

SHORT TERM MOBILITY PROGRAM 2017

ISTI-CNR, PISA

UNIVERSIDADE DO MINHO - SCHOOL OF ENGINEERING

Department of Civil Engineering & Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE)

7 – 28 Gennaio 2018

Relazione del progetto

Models, methods and tools for the structural analysis of ancient masonry constructions

Forma oggetto della presente relazione l'attività svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e l'Istituto per la Sostenibilità e l'Innovazione nell'Ingegneria Strutturale (ISISE) dell'Università del Minho dal 07/01/2018 al 28/01/2018, nell'ambito del programma di ricerca Short-Term Mobility del CNR denominato "Models, methods and tools for the structural analysis of ancient masonry constructions". Scopo del progetto è migliorare la modellazione del comportamento strutturale degli edifici storici in muratura attraverso il codice agli elementi finiti NOSA-ITACA sviluppato dal Laboratorio di Meccanica dei Materiali e Strutture (MMS Lab) dell'ISTI-CNR. I risultati ottenuti tramite NOSA-ITACA sono stati confrontati con quelli ottenuti tramite gli strumenti numerici messi a disposizione dell'istituto ospitante.

La possibilità di avere a disposizione uno strumento numerico potente e affidabile in grado di supportare le attività di salvaguardia e rafforzamento degli edifici storici in muratura è fondamentale per garantirne la conservazione. Gli effetti potenzialmente disastrosi di gravi eventi sismici ci insegnano inoltre l'importanza di valutare la vulnerabilità sismica degli edifici; sono quindi necessari modelli matematici e strumenti numerici in grado di descrivere realisticamente il comportamento delle strutture in muratura la cui risposta a trazione è profondamente diversa da quella in compressione. Il codice NOSA-ITACA [1] (www.nosaitaca.it) è stato sviluppato da MMS lab, per studiare il comportamento strutturale degli edifici storici in muratura. All'interno del software è implementata l'equazione costitutiva dei materiali masonry-like (noti anche come materiali no-tension) attraverso la quale la muratura è modellata come un materiale isotropo elastico non lineare con debole o nulla resistenza a trazione e resistenza a compressione limitata o illimitata [2], [3], [4]; in questo modo è possibile tener conto degli effetti del cracking sul comportamento statico e dinamico delle costruzioni antiche. Il codice può essere impiegato per effettuare simulazioni statiche e dinamiche non lineari e analisi modali. In particolare, una nuova procedura numerica implementata in NOSA-ITACA permette di calcolare le frequenze naturali e le forme modali degli edifici in muratura tenendo conto del campo di tensione e della presenza di fratture dovute a carichi meccanici e termici [5], [6], [7], [8], [9].

Il dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università del Minho impiega per effettuare analisi statiche e dinamiche non lineari di strutture in muratura, il programma commerciale agli elementi finiti

DIANA 10.2 [10] all'interno del quale la muratura può essere modellata attraverso un'equazione costitutiva basata sui "Total Strain based crack models". Tali modelli basati sulla deformazione totale e sviluppati sulla base dell'approccio "Modified Compression Field Theory" proposto originariamente da Vecchio e Collins [11], seguono uno "smeared approach" per l'energia di frattura. L'estensione al caso tridimensionale di questa teoria è stata proposta da Selby & Vecchio in [12] e seguita durante l'implementazione del codice DIANA. Il software DIANA contempla al suo interno la possibilità di effettuare analisi modali (ovvero risolvere un problema agli autovalori generalizzato) sostituendo al posto della matrice di rigidezza elastica la matrice di rigidezza tangente e quindi considerare la presenza di fratture all'interno del materiale nella determinazione delle frequenze naturali di vibrazione della struttura. Al fine di confrontare i risultati prodotti dai due codici di calcolo (che implementano quindi una procedura analoga), sono state eseguite analisi parametriche della risposta dinamica, in termini di frequenza e dei modi vibrare, di due strutture quali rispettivamente: un arco ribassato in muratura di luce 1.9 m, spessore di 0.16 cm incastrato agli estremi e soggetto al peso proprio e ad un carico concentrato di intensità crescente posto in corrispondenza di una delle due "reni"; la Torre delle Ore a Lucca [5], struttura completamente in muratura attualmente oggetto di un monitoraggio a lungo termine delle vibrazioni (progetto "TITANIO - Sensori innovaTivi per il moniTorAggio del patrimoNIO architettonico" condotto dal nostro laboratorio, attualmente in corso). In entrambi i casi la muratura è stata modellata con un comportamento non lineare, rispettivamente: con l'equazione costitutiva dei materiali no tension nel caso del codice NOSA-ITACA, e con il modello costitutivo basato sui "Total Strain based crack models" implementato in DIANA impiegando un comportamento in compressione elastico e un comportamento a trazione caratterizzato da una funzione di softening esponenziale o costante. Per valori diversi di resistenza a trazione della muratura e al crescere del carico applicato alla struttura, è stata valutata la risposta strutturale dei due esempi comparando le frequenze e le forme modali. Lo studio ancora in fase embrionale, ha consentito di stabilire che al di sopra di un certo valore di soglia della resistenza a trazione del materiale, le risposte fornite dai due codici sono paragonabili, mentre per valori molto piccoli della resistenza a trazione, i due codici forniscono risultati diversi e gli aspetti del problema devono essere ancora approfonditi. La ricerca è attualmente in corso e il programma STM ha consentito al nostro laboratorio di stabilire una collaborazione con l'Università del Minho la quale metterà a disposizione un caso studio reale su cui effettuare le stesse analisi e fare dei confronti che saranno poi oggetto di future pubblicazioni.

Durante il soggiorno a Guimaraes in data 16/01/2018, ho partecipato inoltre al seminario organizzato dal Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Minho "Effects of the September 2017 earthquakes in Mexico – Lessons and Challenges" tenuto da Gustavo Ayala Research Professor, Istituto di Ingegneria UNAM, Messico.

Bibliografia

- [1] Binante, V, Girardi, M, Padovani, C, Pellegrini, D, Porcelli, M, Robol, L. NOSA-ITACA 1.1, www.nosaitaca.it/software (2017, accessed 15 March 2017).
- [2] Del Piero G. Constitutive equations and compatibility of external loads for linear elastic masonry-like materials. *Meccanica* 1989; 24:150–162.
- [3] Di Pasquale S. New trends in the analysis of masonry structures. *Meccanica*, 1992. 27:173–184.

- [4] Lucchesi M, Padovani C, Pasquinelli G, Zani N. *Masonry constructions: mechanical models and numerical applications 2008*; Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Springer-Verlag.
- [5] D. Pellegrini, M. Girardi, C. Padovani, and R. M. Azzara, “A new numerical procedure for assessing the dynamic behaviour of ancient of ancient masonry towers” COMPDYN 2017, 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.) Rhodes Island, Greece, 15–17 June, 2017.
- [6] M. Girardi, C. Padovani, and D. Pellegrini, “Effects of the stress field on the dynamic properties of masonry bell towers”, XXIII Congresso Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata AIMETA 2017, Salerno 4-7 September 2017.
- [7] Azzara, R. M., De Roeck, G., Girardi, M., Padovani, C., Pellegrini, D., & Reynders, E. (2018). “The influence of environmental parameters on the dynamic behaviour of the San Frediano bell tower in Lucca”. *Engineering Structures*, 156, 175-187. doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.045.
- [8] R. M. Azzara., A. De Falco, M. Girardi, D. Pellegrini, “Ambient vibration recording on the Maddalena Bridge in Borgo a Mozzano (Italy): data analysis.”. *Annals of Geophysics*, 60, 4, 2017, S0441, doi: 10.4401/ag-7159.
- [9] Girardi M., Padovani C, Pellegrini D., “Modal analysis of masonry structures” accettato per la pubblicazione in *Mathematics and Mechanics of Solids Journal*. doi: 10.1177/1081286517751837
- [10] DIANA - Finite Element Analysis. User's Manual release 10.2. Release Notes. Edited by: Jonna Manie. Published by: DIANA FEA BV Delftechpark 19a, 2628 XJ Delft, The Netherlands.
- [11] Vecchio, F. J., and Collins, M. P. “The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear”. *ACI Journal* 83, 22 (1986), 219-231.
- [12] Selby, R. G., and Vecchio, F. J. “Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete”. Tech. Rep. 93-02, Univ. Toronto, dept. Civil Eng., Toronto, Canada, 1993.

Dott. Daniele Pellegrini (Proponente e fruitore)

Daniele Pellegrini