

# INDAGINI NON DISTRUTTIVE E CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DI UN VIADOTTO FERROVIARIO IN MURATURA SULLA LINEA FERROVIARIA CANICATTÌ -GELA-COMISO

E. Lo Giudice<sup>1</sup>, G.L. Di Marco<sup>2</sup>, M. Gallo<sup>1</sup>, R. Mantione<sup>2</sup>, V. Carlisi<sup>1</sup>, C. Vitellaro<sup>3</sup>, S. Di Franco<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio Dismat srl, C.da Andolina, S.S. 122 – km 28 – 92024 Canicattì (AG),  
tel. 0922 859406, fax 0922 853877, [eliologiudice@dismat.it](mailto:eliologiudice@dismat.it); [michelegallo@dismat.it](mailto:michelegallo@dismat.it);  
[valecarlisi@libero.it](mailto:valecarlisi@libero.it)

<sup>2</sup> Studio Tecnico Lo Giudice – Di Marco, Via Garibaldi, 225 92020 Racalmuto (AG),  
tel. 0922 942603, [dimarco.gia@libero.it](mailto:dimarco.gia@libero.it); [robertamantione.rm@gmail.com](mailto:robertamantione.rm@gmail.com)

<sup>3</sup> SO Ingegneria DTP Palermo RFI, Piazzetta Cairoli, 5, 90123 Palermo,  
tel. 091 6033760 [c.vitellaro@rfi.it](mailto:c.vitellaro@rfi.it) ; [s.difranco@rfi.it](mailto:s.difranco@rfi.it)

## SOMMARIO

A seguito della velocizzazione della linea ferroviaria Canicattì-Gela-Comiso è stato necessario valutare le condizioni statiche di un campione rappresentativo di manufatti sottoposti alle nuove e più gravose condizioni di carico. Particolare attenzione è stata posta al viadotto in muratura a sette arcate avente lunghezza complessiva pari a 101,20 m posto alla progressiva 187+450. Il livello di conoscenza del manufatto è stato raggiunto mediante un accurato rilievo geometrico integrato da una campagna di rilevazioni sperimentali condotte in situ ed in laboratorio sulla base di un protocollo di indagini in cui si è fatto ampio ricorso a tecniche non distruttive. Nel lavoro si illustrano anche i risultati delle prove di caratterizzazione dinamica che sono stati utilizzati per calibrare il modello FEM della struttura.

## 1. PREMESSA

Il viadotto in muratura ricadente nella tratta ferroviaria Canicattì-Licata è costituito da sette campate con geometria ad arco a tutto sesto, le cui cinque arcate centrali hanno luce pari a 12.0 m mentre le due di riva pari a 6.0 m; esso è sorretto da pile e spalle in muratura di altezza variabile ed in planimetria segue un tracciato curvo avente raggio pari a 300 m.



**Figura 1** Vista frontale del viadotto

## 2. PIANO D'INDAGINE ESEGUITO

Il raggiungimento del livello di conoscenza richiesto ha necessitato la predisposizione di un protocollo di indagine dettagliato e specifico concordato con l'Ente Gestore (RFI). Esso ha previsto un complesso di prove ed indagini diagnostiche che ha riguardato: il rilievo metrico-costruttivo dell'opera, la caratterizzazione dei materiali che la compongono e la valutazione del comportamento globale, al fine di valutare le prestazioni del manufatto sotto le nuove condizioni di carico dovute all'aumento di velocità sulla linea.

## 3. RILIEVO DELL'OPERA

La restituzione integrata della geometria e delle parti strutturali dell'opera è avvenuta tramite misure metriche e contestualmente è stata eseguita la valutazione dello stato di degrado mediante ispezione visiva.

Il manufatto è interamente costituito da blocchi di pietra naturale a meno dell'intradosso delle cinque volte centrali costituite da mattoni in laterizio. Si riportano in tabella le dimensioni degli elementi strutturali principali, il prospetto, la pianta e la sezione di mezzeria del manufatto.

| Descrizione             | Dimensione [m] |
|-------------------------|----------------|
| Lunghezza complessiva   | 101,20         |
| Larghezza               | 5,30           |
| Altezza spalla sinistra | 4.80           |
| Altezza spalla destra   | 3.80           |
| Altezza pile 1 e 6      | 8.20           |
| Altezza pile 2 e 5      | 3.44           |
| Altezze pile 3 e 4      | 5.60           |
| Larghezza pile          | 2.50           |

Tabella 1 Dimensioni rilevate

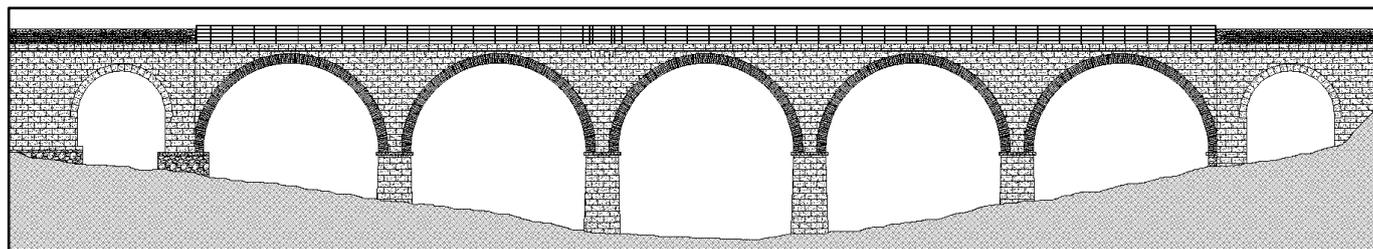


Figura 2 Prospetto

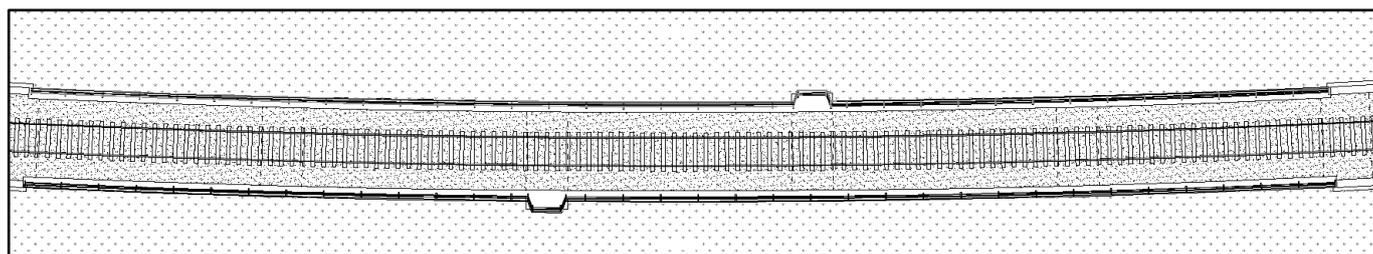
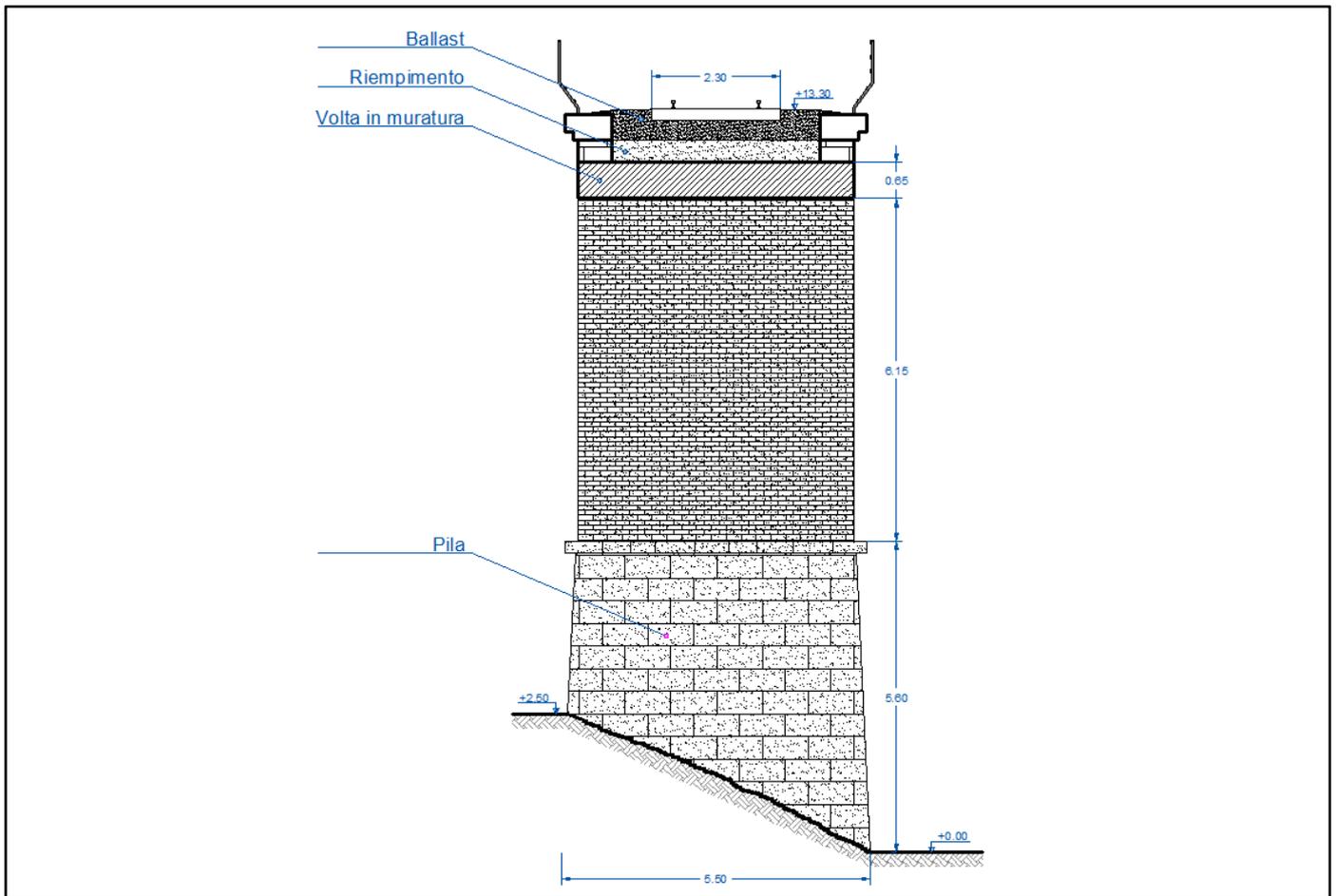


Figura 3 Pianta



**Figura 4** Sezione di mezzeria

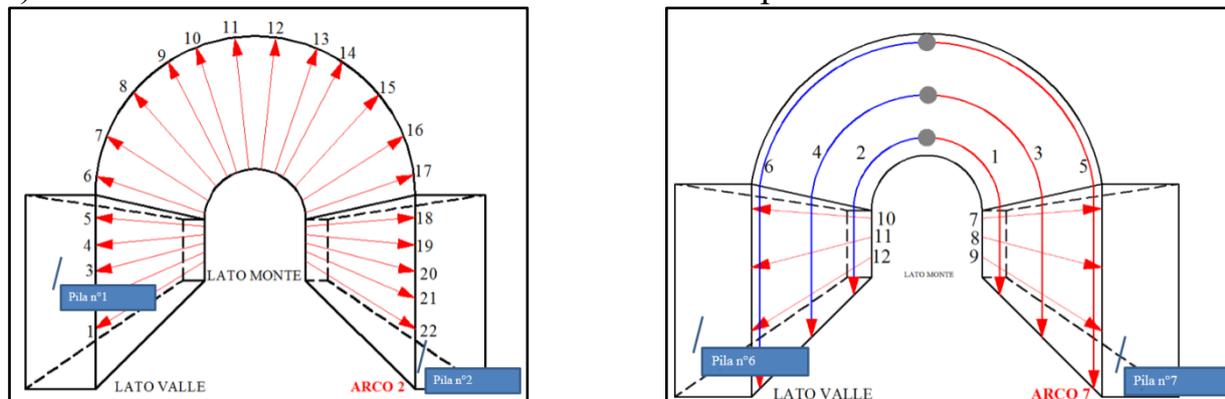
Il viadotto è apparso in buone condizioni di conservazione, tuttavia si è riscontrata la presenza di segni di degrado all'intradosso delle volte e sulle pile, questo è essenzialmente causato dal cattivo funzionamento del sistema di smaltimento delle acque meteoriche, infatti è particolarmente soggetta a degrado la porzione di volta in corrispondenza del doccione. Sono inoltre presenti efflorescenze saline all'intradosso della volta e si nota la disgregazione dei giunti di malta nelle zone maggiormente battute dagli agenti meteorici (prospetto lato valle).



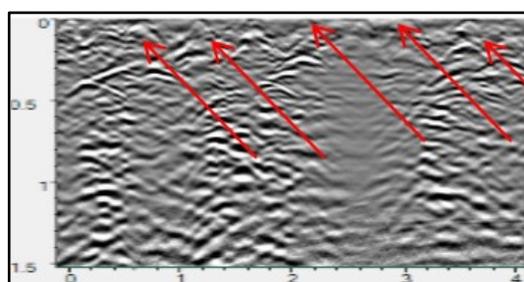
**Figura 5** Disgregazione giunti di malta e degrado in corrispondenza del doccione

Di particolare importanza si sono rilevate le indagini non distruttive mediante tecnica GPR eseguite a corredo del rilievo strutturale dell'opera.

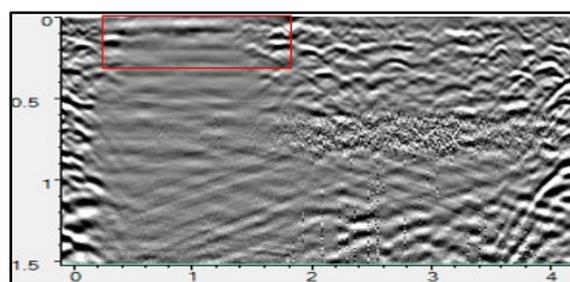
Lo schema tipo utilizzato per l'esecuzione di tali indagini è quello mostrato in Figura 6, vengono riportati alcuni dei radargrammi maggiormente rappresentativi. Da questi si nota come la muratura, anche in profondità, non presenti disomogeneità, ma sono visibili lievi anomalie locali ed isolate (rettangoli in rosso e picchi iperbolici segnati dalle frecce in rosso) che indicano la carenza di malta tra i blocchi di pietra.



**Figura 6** Schema tipo indagine georadar

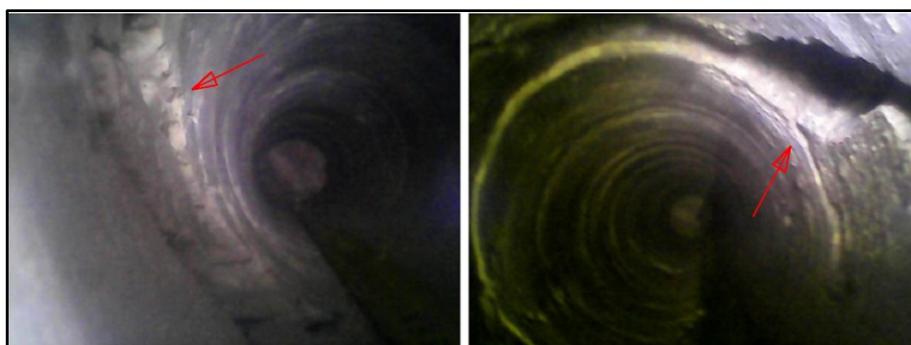


**Figura 7** Picchi iperbolici



**Figura 8** Lieve attenuazione del segnale

L'indagine mediante GeoRadar è stata calibrata tramite indagini visive in profondità con endoscopio. Queste, d'altra parte hanno confermato i dati rilevati mediante tecnica Georadar, infatti la muratura risulta uniforme sia nelle sottostruttura che nelle volte, si evidenziano lievi cavità dovute alla disgregazione dei giunti di malta. E' stato inoltre possibile discriminare lo spessore dei vari strati che compongono le diverse parti dell'opera, ed in particolare gli strati di rinfiacco e riempimento (vedi Figura 4).

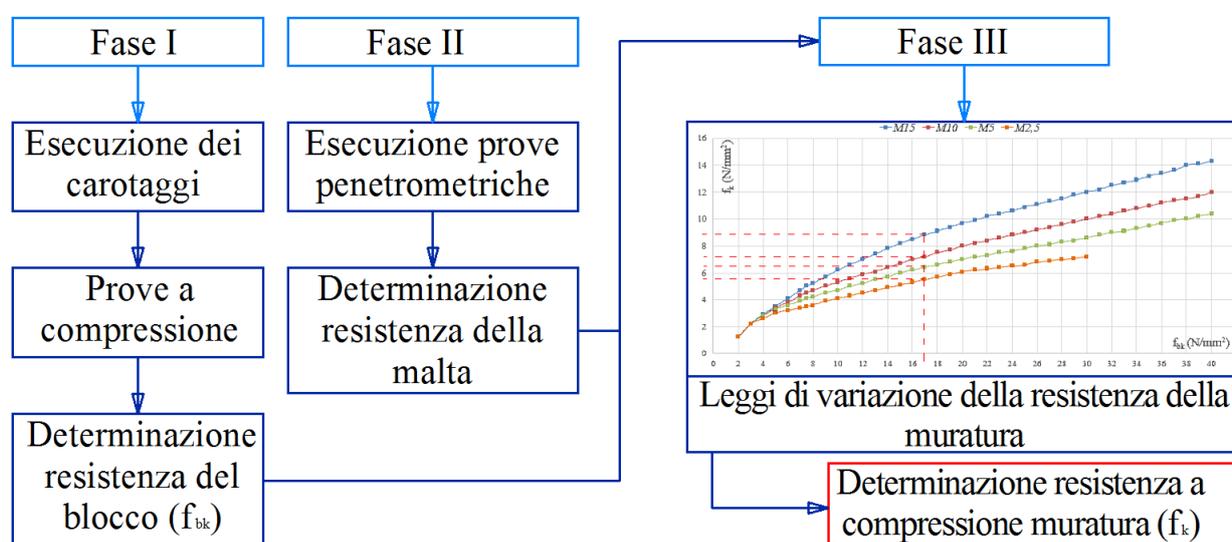


**Figura 9** Immagine indagine endoscopica – Pila 2 – Profondità 88 cm (sn) e 58 cm (dx)

#### 4. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

Per la caratterizzazione della muratura è stata impiegata una procedura operativa alternativa rispetto a quanto previsto dalla Circolare Esplicativa 617/2009 al § C8A.1.A.3,

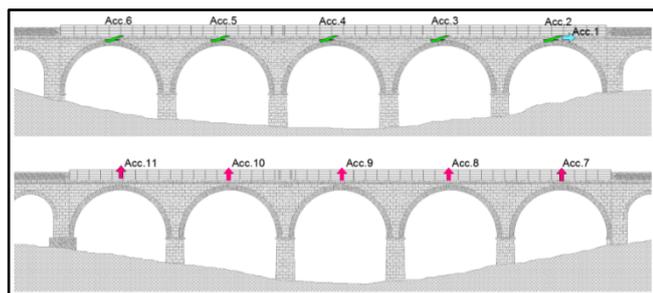
ciò al fine di raggiungere il livello di conoscenza richiesto. Tale scelta esecutiva è stata dettata, nel caso specifico, dall'impossibilità dell'esecuzione della prova mediante martinetti piatti doppi senza incorrere in non conformità rispetto ai disposti normativi vigenti riguardanti lo svolgimento delle prove (dimensioni elevate dei blocchi, giunti di malta pressochè inesistenti, diverso materiale tra paramento esterno e riempimento) [12]. La nuova procedura impiegata ha previsto, in una prima fase, l'esecuzione di carotaggi in tutti gli elementi strutturali dell'opera, l'esecuzione delle prove di compressione dei provini ricavati dalle carote e la determinazione della resistenza a compressione di blocchi murari ( $f_{bk}$ ). La seconda fase ha previsto la caratterizzazione meccanica della malta mediante prove penetrometriche con trapano PNT-D. I dati così determinati sono stati infine combinati ottenendo la resistenza a compressione della muratura ( $f_k$ ). Ciò è stato possibile costruendo, per una data classe di malta, la corrispondente legge di variazione che restituisce la resistenza della muratura in funzione della resistenza del blocco (vedi Fig.10).



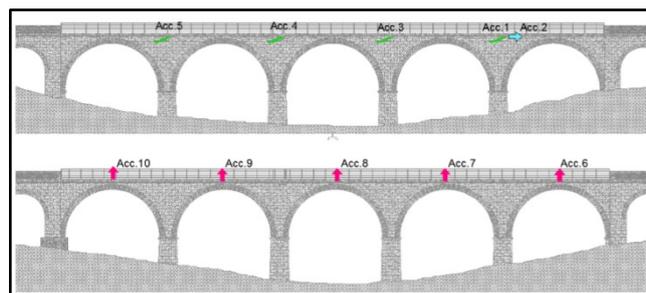
**Figura 10** Schema di sintesi della procedura utilizzata

## 5. VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO GLOBALE

Il comportamento globale del manufatto è stato valutato mediante prove di caratterizzazione dinamica condotte tramite due set up di prova, in considerazione dell'elevato numero di gradi di libertà da monitorare per ricostruire in maniera accurata le deformate modali. La prova ha permesso la valutazione dei principali parametri dinamici quali frequenze fondamentali, forme modali e smorzamento.



**Figura 11** Strumentazione Set up 1



**Figura 12** Strumentazione Set up 2

La rete di sensori utilizzati, per ogni set up di prova, era costituita da 11 sensori accelerometrici piezoelettrici collegati ad una centralina di acquisizione dati (N.I. C-Daq 9172+4 USB9234), la struttura è stata posta in eccitazione mediante forzante di tipo ambientale.

I dati acquisiti sono stati trattati ed elaborati da un software dedicato, mediante la tecnica *Frequency Domain Decomposition* (FDD) ricadente nell'ambito dell'Analisi Modale Operazionale (OMA); di seguito si riportano gli spettri e le frequenze modali ottenute.



**Figura 13** Spettro accelerometri in direzione Z



**Figura 14** Spettro accelerometri in direzione Y

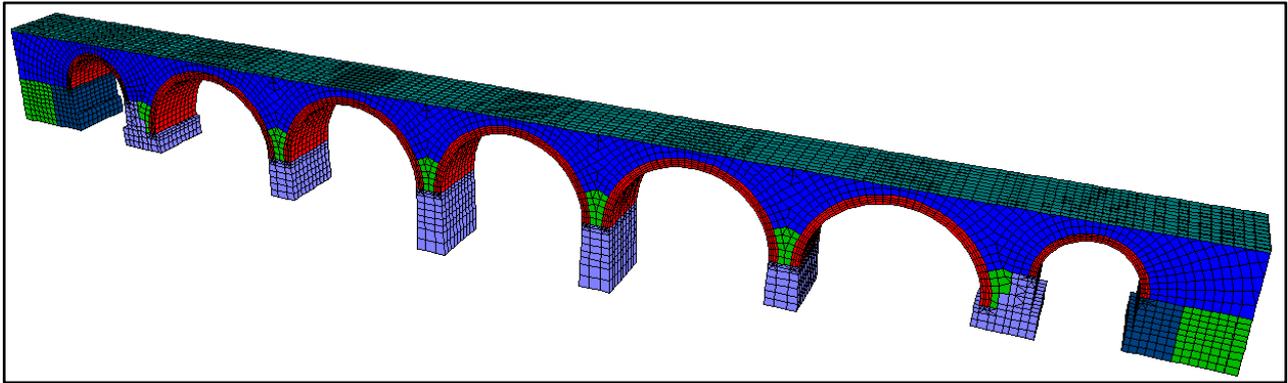
|                        | $f_1$ [Hz] | $f_2$ [Hz] | $f_3$ [Hz] | $f_4$ [Hz] |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Frequenze sperimentali | 1.95       | 3.44       | 4.47       | 5.57       |

**Tabella 2** frequenze fondamentali

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 è pari a 1,6%, in linea con quanto riportato in letteratura tecnica [13].

## 6. VERIFICA DELLE PRESTAZIONI

A valle di tutte le indagini è stato realizzato un modello agli elementi finiti, con l'impiego di 32'142 nodi e 27'490 elementi break, utilizzato per eseguire le verifiche statiche sotto le nuove condizioni di carico.

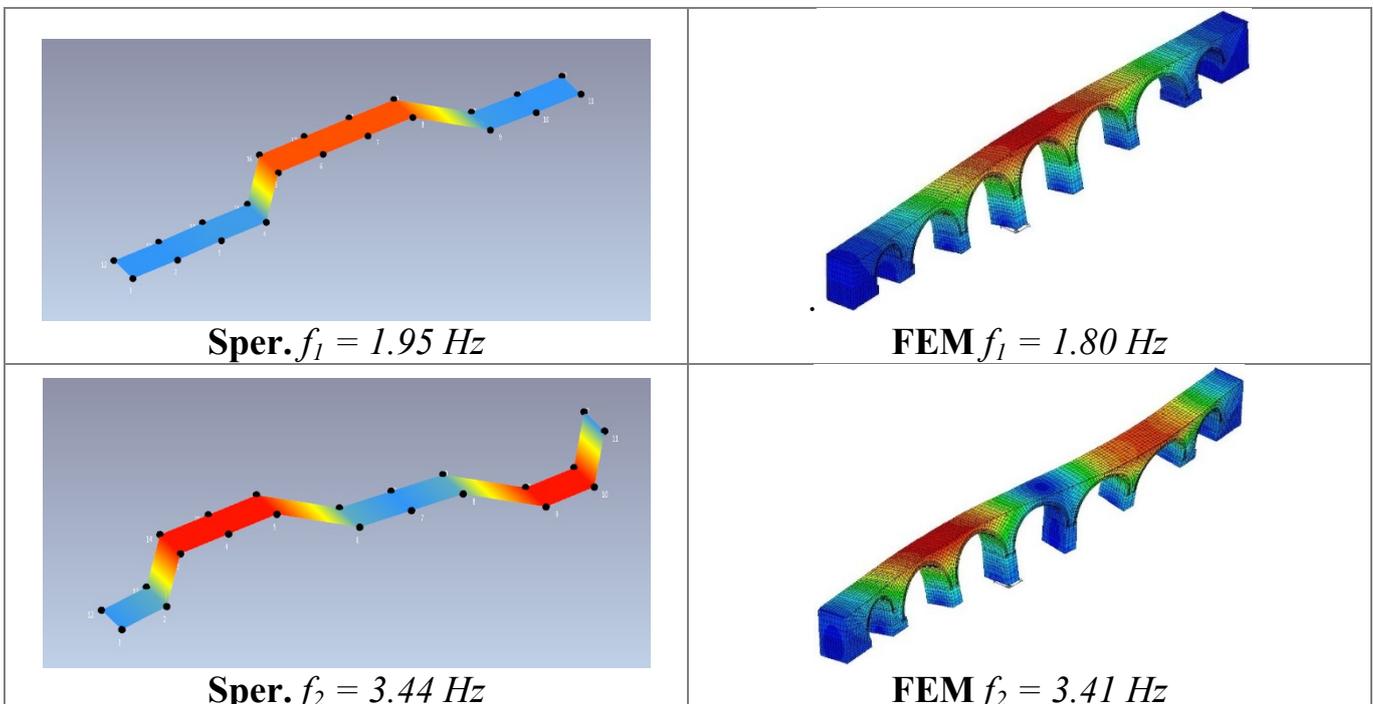


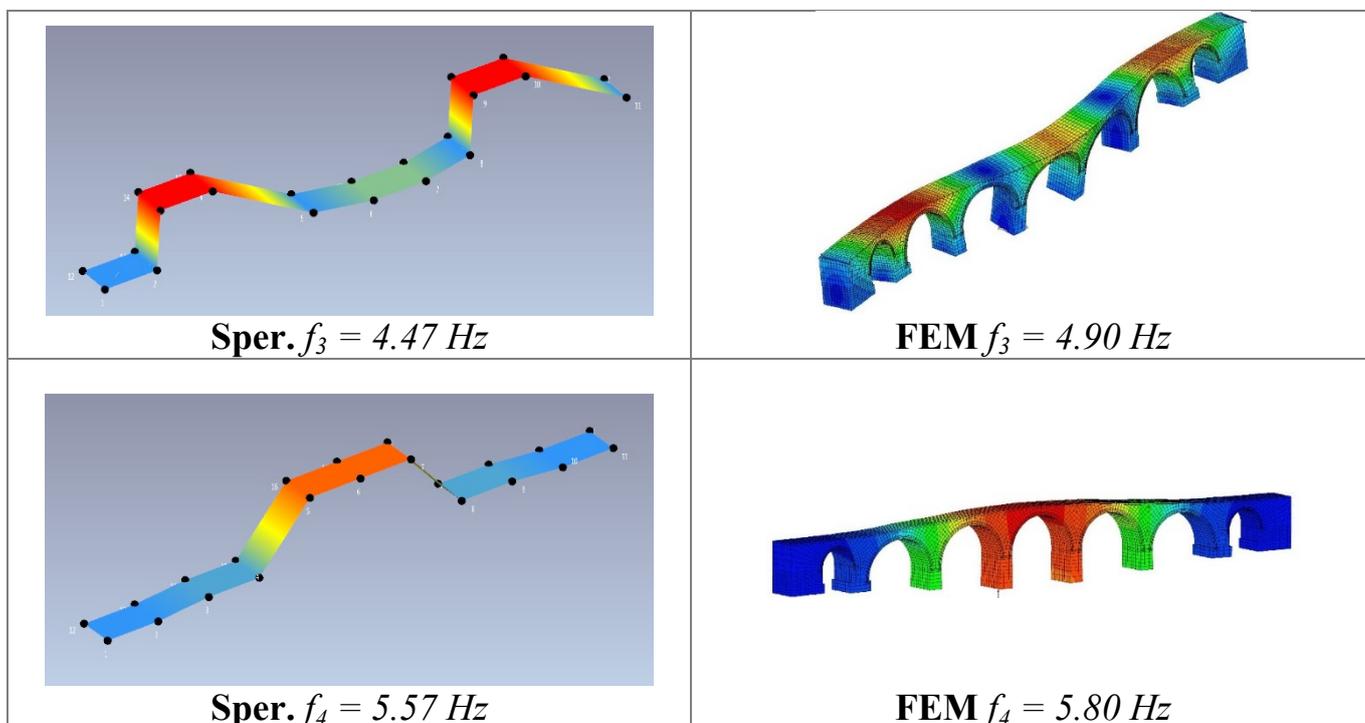
**Figura 15** Vista d'insieme del modello FEM

La validazione del modello FEM, è stata eseguita in base ai dati ottenuti dalla prova di caratterizzazione dinamica. L'ottimizzazione del modello ha permesso di ottenere un buon accordo tra dati sperimentali e risultati numerici sia in termini di frequenze fondamentali sia in termini di deformate modali. I dati vengono riassunti in tabella 2.

|                        | $f_1$ [Hz] | $f_2$ [Hz] | $f_3$ [Hz] | $f_4$ [Hz] |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Frequenze sperimentali | 1.95       | 3.44       | 4.47       | 5.57       |
| Frequenze teoriche     | 1.80       | 3.41       | 4.90       | 5.80       |
| <i>Differenza [%]</i>  | 7.6        | 0.0        | 8.7        | 4.1        |

**Tabella 2** Confronto frequenze





**Tabella 3** Confronto deformate modali

L'analisi elastico-lineare con tecnica FEM ha permesso di valutare lo stato tensionale della muratura individuando inoltre le parti strutturali maggiormente sollecitate. Su tale indicazione sono state condotte verifiche a pressoflessione fuori piano nella sezione di chiave in corrispondenza di due arcate, nella sezione alle reni, alla base della pila maggiormente sollecitata e su quella avente materiale di cortina con caratteristiche meccaniche inferiori, infine sono state condotte le verifiche alla base delle spalle. Tutte le verifiche hanno restituito esito positivo.

## 7. CONCLUSIONI

Il piano di adeguamento ai nuovi standards, relativi alla velocizzazione di alcune linee ferroviarie siciliane, ha determinato la necessità di verificare i manufatti ricadenti in esse rispetto ai nuovi e più gravosi carichi; tra questi vi è un viadotto in muratura, di pregevole fattura, costituito da sette arcate.

Propedeutica alla verifica delle prestazioni offerte dall'opera in condizioni di esercizio è stata la redazione di uno specifico protocollo d'indagine, in cui si è fatto ampio utilizzo di prove e indagini di tipo non distruttivo.

La caratterizzazione meccanica dei materiali ha seguito una particolare procedura, concordata con la Committenza, alternativa rispetto a quanto indicato dalla Circolare 617/2009. Il comportamento globale del viadotto è stato individuato mediante prova di caratterizzazione dinamica, che ha tra l'altro permesso la validazione del modello matematico utilizzato per il calcolo delle sollecitazioni.

Le verifiche svolte hanno consentito di esprimere un giudizio positivo sulle capacità di servizio del viadotto.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni 2008 – D.M. 14/01/2008
- [2] D.M. Infrastrutture 14 gennaio 2008
- [3] Circolare 02 febbraio 2009 n°617/C.S.LL.PP.
- [4] *“Specifica tecnica riclassificazione delle linee e circolabilità delle locomotive sui ponti”*; Ferrovie dello Stato Divisione infrastruttura; codifica: DITC/ARMOIFS001A.
- [5] Manuale di Progettazione RFI (RFI DTC SICS PS MA IFS 001A rev A del 29/12/2015).
- [6] *Istruzioni per la valutazione della Sicurezza Strutturale di Ponti Stradali in Muratura* – Consiglio Nazionale per le Ricerche 2015, ulteriori riferimento per i manufatti in muratura o che hanno parti in muratura.
- [7] UNI 10985:2002, “Vibrazioni su ponti e viadotti: linee guida per l’esecuzione di prove e rilievi dinamici”.
- [8] D.J. Ewins, “Modal Testing: Theory and Practice”, John Wiley & Sons Inc, USA, 1984.
- [9] J. Heyman, “The Stone Skeleton: Structural engineering of masonry architecture”, Cambridge University, 1995.
- [10] C. Costa, A. Arede, A. Costa, “Dynamic characterization of a masonry arch bridge” 1<sup>st</sup> International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)
- [11] E. Lo Giudice, G. L. Di Marco, G. Fidotta, G. Sollami, “Caratterizzazione dinamica di un ponte ad arco in muratura sulla tratta Palermo Trapani”, Convegno AIPnD 2013
- [12] L. La Mendola, E. Lo Giudice, G. Minafò, G. Navarra. “Evaluation of Flat Jack Test Method Effectiveness for Mansory Structural Investigastion”, in fase di pubblicazione su IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Lecce, Ottobre 2017.
- [13] A.K. Chopra, “Dynamicsof Structures, Teory and Structures, Theory and Application to Earthquake Engineering”, Pearson, 2007.