

## **Modellazione numerica di strategie di miglioramento strutturale di ponti ad arco in muratura mediante il Metodo a Macro-Elementi Discreti**

### *Introduzione*

La relazione presenta alcune simulazioni numeriche di un ponte ad arco in muratura sito in località Maletto (CT), appartenente alla rete ferroviaria Circumetnea, e le cui fondazioni poggiano su un terreno in frana. Le analisi numeriche sono orientate alla valutazione dell'efficacia degli interventi eseguiti negli anni '80 che si sono resi necessari a seguito dell'insorgere di un importante quadro fessurativo, e indagano sia le condizioni operative del ponte, che quelle sismiche.

### *Testo*

Mentre per strutture in muratura ordinaria esistono diverse strategie di modellazione semplificata in alternativa ad approcci rigorosi (elementi finiti nonlineari), per quelle a geometria complessa come quelle a geometria curva, il metodo agli elementi finiti nonlineari è una scelta spesso obbligata. Il Metodo a Macro-Elementi Discreti (DMEM), inizialmente introdotto per la modellazione nonlineare di pareti murarie nel piano [1] e fuori piano [2], e successivamente esteso a ulteriori tipologie costruttive anche a geometria curva [3], rappresenta una efficace alternativa ai metodi rigorosi che ha il significativo vantaggio di essere una strategia computazionalmente parsimoniosa. Tale vantaggio risiede nell'introduzione di un modello meccanico equivalente, a cui viene attribuito un numero di gradi libertà essenziale (7 nella versione tridimensionale), in grado di simulare i principali meccanismi di collasso di un pannello murario. La versatilità geometrica di questa strategia di modellazione è stata sfruttata anche per la simulazione del comportamento nonlineare di ponti ad arco in muratura [4]. Una sintesi dell'evoluzione di questa strategia di modellazione può essere trovata in [5]. Recentemente, questo approccio di modellazione è stato ulteriormente esteso con l'introduzione di un elemento di rinforzo [6] in grado di simulare l'effetto di intonaci fibro-rinforzati applicati su superfici murarie.

Nella relazione, dopo una panoramica della modellazione a Macro-Elementi Discreti e la presentazione di alcune simulazioni di prove sperimentali di archi in muratura rinforzati con GFRP, viene introdotto il caso di studio relativo a un ponte ferroviario a 4 campate sito a Maletto di proprietà di FCE (Ferrovia CircumEtnea). Il ponte è stato recentemente oggetto di una convenzione di ricerca tra FCE e Università di Catania (resp. scientifico prof. Ivo Calì), è caratterizzato da una geometria complessa in quanto in curva e soggetto ad una pendenza longitudinale, e si trova su un'area in frana. A seguito dei movimenti franosi, che hanno comportato il cedimento della pila centrale, nel 1984 il ponte è stato oggetto di un intervento strutturale orientato al consolidamento del ponte che esibiva un importante quadro fessurativo alle reni delle arcate. L'intervento è consistito nell'allargamento delle fondazioni e nell'inserimento di uno strato di calcestruzzo all'intradosso delle arcate gettato su casseforme a perdere costituite da lamiera grecata in acciaio.

Il ponte è stato oggetto di un'estesa campagna di indagine nell'ambito della collaborazione tra FCE e Università di Catania, sulla base della quale sono stati condotti alcuni studi di dettaglio [7-9], i cui risultati sono riassunti nella relazione, considerando le configurazioni pre- e post-intervento.

In particolare, lo studio della configurazione pre-intervento ha riguardato l'interpretazione del quadro fessurativo osservato negli anni '80 alla luce del cedimento della pila centrale. È stata valutata la capacità residua del ponte nei confronti dei carichi di servizio per diversi valori dell'intensità del cedimento e posizione del locomotore. Da questa prima indagine è stato evidenziato che la sicurezza del ponte nei confronti dei carichi di servizio subisce modeste riduzioni per scenari di carico in cui il locomotore non insiste su nessuna delle due campate adiacenti la pila che subisce cedimento, mentre

si osserva una considerevole riduzione di resistenza e capacità di spostamento se il locomotore è prossimo alla pila che subisce cedimento, e tali riduzioni sono sensibili all'entità del cedimento.

La modellazione della configurazione post-intervento è stata realizzata considerando degli elementi aggiuntivi per simulare l'allargamento delle fondazioni e inserendo un layer all'intradosso delle arcate; in entrambi i casi sono state attribuite le proprietà meccaniche del calcestruzzo impiegato. La lamiera grecata usata come cassaforma a perdere è stata modellata con l'elemento di rinforzo a spessore nullo. Le simulazioni in tale configurazione mostrano un notevole incremento della sicurezza nei confronti delle azioni verticali.

Sono state inoltre confrontate le due configurazioni considerando uno scenario di carico di tipo sismico. L'intervento di miglioramento strutturale si è dimostrato efficace anche nei confronti delle azioni orizzontali come evidenziato dalle analisi push-over eseguite. In particolare, per ciascuna configurazione sono state eseguite due analisi considerando una distribuzione di forze proporzionale alle masse, in direzione trasversale e considerando entrambi versi. Gli interventi strutturali hanno evidenziato un incremento considerevole di resistenza e duttilità; inoltre, tutte le analisi hanno mostrato un effetto arco globale del ponte, sulla base del quale il verso di carico che mobilita una maggiore resistenza del ponte è quello nella direzione interna del ponte.

[1] Calìo, I., M. Marletta, and B. Pantò. 2012. A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings *Engineering Structures* 40:327–338. doi:10.1016/j.engstruct.2012.02.039.

[2] Pantò, B., F. Cannizzaro, I. Calìo, and P. B. Lourenço. 2017. Numerical and experimental validation of a 3D macro-model for the in-plane and out-of-plane behaviour of unreinforced masonry walls. *International Journal of Architectural Heritage* 11 (7): 946–964. doi:10.1080/15583058.2017.1325539.

[3] Cannizzaro, F., B. Pantò, S. Caddemi, and I. Calìo. 2018. A discrete macro-element method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches. *Engineering Structures* 168 :243–256 doi:10.1016/j.engstruct.2018.04.006.

[4] Caddemi, S., Calìo, I., Cannizzaro, F., D'Urso, D., Pantò, B., Rapticavoli, D., Occhipinti, G. 2019. 3D discrete macro-modelling approach for masonry arch bridges. *IABSE Symposium, Guimaraes 2019: Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management - Report*, pp. 1825 – 1835.

[5] Caddemi, S., Calìo, I., Cannizzaro, F., Pantò, B., Rapticavoli, D. 2019. Discrete macroelement modeling. In: *Numerical modeling of masonry and historical structures: from theory to application*. by: Bahman Ghiassi, Gabriele Milani (Elsevier). ISBN: 978-0-08-102439-3 (print) ISBN: 978-0-08-102440-9 (online). doi: 10.1016/C2017-0-01579-3.

[6] Cannizzaro, F., Pantò, B., Caddemi, S., Calìo, I. 2023. Discrete modelling of externally bonded composite layers on masonry structures. *Composite Structures*, 116937, DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116937.

[7] Rapticavoli, D., Cannizzaro, F., Caddemi, S., Calìo, I. 2023. Discrete Macro-Element structural assessment of a railway masonry arch bridge subjected to pier settlements. *8th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering IALCCE 2023, Milan, Italy, July 2-6 2023*.

[8] Rapticavoli, D., Cannizzaro, F., Falco, M., Fiore, S., Papa, M., Caddemi, S., Calìo, I. 2024. Structural Assessment of a Masonry Arch Bridge before and after a traditional inner arch retrofitting technique. *II Fabre Conference – Existing bridges, viaducts and tunnels: research, innovation and applications*

(FABRE24) Genoa 12-15 February 2024. Procedia Structural Integrity 62, 476–483, doi: 10.1016/j.prostr.2024.09.068.

[9] Pappalardo, G., Calì, D., Cavallaro, L., Musca, A., Rapicavoli, D., Cannizzaro, F., Calì, I. 2024. Multi-hazard assessment of a masonry railway bridge in landslide areas. II Fabre Conference – Existing bridges, viaducts and tunnels: research, innovation and applications (FABRE24) Genoa 12-15 February 2024. Procedia Structural Integrity 62, 460–467, doi: 10.1016/j.prostr.2024.09.066.