



ANALISI NUMERICA DI PONTI AD ARCO IN MURATURA

Il lavoro in oggetto ha trattato l'analisi numerica dei *ponti ad arco in muratura* sfruttando tre diverse tipologie di modellazione, quale quella a *fibre*, al *continuo* ed a *macro-elementi*, al fine di eseguirne un confronto e di mettere in mostra il comportamento di tale tipologia strutturale sia nel caso di carichi *veicolari* che nel caso *sismico*.

Il tema trattato è di particolare rilevanza tenuto conto del *numero* di ponti ad arco in muratura individuabili nelle infrastrutture europee, sia *stradali* che *ferroviarie*. A tal proposito, in Europa, la percentuale dei ponti ferroviari che ricadono in questa tipologia può essere stimata nell'ordine del 60% [1]ⁱ, un valore particolarmente elevato. Altro aspetto importante è l'*età* che essi presentano (Figura 1) e le condizioni in cui si trovano. Tali aspetti interessano in particolare il nostro paese ed il nostro territorio, particolarmente ricco di strutture in età avanzata.

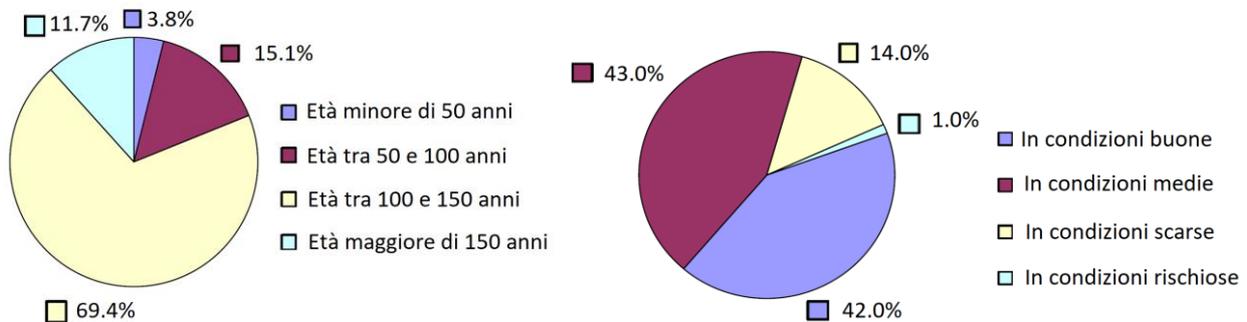


Figura 1 Diagrammi derivanti dall'elaborazione di informazioni statistiche reperite da un campione di circa 200 000 ponti ferroviari appartenenti a 14 enti gestori europei in riferimento all'*età* che essi presentano (a sinistra) ed alle *condizioni* in cui si trovano (a destra). Riadattato da [1]

Nell'ambito quindi del *restauro e del recupero del patrimonio infrastrutturale* del paese riveste certamente interesse preminente la valutazione di un elevato numero di ponti ad arco in muratura, sia per carichi *veicolari* che nel caso *sismico*.

Il presente lavoro è stato suddiviso sostanzialmente in due parti; nella prima è stata eseguita una ricostruzione dello *stato dell'arte* mentre nella seconda si è considerato come *caso studio* un ponte ad arco in muratura effettivamente esistente il quale è stato utilizzato come base applicativa delle diverse tecniche di modellazione indicate in precedenza.

L'analisi richiede infatti un approccio multidisciplinare ed una ricerca storica avanzata, in modo tale da conoscere nel dettaglio le condizioni al contorno nelle quale ci si trova ad intervenire.

Il caso studio preso come riferimento consiste nel *Pontelungo sul Reno*, un ponte ad arco in muratura la cui realizzazione può essere fatta risalire al 1257, il quale è stato allargato nel periodo che va dal 1877 al 1880. Esso, nel suo profilo completo, è costituito da 21 arcate di cui quattro interrate o murate, per una lunghezza complessiva nell'ordine di 300 m ed una larghezza media di 14.30 m (Figura 2).

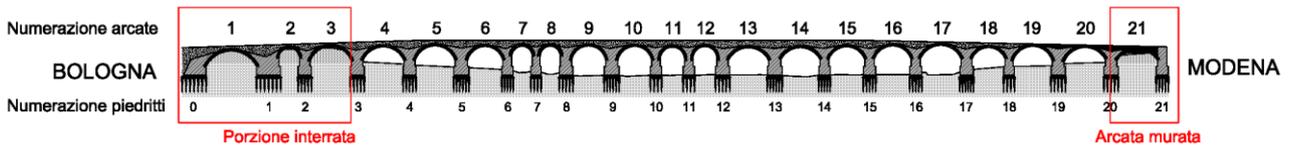


Figura 2 Prospetto nord del ponte con indicazione della numerazione dei piedritti e delle arcate.

La *ricostruzione geometrica e strutturale* è stata realizzata facendo uso di diverse prove in situ, le quali non hanno permesso di valutare eventuali problematicità *locali*; per questo motivo il comportamento è stato valutato in termini *globali*, assumendo l'esecuzione di interventi di straordinaria manutenzione per risolvere eventuali stati di degrado localizzati oltre che per garantire il comportamento monolitico della struttura stessa.

A seguito di questa serie di prove (rilievo con laser scanner, carotaggi delle sovrastrutture e delle fondazioni, prove con martinetto piatto doppio, prove di caratterizzazione dinamica) e facendo riferimento ad indicazioni di normativa e letteratura è stato possibile definire le proprietà dei diversi elementi, sintetizzate nella Tabella 1.

Elemento	γ [kN/m ³]	E [MPa]	ν	G [MPa]	f_m [MPa]	G_{fc} [N/mm]	f_t [MPa]	G_{ft} [N/mm]	τ_0 [MPa]	f_{v0} [MPa]	μ
Pile	19	17500	0.20	7290	7.00	15	0.14	0.02	0.130	0.30	0.5
Arcate	18	5185	0.20	2160	7.00	15	0.14	0.02	0.130	0.30	0.5
Rinfianco	20	22000	0.20	9167	7.00	15	0.14	0.02	0.130	0.30	0.5
Riempimento	19	3000	0.20	1250	1.40	4	0.07	0.01	0.026	-	0.5

Tabella 1 Parametri utilizzati nella modellazione degli elementi costituenti il ponte.

In un primo momento è stato valutato il comportamento per *carichi verticali da traffico*, utilizzando un *modello con elementi beam a fibre* per la modellazione di arcate e pile, ognuna delle quali caratterizzata da un legame costitutivo uniassiale alla *Kent & Park*, per la cui calibrazione è stato fatto uso delle prove con *martinetto piatto doppio* e di indicazioni presenti in *letteratura*, al fine di valutare l'influenza della diffusione del carico operata dal *riempimento*, il quale non è stato modellato in modo esplicito ma tenuto conto in termini di peso proprio oltre che appunto di azione diffusiva. Si è valutato inoltre il contributo del *rinfianco*, modellato attraverso degli elementi *truss compression only*, sia sui moltiplicatori di collasso che sui meccanismi relativi oltre che il contributo del *carico veicolare uniformemente distribuito* previsto dalla normativa tecnica.

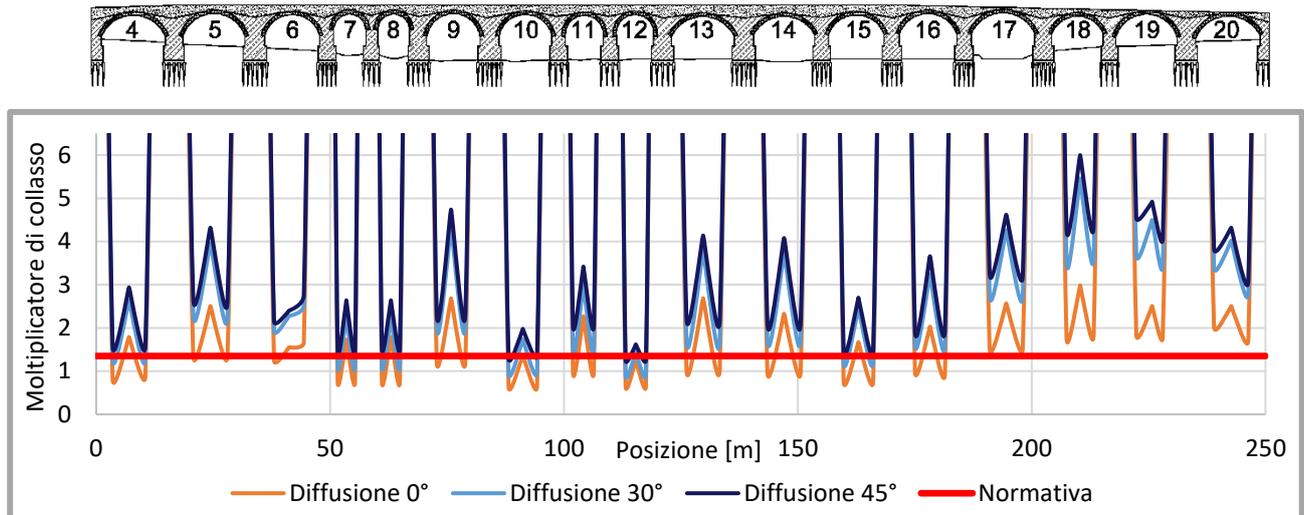


Grafico 1 Andamento del carico di collasso al variare della posizione di applicazione del carico tandem e dell'angolo di diffusione assunto nel caso in cui non si sia tenuto conto del rinfiacco.

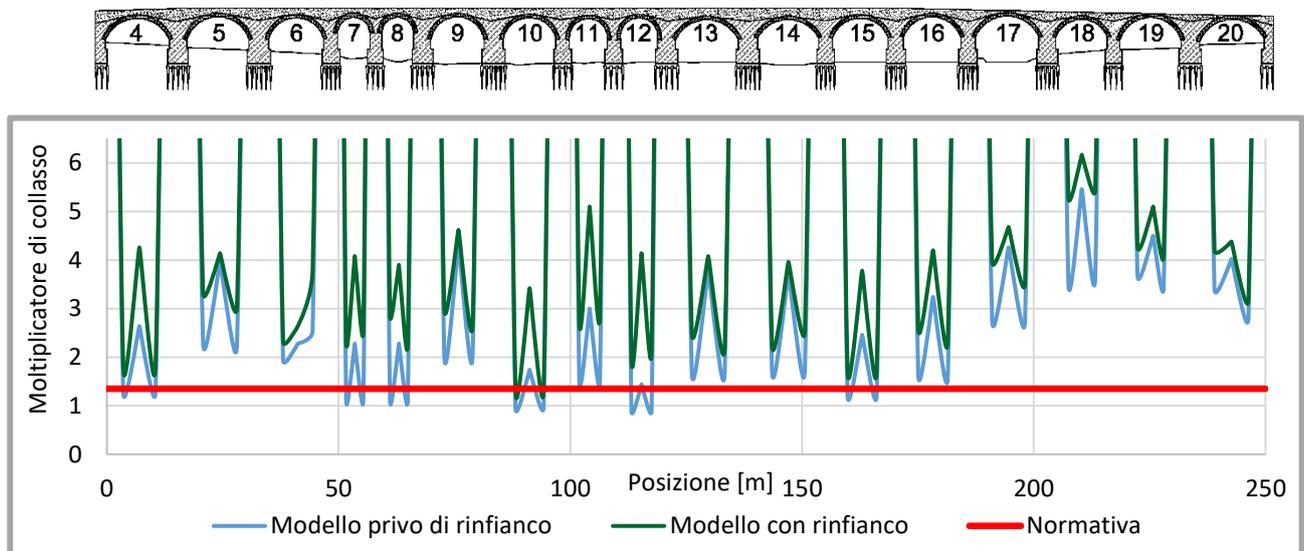


Grafico 2 Andamento del carico di collasso al variare della posizione di applicazione del carico tandem tenendo in conto oppure no della presenza del rinfiacco e dell'angolo di diffusione assunto nel caso in cui non si sia tenuto conto del rinfiacco.

In un secondo momento si è utilizzato il modello a *macro-elementi*. Esso è fondato sul metodo DMEM, il quale permette di sfruttare i vantaggi del *metodo agli elementi discreti* (DEM) nel quale l'interazione tra macro-elementi adiacenti è concentrata in corrispondenza di *interfacce di spessore nullo* corrispondenti ad una distribuzione uniforme di molle non lineari che incorporano il comportamento non lineare della muratura a *flessione* ed a *scorrimento*. In questo modo l'*onere computazionale* richiesto risulta essere di molto inferiore rispetto ad un'analisi FEM o DEM.

Attraverso tale metodo è stato modellato in modo esplicito il riempimento, valutando l'incremento dei moltiplicatori di collasso ad esso associati e l'influenza del legame costitutivo adottato per il

comportamento *a taglio per fessurazione diagonale* (alla *Turnsek-Cacovic*) ed a *scorrimento* (alla *Mohr-Coulomb*).

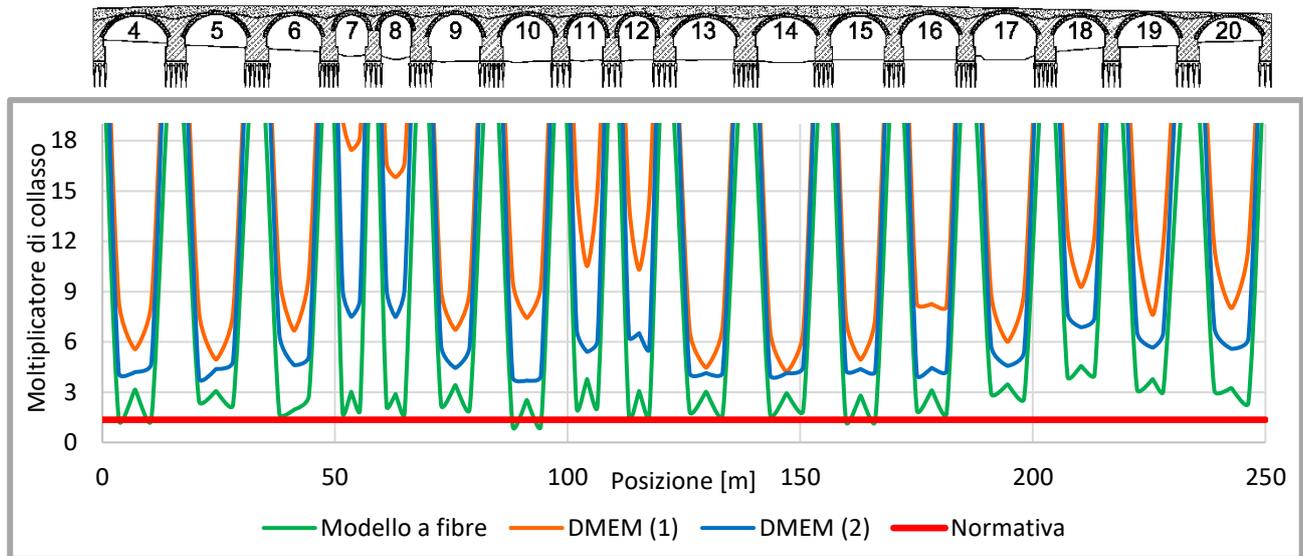


Grafico 3 Andamento del carico di collasso al variare della posizione di applicazione del carico tandem nel caso di modellazione a fibre e angolo di diffusione a 30° (*modello a fibre*), metodo DMEM con legame costitutivo elastico a taglio per fessurazione diagonale ed a scorrimento (*DMEM 1*) oppure con legame alla Turnsek-Cacovic e Mohr-Coulomb (*DMEM 2*).

Per quanto riguarda il comportamento *sismico* è stato valutato unicamente quello *longitudinale*, essendo esso associato al primo modo di vibrare del ponte. Le analisi numeriche sono state realizzate utilizzando il modello al *continuo* con un legame costitutivo di frattura qual è il *Total Strain Crack*, assumendo un approccio *fixed* o *rotating* per l'evoluzione della direzione di propagazione della frattura ed il modello a *macro-elementi*, al variare del legame costitutivo adottato per le molle *a taglio per fessurazione diagonale* ed a *scorrimento* e realizzando delle analisi statiche non lineari (*pushover*) al variare della *distribuzione di carico laterale*. In questo modo è stato possibile valutare l'*influenza dei meccanismi a taglio*, in particolar modo per una struttura particolarmente *tozza* come quella in esame, oltre che l'*influenza della distribuzione di carichi laterali sulla curva di capacità* associata. Nelle figure seguenti sono riportate le *curve di capacità* ottenute con il metodo FEM ed un legame costitutivo Total Strain Rotating Crack (TSRC) ovvero Total Strain Fixed Crack (TSFC) oppure con il metodo DMEM con legame costitutivo elastico per il comportamento a taglio per fessurazione diagonale ed a scorrimento (*DMEM 1*) oppure elasto-plastico, alla Turnsek-Cacovic ed alla Mohr-Coulomb (*DMEM 2*).

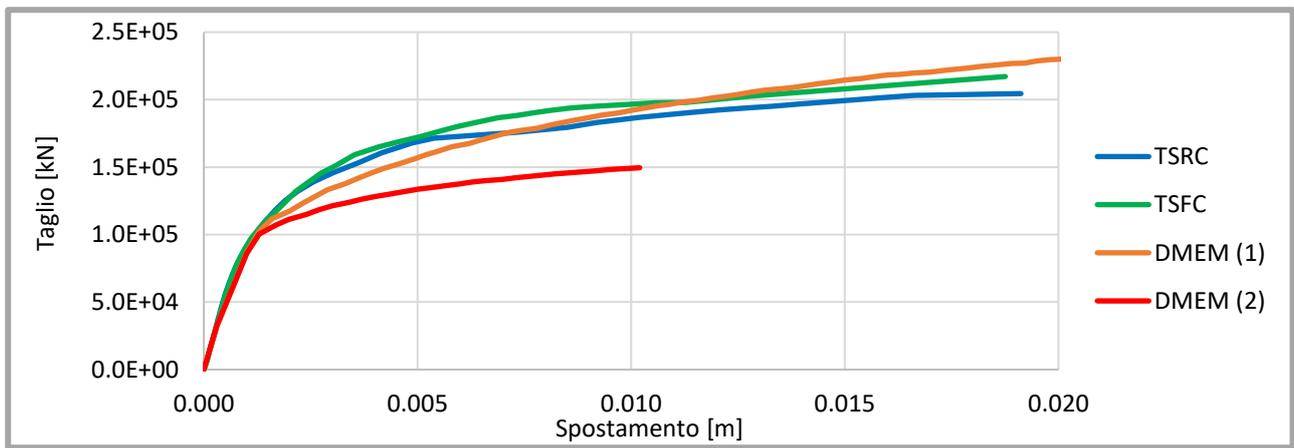


Grafico 4 Curva di capacità nel caso di distribuzione di forze laterali proporzionali alle masse nella direzione positiva (da Bologna verso Modena) al variare del modello utilizzato.

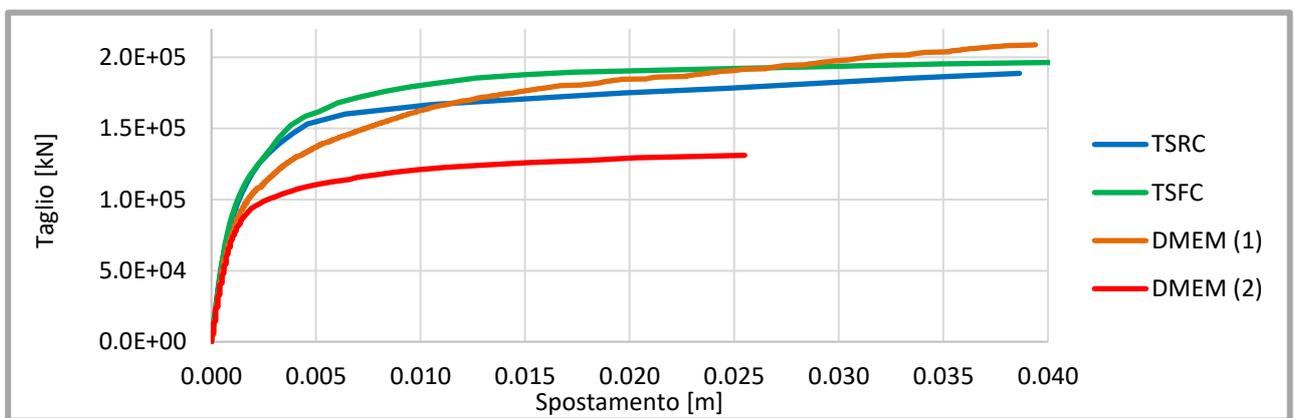


Grafico 5 Curva di capacità nel caso di distribuzioni di forze laterali proporzionali alle masse nella direzione negativa (da Modena verso Bologna) al variare del modello utilizzato.

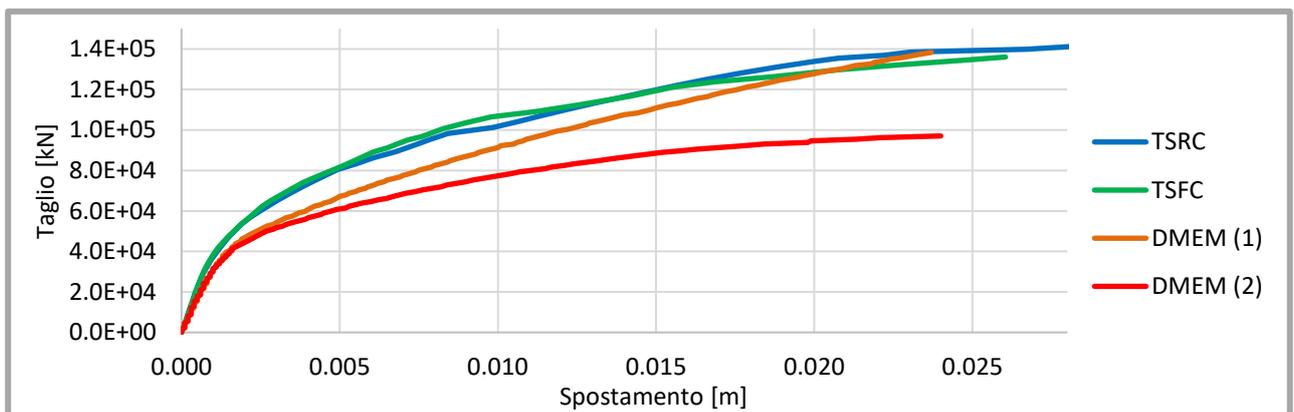


Grafico 6 Curva di capacità nel caso di distribuzione di forze laterali proporzionali al primo modo di vibrare al variare del modello utilizzato.

ⁱ [1] Z. Orban – Assessment, Reliability and Maintenance of Masonry Arch Railway Bridges in Europe, 2004.