

PONTE FERROVIARIO A TRAVATE METALLICHE SUL FIUME SALSO

E. Lo Giudice¹, G.L. Di Marco², G. Navarra¹, R. Mantione², V. Carlisi¹, C. Vitellaro³, P. Sorce³

¹ Laboratorio Dismat srl, C.da Andolina, S.S. 122 – km 28 – 92024 Canicattì (AG),
tel. 0922 859406, fax 0922 853877, eliologiudice@dismat.it; giuseppenavarra@dismat.it;
valecarlisi@libero.it

² Studio Tecnico Lo Giudice – Di Marco, Via Garibaldi, 225 92020 Racalmuto (AG),
tel. 0922 942603, dimarco.gia@libero.it; robertamantione.rm@gmail.com

³ SO Ingegneria DTP Palermo RFI Piazzetta Cairoli, 5, 90123 Palermo,
tel. 091 6033760 c.vitellaro@rfi.it; p.sorce@rfi.it

SOMMARIO

La Rete Ferroviaria Siciliana, la cui costruzione risale al periodo 1861-1879, nel corso dei tanti anni di servizio è stata sottoposta a numerosi interventi di ammodernamento. Oggi si sta attuando un piano di adeguamento di alcune linee ai nuovi standards e la linea Canicattì-Gela-Comiso rientra in tale programma. In accordo con l'Ente Gestore, nell'ambito di un piano generale che prevede la *velocizzazione* della linea, si è concordata una metodica che contempla la redazione di un protocollo di indagini strutturali funzionale alle verifiche statiche da eseguire su un campione significativo di opere d'arte. Nella memoria si descrivono, in particolare, il complesso delle indagini non distruttive e di caratterizzazione dinamica condotte sul ponte a travate metalliche sul fiume Salso in corrispondenza della città di Licata.

1. DESCRIZIONE GENERALE DEL MANUFATTO

Il ponte, in carpenteria metallica, attraversa in obliquo il fiume ed è costituito da tre campate isostatiche con struttura di tipo reticolare. Ogni singola campata, dal punto di vista costruttivo, è stata risolta mediante lo schema classico formato da due travi maestre reticolari di tipo Pratt aventi corrente superiore con sezione aperta composta da elementi a U e collegati da una piattabanda superiore continua ed opportunamente diaframmata, corrente inferiore avente sezione formata da due profili composti a T rovescia (le cui dimensioni delle ali variano longitudinalmente), aste diagonali di parete costituite da profili laminati ad U calastrellati fanno eccezioni le diagonali di accesso che presentano sezione composta scatolare, i montanti sono in profilo laminato a doppio T. Completano l'impalcato traversoni in profilo a doppio T composto, i longheroni a doppio T composto, il controvento orizzontale. Circostanza singolare della composizione strutturale del manufatto è costituita dalla mancanza della trave di frenamento che sarebbe stato opportuno inserire in considerazione della luce della travata [10]. L'impalcato poggia su apparecchi di appoggio in acciaio di cui uno di tipo fisso a *bilanciere* [10] e l'altro a carrello con *rulli a settore* [10]. Le sottostrutture sono realizzate in muratura con blocchi lapidei squadrati aventi in sommità una piastra di ripartizione in c.a.



Figura 1 Appoggio cerniera



Figura 2 Appoggio carrello

Le caratteristiche geometriche principali sono riassunte in Tabella 1.

Elemento strutturale	Dimensione [m]
Lunghezza ponte	112
Lunghezza campata di riva	36
Lunghezza campata centrale	40
Larghezza impalcato	4.80
Altezza spalle	3.40
Altezza pile	3.96-5.30
Altezza trave reticolare	3.96

Tabella 1 Dimensioni rilevate



Figura 3 Ponte a travate metalliche sul fiume Salso

2. SCOPI DEL LAVORO

Lo scopo del lavoro è quello di verificare le prestazioni della struttura in funzione del nuovo livello di servizio richiesto in conseguenza della velocizzazione. Lo studio è stato condotto secondo quanto previsto dal Capito 8 dalle norme tecniche [1] e secondo le disposizioni del manuale di progettazione RFI [4].

Il livello di conoscenza dell'opera si è raggiunto mediante dettagliate indagini, concordate con la committenza, svolte in situ e in laboratorio i cui risultati sono stati successivamente impiegati sia per la realizzazione del modello FEM sia per le verifiche statiche propedeutiche alla formulazione del giudizio sulla possibilità di mantenere in servizio il manufatto.

Il protocollo d'indagine ha previsto:

- Rilievo geometrico-strutturale e del degrado dell'opera;
- Caratterizzazione meccanica dei materiali dell'impalcato e delle sottostrutture;
- Valutazione dei parametri di rigidezza, smorzamento e forme modali mediante prove di caratterizzazione dinamica;
- Verifiche statiche e formulazione del giudizio sulla capacità portante.

3. RILIEVO GEOMETRICO-STRUTTURALE E DEL DEGRADO

La prima fase operativa ha riguardato il rilievo geometrico-strutturale mediante indagini visive, misure metriche, indagini Georadar, indagini pacometriche, endoscopiche e spessimetriche individuando la conformazione e le dimensioni del manufatto.

Le varie parti dell'impalcato metallico, come già precisato, sono ottenute mediante assiemaggio di elementi laminati con chiodatura. Le dimensioni dei profili è stata rilevata per mezzo di calibro e per via indiretta mediante indagini spessimetriche. A titolo esemplificativo si riportano alcuni dei profili rilevati.

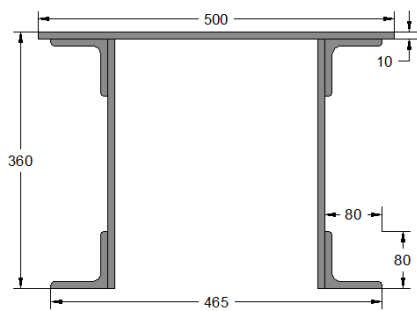


Figura 4 Profilo briglia superiore

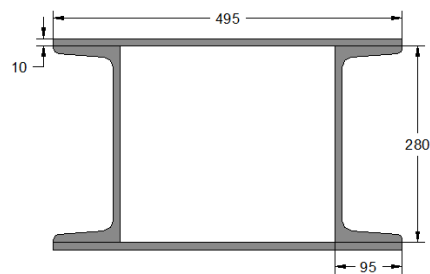


Figura 5 Profilo diagonali

A completamento del rilievo geometrico è stata effettuata l'indagine Georadar sulle sottostrutture per individuare eventuali presenze di anomalie, cavità ed inclusioni. Di seguito si riportano lo schema d'indagine GPR ed alcuni dei radargrammi più significativi.

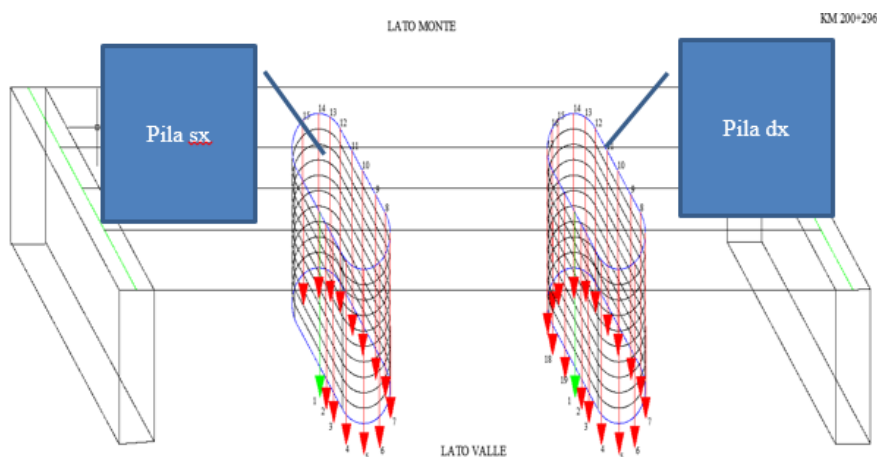


Figura 6 Schema indagine Georadar svolta

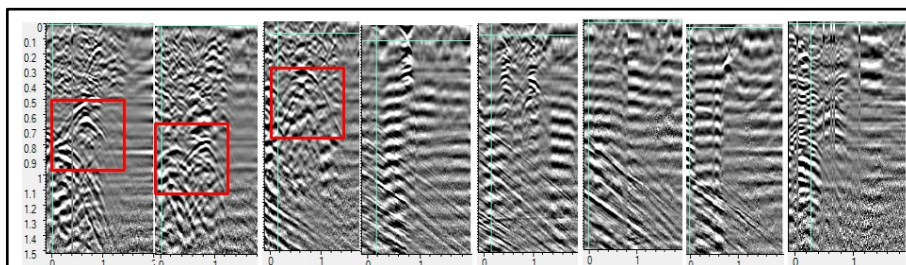


Figura 7 Sezione longitudinale – Pila sinistra

La lettura dei radargrammi restituiti, effettuati sulle pile in muratura, ha mostrato l'omogeneità del materiale con riscontro di alcune anomalie probabilmente imputabili al materiale lapideo di grossa pezzatura presente al suo interno.

Per discriminare il materiale costituente le spalle e le pile sono state condotte indagini endoscopiche all'interno dei fori realizzati dai carotaggi per una profondità di circa 160 cm riscontrando uniformità della tipologia muraria dell'intero paramento murario con presenza di lievi cavità interne alla muratura.

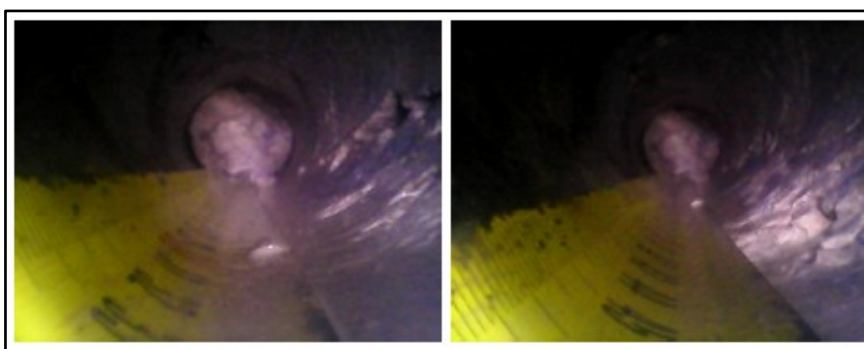


Figura 8 Endoscopia Spalla destra

Sulle piastre di ripartizione in c.a. delle strutture di sostegno sono state eseguite indagini pacometriche che hanno permesso di valutare lo spessore del copriferro, la posizione e il diametro delle armature.

Infine si è valutato lo stato di degrado attraverso l'esame visivo di tutte le parti strutturali; esso ha consentito di appurare che l'attacco corrosivo degli elementi in acciaio è limitato alla sola superficie dei profili senza intaccarne quindi la sezione.

Inoltre si è evidenziato il distacco del copriferro delle piastre in c.a. e l'assenza di giunti di malta in alcune zone localizzate di spalle e pile.

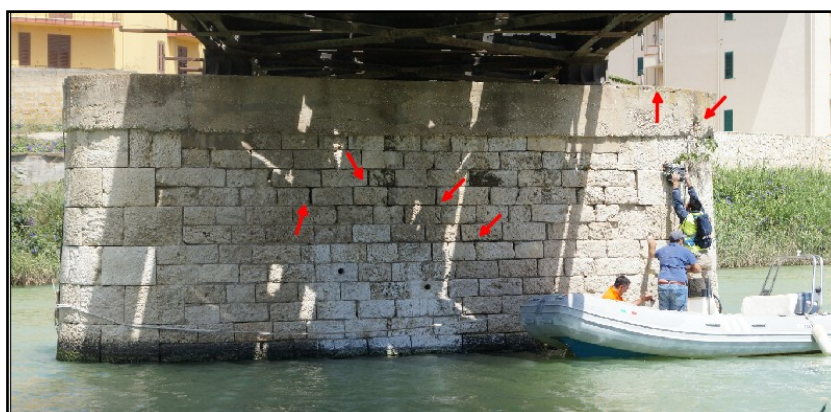


Figura 9 Distacco del copriferro e disgregazione dei giunti di malta

4. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

La seconda fase del protocollo ha previsto la caratterizzazione dei materiali sia dal punto di vista meccanico sia chimico. La stima della resistenza meccanica a trazione dell'acciaio dei profili, vista l'impossibilità di prelievo di materiale, è stata ottenuta tramite l'esecuzione di prove di microdurezza con metodo a rimbalzo Leeb utilizzando un Microdurometro Smart Sensor AR936. Le prove sono state precedute dall'accurata preparazione della superficie da indagare mediante mola e successiva levigatura con carta abrasiva. I risultati dei valori medi ottenuti per tutti gli elementi indagati sono riportati in Tabella 2.



Figura 10 Microdurezza Diagonale campata 3 Figura 11 Microdurezza Piedritto campata 2

	Piedritti Camp. 1	Piedritti Camp. 2	Piedritti Camp. 3	Diagonali Camp. 1	Diagonali Camp. 2	Diagonali Camp. 3
Durezza di Leeb (HDL)	367	374	374	378	372	369
Durezza di Vickers (HV)	122	128	128	131	126	124
Resist. mecc. a trazione [N/mm ²]	414	392	430	440	426	420

Tabella 2 Valori medi ottenuti per gli elementi strutturali delle tre campate

La caratterizzazione meccanica della muratura è stata ottenuta seguendo un procedimento alternativo a quello previsto dalla Circolare Esplicativa 617/2009 al § C8A.1.A.3. tale procedura è stata preliminarmente concordata ed approvato dalla Committenza. Le motivazioni che hanno indotto a non utilizzare quanto previsto dalla Circolare sono connesse con l'impossibilità di eseguire misure dirette in situ mediante martinetti piatti o compressione diagonale senza incorre in non conformità procedurali nel primo caso [14] e per la materiale irrealizzabilità di esecuzione delle seconde.

La procedura messa a punto ha previsto:

- determinazione della resistenza f_{bk} dei blocchi lapidei mediante elaborazione delle risultanze sperimentali dedotte dalle prove di compressione su elementi cilindrici ricavati dai campioni estratti mediante carotaggio;
- prove penetrometriche effettuate mediante trapano PNT-D per stimare la resistenza a compressione della malta e la relativa classe di appartenenza;
- definizione della curva che definisce la resistenza a compressione della muratura, f_k , che dipende dal valore f_{bk} al variare della classe di malta.

Oltre agli aspetti quantitativi sono state eseguite sulla malta indagini allo stereomicroscopio per definirne la composizione mineralogico-petrografica, analisi per

spettrofotometria UV-Vis con la quale si rileva qualitativamente la presenza di ioni solfato e prove chimiche per la stima della presenza di ioni cloruro.

5. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEL MANUFATTO

La valutazione del comportamento globale della struttura è stata eseguita mediante di prove di caratterizzazione dinamica, allo scopo sono stati predisposti due set up di prova con la collocazione di 12 sensori accelerometrici ciascuno; quest'ultimi posizionati in punti prestabili dettati dalla necessità di ricostruire le forme modali. La rete dei sensori è stata collegata ad una centralina di acquisizione a 24 bit con convertitore Analogico/Digitale (N.I. C-Daq 9172+4 USB9234). La struttura è stata eccitata mediante forzante ambientale e le acquisizioni hanno avuto una durata di 2400 sec [13].

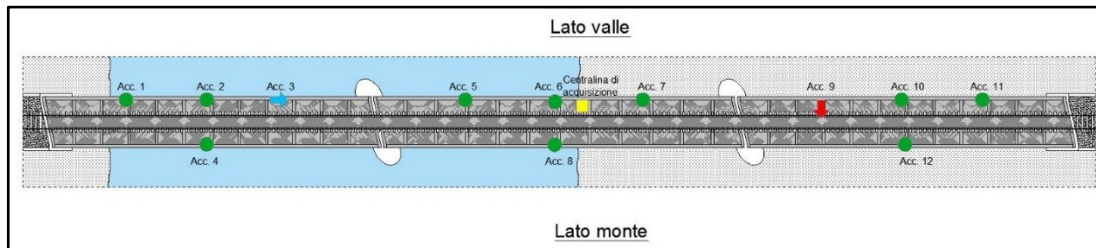


Figura 12 Disposizione della strumentazione – Set up 1

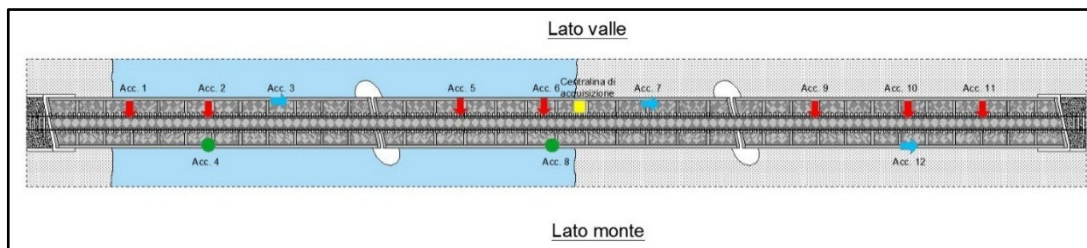


Figura 13 Disposizione della strumentazione – Set up 2

La prova ha permesso la stima dei parametri dinamici in termini di frequenze proprie, coefficienti di smorzamento e forme modali, attraverso l'Analisi Modale Operazionale (OMA) secondo la tecnica FDD (*Frequency Domain Decomposition*). I dati acquisiti nel dominio del tempo sono stati trasformati nel dominio della frequenza grazie all'algoritmo della *Fast Fourier Transform* (FFT). Essi, preliminarmente trattati [11,17] sono stati elaborati con software dedicato *ARTEMIS Modal 4.0*, consentendo la lettura delle frequenze sullo spettro dei valori singolari della matrice di densità spettrale. La tecnica FDD consiste in [15]:

- Determinazione delle matrici di potenza di densità spettrale di output (PSD), dei corrispondenti autospettri ed i cross-spettri per ogni test;
- Decomposizione delle matrici di densità spettrale in autovettori per ogni valore di frequenza;
- Interpretazione di ogni autovalore come autofunzione di un sistema ad un solo grado di libertà;
- Interpretazione dei primi autovettori del sistema, associati ai primi picchi dell'autospettro, come forma modale.

Tale metodo permette di identificare in maniera univoca le forme modali poiché è in grado di tener conto della molteplicità di modi alla stessa frequenza. Di seguito si riporta lo

spettro le prime frequenze sperimentali del sistema rilevate attraverso le prove effettuate e le corrispondenti forme modali (Tabella 2).

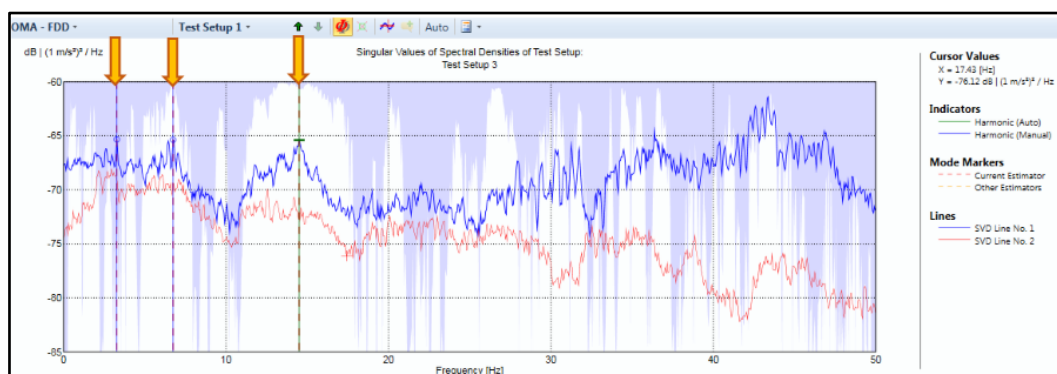


Figura 14 Valori singolari della matrice di densità spettrale – Campata 2 Setup 1

Lo smorzamento è stato stimato seguendo due vie: nel dominio della frequenza valutandolo per ogni fondamentale, nel dominio del tempo per mezzo di una valutazione complessiva operando sul decremento logaritmico. Il valore medio per l'indice di smorzamento ξ è risultato pari al 2.1 % [18].

6. MODELLO FEM E VERIFICHE

Sulla base dei risultati delle indagini sperimentali è stato realizzato un modello matematico agli elementi finiti del manufatto, opportunamente validato tramite le prove di caratterizzazione dinamica eseguite, esso è stato successivamente utilizzato per le verifiche statiche. La Tabella 3 riassume i risultati delle prove sperimentali e delle elaborazioni numeriche. Dal confronto si osserva il buon accordo tra i risultati. Infine sono state eseguite le verifiche statiche sulla base delle sollecitazioni ricavate dal modello FEM validato.

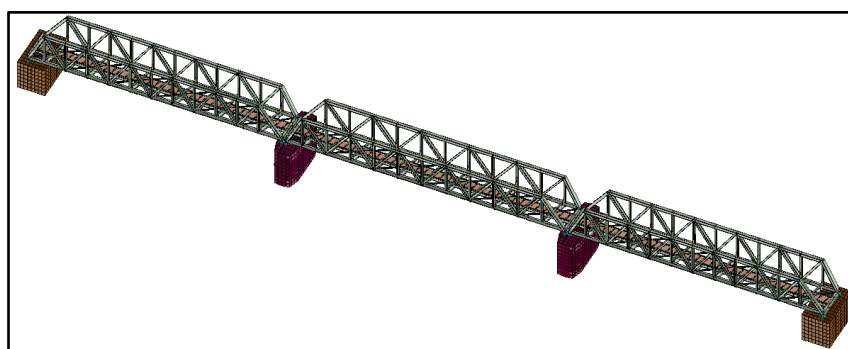


Figura 15 Modellazione con elementi solidi del modello FEM

	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]
Frequenze sperimentali	3.75	5.80	8.52
Frequenze Teoriche	4.05	6.07	7.76
<i>Differenza [%]</i>	-8.00	-4.60	8.90

Tabella 3 Confronto tra le frequenze sperimentali e teoriche

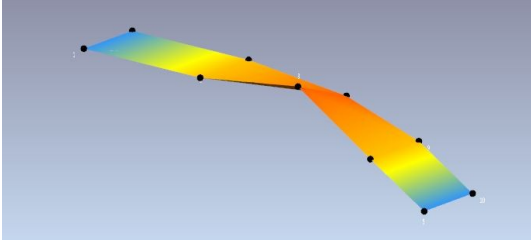
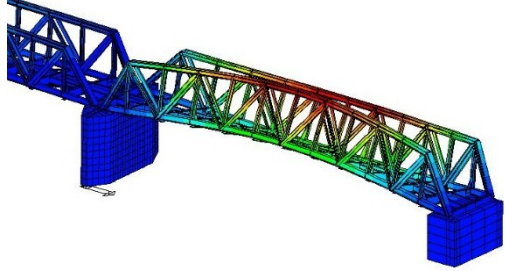
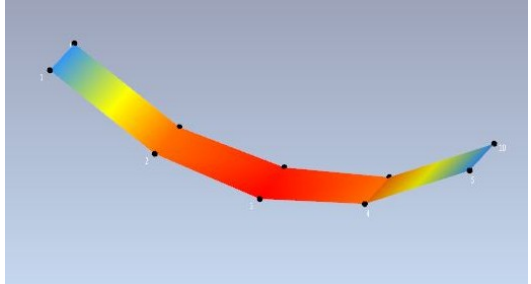
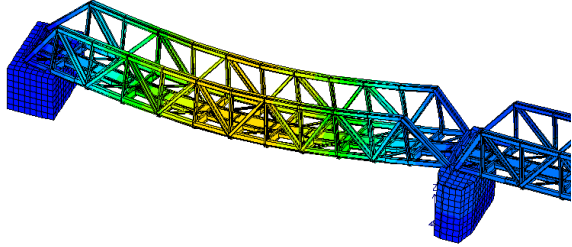
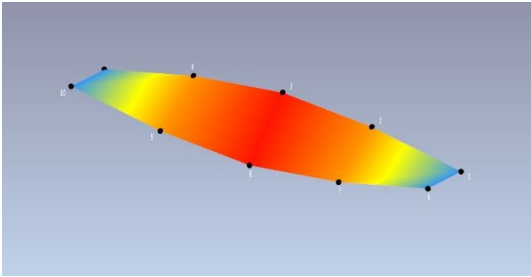
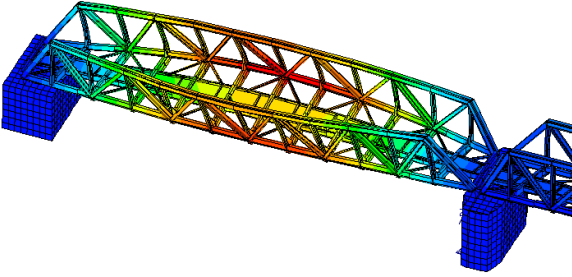
 <p>Sper. $f_1 = 3.75$ Hz</p>	 <p>FEM $f_1 = 4.05$ Hz</p>
 <p>Sper. $f_2 = 5.80$ Hz</p>	 <p>FEM $f_2 = 6.07$ Hz</p>
 <p>Sper. $f_3 = 8.52$ Hz</p>	 <p>FEM $f_3 = 7.76$ Hz</p>

Tabella 4 Confronto tra le deformate sperimentali e teoriche

7. CONCLUSIONI

La necessità di adeguare le tratte ferroviarie ai nuovi e più gravosi carichi dovuti alla velocizzazione della linea Canicatti-Gela-Comiso ha indotto l'Ente Gestore a predisporre studi, analisi e verifiche sulle opere d'arte in esse ricadenti. Il ponte in acciaio sul fiume Salso è una di queste.

Nello studio della capacità di servizio dell'opera d'arte si è realizzata una campagna di indagini sperimentali condotte in situ e in laboratorio che ha visto, tran l'altro, un esteso impiego di tecniche non distruttive alcune delle quali combinate ed interpretate in modo innovativo.

Il complesso delle indagini sperimentali e numeriche ha permesso di eseguire le verifiche sul manufatto ed esprimere quindi un giudizio sulla capacità di servizio del ponte.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni 2008 – D.M. 14/01/2008
- [2] Circolare 02 febbraio 2009 n°617/C.S.LL.PP.
- [3] *“Specifica tecnica riclassificazione delle linee e circolabilità delle locomotive sui ponti”*; Ferrovie dello Stato Divisione infrastruttura; codifica: DITC/ARMOIFS001A.
- [4] Manuale di Progettazione RFI (RFI DTC SICS PS MA IFS 001A rev A del 29/12/2015).
- [5] CNR-UNI 10011/97 – Costruzioni in acciaio – Istruzioni per il calcolo, l’esecuzione, il collaudo e la manutenzione.
- [6] D.J. Ewins, “Modal Testing – Theory, practice and application”, Research Studies Press Ltd., England, 2000.
- [7] A. Brencich, L. Gambarotta, “Assessment procedure and rehabilitation of riveted railway girders: The Campasso Bridge”, Engineering Structures 31, 2009.
- [8] F. De Miranda, L. Strata, “Ponti ferroviari a struttura di acciaio”, ILVA
- [9] L.F. Donato, “Lezioni di Costruzioni – Parte seconda Costruzioni Metalliche”, Colombo Corsi, 1948.
- [10] F. Masi, “La pratica delle costruzioni metalliche”, Hoepli, 1931.
- [11] M. Batel, “Operational Modal Analysis – Another Way of Doing Modal Testing”, Sound and Vibration, August, 2002.
- [12] G. Fabbrocino, C. Rainieri, G. Verderame, “L’analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti”, Controllo e monitoraggio di edifici in Calcestruzzo Armato: il caso-studio di Punta Perotti, Bari, Italia, Giugno 2007.
- [13] UNI 10985:2002, “Vibrazioni su ponti e viadotti: linee guida per l’esecuzione di prove e rilievi dinamici”.
- [14] L. La Mendola, E. Lo Giudice, G. Minafò, G. Navarra, “Evaluation of Flat Jack Test Method Effectiveness for Masonry Structural Investigation”, in fase di pubblicazione su IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Lecce, Ottobre 2017.
- [15] C. Costa, A. Arede, A. Costa, “Dynamic characterization of a masonry arch bridge”, 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC).
- [16] R. Brincker, C. Ventura, “Introduction to Operational Modal Analysis”, Wiley, 2015.
- [17] A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer, “Elaborazione numerica dei segnali”, Franco Angeli, 2009.
- [18] A. K. Chopra, “Dynamics of Structures, Theory and Application to Earthquake Engineering”, Pearson, 2007.