

MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE FEM DI PONTI AD ARCO IN MURATURA *

Valentina SALOMONI **

* Ricerca condotta dal Dipartimento di Costruzioni e Trasporti della Facoltà di Ingegneria, Università di Padova, in collaborazione con il Dublin University College (Eire) e la Pennsylvania State University (USA)

** Ingegnere Civile Strutture; Dottorato di Ricerca in “Meccanica delle Strutture”; Post-Dottorato di Ricerca; Professore Aggregato di “Dinamica delle Strutture” e già Professore Aggregato di “Meccanica dei Solidi” presso la Facoltà di Ingegneria dell’Università di Padova

SOMMARIO

La simulazione della risposta di ponti ad arco in muratura ai carichi da traffico veicolare presenta numerose, differenziate difficoltà. Queste includono la modellazione dei blocchi di muratura, della malta, del materiale di riempimento, dell’interazione fra ciascuno di questi elementi, nonché delle potenziali non-linearità del materiale e della conseguente risposta strutturale. Si discute in questa sede sulle metodologie adottate al fine di rispondere alle presenti problematiche, utilizzando tecniche di modellazione FEM tridimensionale non-lineare nel contesto dei ponti ad arco in muratura, tipici nel panorama dei ponti ad arco irlandesi. Per i ponti qui considerati, i modelli includono rappresentazioni tridimensionali dell’arco, dei timpani di volta, del materiale di riempimento e degli strati di terreno circostanti. Specifici modelli non-lineari sono utilizzati per la simulazione del comportamento di muratura, riempimento al di sopra dell’arco e terreno adiacente, mentre l’interfaccia fra muratura e riempimento è definita come superficie di contatto ad attrito in modo da consentire lo scorrimento od il movimento relativo del materiale detto rispetto all’arco ed ai timpani di volta. I modelli discussi sono utilizzati per studiare il passaggio di autoarticolati su diverse strutture da ponte, attraverso una serie sequenziale di passi di carico statici e successivamente la risposta del ponte misurata in situ è confrontata con quella numerica al fine di verificare l’appropriatezza delle assunzioni fatte.

INTRODUZIONE

Il *Greenfields Bridge* a Ballincolig presso Cork, Irlanda (Figura 1) ed il *Queen’s Bridge* a Belfast, Irlanda del Nord –UK- (Figura 2) sono ponti ad arco (semplice e multiplo, rispettivamente) con struttura portante in pietra-muratura e materiale di riempimento di tipo grossolano (terreno di riporto di varia natura). L’Irlanda ed il Regno Unito vedono infatti, dispersi nel territorio, numerosi esempi di strutture da ponte, quali quelle qui indagate, realizzate nel 18^o-19^o secolo e progettate quindi per sostenere carichi da traffico veicolare sensibilmente più bassi di quelli odierni.



Figura 1



Figura 2

La difficoltà di definire le capacità di dette strutture a sostenere i moderni carichi stradali, viste soprattutto le richieste dei nuovi regolamenti per il passaggio di veicoli sempre più larghi, ha condotto a sviluppare tecniche di analisi da utilizzarsi per modellare la risposta, nonché stimare la portanza, di ponti di questa tipologia. Ad oggi non esiste un metodo comunemente accettato per stimare in modo attendibile le capacità di un’ampia tipologia di ponti ad arco in muratura.

I ponti ad arco in pietra sono sistemi il cui comportamento strutturale è determinato dal materiale composito malta-muratura, dal materiale di riempimento in essi contenuto e dall’interazione fra questi elementi ed il terreno circostante. Quindi la simulazione matematico-numerica della risposta a carichi ultimi e di servizio risulta complessa e richiede di dover considerare la possibilità del generarsi di fessure nella struttura ad arco, di una risposta plastica del materiale di riempimento e del trasferimento delle tensioni da compressione e da attrito tra l’arco in muratura ed il materiale di riempimento.

DETTAGLI DEI TESTS DI CARICO

Lo schema di carico in condizioni di servizio per Greenfields e Queen's Bridge è illustrato nelle Figura 3 e Figura 4, rispettivamente: nel primo caso le simulazioni hanno anticipato la sperimentazione [1, 2], mentre nel secondo si è potuto usufruire dei risultati di trasduttori di spostamento posti a strumentare il penultimo arco sulla banchina nord del fiume Lagan, attraversante la città di Belfast [3]. Per il ponte a Ballincolig si è previsto di giungere anche in condizione di carico ultima, situazione realizzatasi sperimentalmente attraverso il posizionamento di un blocco di cemento agganciato ad un telaio in acciaio agente a contrasto sul piano stradale: una serie di *strain gauges* è stata disposta a monitoraggio dell'arco.

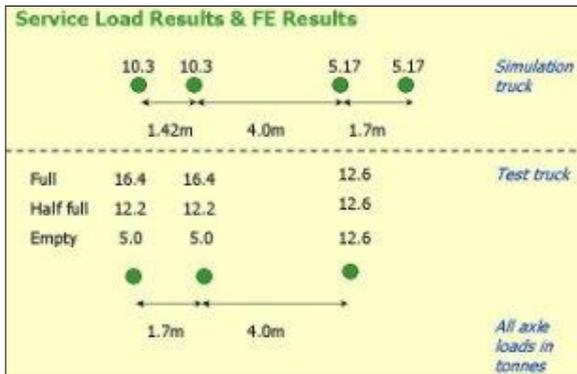


Figura 3

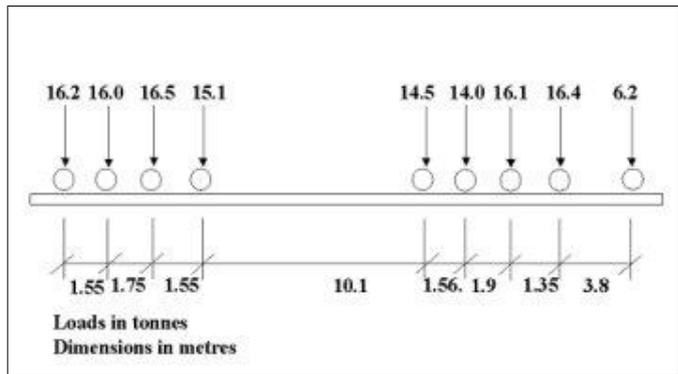


Figura 4

ANALISI NUMERICHE

La geometria ed il profilo della curvatura dei ponti in oggetto sono state determinate attraverso rilievi fotografici e/o disegni di progetto (per Queen's Bridge); si è assunto che il materiale di riempimento fosse distribuito uniformemente in profondità e lo spessore delle volte pari a quello dei blocchi di facciata. Una serie di incertezze ancora presenti per Queen's Bridge ha condotto a realizzare opportune analisi di sensitività, variando dati geometrici e del materiale (per approfondimenti, si veda [3]).

Elementi finiti tridimensionali isoparametrici, ad 8 nodi (SOLID65) sono stati utilizzati per modellare il continuo in muratura/malta, includendo i supporti a contrafforte [4] (Figura 5 discretizzazione FE per Greenfields Bridge e Figura 6 discretizzazione FE per Queen's Bridge). Al di sopra della volta ad arco e contenuti all'interno dei timpani di volta si sono disposti elementi solidi tridimensionali a modellare il materiale di riempimento (SOLID45). Al fine di consentire lo scorrimento od il movimento relativo fra questi e la muratura, senza generare tensioni di trazione all'interfaccia, sono stati incluse superfici curve di contatto tridimensionali ad attrito. Il movimento dei carichi di servizio sul piano stradale è stato simulato attraverso appropriate forze nodali applicate a detto piano o attraverso elementi solidi di densità opportuna e collegati al medesimo piano a contatto senza attrito. Gli elementi SOLID65 simulano la fessurazione nelle zone a trazione attraverso un modello a fessurazione diffusa (*smearred crack*) ed utilizzano un algoritmo plastico che consente lo schiacciamento per compressione, secondo [5].

Il materiale di riempimento, generalmente una terra od un materiale grossolano, è stato modellato utilizzando una legge del tipo Drucker-Prager. Le proprietà dei materiali, omesse in questa sede per brevità, sono state scelte in accordo con quanto esposto in [6].

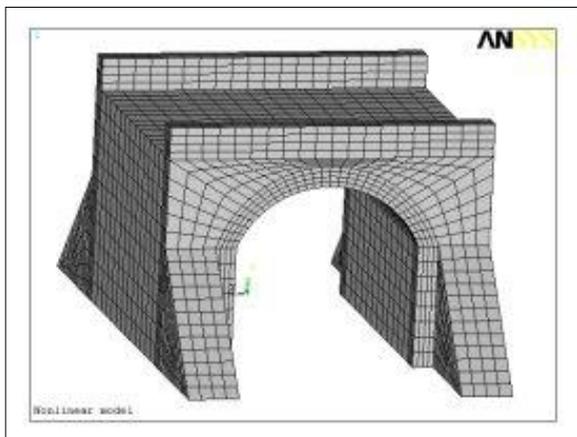


Figura 5



Figura 6

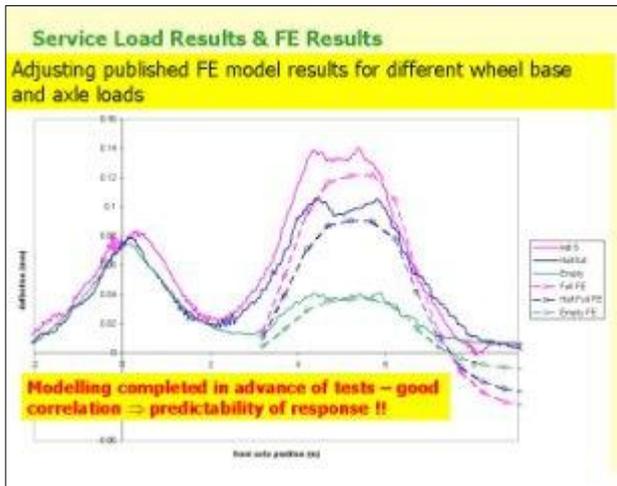


Figura 7

I risultati numerici derivanti dalle analisi di carico di servizio (per Greenfields e Queens' Bridge) e di carico ultimo (solo per Greenfields) sono riportati nella Figura 7, Figura 8 e Figura 9, rispettivamente: seppure la costruzione e successiva elaborazione dei modelli numerici sia caratterizzata da una serie di difficoltà essenzialmente legata ad incertezze sui materiali da costruzione e sulla stessa geometria delle strutture in esame, si evidenzia come uno strumento di calcolo tridimensionale opportunamente tarato sia in grado di predire adeguatamente il comportamento strutturale in varie situazioni di carico.

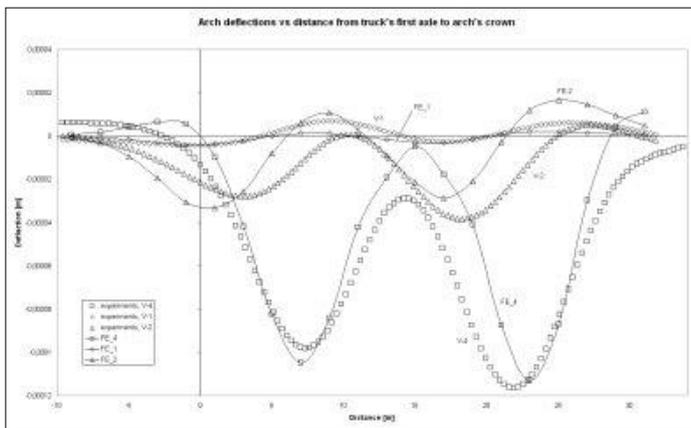


Figura 8

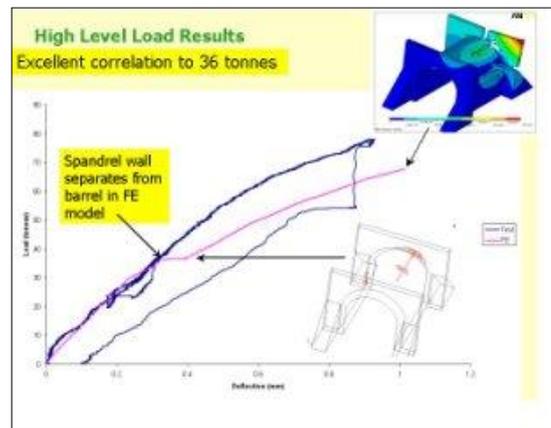


Figura 9

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Fanning P.J., Salomoni V., Boothby T.E.: *Ultimate and Service Load Simulations of a Masonry Arch Bridge Scheduled for Controlled Demolition*, II Int. Structural Engng. and Construction Conference, ISEC-02, Rome, Italy, sept. 23-26 (2003).
- [2] Fanning P.J., Sobczak L., Boothby T.E., Salomoni V.: *Load testing and model simulation for a stone arch bridge*, Journal of Bridge Structures (2006) (to appear).
- [3] Fanning P.J., Salomoni V., Sloan D.T.: *Nonlinear Modelling of a Multi-Span Arch Bridge Under Service Load Conditions*, Structural Faults & Repairs 2003, London, July 1-3 (2003).
- [4] ANSYS (v 6.1), *ANSYS Manual Set*, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA (2000).
- [5] Willam K.J. & Warnke, E.D.: *Constitutive Model for the Triaxial Behaviour of Concrete*, Colloq. Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, ISMES, Bergamo, May 17-18, 1974, publ. In Proc. IABSE Report 19, Zurich, III-I, 1-30 (1975).
- [6] Fanning P.J., Boothby T.E.: *Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges*, Computers and Structures, 79, 2645-2662 (2001).