



PONTI STRADALI AD ARCO IN MURATURA

VERIFICHE DI SICUREZZA MEDIANTE L'APPROCCIO PARAMETRICO PER MACRO-ELEMENTI

PREMESSA

Le Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti. C.S.LL.PP. n.88/2019 del 17 aprile 2020, aprono un nuovo capitolo sulle procedure di verifica e le attività di monitoraggio dei ponti stradali esistenti, che vedrà impegnate le amministrazioni, gli enti gestori e i professionisti ad intraprendere azioni per il miglioramento del nostro patrimonio infrastrutturale.

Il testo della norma prevede inizialmente un censimento dei ponti esistenti finalizzato alla sorveglianza ed al monitoraggio per poi eseguire una classificazione del rischio rispetto alla quale si perviene, mediante un approccio multilivello, alle verifiche di sicurezza dell'opera. Queste ultime consistono, nei casi previsti dalle Linee Guida, nella realizzazione di un modello di calcolo non lineare capace di simulare la risposta della struttura soggetta a scenari di carico previsti.

In particolare si introducono le verifiche di transitabilità e di operatività da eseguire nei casi in cui non siano soddisfatte le verifiche ai sensi del cap. 5 delle NTC2018. Nel caso dei ponti ad arco in muratura è richiesta una modellazione tridimensionale accurata al fine di analizzare la risposta non lineare globale e gli effetti locali, come quelli causati da qua-dri fessurativi o dall'eccentricità dei carichi viaggianti.

Stante l'elevato numero di ponti da monitorare è auspicabile poter utilizzare procedure di modellazione speditive per l'analisi strutturale non lineare, che siano in grado di cogliere i meccanismi di collasso della muratura e al contempo restituire informazioni sulla capacità portante della struttura e procedere alle verifiche agli stati limite ultimi e di esercizio.

Tali esigenze sono state recepite nel software HiStrA Bridges (Historical Structures Analysis), dedicato all'analisi non lineare di ponti ad arco in muratura che mediante un input parametrico permette la generazione del modello 3D e delle combinazioni e distribuzioni di carico a cui il ponte è soggetto.

Il software è dotato di un potente solutore a matrici spar-se che, implementando l'approccio ai macro-elementi discreti (DMEM) concepito per simulare i meccanismi di rottura delle murature, permette di ottenere, grazie al contenimento dei gradi di libertà rispetto ad altri approcci FEM, un risparmio significativo dell'onere computazionale e dei tempi di calcolo.

Nel presente articolo verranno trattati brevemente le principali caratteristiche del software e si mostra uno studio di dettaglio relativo il ponte stradale sul torrente Dolo.



IL PONTE STRADALE SUL TORRENTE DOLO

Si presenta ora un interessante caso di studio, per il quale la valutazione della sicurezza statica e sismica è stata condotta mediante l'ausilio del software HiStrA Bridges.

Il ponte è sito in Località "Ponte Dolo", nel Comune di Toano (RE), ed è costituito da 7 archi in muratura caratterizzati da una luce media di 11.80m, freccia media di 3.80m e spessore 0.75m (figura 2).

Le pile, anch'esse in muratura, sono caratterizzate da altezza variabile da 2.25m a 4.50m fuori terra; il loro spessore varia da 2.30m circa (pile centrali allineamenti n. 3, 4, 5 e 6) a 3.30m circa (pile esterne allineamenti n. 2 e 7).

Sono state eseguite indagini in situ ed un accurato rilievo tridimensionale al fine di giungere, vista la mancanza di documentazione progettuale, ad una migliore conoscenza dell'opera e delle caratteristiche dei materiali.

In particolare i carotaggi eseguiti hanno evidenziato che le pile presentano uno strato corticale ed un nucleo scadente dal piano viabile, con estrazione del materiale di riempimento presente all'interno del nucleo centrale delle pile, racchiuso dalla muratura perimetrale, ed a ridosso delle sulle spalle.

La valutazione della sicurezza del complesso strutturale, sia nei confronti dei carichi statici che delle azioni sismiche, è stata condotta sulla base delle prescrizioni fornite dal D.M. 17/01/2018 e della relativa Circolare n° 7.



Quadro fessurativo e di degrado

Durante i sopralluoghi effettuati si è potuto rilevare un buono stato di conservazione del manufatto nel suo complesso; si sono evidenziati comunque alcuni aspetti locali che richiedono l'esecuzione di interventi di mitigazione e ripristino ma che non costituiscono impedimenti all'utilizzo dello stesso, in particolare:

- abbassamento del piano di scorrimento dl torrente Dolo con asporto del terreno di ricoprimento delle fondazioni in corrispondenza delle pile identificate dagli allineamenti 6 e

7. Le fondazioni risultano scoperte e l'azione di dilavamento dell'acqua ha comportato, in alcuni punti, l'asportazione della malta tra i blocchi della muratura;

- sugli archi in mattoni pieni in alcuni punti la malta è ammalorata, così come lo sono alcuni mattoni (in zone probabilmente soggette ad infiltrazioni); sono evidenti interventi postumi alla costruzione di ripresa della malta (si veda foto seguente);
- l'arco tra gli allineamenti 7 e 8, campata terminale del ponte, ha subito un intervento di ripristino, sul lato a valle, mediante la ricostruzione di parte dell'arco non con mattoni ma con una struttura in cemento armato. Tale ripristino versa in non buone condizioni, con evidenti distacchi rispetto alla parte in mattoni, erosione del copriferro e delle relative armature e stato fessurativo in corrispondenza delle reni;
- alcuni archi presentano parti di struttura realizzata con blocchi lapidei in luogo dei mattoni pieni, ciò ha comportato l'insorgere di fenomeni fessurativi tra i diversi materiali dovuto, con ogni probabilità, alla mancanza di adeguato ammorsamento tra gli stessi.

Campagna diagnostica

Ai fini del rilievo strutturale è stata predisposta una campagna diagnostica di indagini eseguita da una ditta specializzata, sostanziata nelle seguenti prove: accertamenti endoscopici ad asse orizzontale e verticale su pile e volte, tomografie soniche, prove con martinetto piatto singolo doppio, prove di taglio diretto con Shove Test, prova su giunti di malta mediante penetrometro, saggi per determinare la stratigrafia stradale al di sopra del manto, carotaggi dall'alto con estrazione di materiale sulle spalle e su una pila centrale, al fine di valutare l'effettiva consistenza dei materiali presenti al di sotto della soletta di fondazione del pacchetto stradale.

In considerazione di quanto dedotto dalla campagna diagnostica e dalle indagini integrative si è ricostruito il sistema strutturale del ponte e la consistenza del riempimento; in particolare partendo dal manto stradale:

- Soletta in c.a. spessore medio 30 cm;
- Riempimento in materiale incoerente;
- Malta cementizia con conci di mattoni e materiale lapideo, campata in grigio, di rinfianco agli archi e riempimento delle pile;
- Muratura di mattoni pieni e malta cementizia (spessore medio 75 cm) per gli archi e parte delle volte
- Muratura in blocchi lapidei quadrati spessore medio 25 cm per fondazioni e strato esterno pile.

Modello di calcolo tridimensionale

È stato sviluppato un modello di calcolo tridimensionale del ponte in esame con il software HiStrA Bridges, al fine di valutarne la capacità portante rispetto all'azione da traffico e a quella sismica. Sono stati quindi applicati gli schemi di carico previsti dalle vigenti NTC2018, variando la loro posizione dei carichi tandem sul piano carrabile del ponte. Il software permette automaticamente la loro applicazione secondo vari tipi di distribuzioni al fine di massimizzare le sollecitazioni. Per quanto riguarda l'azione sismica la struttura è

caratterizzata da una vita nominale $V_n=100$ anni e da una classe d'uso IV.

In tabella 1 sono riportati i valori di calcolo dei parametri meccanici assunti.

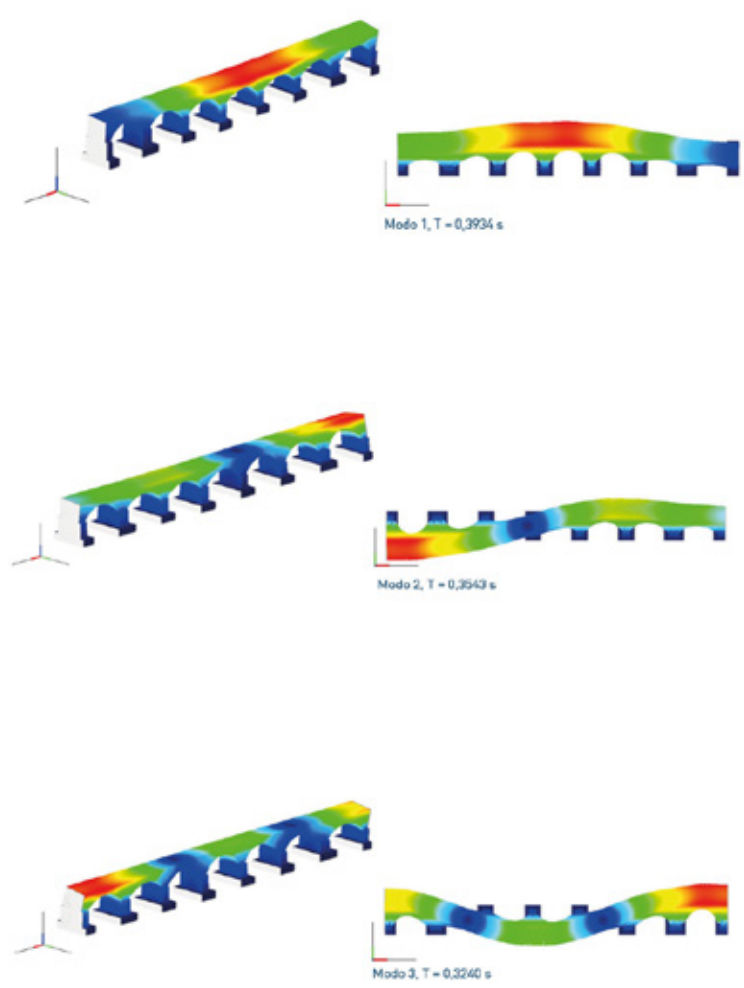
In tabella 2 sono riportati i primi tre modi di vibrare ottenuti mediante analisi modale da cui è emerso che il primo modo è di tipo flessionale in direzione trasversale, caratterizzato da un periodo di vibrare $T=0,3934$ sec. Successivamente è stata analizzata la risposta del ponte soggetto all'azione da traffico stradale secondo le combinazioni di carico agli stati limite ultimi e di esercizio.

In figura 5 sono riportate le linee di influenza delle frecce degli archi al variare della posizione del carico mobile per la combinazione di carico rara agli SLE, da cui si evince un valore massimo della freccia pari a 9.15 mm in corrispondenza della campata n. 5 per cui il rapporto luce/freccia risulta pari a 1311, essendo la luce della campata pari a 12.00 m.

In figura 6 sono rappresentate le linee di influenza del moltiplicatore dei carichi di collasso λ al variare della posizione del carico mobile per le combinazioni di carico agli SLU (figura 7), in cui è possibile osservare un valore minimo del moltiplicatore pari a circa $\lambda = 1.0$ a meno delle posizioni di carico di bordo, in cui $\lambda = 0,84$ dove, a causa della bassa resistenza a compressione e dalla non reaganza a trazione assunta nei calcoli, si determinano dei meccanismi di crisi locali.

In figura 8 sono riportati

	Parametri meccanici non lineari												
	Legame a pannello flessione						Taglio diagonale			Scorrimento			
	E (Pa)	G (Pa)	ν	f_c (Pa)	f_t (Pa)	σ_s	σ_c	τ_{d1} (Pa)	μ_1	σ_s (Pa)	μ_s	τ	PC
Fondazioni	MPa	MPa		MPa	MPa	N/mm	N/mm	MPa		MPa		AN/m ²	
Fondazioni	1777.58	592.54	0.30	0.58	0.136	0.01	3	0.007	0.4	0.35	0.54	22	1.05
File e spalle	400.07	222.22	0.30	1.04	0.03	0.01	3	0.021	0.4	0.35	0.54	19	1.05
Arco	1777.58	392.59	0.30	4.30	0.14	0.01	3	0.007	0.4	0.35	0.54	18	1.05
Rafanoia	400.07	222.22	0.30	1.04	0.03	0.01	3	0.021	0.4	0.35	0.54	19	1.05
Accompagnamento	222.22	81.47	0.30	0.15	0.001	-	-	-	-	-	-	19	1.05
Fondazione stabile in c.a.	12343.00	3144.03	0.30	14.81	0.494	-	30	-	-	-	-	25	1.05



sinteticamente i risultati delle analisi sismiche in termini di curve di capacità, ottenute mediante analisi pushover, da cui emerge che la struttura risulta meno resistente in direzione trasversale Y rispetto alla direzione longitudinale X, a causa della perdita di capacità portante delle pile e dei suoi rostri (figura 9), con un valore minimo del coefficiente di taglio alla base, C_b , ossia del rapporto tra la risultante orizzontale V dell'azione sismica ed il peso sismico P , $C_b=V/P$, rispettivamente pari a $C_{b,x-dir} = 0,1458$ e $C_{b,y-dir} = 0,117$; in figura 10 si mostra la stima della vulnerabilità sismica per l'analisi in direzione trasversale +Y in cui sono riportati i coefficienti di sicurezza ai vari stati limite in termini di spostamento, PGA e di q^* .

Fig. 9. Analisi pushover con distribuzione di carico proporzionale alle masse in direzione +Y

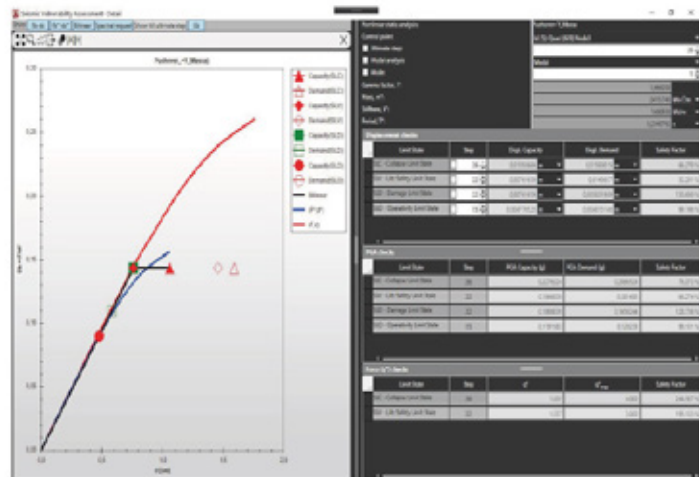
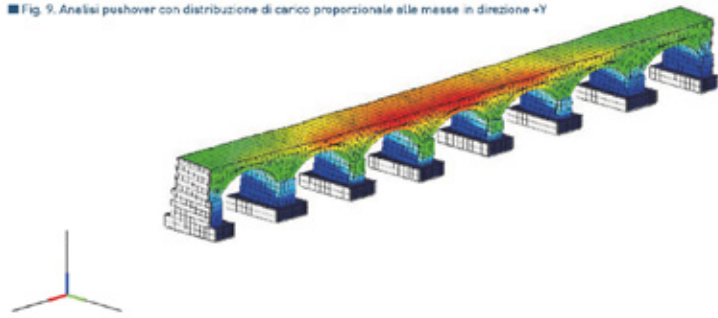


Fig. 10. Stima della vulnerabilità sismica dell'analisi proporzionale alle masse in direzione +Y