



Relazione attività svolte durante il dottorato

ANNI ACCADEMICI 2019/2020-2021/2022

Corso di dottorato	Ingegneria Industriale	Ciclo	XXXV
Dottorando/a	Claudio Boni		
Tutor	Prof. Gianni Royer-Carfagni		

Descrizione dell'attività di ricerca

Nel progetto di ricerca principale ho sviluppato una classe innovativa di strutture cinetiche segmentali, che è stata denominata “flexural tensegrity” per denotare il fatto che l'integrità dell'insieme segmentale è garantita da elementi tesi, che conferiscono anche capacità portante alla struttura e ne influenzano la sua risposta costitutiva sotto flessione. Il termine “tensegrity” fu coniato per la prima volta da R. B. Fuller per riferirsi a strutture peculiari la cui *integrità* è fornita da membrature in *tensione*. Nella definizione originale, questi elementi in trazione sono rappresentati da cavi, pretensionati forzandoli contro alcuni puntoni compressi flottanti. Qui, il termine “flexural tensegrity” è usato per rappresentare un concetto complementare, secondo il quale l'*integrità* sotto *flessione* di una catena mobile di segmenti accoppiati è assicurata da cavi *tensionati*. Più in dettaglio, un tale insieme è formato da segmenti pressoché rigidi tenuti insieme dall'azione di legatura di un tirante precompresso che li attraversa, in modo tale che l'integrità e la capacità di sopportare il carico sia fornita sotto flessione. Il punto chiave è che le superfici di contatto di qualsiasi coppia di segmenti consecutivi sono sagomate secondo profili polari opportunamente progettati, in modo tale che sia consentita una rotazione relativa (su scala finita) dei segmenti e che i giunti si aprano macroscopicamente sotto i carichi di servizio.

Il sistema proposto richiama la costruzione segmentale di strutture a trave con cavi post-tesi non legati e conci prefabbricati in calcestruzzo, tipicamente utilizzati per realizzare colonne, archi e ponti. La somiglianza è che la struttura è assemblata a partire da segmenti, che sono tenuti in contatto da cavi incapsulati in condotti all'interno di essi. Esiste comunque una sostanziale differenza con le travi segmentali in cemento armato precompresso. Infatti, i conci in calcestruzzo sono a contatto reciproco lungo superfici approssimativamente piane, e i giunti sono progettati per rimanere serrati (nessuna apertura) almeno nello stato limite di esercizio. Sotto il carico di servizio la deformazione è principalmente dovuta alla matrice in calcestruzzo e i cavi precompressi non vengono sostanzialmente ulteriormente tesi. Di conseguenza la risposta costitutiva è guidata dal calcestruzzo e minimamente influenzata dai cavi. Il caso di flexural tensegrity è diverso e in qualche modo complementare. Qui, l'apertura dei giunti è prevista e progettata su misura per produrre un allungamento specifico dei cavi sotto i carichi di servizio. Lo scopo del post-tensionamento non è quello di indurre una compressione permanente in un materiale quasi fragile come il calcestruzzo, ma piuttosto quello di fornire un contributo rilevante all'energia di deformazione elastica per la struttura, dove i giunti si comportano come cerniere con molla elastica-rotazionale e sono stabilizzate dallo stato di presollecitazione. Quindi si enfatizza la funzione del cavo, che passa da quella di mero elemento di rinforzo a quella di elemento che detta la risposta costitutiva della struttura.



L'apertura dei giunti è ottenuta mediante la sagomatura, opportunamente progettata, delle superfici di contatto secondo profili curvi, in modo tale che una coppia qualsiasi di segmenti consecutivi (supposti rigidi almeno in prima approssimazione) si muova reciprocamente in rotolamento puro lungo i profili polari di progetto. Come conseguenza dell'apertura dei giunti, si ha l'allungamento dei cavi, in misura dettata dalla forma delle superfici di contatto: questo incide sull'energia elastica del sistema e, quindi, ne caratterizza le proprietà costitutive in flessione, in funzione della forma di progetto dei profili di contatto. Poiché ogni cavo è alloggiato in cavità prive di attrito e passa attraverso *tutti* i segmenti (unbonded cable), i giunti risultano essere interconnessi e la risposta dell'assieme risulta essere di tipo *non-locale*. Variando la forma di progetto delle linee polari, la forza di trazione iniziale nei cavi (e la corrispondente rigidità assiale) e il tipo di mobilità consentita a ogni cavo all'interno dei segmenti (dal solo allungamento assiale, a gradi di libertà laterali), è possibile accordare la rigidità flessionale della struttura, e ottenere, almeno in linea di principio, qualsiasi tipo di relazione costitutiva non-lineare, eventualmente non-monotona. Inoltre, un dispositivo di tensionamento attivo potrebbe tirare o rilasciare ad arte il singolo cavo, così da raggiungere diverse configurazioni di equilibrio sotto gli stessi carichi applicati, o controllare le vibrazioni.

Come obiettivo globale, è stata studiata la cinematica e la risposta statica/dinamica di strutture segmentali della classe *flexural tensegrity*, sotto molteplici scenari di carico e per diverse forme dei profili di contatto e vari tipi di mobilità del cavo. In particolare, gli scopi principali della ricerca possono essere elencati come segue.

- Definizione della cinematica di puro rotolamento per il giunto di contatto e progettazione dei relativi dettagli costruttivi, con specifico riferimento ad una eventuale lavorazione/produzione tramite stampa 3D a filamento (FDM), fresatura CNC o colata in stampi.
- Definizione della legge che mette in relazione l'apertura dei giunti con l'allungamento del cavo, data la forma dei profili polari, o, in alternativa, trovare la forma dei profili di contatto per una determinata legge di allungamento del cavo.
- Incrementare i gradi di libertà della mobilità del cavo all'interno dei segmenti (da guaine tubolari a cavità più ampie), per raggiungere relazioni costitutive complesse, anche non-convesse, per i singoli giunti, al fine di ottenere strutture in grado di immagazzinare energia elastica e rilasciarla improvvisamente, mediante instabilità a scatto in conseguenza di perturbazioni localizzate.
- Modellazione della struttura segmentale nel suo insieme, per ogni data risposta costitutiva dei giunti di contatto, facendo uso di un approccio variazionale, al fine di trovare l'insieme di equazioni non-lineari che governano la risposta del sistema strutturale, negli stati di equilibrio sia statici che dinamici.
- Indagine del limite continuo dell'assieme segmentale, con specifico riferimento a strutture segmentali a trave, e confronto con il noto modello dell'elastica di Eulero sotto grandi deformazioni.
- Estensione del concetto strutturale dalla trave unidimensionale ai casi di piastre bidimensionali e assemblaggi segmentali tridimensionali, con un disegno specifico per il giunto di contatto che consente una determinata mobilità 3D.
- Validazione dei modelli teorici e dei risultati analitici, nonché della fattibilità di fabbricazione data la geometria del giunto, con esperimenti su prototipi stampati in 3D o tagliati al laser, testati in condizioni statiche e dinamiche, anche considerando l'interazione fluido-struttura.



- Studio sulle possibili applicazioni di strutture basate sul concetto di flexural tensegrity, spaziando dal tiro con l'arco, alla robotica, dalla propulsione marina tramite code bio-inspirate all'ampio campo dell'architettura cinetica e del design industriale.
- Ulteriori spunti per ricerche future si trovano nella diversa cinematica delle lastre scorrevoli su superfici ondulate (piuttosto che in rotolamento puro lungo profili di polari), che possono trovare applicazione nell'interpretazione del comportamento meccanico di laminati biologici, per i quali un esempio paradigmatico è rappresentato dalla madreperla.

A conclusione del progetto di ricerca, posso asserire che il concetto di flexural tensegrity è stato esplorato in molte forme e gli obiettivi prefissati sono stati raggiunti. Partendo da elementi di tipo trave (segmentale) e andando a modificare la forma dei profili di contatto, si sono ottenute risposte costitutive lineari, sub-lineari o super-lineari. In funzione della rigidità del cavo, si sono ottenute vibrazioni non-lineari simili quelle di un oscillatore alla Duffing; queste possono essere controllate variando la forza assiale nel cavo. Incrementando la mobilità del cavo in cavità via via più grandi, l'energia di flessione è stata resa di tipo non-convesso, ottenendo anche movimenti sequenziali a scatto. Il limite, quando il numero dei segmenti va all'infinito e la loro lunghezza a zero, è risultato corrispondente a un particolare tipo di elastica di Eulero con risposta non-locale, la cui deformata può essere calcolata analiticamente (con integrali ellittici), o numericamente. Applicazioni sul campo, ancora da esplorare completamente, sono state trovate nel tiro con l'arco (un nuovo tipo di arco segmentale e dispiegabile) e nella robotica (arti controllati da cavi interni/esterni). Flexural tensegrities multistabili possono essere utilizzate come costituenti di base per metamateriali con meccanismi 3D, sotto forma di piastre e cubi, e per la propulsione nei fluidi come code flagellanti. Applicazioni, su scala maggiore, nell'ambito dell'architettura cinetica possono essere trovate nella realizzazione di scheletri mobili per tensostrutture, mentre, nel campo del design industriale, il concetto è stato applicato nella realizzazione di una lampada da scrivania. Qui, la forma piegata del braccio può essere modificata variando la forza di tensione nella coppia di cavi di precompressione, che trasportano anche elettricità; il progetto è stato infine sottoposto all'attenzione di un produttore italiano di lampade di design.

Come spunto per la ricerca futura, è stata infine introdotta e studiata in via preliminare una diversa cinematica. Questa corrisponde allo scorrimento di lastre su superfici di contatto ondulate inizialmente corrispondenti (piuttosto che in rotolamento puro lungo profili polari), costituendo così la base per il nuovo concetto di "shear tensegrity". Si è mostrato che il modello può trovare applicazione nell'interpretazione del comportamento meccanico di laminati biologici, simili alla madreperla.

Formazione disciplinare

Attività	Data	ECTS	Voto-Giudizio	Docente
<i>Corsi</i>				
Computational Mechanics	06/04/2020 - 09/06/2020	2	30/30	Alessandro Tasora <i>Università degli Studi di Parma</i>



Dighe e Traverse	25/02/2020 - 04/06/2020	6	30/30	Marco D'Oria <i>Università degli Studi di Parma</i>
Structural Mechanics of Brittle Materials	22/09/2020 - 30/10/2020	3	30/30	Gianni Royer-Carfagni <i>Università degli Studi di Parma</i>
Programmazione e gestione di dati in Python	03/2021 - 04/2021	2	Idoneo	Michele Tomaiuolo <i>Università degli Studi di Parma</i>
Design and optimization of shells and spatial structures	05/2021 - 06/2021	4	Idoneo	Amedeo Manuello Bertetto <i>Politecnico di Torino</i> Stefano Gabriele <i>Università Roma Tre</i> Francesco Marmo <i>Università di Napoli Federico II</i> Andrea Micheletti <i>Università Roma Tor Vergata</i>
Analytical modelling of sandwich and layered composites	06/05/2022 - 20/05/2022	2	Idoneo	Laura Galuppi <i>Università degli Studi di Parma</i>

Workshops

IWSS 2020 – 1 st Italian Workshop on Shell and Spatial Structures	25/06/2020 - 26/06/2020	2		
Congresso Nazionale AIMETA 2022 – Palermo	04/09/2022 - 08/09/2022	3		

Seminari

Gap Test Consequences for Quasibrittle Fracture Mechanics, Scaling and HRR Theory of Metal Fracture	23/03/2021			Zdenek P. Bažant <i>Northwestern University</i>
Designing with laminated glass: recent advances in engineering methods	28/04/2021			Stephen Bennison (moderator) <i>Kuraray America, Inc.</i>
MechE Colloquium – Coupling rheology and segregation in granular flows	28/09/2021			Prof. Nico Gray <i>University of Manchester</i>



MechE Colloquium – The hydrodynamics of propulsion in rowing	05/10/2021			Prof. Jerry Westerweel <i>TU Delft</i>
MechE Colloquium – Stability and body mechanics during swimming in fish	12/10/2021			Prof. Eric Tytell <i>Tufts University</i>
MEGA Seminar: Talk 1 - The dynamic stall dilemma for vertical-axis wind turbines Talk 2 - Mobile robots' navigation in dense crowds and how to measure their performance	04/11/2021			Sébastien Le Fouest <i>UNFoLD - École Polytechnique Fédérale de Lausanne</i> David Julian Gonon <i>LASA - École Polytechnique Fédérale de Lausanne</i>
The art of structural tile (L'arte delle volte in foglio)	08/11/2021			John Ochsendorf <i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MEGA Seminar: Fluid physics driven bio-inspired robots	18/11/2021			Qiang Zhong <i>University of Virginia</i>
MEGA Seminar: Talk 1 - Why do surgeons sleep better with plasticity in their knots? Talk 2 - Snap buckling of bi-stable beams under magnetic actuation	02/12/2021			Paul Johanns <i>fleXLab - École Polytechnique Fédérale de Lausanne</i> Arefeh Abbasi <i>fleXLab - École Polytechnique Fédérale de Lausanne</i>
Stability of giant wind turbines: methods and perspectives	29/06/2022			Peng Chao <i>Università degli Studi di Parma</i>

Formazione interdisciplinare

Attività	Data	ECTS	Voto-Giudizio	Docente
<i>Corsi</i>				
Introduzione ai metodi e agli strumenti della ricerca scientifica (corso SDIA)	28/11/2019 - 30/04/2020	4	Idoneo	Organizzatore: Università di Parma, Dipartimento di Ingegneria e Architettura



Percorso Formativo PF24 per l'Anno Accademico 2020/2021	21/09/2020 - 07/04/2021	24	Antropologia culturale: 24/30 Elementi di pedagogia, pedagogia speciale e didattica dell'inclusione nella scuola secondaria: 21/30 Psicologia sociale: 24/30 Metodologie e tecnologie didattiche: 27/30	<u>Organizzatore:</u> Università di Parma, Dipartimento di Discipline Umanistiche, Sociali e delle Imprese Culturali
---	-------------------------------	----	--	--

Altri progetti di ricerca

Attività	Data	Luogo
<u>DPC/ReLuis</u> : partecipazione al progetto 2019/2021 dal titolo <i>WP5: Interventi di rapida esecuzione a basso impatto integrati</i> , tramite l'esecuzione di simulazioni ad elementi discreti sul comportamento sismico di strutture in muratura con e senza interventi di rinforzo basati sull'inserimento di diaframmi in vetro cerchiato da acciaio nei fornicati di archi di colonnati.	01/11/2020 - 31/01/2022	Università degli Studi di Parma <i>Dipartimento di Ingegneria e Architettura</i>
<u>Convenzione tra Società Aero-rossa S.r.l. e Università di Parma</u> : calcolo delle sollecitazioni alla base del fusto della turbina eolica RAD 02 nel parco eolico di Raddusa (CT) al fine di valutarne la stabilità in conseguenza ai cedimenti fondali.	06/04/2020 - 21/12/2020	Università degli Studi di Parma <i>Dipartimento di Ingegneria e Architettura</i>

Altre attività

Attività di supporto al corso "Scienza delle Costruzioni" tenuto dal prof. Gianni Royer-Carfagni: supervisione degli studenti durante le prove scritte e assistenza durante le prove orali.
Attività di supporto al corso "Ponti" tenuto dal prof. Gianni Royer-Carfagni fino al 2021: supervisione degli studenti e assistenza durante le prove orali.
Attività di supporto alla didattica del corso "Elementi di Progettazione Strutturale per l'Industria" tenuto da Laura Galuppi: svolgimento alla lavagna di esercitazioni aggiuntive in aula.
Contributo alla redazione del materiale per la partecipazione al bando di concorso del progetto PRIN 2020, con il titolo <i>Glass "in" and "for" the Italian Cultural Heritage (GICH): where the past meets the future.</i>
Contributo alla redazione del materiale per la partecipazione al bando di concorso del progetto PRIN 2022, con il titolo <i>Glass to preserve the Italian Cultural Heritage (GICH) of archeological sites.</i>



Risultati

Boni, C., & Royer-Carfagni, G. (2022). Simple cubic flexural-tensegrity lattices. <i>In preparation</i> .
Boni, C., & Royer-Carfagni, G. (2022). Flexural tensegrity: field applications. <i>AIMETA 2022 Conference Proceedings, Materials Research Forum LLC</i> .
Boni, C., & Royer-Carfagni, G. (2022). Transparent glass bracing to improve the seismic capacity of historic buildings with colonnades. <i>Engineering structures – Submitted for publication</i> .
Boni, C., Reis, P.M., & Royer-Carfagni, G. (2022). Flexural-tensegrity snapping tails for bio-inspired propulsion in fluids. <i>Extreme Mechanics Letters</i> , 101853.
Ballarini, R., Boni, C., & Carfagni, G. R. (2022). Geometry of sliding lamellae dictates the constitutive properties of nacre-like hierarchical materials. <i>Journal of the Mechanics and Physics of Solids</i> , 105000.
Boni, C., & Royer-Carfagni, G. (2022). Energy harnessing in the snap-through motion of a flexural-tensegrity flagellum. <i>Mechanism and Machine Theory</i> , 173, 104845.
Boni, C., & Royer-Carfagni, G. (2021). A new flexural-tensegrity bow. <i>Mechanism and Machine Theory</i> , 164, 104698.
Boni, C., & Royer-Carfagni, G. (2021). Equilibrium of bi-stable flexural-tensegrity segmental beams. <i>Journal of the Mechanics and Physics of Solids</i> , 152, 104411.
Boni, C., & Royer-Carfagni, G. (2021). Nonlinear effects in the vibrations of flexural tensegrity beams. <i>International Journal of Non-Linear Mechanics</i> , 128, 103616.
Boni, C., & Royer-Carfagni, G. (2021). A nonlocal elastica inspired by flexural tensegrity. <i>International Journal of Engineering Science</i> , 158, 103421.
Boni, C., Silvestri, M., & Royer-Carfagni, G. (2020). Flexural tensegrity of segmental beams. <i>Proceedings of the Royal Society A</i> , 476(2237), 20200062.

Data, 20/10/2022

Claudio Boni

(firma dottorando/a)

G. Royer-Carfagni
(firma supervisore)

PER PRESA VISIONE IL COORDINATORE:

G. Royer-Carfagni