rete di interconnessione fra gli attuatori piezoelettrici al fine di ottimizzare l'identificazione.

C.2 - Controllo semi-attivo di strutture sottili tramite dispositivi piezoelettrici

Il sub-task verrà sviluppato dalle UR di RM ed AN.

L'UR-RM studierà piastre intelligenti per lo smorzamento di vibrazioni strutturali, equipaggiate con una rete distribuita di trasduttori piezoelettrici, connessi ad un circuito modulare virtualmente passivo, ed ottimizzato per estrarre energia meccanica a banda larga e dissiparla elettricamente. In un secondo approccio al problema, finalizzato al controllo dell'energia irradiata in ambito acustico, l'UR-RM realizzerà un controllore agente su una rete di attuatori localizzati in modo ottimo, in grado di smorzare frequenze in bande selezionate, ed effettuerà prove sperimentali di laboratorio.

L'UR-AN indagherà sull'impiego dei materiali piezoelettrici nel controllo e nella sensoristica. Formulerà un modello continuo elettromeccanico per ceramiche ferroelettriche, trasferendo alla scala del modello proprietà note nella fisica dello stato solido. Studierà fenomeni di isteresi e riorientamento dei domini indotti da sollecitazioni elettromeccaniche. Effettuerà prove sperimentali per la validazione del modello.

C.3 - Controllo passivo di strutture tramite dissipatori elastoplastici suscettibili di instabilità

Il sub-task verrà sviluppato autonomamente dalla UR-AQ. L'UR studierà, con approccio sperimentale e numerico, un pannello dissipativo in alluminio e acciaio. Analizzerà accorgimenti tecnici e geometrie atti a prevenire fenomeni d'instabilità locale del pannello. Valuterà la possibilità d'impiego di materiali innovativi in sostituzione dell'alluminio, quali leghe Nitinol a memoria di forma, oppure schiume di alluminio, in grado di migliorare le prestazioni del dispositivo.

Testo inglese

To achieve the objectives of the project, a pool of six UR is established, composed by 12 full professors, 6 associate professors, 5 assistant professors, 2 Research Institutions, 7 post-doc fellows, 6 PhD students; the contribution of additional 8 post-doc fellows, bringing to 50 the total number, is scheduled. Most components of the UR, and in particular all the coordinators, belong to the SSD ICAR/08. However, given the interdisciplinary aspects involved in the study, and consistently with the international context described in section 11, it was considered appropriate to include complementary skills, so that the team includes: 15 members from the SSD ICAR/08, 1 member from the related sector (ICAR/09), 1 member from the sector of Mathematics (MAT-01), 1 member from the sector of Physics (FIS/03), 4 members from the sector of Mechanical and Aeronautical Engineering (ING-IND/04, ING-IND/13, ING-IND/14) and 1 member from the sector of Information Technology Engineering (ING-INF/01).

All Teams will work together on the contiguous topics of the same areas, or in close and direct collaboration on the same topic. Eleven of the fourteen sub-tasks will be developed by at least two UR.

In the following, for each of the sub-tasks listed in section 12, the objectives of the involved UR will be described, highlighting the elements of integration and collaboration.

A.1.1 - Interface models for localized damage and delamination in multilayered structures

This sub-task will be developed by UR AN, MI and CT, which will carry out, in synergy and for comparison, several models of interface.

UR-AN will formulate a model for the analysis of interface in the delamination process of multilayer structures, able to describe fatigue and fracture dynamics. Making use of asymptotic methods, UR-AN will develop models of quasi-fragile interface, taking into account the unilateral contact, friction at the microscopic scale, damage and viscosity. UR-AN will also study the delamination of multilayer panels with "strong" interlayer. Based on a principle of minimum energy, UR-AN will formulate a model of stable growth of fracture, in both linear and nonlinear regimes, which will be implemented in a finite element code.

UR-MI will develop an interface element to be interposed between adjacent shell, and an interface element to be interposed between adjacent layers of the same finite element, able to convey cohesive forces, suitable for simulation of local damage, e.g. due to bending and delaminations.

UR-CT will formulate a numerical model of cohesive interface that can be used for the analysis of both delamination in laminated glass and the evolution of the fracture, which would assess the residual strength of the laminated.

A.1.2 - Models for fracture analysis in laminated structures

This sub-task will be developed by UR AN and MI.

UR-AN will develop numerical models for the analysis of fracture of laminated structures. Making use of asymptotic methods, and from three-dimensional models, UR-AN will deduce structural theories of multilayered plates and fragile beams. UR-AN will analyze thin films bonded to elastic unilateral substrates, dynamically excited, investigating the phenomenon of the separation and the fatigue behavior of bonding.

UR-MI will further develop a "directional" cohesive element, recently proposed in the literature for the simulation of cutting thin sheets. UR-MI will develop validation tests of the model and will implement an elastoplastic large deformation element of shell, with a criterion for crack propagation.

UR-CT will use the interface model formulated in sub-task A.1.1 to study the propagation of the fracture on the surface of the laminated glass.

A.2.1 - Analysis of forming processes of cardboard structures

This sub-task will be developed independently by UR-MI, however, using the results from other research units in sub-tasks A.1.1 and A.1.2. UR-MI will study the forming and cutting of food containers, made of laminated cardboard. UR-MI will formulate a constitutive model under large rotations for finite element interface from sub-task A.1.1, to simulate the behavior of the crease line. UR-MI will define small dimension reference problems on which to test the proposed methodologies and study the dependence on parameters of various dissipative competing mechanisms: plasticity, damage and fracture.

A.2.2 - Analytical, numerical and experimental models for laminated glass panels

This sub-task will be developed by UR AN and CT. The synergy focus principally on the formulation of analytical and numerical models.

UR-AN will develop analytical methods for the numerical and experimental analysis of the damage to laminated glass structures. The models will take into account imperfections, geometric nonlinearity, temperature changes and the deterioration in the time of the plastic interlayer. The experimental campaign will determine the modal parameters of glass elements, and their sensitivity to damage.

UR-CT will develop an analytical and numerical model for analysis of structural elements in laminated glass, in the presence of geometric and material nonlinearities, even considering the duration of the load.

A.2.3 - Modellization of the thermo-mechanical behaviour of flexible multi-layered tubes affected by interface fatigue and wear

This sub-task will be developed independently by UR-AQ, which will however gets benefit from the research of other UR in sub-task A.1.1. UR-AQ will formulate analytical and numerical models for describing the fatigue and wear behavior at the interface of multilayer pipes, subject to cyclical variations in temperature and pressure. The analysis will be conducted in a damaged continuous model, and will aim to assess how the circumferential and longitudinal sliding between the layers affects the useful life of the pipe.

B.1.1 - Critical and post-critical analysis of thin structures affected by defects or material degradation

This sub-task will be developed by UR-AQ and GE, in full collaboration.

UR-AQ will formulate a modified version of the GBT method (Generalized Beam Theory), to study the critical and post-critical behavior of thin walled sections, using perturbation processes.

UR-GE will implement the model in a computer code. The two UR, in collaboration, will perform parametric analysis, aimed to assess the effects of local or diffuse imperfections, or material degradation, such as that caused by fire.

B.1.2 - Local instability of laminated shells

This sub-task will be developed by UR-CT for generic materials, and by UR-MI and AQ for cardboard.

UR-CT will study the buckling of thin shells, with particular attention to the folding of the membranes. UR-CT will determine the domains of stability of the shell as a function of the loads and the local Gaussian curvature.

UR-MI and AQ, in combination, will study the phenomena of buckling with wrinkling, which may occur during the forming of cardboard shells, encouraged by lines of pre-damage. UR-MI will use finite elements for shells and the interface element described in sub-task A.1.1; in parallel, UR-AQ will develop a simple analytical model based on perturbation methods, in order to deepen understanding of the problem.

B.1.3 - Instability of laminated glass panels

This sub-task will be developed by UR-AN and CT, using the results obtained in sub-task A.2.2, and by conducting specific tests.

UR-AN will analyze the behavior of laminated glass under compression. UR-AN will carry out an experiment on samples with different number of layers, interlayer composition, dimensions and constraints. UR-AN will get constitutive diagrams that allow to identify the mechanical parameters of the glass and to validate models developed in sub-task A.2.2. UR-AN will take account of geometric imperfections, large displacement, temperature changes, duration of load, deterioration and delamination.

UR-CT will analyze the critical and post-critical behavior of laminated glass panels, when in-plane and out-of-plane excitations are applied. UR-CT will obtain analytical solutions for simple geometries, and will develop numerical methods for more complex cases. Then UR-CT will study the interaction of the instability with the damage of the interface.

B.2.1 - Mathematical models for pedestrian-structure interaction and dynamic response of footbridges

This sub-task will be developed by UR-AN and GE.

UR-AN will develop a new nonlinear model of pedestrian-bridge dynamic interaction, which includes, as a threshold matter, the synchronization of all pedestrians to the bridge. UR-AN will determine a limit of structural instability, in terms of number of pedestrians and modal characteristics of the structure. UR-AN will compare the model results with experimental tests of existing literature and with numerical models.

UR-GE means to improve a pedestrian-structure interaction model based on a mechanism of parametric excitation, by applying it to real cases that have shown lateral instability without any evidence of synchronization; it will use spectral approaches to model continuous vertical forces, and to obtain solutions in closed form using techniques of random linear dynamics.

B.2.2 - Dynamics, instability and damage analysis of beams and cables

This sub-task will be developed by UR-AN, RM, AQ, GE and MI, which will address each, different and complementary aspects of the vast problem.

UR-AN will analyze with analytical and numerical methods, dynamics of free and forced one-dimensional structures of infinite length. UR-AN will investigate the properties of progressive waves and stationary waves. UR-AN will study the influence of the local or global damage and of the monolateral contact with a substrate on the regime of wave propagation, solving a nonlinear free boundary problem with perturbation techniques.

UR-RM will study the dynamic response of a cantilever that hits on a support, made monolateral by damage, placed at one end and at a distance ("gap", which is a measure of damage), represented by a piecewise linear spring. UR-RM will perform parametric analysis in terms of gap, frequency and amplitude of forcing and compressive stiffness of the spring. UR-RM will make an experimental verification of the proposed model.

UR-AQ and GE, in close collaboration, will study the instability induced by a train of traveling masses on a wire or suspended cable. UR-AQ and GE will determine the regions of instability of equilibrium in the space of parameters (speed, mass ratio, ...). UR-AQ and GE will also use a perturbation method for describing the asymptotic regions of instability, when the mass ratio tends to zero. UR-AQ and GE will pay particular attention to the problem of the singularity of the displacement produced by the concentrated mass.

UR-AQ will study the effects of localized damage on the dynamic response of cables under large displacements, triggered by dynamic instability. Using low-dimensional models, UR-AQ will conduct sensitivity analysis of the boundaries of instability to the parameters of damage indicators, including the effect of temperature changes. The study will enable early detection of damage.

UR-MI will model the damage from alkali-aggregate reaction in concrete bridges. UR-MI will develop a constitutive model, dependent on temperature and humidity, to simulate the evolution of damage in the material. UR-MI will implement the model in a finite element code to perform evolutionary analysis and to predict the reduction of stiffness and the resulting time variation of the dynamic performance of the structure.

B.2.3 - Aerodynamic instability of cables and stays, cable nets and airfoils

This sub-task will be developed by UR-AQ, GE, CT and AN.

UR-AQ and GE, in synergy, will study linear and nonlinear aeroelastic instability of suspended and stayed cables in cases of presence of ice accretion or rain rivulet, using perturbation techniques. UR-AQ and GE will analyze the turbulence as an explicit cause of parametric excitation. In particular, UR-AQ will study the interactions among steady and turbulent wind and support motion (traffic), leading to simultaneous self-excitation, external and parametric excitations. UR-GE will analyze dry galloping in inclined stayed cables angled to the incident wind, adopting quasi-stationary generalized formulations, able to take into account the three-dimensional geometry. UR-GE will also carry out wind tunnel experimental tests on elements excited by a skew wind and spring-supported rigid models.

UR-CT will analyze the wrinkling of stiff thin membranes. UR-CT will determine the initial configuration of equilibrium, considering the membrane as a network of wires. Then UR-CT will use a finite element of heavy wire, developed to study the system's response to conservative and nonconservative forces produced by interaction with a fluid.

UR-AN will study nonlinear dynamic stall of airfoils. UR-AN will develop an aeroelastic model with concentrated elasticity, using different semi-analytical nonlinear models of aerodynamic forces. The study of discontinuous equations, which simulate the detachment of vortices, will justify some aspects of non-regular dynamics, such as the disappearance of attractors.

C.1 - Methods and tools for damage detection in thin structures

This sub-task will be developed by UR-AN, AQ and RM.

UR-AN will develop global non-destructive methods to monitor damaged structures. UR-AN will make use of the theory of proper normal modes, to trace the position of the damage through the analysis of angular points.

UR-AQ will formulate dynamic models of damaged structures, with materials degrading over time, and will develop diagnostic procedures in the time and frequency domains. UR-AQ will implement the algorithms on smart sensors with programmable microprocessors. UR-AQ will study the possibility of real-time auto-update for dynamic models and will perform laboratory and full scale tests.

UR-RM will fulfil strategies for detection of damage by sensor networks. UR-RM will design the impedance of the interconnection network among the piezoelectric actuators to optimize the identification.

C.2 - Semi-active control of thin structures through piezoelectric devices

This sub-task will be developed by UR-RM and AN.

UR-RM will analyze smart plates for damping structural vibrations, equipped with a network of distributed piezoelectric transducers, connected to a virtual passive modular circuit, optimized for harvesting mechanical energy of the plate and dissipating it into the circuit. In a second approach to the problem, aiming to control acoustic radiated energy, UR-RM will implement a controller, acting on a network of optimally located actuators, that can damp frequencies in selected bands, and will perform laboratory tests.

UR-AN will investigate the use of piezoelectric materials in the control and sensor fields, where particular attention is paid to ceramics. UR-AN will make a continuous electromechanical model for ferroelectric ceramics of PZT group, transferring the properties known from solid state physics to the in-scale model. UR-AN will study hysteresis phenomena and reorientation of domains induced by electromechanical stress. UR-AN will perform tests to validate the model.

C.3 - Structural control through passive elastoplastic dampers subject to instability

This sub-task will be developed independently by UR-AQ which, for this purpose, has included in its team researchers from other universities. UR-AQ will study, with experimental and numerical approaches, a dissipating aluminium and steel panel. UR-AQ will analyze technical and geometric devices to prevent local buckling phenomena of the panel. UR-AQ will assess the possibility of using new materials instead of aluminium, such as Nitinol shape memory alloys, or aluminium foam, which can improve device performance.

14 - Risultati attesi dalla ricerca, il loro interesse per l'avanzamento della conoscenza e le eventuali potenzialità applicative

Testo italiano

I risultati attesi dalla ricerca sono molteplici, e riguardano (a) l'avanzamento della conoscenza su temi di frontiera inerenti la Meccanica dei Materiali e delle Strutture, e, (b) la realizzazione di prodotti, consistenti in strumenti di calcolo per la progettazione, verifica, e miglioramento delle prestazioni delle strutture sottili. I risultati possono classificarsi come segue, in accordo ai WP del progetto.

(A) Significativo incremento del livello di conoscenza del comportamento meccanico di materiali sino ad oggi poco studiati in ambito strutturale, quali cartone, vetro, gomma, polietilene, e loro combinazioni in strutture laminate composite, con particolare riguardo a fenomeni di frattura e danneggiamento, ed alla loro interazione con l'instabilità; implementazione di codici di calcolo quali strumenti di ausilio alla progettazione e verifica di elementi strutturali laminati.

(B) Considerevole approfondimento della conoscenza del comportamento di strutture sottili, in campo statico e dinamico, lineare e non-lineare, soggette a forze gravitazionali o interattive, ambientali (vento), funzionali (masse mobili) ed antropiche (passerelle pedonali), con particolare riguardo all'instabilità, e alla sua dipendenza dal danno; formulazione di algoritmi analitico-numeric per la simulazione del comportamento strutturale.

(C) Messa a punto di algoritmi e tecniche d'indagine di elevate potenzialità applicative nel campo del rilevamento del danno, del controllo passivo o semi-attivo delle strutture sottili, in ambito strutturale (ai fini della sicurezza) o acustico (ai fini del comfort), con particolare riguardo all'impiego di strumenti intelligenti, materiali innovativi e tecniche collaborative integrate con altri settori dell'Ingegneria (Meccanica, Elettrica, Informatica); validazione di modelli teorici attraverso sperimentazione su prototipi in scala e strutture reali.

Nello specifico, si prevedono i seguenti risultati, suddivisi per ciascun sub-task.

A.1.1 - Modelli di interfaccia per danni localizzati e delaminazione in strutture multistrato

Principali prodotti della ricerca saranno dei codici di calcolo per la simulazione di fenomeni di distacco tra gli strati di compositi laminati, che tengano conto di fatica, degrado della resistenza e della rigidità, elasto-plasticità, attrito e viscosità, anche in campo di grandi spostamenti. Questi codici deriveranno da formulazioni matematiche rigorose, che li differenzieranno da quelle semi-empiriche di letteratura.

A.1.2 - Meccanica della frattura in strutture laminate

Un primo prodotto riguarderà l'implementazione di un codice di calcolo per la simulazione del processo di taglio di fogli sottili mediante lame affilate. Il codice sarà basato sull'uso di un innovativo elemento finito coesivo, detto "direzionale", formulato in grandi deformazioni, a integrazione ridotta, con controllo dei modi di deformazione spuria ed un criterio di inializzazione e di propagazione della frattura basato su parametri di deformazione.

Un secondo prodotto consisterà in un codice di calcolo per l'analisi di strutture laminate costituite da strati con diverse proprietà meccaniche. Lo strumento permetterà di studiare lo scollamento di film sottili incollati su substrati elastici, e di descrivere riflessione e rifrazione delle onde trasversali in corrispondenza dell'apice dell'incollaggio.

A.2.1 - Analisi dei processi di formatura di strutture in cartone

Prodotto atteso è un codice di calcolo per la simulazione di processi di produzione di laminati a base di carta e cartone. Lo strumento avrà grande rilevanza applicativa nella progettazione degli imballaggi, dove, agendo sui parametri fisici e geometrici (spessore, orientazione degli strati, proprietà dei materiali, layout delle piegature, geometria delle lame), si potrà evitare la formazione di difetti (grinze, delaminazione, fratture superficiali e deformazioni permanenti), salvaguardando così l'efficienza del prodotto.

A.2.2 - Modelli analitici, numerici e sperimentali per l'analisi dei laminati in vetro

Risultato atteso è un notevole incremento della conoscenza del vetro laminato strutturale, quale risulterà dalle campagne sperimentali e dai modelli interpretativi formulati. Si ritiene che i risultati prodotti possano essere di interesse sia per la comunità scientifica, sia tecnica, in quanto l'incremento di dati e teorie renderà possibile un utilizzo più consapevole del materiale ed un suo maggiore sfruttamento nelle applicazioni architettoniche e strutturali. La disponibilità di modelli interpretativi e dati sperimentali, renderà poi ipotizzabili tecniche di monitoraggio non distruttivo su elementi in vetro laminato anche di grandi dimensioni, ad esempio facciate continue, coperture e pavimentazioni.

A.2.3 - Analisi del comportamento termo-meccanico a fatica e ad usura interlaminare di tubi flessibili multistrato

E' attesa la formulazione di modelli analitici semplici, in grado di simulare il comportamento di tubi multistrato soggetti a cicli di pressione e/o elevata temperatura, che tengano conto di fenomeni di danneggiamento a fatica ed usura per attrito all'interfaccia. Tali modelli saranno particolarmente utili a stabilire la vita utile del tubo, soprattutto nelle applicazioni industriali, dove il fermo-macchina dovuto al collasso del tubo ha onerose ripercussioni economiche. Ciò a fronte della tecnica progettuale corrente, dove la scarsa conoscenza dei fenomeni in gioco induce all'impiego non ragionato, e perciò spesso infruttuoso, di costosi modelli di calcolo agli elementi finiti.

B.1.1 - Analisi critica e post-critica di travi sottili in presenza di difetti o degrado del materiale

E' attesa la formulazione di un algoritmo numerico-analitico per l'analisi di stabilità di profili aperti sottili, capace di simulare la perdita di forma della sezione trasversale della trave (ovalizzazione, instabilità locale, modi misti locale-globale), in campo lineare e non-lineare, in presenza oppure no di difetti localizzati o diffusi, ovvero degrado del materiale, quale ad esempio prodotto da incendio. L'algoritmo supererà alcune macchinosità proprie di altri procedimenti di letteratura, sia ai fini di una maggiore efficienza computazionale, sia soprattutto di maggiore chiarezza concettuale.

B.1.2 - Instabilità locale di gusci laminati

Sono attesi modelli di calcolo analitici e numerici per l'analisi d'instabilità locale di gusci e membrane laminati molto sottili, capaci di simulare la formazione di grinze ed eventuali delaminazioni, in posizione non nota a priori, ovvero nell'intorno di linee di pre-danneggiamento (cordonature). I modelli saranno d'aiuto alla progettazione di diverse tipologie di strutture, dalle vetrate continue agli imballaggi in cartone.

B.1.3 - Instabilità di laminati in vetro

E' atteso un miglioramento significativo della conoscenza del comportamento, lineare e nonlineare, del vetro strutturale nei riguardi del fenomeno dell'instabilità, che limita fortemente l'uso del materiale. I modelli matematici, formulati sulla base delle risultanze sperimentali, permetteranno di chiarire l'influenza dei diversi parametri fisici, in particolare dell'intercalare, sul comportamento del laminato, tenendo conto d'imperfezioni, variazioni termiche e degrado. La ricerca avrà dunque significative ricadute di tipo tecnico, in quanto favorirà una maggiore e più consapevole diffusione in edilizia del vetro laminato compresso.

B.2.1 - Modelli matematici di interazione uomo-struttura e risposta dinamica di passerelle pedonali

Prodotti della ricerca saranno modelli matematici, atti a valutare le forze d'interazione dinamica che si sviluppano tra passerelle pedonali e gruppi di pedoni che le percorrono. I modelli renderanno possibile la valutazione progettuale preventiva del numero critico di pedoni in grado di innescare l'instabilità laterale di strutture flessibili, nonché dell'entità degli effetti dinamici complessivi. Considerato che le normative esistenti, anche estere, sono al riguardo lacunose, la ricerca si configura come lavoro di partenza per lo sviluppo di raccomandazioni, linee-guida e documenti pre-normativi, che possano essere utilizzati dai progettisti per rendere più efficiente e mirata la progettazione, realizzazione e gestione delle infrastrutture pedonali.

B.2.2- Dinamica, instabilità ed analisi del danno di travi e fili

Questo sub-task, molto esteso ed articolato, produrrà modelli, analitici e numerici, per la migliore comprensione di una varietà di fenomeni che influenzano la risposta dinamica, la stabilità dinamica e l'evoluzione del danno nelle strutture a trave o a filo.

Alcuni modelli sono relativi alla dinamica e stabilità delle strutture.

Un primo modello permetterà di analizzare la propagazione ondosa in tubature o linee ferroviarie, dovuta ad esempio a sisma o esplosione, o al moto ondoso su cavi, oleodotti e strutture off-shore. Lo strumento permetterà di stabilire quali sono gli intervalli di frequenza più pericolosi, in termini di sollecitazioni e deformazioni indotte sulla struttura, soprattutto in corrispondenza di zone danneggiate o indebolite, dove si produce riflessione e rifrazione delle onde.

Un secondo modello permetterà di analizzare la dinamica di travi impattanti su vincoli monolateri, che ad esempio si manifestano a seguito del distacco di un vincolo originariamente bilatero. Lo strumento, tarato su indagini sperimentali, arricchirà la conoscenza di un fenomeno non ancora studiato a fondo, e di grande attualità scientifica.

Un terzo modello consentirà di determinare le velocità critiche di treni di masse viaggianti su travi, fili o cavi sospesi, ad esempio infrastrutture viarie o ferroviarie, e sistemi di trasporto a fune. Lo strumento permetterà di chiarire il ruolo delle frequenze proprie e della velocità di transito sul fenomeno della risonanza parametrica, responsabile dell'instabilità dinamica.

Altri modelli sono invece dedicati all'analisi del danno, e a come questo influenzi la dinamica delle strutture.

Un quarto modello consentirà di valutare l'effetto di un danno localizzato sulla risposta dinamica nonlineare di cavi, anche in presenza di variazioni termiche, e sarà finalizzato alla diagnosi precoce del danno.

Un quinto modello consentirà di simulare l'evoluzione del danneggiamento da reazione alcali-aggregati nei ponti in calcestruzzo, tenendo conto di temperatura ed umidità. Lo studio produrrà un codice agli elementi finiti in grado di stimare le variazioni temporali di rigidità della struttura, con conseguenti eventuali instabilità.

B.2.3 - Instabilità aerodinamica di cavi e stralli, reti di funi e profili alari

Da questo sub-task, che affronta l'importante problematica dell'analisi d'interazione vento-struttura, si attendono modelli capaci di descrivere diverse forme d'instabilità, che si manifestano in diverse tipologie di strutture flessibili.

Un primo modello analitico, corroborato da prove in galleria del vento, consentirà di analizzare fenomeni lineari e nonlineari d'instabilità aeroelastica di cavi e stralli, eventualmente inclinati, ghiacciati o asciutti, sotto vento stazionario o turbolento, con appoggi fissi oppure soggetti a moto prescritto. Tale strumento permetterà di migliorare la conoscenza dei fenomeni di galloping, che condiziona le prestazioni meccaniche di linee aeree di trasmissione elettrica, linee di trasporto a fune, cavi di ponti sospesi e stralli di antenne o ponti.

Un secondo modello, agli elementi finiti, renderà possibile prevedere il verificarsi di fenomeni di corrugamento di membrane irrigidite da reti di travi sottili. Lo strumento permetterà di determinare la configurazione di equilibrio della membrana sotto forze gravitazionali, nonché la risposta dinamica sotto forze d'interazione con il fluido.

Un terzo modello consentirà di approfondire la conoscenza del fenomeno dello stallo dinamico dei profili alari, prodotto dal distacco posteriore dei vortici, e in particolare della soglia di flutter e della relativa dinamica complessa della struttura.

C.1. - Metodi e strumenti per la rilevazione del danno in strutture sottili

La ricerca produrrà algoritmi per indagini non distruttive, validati da prove di laboratorio e al vero, finalizzate alla rilevazione del danno nelle strutture (diagnosi), alla formulazione di un giudizio di integrità (sintesi), e alla stima delle capacità prestazionali residue (prognosi). Le tecniche si avvarranno di sensori intelligenti di nuova generazione, dotati di microprocessori a bordo per la parziale decentralizzazione delle funzioni di elaborazione in tempo reale dati ed organizzati in reti gerarchizzate per la comunicazione non cablata, oppure reti di attuatori piezoelettrici con impedenze delle interconnessioni ottimizzate alla diagnosi del danno.

C.2 - Controllo semi-attivo di strutture sottili tramite dispositivi piezoelettrici

Sono attesi modelli analitici e prototipi sperimentali di piastre sottili equipaggiate con trasduttori piezoelettrici distribuiti, in grado di estrarre energia meccanica dalla struttura per dissiparla elettricamente, al fine di controllarne in modo semi-attivo le vibrazioni strutturali ed acustiche. L'approccio ha possibili ricadute applicative in campo automotive.

Ulteriore prodotto della ricerca consisterà in un modello matematico avanzato di continuo elettromeccanico, atto a descrivere il comportamento delle ceramiche ferroelettriche. Quest'aspetto riveste notevole importanza tecnologica, in quanto propedeutico alla realizzazione di elementi ceramici massicci idonei all'impiego come attuatori.

C.3 - Controllo passivo di strutture tramite dissipatori elastoplastici suscettibili di instabilità

Risultato atteso è la progettazione e realizzazione di un prototipo di un nuovo dispositivo meccanico, costituito da un pannello metallico sottile, in materiale tradizionale o innovativo, in grado di dissipare energia per isteresi, senza soffrire fenomeni d'instabilità locale nel campo operativo richiesto. Il dissipatore, dopo essere stato sperimentato al vero, potrà essere impiegato per la protezione sismica di edifici.

Testo inglese

The awaited results of the research are several and relate (a) to the advancement of knowledge on issues concerning the Mechanics of Materials and Structures, and (b) to make products, consisting of computational tools for the design, verification, and improvement of the performance of thin structures. The results can be classified as follows, according to the WP of the project.

(A) Significant increase in the level of knowledge of the mechanical behavior of materials, not much studied so far in the structural field, such as cardboard, glass, rubber, polyethylene, and combinations of them in laminated composite structures, with particular regard to phenomena of fracture and damage, and their interaction with the instability; implementation of calculation tools to aid in the design and verification of structural laminates

(B) Deep study of the static and dynamic behavior of thin structures, in linear and nonlinear fields, subject to gravitational or interactive forces, environment (wind), functional (moving mass) and anthropogenic (pedestrian), with particular regard to instability, and its dependence on the damage; formulation of analytical-numerical algorithms for the simulation of structural behavior

(C) Development of algorithms and techniques of investigation of high-potential applications in the fields of damage detection, of passive or semi-active control of thin structures, both in structural (for safety) and acoustic (for the purposes of comfort) fields, with particular regard to the use of smart devices, innovative materials and techniques borrowed from other sectors of Engineering (Mechanical, Electrical, Information Technology); validation of theoretical models through testing of scale prototypes and real structures.

Specifically, we anticipate the following results, with reference to each sub-task.

A.1.1 - Interface models for localized damage and delamination in multilayered structures.

Main products of the research will be calculating tools for the simulation of phenomena of separation between the layers of composite laminates, which take account of fatigue, deterioration of strength and stiffness, elasto-plasticity, viscosity and friction, even in the field of large displacements. These codes will arise from rigorous mathematical formulations, which differentiate them from those, semi-empirical, present in the literature.

A.1.2 - Models for fracture analysis in laminated structures

A first product will address the implementation of a software for simulating the process of cutting thin sheets with sharp blades. The software will be based on the use of an innovative cohesive finite element, called "directional", formulated in large deformations, with reduced integration, with control of spurious modes of deformation and a condition for the initialization and propagation of the fracture parameters based on strain.

A second product will be a software for the analysis of laminated structures consisting of layers with different mechanical properties. This tool will allow to study the detachment of thin films bonded on elastic substrates, and to describe reflection and refraction of shear waves at the bonding apex.

A.2.1 - Analysis of forming processes of cardboard structures

The expected product is a software for simulating processes of production of laminated elements made of paper and cardboard. The instrument will have very important applications in the design of packaging where, acting on the physical and geometrical parameters (thickness, orientation of layers, material properties, layout of bends, geometry of the blades), the formation of defects (wrinkles, delamination, superficial fracture and permanent deformation) can be prevented, thereby maintaining the efficiency of the product.

A.2.2 - Analytical, numerical and experimental models for laminated glass panels

Expected result is a significant increase in knowledge of the structural laminated glass, which results from experimental campaigns and interpretative formulated models. It is believed that the produced results may be of interest to both the scientific and the technical communities, since the increase of data and theories can allow a greater and more conscious use of the material in architectural and structural applications. The availability of interpretative models and experimental data will then allow the use of non-destructive monitoring techniques on laminated, even large, glass elements, such as curtain walls, roofs and floors.

A.2.3 - Modellization of the thermo-mechanical behaviour of flexible multi-layered tubes affected by interface fatigue and wear

It is expected the formulation of simple analytical models that can simulate the behavior of multilayer pipes subjected to pressure cycles and/or high temperature, taking into account the phenomena of fatigue damage and wear by interface friction. These models will be particularly helpful to establish the useful life of the pipe, especially in industrial applications, where the downtime due to the collapse of the pipes has costly consequences. That compares with the current design technique, where the poor understanding of the involved phenomena induces not rational and often not fruitful use of expansive finite element models.

B.1.1 - Critical and post-critical analysis of thin structures affected by defects or material degradation

It is expected the formulation of an analytic-numerical algorithm for stability analysis of thin open sections, capable of simulating the loss of cross-section shape of the beam (ovality, local buckling, global-local mixed modes), in the linear and non-linear fields, in the absence or not of local or widespread defects, or material degradation, such as due to fire. The algorithm will overcome some of cumbersome procedures proposed in the literature, in order to improve computational efficiency and especially to get greater conceptual clarity.

B.1.2 - Local instability of laminated shells

Expected results are analytical and numerical models for the analysis of local instability of laminated thin shells and membranes, capable of simulating the formation of wrinkles and possible delamination at positions not known in advance, or at the neighborhood of pre-damage lines (crease). The models will help to design different types of structures, such as continuous glass and cardboard packages.

B.1.3 - Instability of laminated glass panels

It is expected a significant improvement in knowledge of the linear and nonlinear behavior of structural glass towards the phenomenon of instability, which strongly affects the use of the material. The formulated mathematical models, based on experimental results, will clarify the influence of various physical parameters, including the interlayer, on the behavior of the laminate, taking account of imperfections, thermal variations and degradation. The research will therefore have significant technical consequences, in terms of facilitating greater and more conscious distribution of compressed laminated glass in buildings.

B.2.1 - Mathematical models for pedestrian-structure interaction and dynamic response of footbridges

Research products will be mathematical models to assess the dynamic interaction forces that arise in footbridge from groups of pedestrians. The models will make it possible to evaluate the critical number of pedestrians that can trigger the lateral instability of flexible structures and the level of overall dynamic effects. Given that the existing regulations, even the foreign ones, are deficient in this respect, the research work will constitute the basis for the development of recommendations, guidelines and pre-normative documents, which can be used by designers to make more efficient and focused the design, implementation and management of pedestrian infrastructure.

B.2.2 - Dynamics, instability and damage analysis of beams and cables

In this sub-task, very extensive and articulated, the results will be analytical and numerical models for better understanding of a variety of phenomena that affect the dynamic response, dynamic stability and evolution of damage in beam and wires structures. Some models apply to the dynamic and stability of structures.

A first model will analyze the wave propagation in pipelines or railways, e.g. in case of earthquake or explosion, or waves on cables, pipelines and offshore structures. The model will identify which are the most dangerous frequency ranges in terms of stresses and deformations of the structure, particularly at damaged or weakened areas, where wave refraction and reflection is produced.

A second model will examine the dynamics of beams impacting on monolateral constraints, such as those occurring when originally bilateral constraints fail and detach. The instrument, calibrated on experimental investigations, will enrich the knowledge of a phenomenon not yet fully explored, and of current scientific interest. A third model will allow to determine the critical speed of trains of travelling masses on beams, wires or suspended cables, such as road and rail infrastructure, and cable transport systems. The instrument will clarify the role of natural frequencies and speed of transit through the phenomenon of parametric resonance, responsible for dynamic instability.

Other models are dedicated to the analysis of the damage, and how this affects the dynamics of structures.

A fourth model will assess the effect of localized damage on the nonlinear dynamic response of cables, even with temperature variations; it will be aimed at early detection of damage.

A fifth model will simulate the evolution of damage from alkali-aggregate reaction in concrete bridges, taking into account temperature and humidity. The study will produce a finite element code capable of estimating the temporal variation of stiffness of the structure, leading to possible instability.

B.2.3 - Aerodynamic instability of cables and stays, cable nets and airfoils

From this sub-task, which addresses the important question of the analysis of wind-structure interaction, models capable of describing various forms of instability, arising in various types of flexible structures, are expected.

A first analytical model, supported by wind tunnel tests, will analyze the phenomena of linear and nonlinear aeroelastic instability of wires and cables, in case yawed, iced or dry, under steady or turbulent wind, with fixed supports or subject to prescribed motion. The model will improve the knowledge of the galloping phenomenon, which affects the mechanical performance of power transmission lines, cable transport lines, cables in suspension bridges and stayed cables in antennas or bridges.

A second, finite element, model will allow to predict the occurrence of the phenomenon of wrinkling in membranes stiffened by networks of thin beams. The model will permit to determine the equilibrium configuration of the membrane under gravitational forces and dynamic response under forces of interaction with the fluid.

A third model will allow better understanding of the phenomenon of dynamic stall of airfoils, produced by the rear detachment of vortices, and in particular the threshold of flutter and the complex dynamics of the structure

C.1 - Methods and tools for damage detection in thin structures

The research will produce algorithms for non-destructive surveys, validated by laboratory and real-structures tests, aimed at detecting damage in structures (diagnosis), at the formulation of a review of integrity (synthesis), and at the assessment of the residual capacity performance (prognosis). The techniques will use new-generation smart sensors, on board equipped with microprocessors for the partial decentralization of real-time data processing and organized in hierarchically networks for wireless communication, or networks of piezoelectric actuators with optimal (for diagnosis) impedance interconnections.

C.2 - Semi-active control of thin structures through piezoelectric devices

Expected results are analytical models and experimental prototypes of thin plates equipped with distributed piezoelectric transducers, capable of extracting mechanical energy from the structure to electrical dissipation, in order to apply semi-active control for structural and acoustic vibrations. The approach has potential impact in applications such as auto motive.

Further research product will be an advanced mathematical model of electro-mechanical continuum act to describe the behavior of ferroelectric ceramics. This aspect is of considerable technological importance as a prerequisite to achieving massive ceramic elements, suitable to be used as actuators.

C.3 - Structural control through passive elastoplastic dampers subject to instability

Expected result is the design and implementation of a prototype of a new mechanical device consisting of a thin metal panel, made of traditional or innovative material, able to dissipate energy by hysteresis, without suffering from local phenomena of instability in the required operating range. The damper, after being tested, can be used for seismic protection of buildings.

15 - Elementi e criteri proposti per la verifica dei risultati raggiunti

Testo italiano

I risultati conseguiti dalla ricerca saranno disseminati nella comunità scientifica nelle seguenti forme:

- (a) presentazione di comunicazioni a convegni e pubblicazioni su riviste internazionali;
- (b) organizzazione di una giornata di studio;
- (c) attivazione di un sito web;
- (d) redazione di un Sommario Esteso, con illustrazione dei risultati conseguiti.

Tutte le memorie, il workshop, il sito web ed il Sommario Esteso dichiareranno il supporto finanziario alla ricerca concesso dal MIUR. Il conseguimento degli obiettivi del progetto potrà essere verificato dall'esame della produzione scientifica ivi esposta.

Costituiranno ulteriori elementi di verifica:

- (a) l'organizzazione, ad opera dei membri delle UR, di mini-simposi in convegni nazionali ed internazionali sui temi della ricerca;
- (b) i rendiconti delle riunioni interne di lavoro dei membri delle diverse UR, finalizzate a discutere lo stato della ricerca.

PUBBLICAZIONI

Una stima precisa della produzione scientifica attesa è alquanto difficile, in quanto, com'è noto, la ricerca 'curiosity driven' è suscettibile di sviluppi in direzioni non tutte prevedibili a priori. Tuttavia, il dettaglio con cui è stato redatto il presente progetto, e la 'storia scientifica' dei ricercatori coinvolti, rendono attendibile un bilancio previsionale di un lavoro scientifico per ciascuna UR coinvolta in ciascuno dei sub-tasks. Complessivamente, dunque, 30-35 articoli scientifici, la maggior parte dei quali su riviste internazionali. Si propone il raggiungimento di questo obiettivo MINIMO quale primo criterio di verifica dei risultati raggiunti.

GIORNATA DI LAVORO

Si prevede un Workshop pubblico che avrà luogo al termine del progetto, durante il quale si illustreranno i risultati conseguiti dalla ricerca. Il Workshop sarà aperto a tutti i Colleghi della comunità scientifica nazionale e, ad invito, internazionale, che potranno presentare lavori su temi attinenti a quelli del progetto, in modo da stimolare la discussione. La realizzazione della giornata di lavoro, e la partecipazione esterna, potranno essere considerate quali ulteriori elementi di valutazione.

SITO WEB

Si attiverà, a cura di una UR da individuare, un sito web dedicato al progetto, accessibile fin dalla fine del primo semestre, che verrà opportunamente pubblicizzato attraverso le Segreterie Nazionali dei SSD ICAR/08 e ICAR/09. Il sito riporterà: (a) l'architettura del progetto, (b) i compiti delle UR, (c) i risultati al momento conseguiti, con i file pdf delle pubblicazioni prodotte (integrali, o limitate al sommario, in relazione alle norme editoriali). La realizzazione del sito, la sua forma e qualità dei contenuti, costituiranno altri elementi di valutazione.

RAPPORTO SCIENTIFICO

Alla conclusione del progetto, i risultati ottenuti saranno sintetizzati in un sommario esteso che verrà reso disponibile sul sito web del progetto e fatto circolare per posta elettronica tramite gli usuali canali di diffusione delle informazioni scientifiche, propri del nostro ambito disciplinare. Nel sommario verranno riportati anche i riferimenti completi a tutto il materiale scientifico prodotto nell'ambito dell'attività del progetto. Questo rapporto breve costituirà un elemento importante di supporto alla valutazione del raggiungimento degli obiettivi di progetto.

Il coordinatore nazionale, valendosi della collaborazione dei coordinatori locali, si impegna a monitorare lo sviluppo del progetto, facendosene garante, e verificandone in itinere l'aderenza al programma qui presentato.

Testo inglese

The results of the research activity will be disseminated within the scientific community in the following forms:

- (a) presentation of communications in conferences and publications in international journals;
- (b) organizing a workshop;
- (c) activation of a website;

(d) writing an extended summary, with illustration of the results.

All the memories, the workshop, the website and the extended summary will state the financial support granted by MIUR. The objectives of the project can be ascertained from an examination of the scientific production mentioned there.

Additional verification elements will be:

(a) the organization, by members of the UR, of mini-symposia at national and international conferences on the themes of the project;

(b) the report of internal work meetings of members of different UR, aimed to discuss the state of research.

PUBLICATIONS

Precise estimates of the expected scientific production is very difficult because the "curiosity-driven" research is susceptible to developments in all directions, not predictable in advance. However, the detail reached in writing this project and the "scientific history" of the involved researchers, allow to make a reliable estimate of one scientific paper for each UR involved in each sub-tasks. Overall, therefore, 30-35 scientific papers, most of them in international journals, are expected. The achievement of that MINIMUM objective is proposed as a first criterion for verification of results.

WORKSHOP

A public workshop, to be held at the end of the project, where the results of research will be reported, will be organized. The Workshop will be open to all national and, at invitation, international colleagues in the scientific community, who will present papers on topics related to the project in order to stimulate discussion. The realization of the workshop, and external participation, may be regarded as additional factors of evaluation.

WEBSITE

A website will be activated by a UR to be identified; it will be devoted to the project, accessible since the end of the first semester, and suitably publicized through the national secretariat of the SSD ICAR/08 and ICAR/09. The website will give details on: (a) architecture of the project, (b) the functions of UR, (c) the results achieved at the time, with pdf files of publications (full or limited to the summary, in relation to editorial standards). The completion of the website, its form and content quality are other factors of evaluation.

SCIENTIFIC REPORT

At the end of the project, the results will be summarized in an extended summary which will be made available on the project website and spread by electronic mail through the usual channels of scientific information of our own discipline. The summary will also indicate the full references to all scientific material produced according to the project schedule. This short report will constitute an important support to the evaluation of achievement of the project.

The national coordinator, taking advantage of the collaboration of local coordinators, will undertake due actions to monitor the development of the project, becoming its guarantor, and to verify ongoing adherence to the program presented here.

16 - Mesi persona complessivi dedicati al Progetto di Ricerca

		Numero
16.1 Personale dipendente dall'Ateneo/Ente cui afferisce l'Unità di ricerca	a) docenti / ricercatori / tecnologi	17.42
	b) altro personale tecnico	0
16.2 Personale dipendente da altri Atenei/Enti	a) docenti / ricercatori / tecnologi	9.43
	b) altro personale tecnico	0
16.3 Personale non dipendente già acquisito con altri fondi	a) assegnisti	9.24
	b) titolari di borse di dottorato	11.9
	c) titolari di borse di post-dottorato	0
	d) borsisti delle scuole di specializzazione	0
	e) collaboratori coordinati e continuativi	0
	f) co.co.pro	0
	g) borsisti	0
	h) altro	0
16.4 Personale non dipendente da destinare a questo specifico Progetto	a) assegnisti	48
	b) titolari di borse di dottorato	0
	c) titolari di borse di post-dottorato	0
	d) borsisti delle scuole di specializzazione	0
	e) collaboratori coordinati e continuativi	0
	f) co.co.pro	0
	g) borsisti	13
	h) altro	0
TOTALE		108.99

17 - Costo complessivo del Progetto articolato per voci

Responsabile dell'Unità di Ricerca	Finanziamento MIUR	Costo a carico Ateneo / Ente	Costo Complessivo dell'Unità di Ricerca
<i>LUONGO Angelo</i>	60.200	25.800	86.000
<i>PEREGO Umberto</i>	76.131	32.627	108.758
<i>LENCI Stefano</i>	80.150	34.350	114.500
<i>CUOMO Massimo</i>	37.867	16.229	54.096
<i>DELL'ISOLA Francesco</i>	68.612	29.405	98.017
<i>PICCARDO Giuseppe</i>	26.261	11.255	37.516
TOTALE	349.221	149.666	498.887

I dati contenuti nella domanda di finanziamento sono trattati esclusivamente per lo svolgimento delle funzioni istituzionali del MIUR. Incaricato del trattamento è il CINECA- Dipartimento Servizi per il MIUR. La consultazione è altresì riservata al MIUR - D.G. per il Coordinamento e lo Sviluppo della Ricerca -- Ufficio V -- Settore PRIN, alla Commissione di Garanzia e ai referee scientifici. Il MIUR potrà anche procedere alla diffusione dei principali dati economici e scientifici relativi ai progetti finanziati.

Firma _____

Data (dal sistema alla chiusura della domanda)