

Ricerca

Analisi della risposta strutturale di alcuni ponti durante il terremoto del Centro Italia Analysis of the structural response of some bridges during the Central Italy Earthquake

Luigi Di Sarno¹, Francesca da Porto², Gabriele Guerrini³, Andrea Prota⁴ ■

Sommario

La presente memoria analizza la risposta strutturale dei ponti in muratura ed in c.a. durante la sequenza sismica registrata nel Centro Italia. Dopo una breve discussione delle caratteristiche principali della sequenza sismica registrata nel 2016-2017, vengono esaminati in particolare i diversi meccanismi di collasso osservati e la prestazione sismica di alcune delle più significative infrastrutture viarie presenti nell'area del cratere ed essenziali per le operazioni di soccorso.

Dai sopralluoghi effettuati e dall'esame della risposta strutturale si può asserire che gran parte dei danni rilevati sono attribuibili principalmente a fenomeni di degrado dovuti alla scarsa manutenzione, nonché a stati pregressi di danneggiamento.

Parole chiave: Ponti, danni, muratura, cemento armato, terremoto Centro Italia 2016.

Abstract

The present work assesses the structural response of masonry and reinforced concrete bridges subjected to the earthquake sequence of Central Italy. A preliminary discussion of the main features of the 2016-2017 seismic sequence is provided. Failure modes are investigated and the seismic performance assessment is then carried out for the most relevant highway infrastructures located in the stricken areas and that were essential for rescue operations.

The post-earthquake surveys and the outcomes of the seismic performance assessment show that the spread of damage is primarily caused by the lack of maintenance and pre-existing damage due to ageing phenomena.

Keywords: bridges, damage, masonry, reinforced concrete, 2016 Central Italy Earthquake.

1. Introduzione

L'osservazione sistematica di danni conseguenti ad eventi sismici alle infrastrutture di trasporto, e nello specifico dei ponti, nel nostro paese è abbastanza limitata, diversamente da quanto accade per i danni rilevati a strutture ordinarie dell'edilizia. Una possibile spiegazione è data dal fatto che i maggiori terremoti avvenuti negli ultimi quarant'anni non hanno avuto conseguenze di particolare rilievo sulle strutture da ponte. Nel Friuli (1976) la realizzazione di opere infrastrutturali significative era appena agli inizi, mentre nel terremoto Irpino (1980), le opere d'arte presenti nel tratto appenninico dell'autostrada A16 subirono conseguenze di qualche rilievo più che altro dovute all'inadeguatezza degli apparati di vincolo (Reluis, 2009). Durante il terremoto Umbria-Marche del 1997 furono rilevati pochi danni a ponti, in particolare a ponti in muratura, per i meccanismi più vulnerabili di ribaltamento del timpano (Resemini e Lagomarsino, 2004), mentre sia la sequenza sismica de L'Aquila (2009) che quella dell'Emilia (2012), non hanno provocato danni significativi né a ponti in muratura né a ponti di calcestruzzo armato (EERI, 2009; Ioannou, 2012), se non in presenza di gravi difetti di manutenzione, come riportato, ad esempio, per i ponti in C.A. di Fossa ed Onna, nei dintorni de L'Aquila, da (Kawashima et al., 2010).

I ponti in muratura possono, in effetti, essere considerati come strutture piuttosto robuste (Heyman, 1966), il cui danneggiamento

¹ Ricercatore, Università degli studi del Sannio.

² Professore, Università degli studi di Padova.

³ Ricercatore, Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (EUCENTRE).

⁴ Professore, Università degli studi di Napoli Federico II.

mento o collasso trae origine dall'innesco di meccanismi locali o globali, nelle direzioni longitudinale e trasversale del ponte stesso. Tali meccanismi, a loro volta, dipendono in particolar modo dalle principali caratteristiche geometriche del ponte, tra le quali il numero e la lunghezza delle campate, la forma (rapporto freccia/luce) e lo spessore delle arcate, l'altezza o la snellezza di spalle e pile (a seconda che il ponte sia mono- o multi-campata), la larghezza del ponte. Si rimanda ad altre trattazioni (ad esempio, da Porto et al., 2016) per una descrizione più esaustiva del funzionamento strutturale di questa categoria di opere, in questa sede si riportano solo i principali meccanismi di collasso per ponti a campata singola o multi-campata.

Nel caso di ponti ad arco in muratura mono-campata, il danneggiamento e/o il collasso può avvenire per l'innesco di meccanismi longitudinali nell'arcata, con la tipica formazione di quattro cerniere cilindriche nell'arcata del ponte stesso. Se le spalle sono alte, o la risposta è caratterizzata da fenomeni d'interazione con il terreno di fondazione, il meccanismo longitudinale può interessare l'intera struttura, coinvolgendo anche le spalle e non solo l'arcata. Il meccanismo comunque più vulnerabile, ovvero sia quello che s'innesci per valori più bassi delle accelerazioni, è quello di ribaltamento fuori piano di timpano, muri d'ala, e parapetti. Il ribaltamento di questi elementi secondari non implica una rilevante riduzione della sicurezza dell'opera, però, nel caso di timpano e muri d'ala, venendo meno l'azione di contenimento del materiale di riempimento, si possono danneggiare gli strati di finitura della carreggiata, risultando così compromessa la funzionalità del ponte. Questo genere di meccanismo è di gran lunga il più comune, non solo per ponti mono-campata ma anche per quelli a più campate, ed è quindi quello più spesso riportato nei rilievi del danno post-sisma a reti infrastrutturali caratterizzate dalla presenza di opere in muratura (vedasi, ad esempio, il terremoto Umbria-Marche 1997; Resemini e Lagomarsino, 2004).

Anche nel caso di ponti ad arco multi-campata i meccanismi nella direzione longitudinale del ponte dipendono principalmente dalla snellezza delle pile: con pile tozze s'innescano meccanismi locali nelle arcate, analogamente a quanto avviene nei ponti a campata singola, mentre con pile snelle, o in presenza di fenomeni di interazione con il terreno, la risposta del ponte coinvolge anche le pile, come rilevato per il terremoto di Wenchuan in Cina (Kawashima et al., 2009). In particolar modo quando le pile sono snelle, si possono innescare anche meccanismi globali in direzione trasversale, caratterizzati da danneggiamento alla base delle pile, rotture in chiave alle arcate o rotture a taglio nel piano delle arcate stesse. Questi esempi, più rari, sono riportati per il ponte sul Rio Claro in Cile (terremoto del 2010, Grossi et al., 2011), o per il Yingchun Bridge in Cina (Kawashima et al., 2009). È da ricordare, inoltre, che lo sviluppo dei meccanismi descritti potrebbe essere anticipato, o accelerato, da perdite di resistenza legate alla cattiva qualità dei materiali (quale bassa qualità della malta o della muratura utilizzata), e da fenomeni di degrado legati alla vetustà delle opere in muratura, che pur essendo state costruite in un ampio periodo che va dall'epoca romana ai primi decenni del novecento, sono tutt'ora in servizio (Modena et al., 2015).

I danni ai ponti in cemento armato (c.a.), individuati in seguito ai terremoti degli ultimi cinque decenni, possono essere tipicamente suddivisi in quattro categorie, che riguardano i principali elementi che li compongono (vedi anche Di Sarno et al., 2017): danni all'impalcato (travi, solette), danni alle sottostrutture (traversi, pile), danni all'interfaccia terreno-struttura (spalle, fondazioni) e danni agli elementi non strutturali. In particolare, in questa sede, si evidenziano alcune tipologie di danno più ricorrenti, ovvero:

- (i) *Danni agli apparecchi di appoggio.* Gli apparecchi di appoggio sono progettati per trasferire forze fra l'impalcato e le sottostrutture, e per consentire allo stesso tempo movimenti relativi fra gli stessi. I danni agli appoggi variano a seconda della tipologia di apparecchio: per esempio, possono verificarsi lo scorrimento di appoggi elastomerici o lo sfilamento e/o la rottura a taglio di bulloni di ancoraggio. La crisi di questi dispositivi può indurre la perdita d'appoggio delle travi d'impalcato.
- (ii) *Perdita d'appoggio.* Questo problema si identifica con lo spostamento delle travi d'impalcato dalla loro collocazione originaria sulla sottostruttura. Più piccole sono le aree d'appoggio, più elevato è il rischio di innesco di tale meccanismo. Ciò può risultare nella caduta delle travi dagli apparecchi d'appoggio fino ad essere sorrette direttamente dai traversi, ma anche nel collasso totale di una o più campate.
- (iii) *Danni ai giunti di espansione.* I giunti di espansione sono progettati per consentire movimenti relativi fra segmenti adiacenti di impalcato dovuti a variazioni termiche, a deformazioni differite nel tempo, e al traffico. Tuttavia, l'azione sismica può provocare rapidi movimenti di chiusura e apertura dei giunti, che possono risultare in martellamento con conseguente schiacciamento del calcestruzzo e discontinuità fra le campate. Alcuni casi di questo tipo sono stati rilevati lungo le autostrade A24 e A25, in seguito al terremoto de L'Aquila. Il martellamento fra travi adiacenti si verifica inoltre quando il movimento del terreno induce notevoli spostamenti differenziali fra le pile che sostengono l'impalcato.
- (iv) *Danni alle pile.* Trattandosi di componenti fondamentali del sistema resistente alle azioni verticali e laterali, le pile possono essere soggette a forze e deformazioni notevoli durante un terremoto. Il tipo di danno conseguente dipende soprattutto dalla geometria del ponte, dai criteri di progettazione seguiti e dai dettagli costruttivi adottati. Pile corte e tozze sono più suscettibili di crisi per taglio. Carenza di dettagli costruttivi, come insufficienti lunghezze di sovrapposizione delle armature longitudinali, o inadeguata armatura trasversale, possono risultare in collassi inaspettati. Si citano ad esempio i collassi parziali o totali di alcuni ponti nei terremoti di Northridge, California (1994) e Kobe, Giappone (1995).
- (v) *Danni ai nodi trasverso-pila.* I nodi fra traversi e pile sono soggetti a notevoli sforzi di taglio durante la risposta laterale di un ponte. Senza un'adeguata armatura trasversale, fessure diagonali si formano e si propagano nella regione del

nodo, fino al punto di causare il collasso della struttura. In più, le armature longitudinali delle travi non si ancorano in maniera sufficiente se piegate all'interno di nodi poco confinati. Ne è un esempio il collasso catastrofico del Cypress Viaduct di Oakland, California, durante il terremoto di Loma Prieta del 1989.

- (vi) *Danni alle spalle.* Il comportamento delle spalle dipende non solo dalla progettazione strutturale degli elementi che le costituiscono, ma anche dall'interazione col terreno circostante. Le spalle includono apparecchi di appoggio, muri d'ala, pareti delle spalle ed elementi di fondazione. Inoltre, le spalle possono comprendere anche elementi quali le chiavi di taglio, che contribuiscono a limitare gli spostamenti laterali relativi fra impalcato e spalla stessa, e possono fungere da fusi strutturali per prevenire il danneggiamento di altri elementi strutturali. Può verificarsi martellamento anche fra l'impalcato e le spalle.
- (vii) *Danni agli elementi non strutturali.* Questi ultimi includono barriere, segnaletica e impianti. I danni a questi elementi non compromettono l'integrità strutturale del ponte, ma il loro collasso può indurre effetti secondari o il ferimento degli utenti della strada. Per esempio, si possono verificare danni da impatto per il crollo della segnaletica sovrastante, rischi di elettrocuzione per i passanti in presenza di linee elettriche danneggiate, e condizioni di pericolo per il traffico dovuti al crollo di barriere di contenimento.

La presente memoria analizza la risposta strutturale dei ponti in muratura ed in c.a. durante la sequenza sismica registrata nel Centro Italia, nota anche come sequenza sismica Amatrice-Norcia-Visso del 2016-2017. Saranno discussi in particolare i diversi meccanismi di collasso osservati e la prestazione sismica di alcune delle più significative infrastrutture viarie presenti nell'area del cratere. Si ritiene, pertanto, necessario richiamare preliminarmente le caratteristiche della sequenza sismica del Centro Italia.

2. Le caratteristiche della sequenza sismica nel Centro Italia

Il 24 agosto 2016, alle 1.36 UTC, 3.36 ora locale, un terremoto con epicentro localizzato nel comune di Accumoli, di magnitudo momento M_W 6.0, ha dato inizio alla sequenza sismica che ha interessato l'Italia Centrale sino al 2017. L'evento del 24 agosto è stato seguito da innumerevoli altre scosse, di cui le principali sono avvenute il 26 ottobre in prossimità di Castelsantangelo sul Nera (M_W 5.4 e M_W 5.9), il 30 ottobre vicino a Norcia (M_W 6.5) e il 18 gennaio 2017 in prossimità di Capitignano, con quattro scosse di magnitudo M_W compresa tra 5.0 e 5.5.

Tale sequenza sismica ha causato danni molto consistenti in un'ampia area dell'Italia Centrale, coinvolgendo le quattro regioni di Lazio, Umbria, Marche e Abruzzo. Le mappe di scuotimento in accelerazione massima del terreno (PGA) prodotte dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (<http://shakemap.rm.ingv.it>) e le corrispondenti mappe di scuotimento in intensità strumentale Mercalli Cancani Sieberg (MCS), per le quattro principali scosse di cui sopra, sono riportate da AA.VV. (2017). Tale contributo fornisce anche, per le principali località colpite dai sismi di agosto e di ottobre, i risultati dei rilievi macrosismici, espressi secondo la scala macrosismica europea (EMS). È possibile da questa osservare, oltre all'aggravio del danno legato al succedersi delle scosse, i valori molto elevati d'intensità macrosismica che hanno interessato la sequenza, che confermano la presenza di danno significativo e diffuso all'ambiente costruito. Si sono infatti registrati numerosi collassi di edifici residenziali in muratura e in c.a., ma anche la rete infrastrutturale, in particolare i ponti, hanno fatto rilevare danni severi, che hanno in parte compromesso lo svolgimento delle prime attività emergenziali post-evento.

La sequenza sismica ha interessato la zona dei sistemi di faglie normali dei Monti della Laga a Sud-Est e del Monte Vettore-Monte Bove a Nord-Ovest, faglie interessate da movimento estensionale, orientate in senso NNO-SSE e con pendenza verso Sud-Ovest. Dopo l'evento di agosto, il volume sismogenetico si è esteso verso NO e verso SE, rispettivamente con le scosse di ottobre 2016 nelle vicinanze di Norcia e quelle di gennaio 2017 nelle vicinanze di Campotosto. La sequenza ha colpito un'area dove anche in passato vi sono stati numerosi forti terremoti, come si desume dalla più recente versione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15>), ed infatti si colloca nella fascia ad elevata pericolosità sismica che corre lungo l'asse della catena appenninica (http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa_ps_apr04/italia.html). L'area interessata dalla sequenza sismica di Amatrice Norcia Visso e Campotosto è per altro ubicata tra la zona attivata con la sequenza sismica del 1997 in Umbria-Marche a Nord, e a sud quella de L'Aquila del 2009 (Figura 1).

Per fornire alcuni dati sulla severità dei terremoti che si sono susseguiti in Italia Centrale tra 2016 e 2017, si sono selezionate le stazioni di Amatrice (AMT) e Norcia (NRC), attive durante tutta la sequenza e particolarmente vicine agli epicentri del 24 agosto e del 26 e 30 ottobre. In particolare, sono stati registrati per la prima valori di accelerazione di picco al suolo (PGA) pari a 0.380-0.870-0.400 g (rispettivamente in direzione N-S, E-O, verticale) nel terremoto del 24 agosto, e di 0.401-0.532-0.324 g nel terremoto del 30 ottobre. A Norcia si sono invece registrate PGA relativamente più modeste durante il terremoto del 24 agosto (0.373 g), ma significative per quello del 30 ottobre (0.476 g), così come riportato anche nel documento tecnico di ReLUIS-INGV Workgroup (2016). La Figura 2 mostra gli spettri di risposta elastici in pseudo-accelerazione ottenuti dai dati registrati presso le stazioni menzionate, tratti dal database ITACA (<http://itaca.mi.ingv.it>). Per ognuna delle due stazioni, entrambe definite su suolo B*, viene fornito un confronto tra le principali scosse, nelle tre direzioni ortogonali di registrazione del segnale accelerometrico.

Figura 1

Mappa epicentrale delle sequenze sismiche in Italia centrale dal 1997 al 2017. I terremoti del 1997 sono rappresentati in blu. In giallo la sequenza de L'Aquila del 2009, in arancione e rosso la sismicità del 2016-2017 (www.ingv.it)(a destra).

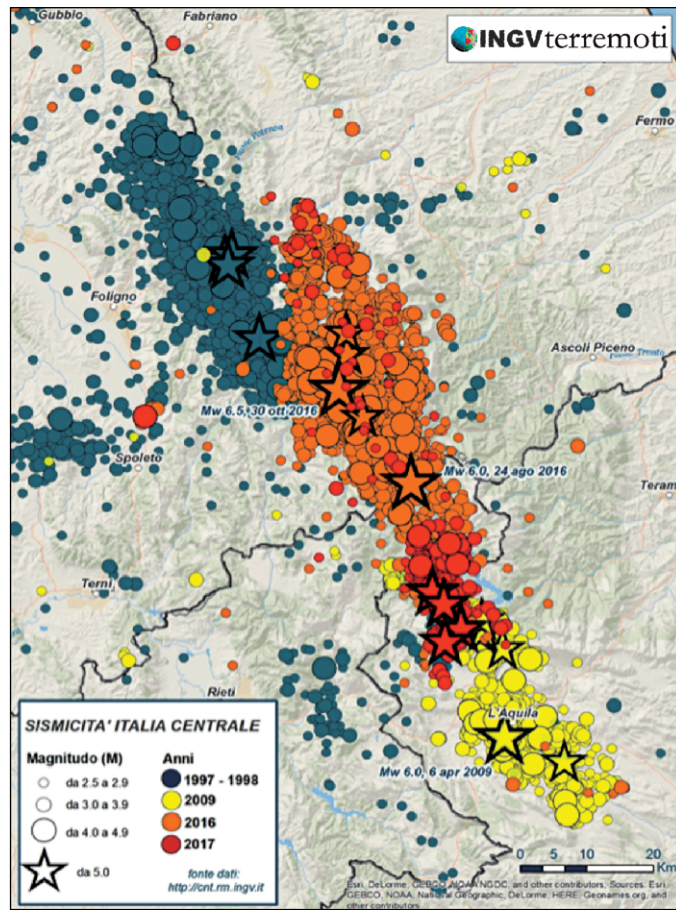
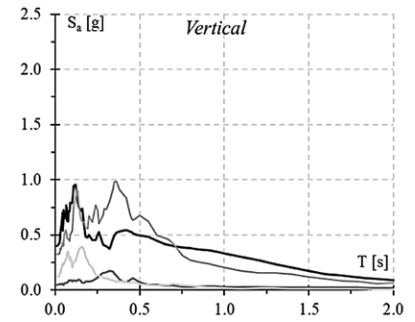
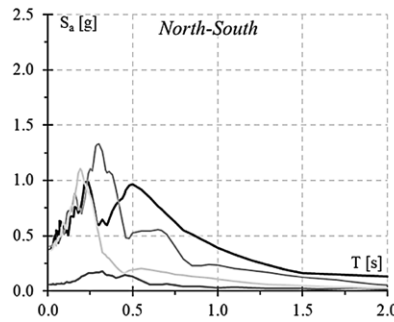
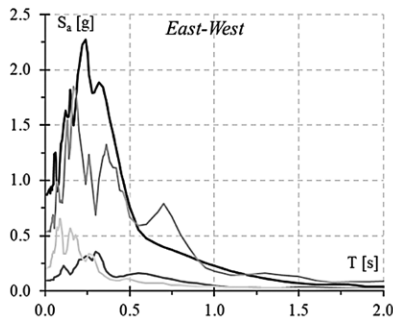


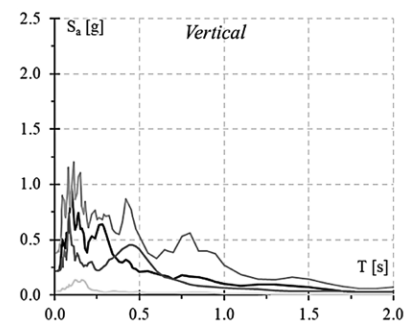
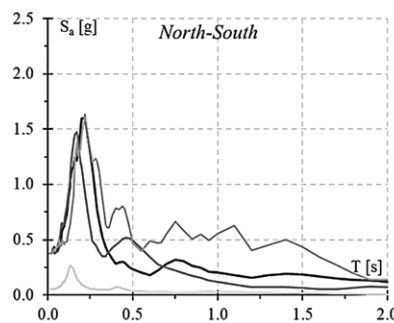
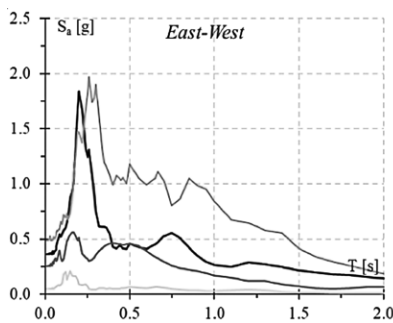
Figura 2

Spettri di risposta di pseudo-accelerazione per i 4 principali terremoti della sequenza, per le stazioni di Amatrice (AMT) e Norcia (NRC), nelle tre direzioni (N-S, E-O, verticale) (in basso).

Amatrice station - AMT



Norcia station - NRC



3. Prestazioni sismiche di ponti

Immediatamente dopo le sequenze sismiche dell'Italia Centrale sono stati eseguiti numerosi sopralluoghi durante i quali sono stati ispezionati diversi ponti con struttura in muratura, c.a., misti muratura e c.a. e composti acciaio-calcestruzzo. Le strutture esaminate sono utilizzate per la viabilità principale di accesso alle zone del cratere. Di particolare interesse risulta la strada regionale SR 260, la dorsale appenninica che collega la strada statale salaria (SS4) ad Amatrice. Lungo la RS sono stati esaminati i ponti ad arco in muratura denominati “Ponte a Tre Occhi” e “Ponte a Cinque Occhi”. Altri ponti in muratura esaminati sono localizzati nella provincia di Ascoli-Piceno, lungo la strada SP 129 denominata Trisungo-Tufo; si tratta, in questo caso, di una viabilità secondaria di accesso a piccoli centri abitati. Nel seguito si farà riferimento alla descrizione dello stato di danneggiamento dei Ponti a “Tre Occhi” e “Cinque Occhi”.

Per quanto attiene i ponti con struttura in c.a. sono stati ispezionati diversi ponti lungo le strade statali SS4 e SS685.

3.1 Ponti in muratura

3.1.1. Ponte a Tre Occhi

Il ponte in muratura a tre archi, noto anche come “Ponte a Tre Occhi” è posizionato lungo una via principale di accesso per Amatrice. Esso si estende longitudinalmente in direzione Est-Ovest, ha una luce complessiva di circa 40 m; ciascun arco ha una freccia netta di circa 5 m ed una luce di 12 m. La larghezza complessiva della sede viaria del ponte, a due sensi di marcia, è allo stato pari a 10 m e comprende circa 7 m per la carreggiata e i restanti 3 m per i due marciapiedi posti a margine della carreggiata stessa, realizzati a seguito di intervento relativamente recente di adeguamento funzionale e consolidamento strutturale. L'intervento di adeguamento funzionale ha previsto la realizzazione di due elementi mensolari in c.a., della lunghezza di circa 2 m, da ciascun lato della preesistente carreggiata, su cui sono state realizzate le barriere metalliche di protezione (guardrail) ed i marciapiedi.

La struttura del ponte è costituita dai tre archi semicircolari realizzati con mattoni pieni; i rinfianchi, i muri d'ala, le spalle e le pile centrali sono invece realizzati con muratura in pietrame, così come illustrato in Figura 1. La muratura dei rinfianchi degli archi e dei muri d'ala è costituita da pietrame di tipo irregolare con dimensioni variabili tra 15 e 300 mm, stilato con malta. La struttura delle spalle e della pila centrale comprende un doppio strato di muratura: il paramento esterno è realizzato con pietrame regolare, con conci di dimensioni di circa 500 mm; la parte interna, di riempimento, è fatta di conci irregolari, scarsamente legati e con un elevato contenuto anche di materiali limosi.



Figura 3
Vista laterale del Ponte a Tre Occhi (sinistra) e particolare interventi strutturali (destra).

Nell'intervento di adeguamento strutturale eseguito, sono state inserite numerose catene, in direzione Nord-Sud, in corrispondenza dei muri d'ala e sulle pile centrali per evitare collassi fuori piano. La modalità realizzativa di tali catene, che non presentano adeguate piastre per i capo-chiave, appare del tutto inefficace ad esplicare alcuna azione di confinamento/contenimento laterale, attese la natura del pietrame costituente ed i notevoli spessori dei muri d'ala. Le dimensioni delle piastre metalliche utilizzate per i capochiave risultano estremamente piccole e tali da non generare alcun effetto di distribuzione del contenimento laterale sul paramento murario esterno.

L'intervento strutturale eseguito sul ponte ha altresì previsto, in prossimità della zona di appoggio, sul muro d'ala posto a Nord-Est, la realizzazione di blocchi (muri) in calcestruzzo non armato, che si estendono per l'intera altezza del ponte, con

una lunghezza complessiva di circa 10 m. Tali muri fungono da contrafforti e servono per contenere le spinte laterali dovute ai rinfianchi in pietrame, attesa anche la geometria (curva) della spalla Est del ponte.

Durante l'evento sismico del 24 agosto 2016, il "Ponte a Tre Occhi" ha subito un'accelerazione massima alla base (PGA) pari a 0.87 g e 0.38 g rispettivamente lungo le direzioni longitudinale e trasversale. Tali significativi valori di PGA registrati nei pressi della infrastruttura viaria hanno causato un danneggiamento diffuso della struttura del ponte, con conseguente chiusura al traffico a partire del 25 agosto 2016, con notevoli evidenti disagi per i mezzi di soccorso e per tutta la viabilità della zona. I danni hanno interessato l'intera sede stradale, l'intradosso dell'arco posto in prossimità della spalla Est del ponte e gran parte dei muri d'ala posti a supporto del recente ampliamento della carreggiata.

Gli strati di rifinitura in conglomerato bituminoso (binder) della carreggiata presentavano notevoli e diffuse lesioni, con evidenti avvallamenti localizzati variabili tra i 40 mm ed i 60 mm, così come documentato in Figura 2. Le lesioni orizzontali lungo la strada hanno dimensioni massima di circa 30 mm.

La pavimentazione bituminosa risultava particolarmente dissestata a causa anche dei significativi spostamenti subiti dal pietrame di riempimento dei muri d'ala, che ha subito anche notevoli spancamenti (vedi Figura 3). L'esame visivo ha altresì evidenziato un collegamento inadeguato tra gli strati funzionali della carreggiata ed il muro d'ala. Tali collegamenti erano realizzati con connettori costituiti da monconi di ferri di armatura per c.a. di lunghezza inadeguata e non opportunamente ammorsati e/o dotati di alcun dettaglio costruttivo per l'ancoraggio (Figura 3).

I danni strutturali rilevati sul Ponte a Tre Occhi hanno interessato in particolare la zona Est del ponte. Lesioni diagonali, con ampiezza di 2.5-3 cm sono state localizzate all'intradosso dell'arco così come si evince dalla Figura 4. Tali lesioni dimostrano come, nonostante la maggiore accelerazione relativa alla componente longitudinale dell'evento sismico del 24 agosto rispetto alla componente trasversale, 0.87 g versus 0.38 g, la risposta del ponte sia stata caratterizzata da una particolare vulnerabilità in direzione trasversale.

Figura 4
Lesioni riportate nella
pavimentazione della
carreggiata del Ponte
"Tre Occhi".



Figura 5
Collegamento inadeguato
tra gli strati funzionali della
carreggiata ed il muro d'ala.





Figura 6
Lesioni diagonali all'intradosso dell'arco e muro d'ala posti in prossimità della spalla Est.

La componente trasversale del sisma del 24 agosto è stata comunque anch'essa molto severa ($PGA = 0.38 g$) per il Ponte Tre Occhi, in quanto il paramento murario esterno del muro d'ala a Sud-Est è collassato, nonostante la presenza di diverse catene (vedi Figura 4). L'effetto di queste ultime è stato molto scarso a causa della inadeguatezza dei capichave. Anche i blocchi in calcestruzzo posti a Nord-Est hanno subito consistenti danni; essi si sono tranciati in due sezioni lungo l'altezza e le parti sconnesse hanno subito scorrimenti e rotazioni significative (Figura 5). Gli spostamenti permanenti dei blocchi di calcestruzzo variano tra i 10 mm ed i 50 mm. A seguito degli altri eventi sismici del 2016 si sono verificati ulteriori collassi parziali lungo il lato Nord-Est del ponte, collassi che hanno interessato le opere di rifinitura poste lungo il lato della carreggiata: muro parapetto e guardrail.



Figura 7
Collassi lungo il muro d'ala posto a Nord, in prossimità della spalla Est.

Il Ponte Tre Occhi è stato chiuso al traffico subito il giorno 25 agosto 2016, a seguito del primo evento sismico del 24 agosto. La chiusura al traffico della predetta infrastruttura è avvenuta dopo che pesanti mezzi della Polizia di Stato e della Protezione sono transitati sul ponte ed hanno generato ulteriori consistenti cedimenti della carreggiata, già parzialmente lesionata dopo lo scuotimento del 24 agosto. A causa della sua posizione strategica, anche a ridosso della tendopoli che è stata allestita a circa 1.5 km dal centro di Amatrice, al km 40 + 750 circa della SR 260 Picente, che attraversa la valle dell'Aterno nel tratto tra L'Aquila e Amatrice collegando direttamente l'entroterra abruzzese con quello marchigiano, è stato necessario costruire un by-pass del Ponte a Tre Occhi, consistente nella costruzione di un guado con strutture scatolari, con una carreggiata di circa 6 m. Tale by-pass è stato realizzato in meno di una settimana, a partire dal 26 agosto, ad opera del Genio militare, con la collaborazione dei tecnici della Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia. In tal modo si è potuto garantire una strada di accesso alternativa ad Amatrice, facilitando, soprattutto, le operazioni di soccorso post-sisma per tutta l'area del cratere.

Gli interventi di somma urgenza per la messa in sicurezza per il Ponte Tre Occhi sono iniziati dopo circa due mesi dall'evento sismico del 24 agosto 2016. L'ente gestore della infrastruttura viaria (SR 260), Azienda Strade Lazio S.p.a. (ASTRAL) ha prima realizzato una paratia costituita da micropali con incamiciatura metallica lungo l'approccio Nord-Est, in curva, del ponte (vedi particolare riportato in Figura 6). A tale paratia è stata ancorata una trave in c.a., di larghezza di circa 1.20 m ed altezza utile di circa 35 cm, che funge da incastro alle lastre predalle di tipo tralicciato utilizzate per l'ampliamento della sede viaria,

in direzione Nord-Sud. Durante il sopralluogo eseguito presso l'infrastruttura viaria nella prima settimana di dicembre 2016, è stato rilevato che mancavano gli elementi di alleggerimento, la rete elettrosaldada ed il getto di completamento dell'ampliamento della carreggiata, così come illustrato in Figura 6.

3.1.2. Ponte a Cinque Occhi

Il ponte in muratura a cinque archi, noto anche come "Ponte a Cinque Occhi" è ubicato lungo la via di accesso interna che connette la strada statale Salaria (SS4) e la strada SR 260, che conduce ad Amatrice dalla direzione Ovest. La lunghezza complessiva del ponte è pari a 56.2 m, la larghezza della carreggiata a due corsie è 6.0 m; non sono presenti marciapiedi e/o banchine laterali. Ciascun arco ha una luce di lunghezza pari a 9.5 m ed una freccia netta di circa 3.5 m. Il ponte poggia su quattro pile murarie aventi geometria tronco-piramidali, con sezione di base di tipo rettangolare, di lato 2.5 m e lato 6.0 m; l'altezza delle pile è variabile tra 8.5 m e 10 m, in funzione della loro posizione rispetto al letto del lago Scandarello che attraversano. L'asse longitudinale del ponte è orientato in direzione Nord-Ovest / Sud-Est.

Il sistema strutturale originario del Ponte a Cinque Occhi è in muratura portante e risulta essere molto simile a quello del Ponte a Tre Occhi illustrato in precedenza. La costruzione iniziale del ponte risale, con molta probabilità, ai primi decenni del secolo scorso. Successivamente, la struttura in muratura è stata oggetto di un intervento di consolidamento che ha interessato le pile, gli intradossi degli archi e le spalle. In particolare, l'intervento di consolidamento, risalente agli anni '80, è consistito nell'utilizzo di una incamiciatura con conglomerato cementizio per le pile e gli intradossi degli archi; per le spalle sono state anche realizzati delle pareti monolitiche in c.a. che hanno inglobato le preesistenti parti murarie.

La manutenzione ordinaria e straordinaria del ponte è stata trascurata negli ultimi decenni, dando luogo a numerose espulsioni del pietrame di riempimento dei rinfianchi degli archi, unitamente all'intonaco superficiale. Inoltre, l'inefficiente allontanamento delle acque di dilavamento della carreggiata e l'uso di sale per la neve nei periodi invernali ha causato la corrosione delle armature di rinforzo presenti nelle pareti in c.a. sulle spalle. Il ponte a Cinque Occhi presentava pertanto una ridotta sicurezza già in condizioni statiche, prima ancora degli eventi sismici che si sono verificati nell'Italia Centrale nel 2016.

Il Ponte a Cinque Occhi ha subito accelerazioni alla base molto prossime a quelle rilevate per il Ponte a Tre Occhi, con una prevalenza di azione, anche per questa struttura, lungo la direzione longitudinale. I danni rilevati consistono, oltre ad un aggravamento delle espulsioni dei riempimenti murari dei rinfianchi degli archi, conseguenti alla scarsa manutenzione, alla formazione di cerniere in corrispondenza dell'innesto degli archi alle pile (imposta degli archi), così come si rileva anche dalle viste globale laterale e di dettaglio riportate nella Figura 8. Tale meccanismo, dovuto alle notevoli forze inerziali agenti lungo la direzione longitudinale del ponte e quindi parallelamente agli archi, è coerente con le fessurazioni verticali o sub-verticali rilevate sulle pile (vedi Figura 9), ascrivibili a fenomeni di schiacciamento della muratura costituente la pila, oltre che con il ridotto rapporto spessore/lunghezza arco.

Figura 6
Interventi di somma urgenza per la messa in sicurezza per il Ponte Tre Occhi.



Figura 7
Stato di fatto del Ponte Cinque Occhi dopo l'evento sismico del 24 agosto 2016.



Le lesioni sulle pile sono, infatti, concentrate in corrispondenza dell'attacco degli archi e si estendono, in direzione verticale, fino alle fondazioni delle pile stesse, come si rileva dalla Figura 9. Le lesioni, che risultano in parte coperte dal materiale di rivestimento presente sulle pile, hanno un'ampiezza variabile tra 1 mm e 10 mm.

Anche a seguito degli altri eventi sismici del 2016, la carreggiata del ponte, realizzata su un misto granulare stabilizzato, non ha riportato lesioni alla pavimentazione in conglomerato bituminoso e non sono stati rilevati cedimenti della soletta.

Il ponte è rimasto aperto alla circolazione, con la sola limitazione, imposta, dopo il terremoto del 24 agosto, del carico massimo transitabile pari a 3.5 tonnellate fino all'evento sismico del 30 ottobre. A seguito di questo evento, sono collassati, con espulsioni fuori piano, diverse parti dei rin fianchi degli archi, soprattutto in corrispondenza delle spalle. Tenuto conto dell'incremento di traffico agente sul ponte, conseguente anche alla ripresa delle attività scolastiche nella zona del cratere, il ponte è stato precauzionalmente chiuso al traffico. Successivamente, è stato dato mandato alla Società ASTRAL S.p.a., adottando il principio della sussidiarietà, di eseguire lavori provvisori di consolidamento dei rin fianchi degli archi, al fine di ripristinare quanto meno la sicurezza statica della struttura.

Gli interventi di consolidamento sono stati realizzati utilizzando reti metalliche elettrosaldate quadrate, maglia 20 x 20 cm, barrotti metallici di ammorsamento alla muratura e rifinitura con cementi fibro-rinforzati sia per i rin fianchi degli archi che parte della pile, così come riportato in Figura 10. I lavori di consolidamento hanno anche interessato le rifiniture della carreggiata; in particolare sono stati riparati anche i cordoli perimetrali dove sono ancorati i sistemi metallici di ritenuta, disponendo anche nuove tubazioni in PVC per il deflusso delle acque (vedi Figura 10).



Figura 8
Fessurazione rilevata sulle pile dopo il terremoto del 24 agosto 2016.



Figura 9
Ponte a Cinque Occhi dopo i lavori di consolidamento statico: superfici murarie riparate con cementi fibrorinforzati e sistemazione dei cordoli perimetrali della carreggiata e tubazioni di deflusso acque sede viaria.

3.1.3. Ponte di Mozzano

Il ponte sorge al Km 3+400 della SP 226 ed attraversa il fiume Tronto in prossimità del centro abitato di Mozzano, a breve distanza da Ascoli Piceno, lungo il tracciato dell'antica strada consolare Salaria (SS4). Si tratta di un ponte in muratura costituito da un unico arco semicircolare ed interamente realizzato con pietra squadrata. La carreggiata a doppio senso di marcia ha una larghezza di circa 7.0 m ed è protetta da un parapetto di altezza pari a circa 1.2 m costituito da blocchi lapidei squadrate (vedi Figura 11).

A seguito dell'evento sismico del 30 ottobre 2016 sul ponte sono stati rilevati sia spostamenti di alcuni blocchi costituenti il parapetto murario che alcune lesioni del manto bituminoso costituente la sede viaria. Sono state adottate misure progressive di riduzione del traffico veicolare, inizialmente ridotto ad un unico senso di marcia e poi completamente chiuso al passaggio di autoveicoli.

È utile evidenziare che il ponte Mozzano già presentava da tempo problematiche connesse al dissesto delle murature dei parapetti. Tale dissesto, ascrivibile alla vegetazione presente lungo i rinfianchi dell'arco ed in corrispondenza della muratura del parapetto, è stato amplificato a seguito degli eventi sismici di ottobre 2016. Sono stati infatti rilevati, durante il sopralluogo eseguito a fine novembre 2016, spostamenti orizzontali e verticali dei blocchi lapidei di 30-40 mm, così come illustrato in Figura 12. Le parti strutturali del ponte in muratura, anche a seguito degli altri eventi sismici che si sono verificati nell'area, non hanno riportato danni, dimostrando quindi l'ottima risposta sismica del sistema strutturale del ponte Mozzano (vedi Figura 12).

A seguito della chiusura del ponte al traffico veicolare, è stato eseguito da parte dell'Ente Provincia di Ascoli Piceno un intervento urgente di manutenzione straordinaria consistente nella rimozione delle alberature presenti sulle murature laterali, il riempimento con misto cementato con bitumatura del piano viabile al fine di impermeabilizzare al meglio l'infrastruttura viaria, il ripristino delle bocchette ostruite e, infine, la riparazione dei parapetti. I lavori di manutenzione, che sono iniziati nella prima decade di marzo 2017, hanno avuto una durata di circa due settimane.

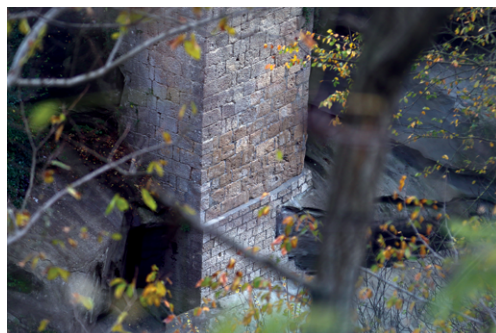
Figura 10
Ponte di Mozzano: vista laterale: vista frontale ed interna del danneggiamento del parapetto murario.



Figura 11
Spostamenti rilevati dei blocchi lapidei costituenti il parapetto.



Figura 12
Imposta dell'arco e pila in muratura.



3.2 Ponti in c.a.

Diversi ponti in c.a. sono stati ispezionati in seguito ai terremoti che hanno interessato l'Italia centrale fra agosto del 2016 e gennaio del 2017. In particolare, nell'area maggiormente colpita dalla scossa del 24 agosto 2016 sono stati considerati i viadotti delle Strade Statali SS4 "Salaria" e SS685 "Tre Valli Umbre". Nel complesso, questa attività ha rilevato un comportamento soddisfacente per i ponti in c.a., con conseguenze limitate sulla rete stradale di cui essi fanno parte. Si è infatti osservato che durante questa sequenza sismica strutture flessibili, quali i ponti in c.a., sono risultate meno sensibili al danneggiamento rispetto ad altre più rigide, quali i ponti in muratura. Benché l'estensione del danno sia stata diversa a seconda del singolo evento sismico e del singolo ponte, in generale durante il rilievo sono emersi alcuni schemi di danno ricorrenti. Nessuno dei ponti ispezionati si è comunque presentato in condizioni preoccupanti dal punto di vista della sicurezza strutturale.

Le SS4 e SS685 costituiscono due arterie fondamentali per i trasporti stradali attraverso l'Italia centrale: queste strade sono prevalentemente orientate in direzione est-ovest, collegando le due coste adriatica e tirrenica. Nell'area interessata dalla sequenza sismica queste arterie includono diversi ponti e viadotti in c.a. Buona parte di queste strutture, risalenti agli anni '70 ed '80, è stata progettata con un'attenzione minima, se non nulla, ai principi e ai dettagli costruttivi necessari per una buona risposta sismica. Questi manufatti rappresentano dunque interessanti casi di studio perché potenzialmente suscettibili di diversi fra i meccanismi di danno descritti in precedenza. La configurazione tipica dei ponti in c.a. ispezionati è rappresentata dai viadotti della SS685 in prossimità di Pescara del Tronto (AP), illustrati in Figura 14, o dal viadotto "Scandarello" sulla SS4 nelle vicinanze di Amatrice (RI), mostrato in Figura 15.

Il sistema strutturale è generalmente costituito da travi in c.a. prefabbricate, di solito precomprese, collegate fra loro da una soletta collaborante in c.a. gettata in opera. Le travi sono sorrette da appoggi elastomerici, situati sopra i traversi delle pile, senza l'ausilio di ancoraggi. Si noti che questi appoggi elastomerici sono stati concepiti non come apparecchi di isolamento sismico, ma per resistere alle azioni verticali e per consentire piccoli spostamenti e rotazioni relativi dovuti alle variazioni termiche. In più, data l'assenza di ancoraggi o bulloni, questi apparecchi consentono di trasferire le azioni orizzontali fra impalcato e traverso in virtù del solo attrito fra la gomma e il calcestruzzo: per questo motivo, l'impalcato tende a scorrere non appena le forze laterali superano la resistenza per attrito. È dunque evidente che in questa configurazione l'impalcato del ponte è scarsamente vincolato contro gli spostamenti orizzontali relativi alla sottostruttura (pile e traversi), benché chiavi di taglio siano a volte realizzate sui traversi e sulle spalle, per prevenire movimenti laterali eccessivi.

Nonostante lo scarso collegamento fra impalcato e sottostruttura, gli appoggi elastomerici sono parsi in buone condizioni in tutti i viadotti ispezionati, senza segni di scorrimento rispetto alla loro posizione originale, come mostrato in Figura 16. Pur non essendo stata documentata alcuna perdita di appoggio delle travi di impalcato, sono stati riscontrati lievi danni dovuti a spostamenti longitudinali eccessivi. Questi spostamenti hanno provocato fenomeni di martellamento fra campate successive o fra campate terminali e spalle, causando fessure e distacchi di calcestruzzo sui traversi, sui diaframmi trasversali e sulle spalle, come illustrato in Figura 17. Nei viadotti ispezionati non sono stati rilevati danni significativi alle pile.

Considerando le dimensioni medie delle pile e degli impalcati, per queste strutture si è stimato in via del tutto approssimativa un periodo fondamentale di vibrazione dell'ordine di 1.0 s. Si può allora in parte spiegare la limitata estensione dei danni osservati imputabili alla scossa del 24 agosto, visto che la massima accelerazione spettrale si è registrata nell'intorno di un periodo di 0.25 s. Si vuole però sottolineare che sono stati osservati danni pregressi diffusi, dovuti in molti casi alla scarsa manutenzione dei manufatti. In particolare, fra le situazioni preesistenti si sono rilevati distacchi del copriferro di calcestruzzo, con esposizione e corrosione delle armature sia degli elementi di implacato, che su traversi, pile e spalle (Figura 17).

Durante l'ispezione di un ponte sulla SP173 "Circonvallazione di Offida", sono stati rilevati consistenti cedimenti della pavimentazione stradale in corrispondenza delle spalle. Tali cedimenti hanno provocato danni alle parti in c.a. ed ai giunti strutturali, così come evidenziato nella Figura 18. L'instabilità del pendio in corrispondenza delle spalle potrebbe essere la causa dei cedimenti osservati; infatti, una delle spalle era già stata oggetto di intervento di messa in sicurezza con paratie.



Figura 13
Configurazione tipica dei viadotti in c.a. ispezionati lungo la SS685 in prossimità di Pescara del Tronto (AP): (a) coordinate 42.752002 N, 13.267902 E; (b) coordinate 42.756556 N, 13.277111 E.

Figura 14
Viadotto "Scandarello"
lungo la SS4 in prossimità
di Amatrice, coordinate
42.643309 N, 13.266802 E
(adattato da ANAS, Relazione
Esecutiva, 2010).



Figura 15
Appoggi elastomerici di uno
dei viadotti in c.a. esaminati
lungo la SS685; non si notano
segni di eventuali scorrimenti
relativi (per concessione
di Totaro).



Figura 16
Danni da martellamento e
danni pregressi ai viadotti
in c.a.: (a) danni al traverso
e al diaframma trasversale
lungo la SS685, coordinate
42.756556 N, 13.277111 E;
(b) danni ad una spalla lungo
la SS4, coordinate 42.699565
N, 13.251978 E (per
concessione di Totaro).



Figura 17
Viadotto in c.a. lungo la
SP173, coordinate 42.941687
N, 13.702294 E:
(a) vista generale del ponte;
(b) abbassamento della sede
viaria in corrispondenza di
una spalla; (c) lesioni del
manto della pavimentazione
in corrispondenza di una
spalla; (d) spostamenti
relativi della spalla.



3.3 Altre tipologie strutturali di ponti

3.3.1 Struttura mista in c.a. e muratura: Ponte Rosa

Il cosiddetto “Ponte Rosa” (Figure 19) è posizionato lungo un tratto viario che connette la strada SR577 con il Retrosi, vicino ad Amatrice. La struttura del ponte comprende tre travi a sezione variabile in c.a. che formano complessivamente un sistema a cinque campate. Dette campate presentano due selle Gerber, in corrispondenza della mezzeria della seconda e quarta campata. Le campate poggiano su quattro pile di muratura, aventi sezioni rettangolari con smussi di estremità. Le pile sono costituite internamente da muratura a sacco e presentano un rivestimento in mattoni in laterizio pieno (vedi Figure 19). Il rivestimento in mattoni di laterizio è presente anche in corrispondenza delle spalle del ponte. Le travate in c.a. risultano semplicemente appoggiate alle pile ed in corrispondenza delle spalle; non sono presenti dispositivi di appoggio o dispositivi di ancoraggio. Il ponte si sviluppa longitudinalmente in direzione NNE-SSO; pertanto la struttura è stata sollecitata da una PGA pari a circa 0.380-0.870-0.400 g durante la sequenza sismica del 24 agosto e del 26 e 30 ottobre, trovandosi in prossimità di Amatrice, così come illustrato anche nel Paragrafo 2.

Il Ponte Rosa presentava avanzati fenomeni di degrado e danno pregresso dovuto alla scarsa manutenzione (Figure 19a e b). In particolare, erano presenti diffuse scalzamenti dei copriferri delle travate in c.a., con chiara esposizione delle barre di armatura ad azioni di tipo corrosive (Figura 19b), specialmente in corrispondenza delle zone dove sono presenti le selle Gerber (Figura 19b). Le pile in muratura presentavano fenomeni di degrado per la malta dei giunti e per gli effetti della presenza di una diffusa vegetazione che in taluni punti ha provocato l’espulsione di alcuni blocchi di muratura (Figura 19c, d). Inoltre, i collegamenti tra parapetto e la soletta risultano non progettati adeguatamente: in diversi punti, infatti, il parapetto risulta significativamente danneggiato, anche, forse, a seguito di urto di veicoli transitanti sul ponte.

Dopo l’evento sismico del 24 agosto, il traffico veicolare è stato limitato considerando un carico massimo di 3.5 t. Per poter far spostare automezzi con carichi superiori a 3.5 t è stato realizzato un by-pass con un ponte militare metallico tipo Bailey, realizzato in pochi giorni dal Genio Militare.

Il Ponte Rosa ha subito diversi alle pile in muratura (Figure 19c e d), con lesioni verticali ed inclinate interessanti l’intera pila. Il depauperamento delle malta dei giunti della muratura della pila, combinato con la scarsa resistenza a taglio della muratura, nonché la presenza di significative accelerazioni verticali registrate in sito, possono essere imputate come possibili cause dei danni rilevati.

3.3.2 Struttura mista in acciaio e c.a.: Ponte Ramazzotti

Per il Ponte Ramazzotti localizzato sulla SP20, che presenta una travata del tipo composto acciaio-calcestruzzo su pile in c.a., non sono state rilevate lesioni e/o situazioni di danneggiamento post-sisma. Si è cercato di accedere agli appoggi in corrispon-



Figura 18
Ponte Rosa:
(a) vista generale del ponte;
(b) particolare sella Gerber;
(c) appoggio delle travate
in corrispondenza di una
pila in muratura; (d) stato
manutentivo delle pile in
muratura.

Figura 19
 Ponte Ramazzotti - Struttura
 composta acciaio-
 calcestruzzo (42.7276 deg,
 13.311 deg): vista generale
 del ponte (a, b), spalla (c)
 appoggi (d).



denza delle spalle; essi sono risultati integri e tali da garantire il normale utilizzo dell'infrastruttura viaria (vedi Figura 20). Per le pile intermedie le informazioni sono limitate in quanto non accessibili. Le spalle non presentano cedimenti e non vi sono segni di martellamento e/o perdita di appoggio.

4. Conclusioni

La sequenza sismica che si è verificata in Italia Centrale a partire dal 24 agosto 2016 ha causato danni molto consistenti in un'ampia area che coinvolgendo le quattro regioni di Lazio, Umbria, Marche e Abruzzo.

Nel presente lavoro si è analizzata la risposta strutturale dei ponti in muratura ed in c.a. durante la sequenza sismica registrata nel Centro Italia nel 2016-2017. In particolare sono state esaminate le infrastrutture viarie presenti nell'area del cratere ed essenziali per le operazioni di soccorso.

I rilievi eseguiti durante i sopralluoghi effettuati ed i risultati dell'esame della risposta sismica delle infrastrutture analizzate consentono di concludere che, per i ponti in muratura ed in c.a. e miste muratura-c.a., gran parte dei danni rilevati sono attribuibili principalmente a fenomeni di degrado dovuti alla scarsa manutenzione, nonché a stati pregressi di danneggiamento. Per i ponti in c.a. si sono rilevati danneggiamenti concentrati prevalentemente in corrispondenza dei giunti tra campate contigue ovvero all'attacco con le spalle. Le strutture miste acciaio-calcestruzzo non hanno, invece, subito alcun danno significativo. Molti dei collassi parziali rilevati per le strutture in c.a. sono dovuti a meccanismi di natura geotecnica che si sono sviluppati in prossimità delle spalle e/o per sistemi franosi sisma-indotti.

Bibliografia

- AAVV (2009) - Linee guida e manuale applicativo per la valutazione della sicurezza sismica e il consolidamento dei ponti esistenti in C.A. Report Progetto DPC-Reluis 2005-2008 http://www.reluis.it/Report_2005-2008/Linea_03/LineeGuida_e_Manuale_PontiEsistenti.pdf
- AAVV (2009) - The Mw 6.3 Abruzzo, Italy, Earthquake of April 6, 2009. EERI special earthquake report. https://www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2009_pdf/LAquila-eq-report.pdf
- AAVV (2017) - Comportamento degli edifici in muratura nella sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016. Parte 1: Quadro generale. Progettazione Sismica.
- ANAS S.p.A. (2010) - Condizione Generale Tecnica Unità Ricerca e Innovazione, Relazione Tecnica Esecutiva, 04.11.10.
- da Porto F., Tecchio G., Zampieri P., Modena C., Prota A. (2016) - Simplified seismic assessment of railway masonry arch bridges by limit analysis. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(5): 567-591, DOI: 10.1080/15732479.2015.1031141.

- Di Sarno L., da Porto F., Guerrini G., Calvi P.M., Camata G., Prota, A. (2017) - Seismic performance of bridges during the 2016 Central Italy earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering* (submitted for publication).
- Grossi P., Williams C., Cabrera C., Tabucchi T., Sarabandi P., Rodriguez A., Aslani H., Rahnama M. (2011) - The 2010 Maule, Chile earthquake: lessons and future challenges. 2011 Risk management solutions, Inc.
- Heyman J. (1966) - The stone skeleton. *International Journal of Solids and Structures*, 2, 249-279.
- Ioannou I., Borg R., Novelli V., Melo J., Alexander D., Kongar I., Verrucci E., Cahill B., Rossetto T. (2012) - The 29th May 2012 Emilia Romagna Earthquake, EPI Centre Field Observation Report No.EPI-FO-290512, UCL, EPI Centre 2012, June.
- Kawashima K., Takahashi Y., Ge H., Wu Z., Zhang J. (2009) - Reconnaissance report on damage of bridges in 2008 Wenchuan, China, earthquake. *J Earthq Eng* 13: 956-998.
- Kawashima K., Aydan Ö., Aoki T., Kishimoto I., Konaga K., Matsu T., Sakuta J., Takahashi N., Teodor S.P., Yashim A. (2010) - Reconnaissance investigation on the damage of The 2009 L'Aquila, central Italy earthquake, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 14, pp.816-841.
- Modena C., Tecchio G., Pellegrino C., Donà M., da Porto F., Zampieri P., Zanini M.A. (2015) - Reinforced concrete and masonry arch bridges in seismic areas: typical deficiencies and retrofitting strategies, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(4): 415-442, DOI: 10.1080/15732479.2014.951859.
- ReLUIS-INGV Workgroup (2016) - Preliminary study on strong motion data of the 2016 central Italy seismic sequence V6, available at <http://www.reluis.it>
- Resemini S., Lagomarsino S. (2004) - Vulnerabilità sismica dei ponti ferroviari ad arco in muratura, in: *Proceedings of the XI Congresso Nazionale, L'ingegneria Sismica in Italia*, Genova, pp. 25-29.

Gli Autori

Luigi Di Sarno

Laureato in Ingegneria Edile presso l'Università di Napoli, ha conseguito il Dottorato nel 2001 in "Vibration Control of High-Rise Buildings Under Environmental Actions" presso l'Università degli Studi di Salerno. Ha ottenuto il Master of Science in Earthquake Engineering and Structural Design (nel 2000) ed il Master in Structural Steel Design (nel 2001) presso l'Imperial College of Science, Technology and Medicine di Londra, UK. Ha poi svolto un'attività biennale di Post-Dottorato all'University of Illinois a Urbana-Champaign, USA. Nel 2003 è risultato vincitore in Italia di un assegno di ricerca dell'ENEA sullo studio di nuovi materiali e tecnologie per la mitigazione del rischio sismico del patrimonio costruito. Dal 2005 è in servizio presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio, Benevento, come Ricercatore di Tecnica delle Costruzioni. È co-autore del libro "Fundamentals of Earthquake Engineering", pubblicato, in seconda edizione, nel 2015 da Wiley and Sons, UK. Ha pubblicato oltre 200 articoli su rivista, convegni nazionali ed internazionali, di cui è stato anche relatore. Svolge l'attività di relatore in seminari e corsi aventi ad oggetto analisi, modellazione e verifica sismica di edifici e ponti esistenti in c.a., strutture metalliche e composte acciaio-calcestruzzo, sistemi di isolamento sismico e dissipazione, soprattutto per strutture ed infrastrutture strategiche, componenti non strutturali ospedalieri.

Francesca da Porto

Laureata in Ingegneria Edile a Padova nel 2000 e dottore di ricerca nel 2005 presso l'Università di Trento, ha svolto attività di ricerca anche presso l'Universitat Politècnica de Catalunya, lo U.S. Department of Interior e lo Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Lubiana. È professoressa associata di Tecnica delle Costruzioni presso l'Università di Padova, dove svolge anche il ruolo di Prorettore all'Edilizia. Autrice di circa 200 articoli scientifici, ha coordinato progetti europei ed è titolare di finanziamenti pubblici e privati. Ha svolto intense attività di supporto alla gestione delle emergenze sismiche, in collaborazione con Protezione Civile, ReLUIS e MIBACT. È revisore scientifico di molte riviste scientifiche e valutatore di diverse agenzie di finanziamento internazionali. È vicepresidente della Commissione Ingegneria strutturale - SC 6 dell'UNI, delegato nazionale presso il CEN e membro di uno dei project team per la riscrittura degli eurocodici.

Gabriele Guerrini

Assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia, dove collabora anche con la Fondazione Eucentre. Ha conseguito le lauree triennale e magistrale in Ingegneria Civile presso l'Università di Bologna, per poi perfezionarsi con un master e un dottorato di ricerca in Ingegneria Strutturale presso la University of California, San Diego. I suoi interessi di ricerca e professionali riguardano principalmente l'analisi e la progettazione sismica delle strutture mediante approccio "performance-based", con particolare riferimento a: costruzioni in muratura nuove ed esistenti, anche di interesse storico; strutture in cemento armato normale e precompresso; strutture composte acciaio-calcestruzzo; soluzioni a danno limitato, quali sistemi auto-ricentranti e isolamento sismico; sperimentazione su materiali, componenti e sistemi strutturali; dinamica e analisi non lineare delle strutture.

Andrea Prota

Laureato in Ingegneria Edile nel 1998 presso la Facoltà d'Ingegneria dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II". Ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Strutture (XIV ciclo) presso la stessa Università nel marzo 2002 ed il Master in Civil Engineering presso la University of Missouri-Rolla (USA) nel maggio 2002. È stato Assegnista di Ricerca presso l'Università del Sannio e poi, dal dicembre 2002, Ricercatore in Tecnica delle Costruzioni presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II. Successivamente è stato Professore Associato di Tecnica delle Costruzioni dal 16 dicembre 2011 ed è Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II dal 1 novembre 2015. È Titolare del Corso di Tecnica delle Costruzioni, del Corso di Innovative Building Materials e del Titolare del Corso di Diagnosi e Terapia dei Dissesti Strutturali. È autore di oltre 450 lavori scientifici pubblicati su rivista o presentati a congressi e commissioni nazionali ed internazionali. È membro di commissioni normative e prenormative in ambito nazionale ed internazionale.