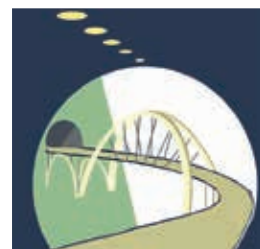


PROGETTO PONTI E INFRASTRUTTURE



Passaggi sicuri
Ponti, gallerie, infrastrutture

iStock/MasaoTaira



Conoscenza e riabilitazione strutturale di ponti esistenti: diagnostica, monitoraggio dinamico e progettazione antisismica

di Alessio Pierdicca, Fabio Mattiauda, Filippo Tassi

Sanità e progettazione ospedaliera: quale lezione dalla pandemia di Covid-19 – Parte II

di Maurizio Costantini

Partner tecnici



Logo
Bisonte?

Partner istituzionali e Patrocini



**L'UFFICIO
TECNICO**

Conoscenza e riabilitazione strutturale di ponti esistenti: diagnostica, monitoraggio dinamico e progettazione antisismica

► di **Alessio Pierdicca ***, **Fabio Mattiauda ****, **Filippo Tassi *****

** Ingegnere libero professionista, dottorato in Ingegneria nell'ambito del monitoraggio dinamico. Opera nel campo della diagnostica strutturale degli edifici ed è specializzato nell'identificazione dinamica delle strutture. Ingegnere progettista presso CapStudio*

*** Ingegnere libero professionista, esperto in diagnostica strutturale. Client Account Manager presso DRC Italia srl*

**** Ingegnere libero professionista, specializzato in analisi strutturali e modellazioni numeriche a elementi finiti*

Il patrimonio infrastrutturale nazionale è caratterizzato da una grande varietà di tipologie costruttive realizzate in diverse epoche. In particolare gran parte dei ponti e viadotti esistenti risalgono ad oltre 50 anni fa e questo rende impellente un serio approccio di classificazione e valutazione della sicurezza di queste opere. Questo articolo presenta un caso studio di un ponte stradale in muratura per il quale è stato eseguito l'intero processo di analisi: dalla caratterizzazione dei materiali, identificazione dinamica ante operam, modellazione e calibrazione del modello numerico FEM sulla base delle indagini dinamiche in situ, fino alla progettazione degli interventi di consolidamento strutturale.

Premessa

Il rischio sismico dei ponti è sicuramente un tema più che mai attuale: gran parte della rete infrastrutturale è stata realizzata negli anni 60-70, il che rende inevitabilmente gran parte di queste strutture inadeguata alle attuali normative antisismiche.

Tra le varie tipologie presenti, i ponti ad arco in muratura sono assai diffusi nella rete infrastrutturale nazionale; si tratta di opere costruite per lo più nel secolo scorso, che svolgono tuttora la propria attività a pieno regime. Il recente adeguamento delle *Norme Tecniche per le Costruzioni* e soprattutto le *"Linea Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti"* (allegato al parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n.88/2019) riporta in primo piano la necessità di effettuare valutazioni di rischio sismico e monitoraggi su questi manufatti allo scopo di gestire la sicurezza dei ponti esistenti e prevenire livelli inadeguati di danno.

Alla luce di ciò diventa quindi fondamentale un'approfondita conoscenza di queste opere infrastrutturali, in modo da gestire in maniera adeguata gli in-

terventi di manutenzione e ottenere informazioni utili, non solo al progettista che dovrà effettuare le valutazioni strutturali, ma anche e soprattutto alle pubbliche amministrazioni che dovranno eseguire e programmare operazioni di censimento e verifica della sicurezza sismica.

La procedura per affrontare tali problematiche, proposta in questo articolo, consiste quindi in 3 fasi distinte e complementari: la *conoscenza* del manufatto, la *modellazione numerica* a elementi finiti e la *valutazione* e *mitigazione* del rischio sismico attraverso interventi di riabilitazione strutturale.

Accanto alle più comuni indagini diagnostiche per la caratterizzazione dei materiali di costruzione, il monitoraggio dinamico dei ponti riveste ormai un ruolo determinante nell'ambito della conoscenza strutturale in quanto permette di determinare i parametri strutturali (frequenze proprie di vibrazione, smorzamento e forme modali) per via sperimentale e di correlarli con le analisi a elementi finiti (*Finite Element Method FEM*).

Nell'ottica di fornire un esempio pratico, questo lavoro propone un approccio metodologico nella valu-

tazione di sicurezza di un ponte in muratura, partendo dalla caratterizzazione dinamica del manufatto per poi calibrare il modello numerico F.E.M. alla base delle analisi strutturali con cui sono stati progettati gli interventi di miglioramento sismico.

Fase conoscitiva: diagnostica strutturale e identificazione dinamica

Il viadotto in oggetto si trova a Sassoferrato (opera n. 152 Provincia di Ancona) appartiene alla tipologia dei ponti ad arco in muratura Sassoferrato. Tale viadotto presenta una serie di patologie strutturali che richiedono interventi di consolidamento al fine di arrestare lo stato di degrado in cui si trova il manufatto, peraltro di interesse storico-artistico (figura 1).

Il ponte ha una luce complessiva di 55 m (distanza tra le due spalle), le volte sono a tutto sesto per un raggio pari a 4.40 m mentre le pile hanno un'altezza massima dall'imposta della volta pari a circa 13 m dal piano di campagna.

Le volte sono costituite da un arco in muratura a 3 teste, con soprastante riempimento in materiale sciolto e non coerente che svolge la funzione di rinfiacco. Con lo scopo di avere una fotografia dello stato attuale del ponte dal punto di vista strutturale è stata svolta una campagna di identificazione dinamica.

Le indagini hanno permesso di determinare le principali frequenze proprie di vibrazione e i relativi modi propri di vibrazione. Grazie a questi dati è stato possibile calibrare opportunamente i modelli FEM per le

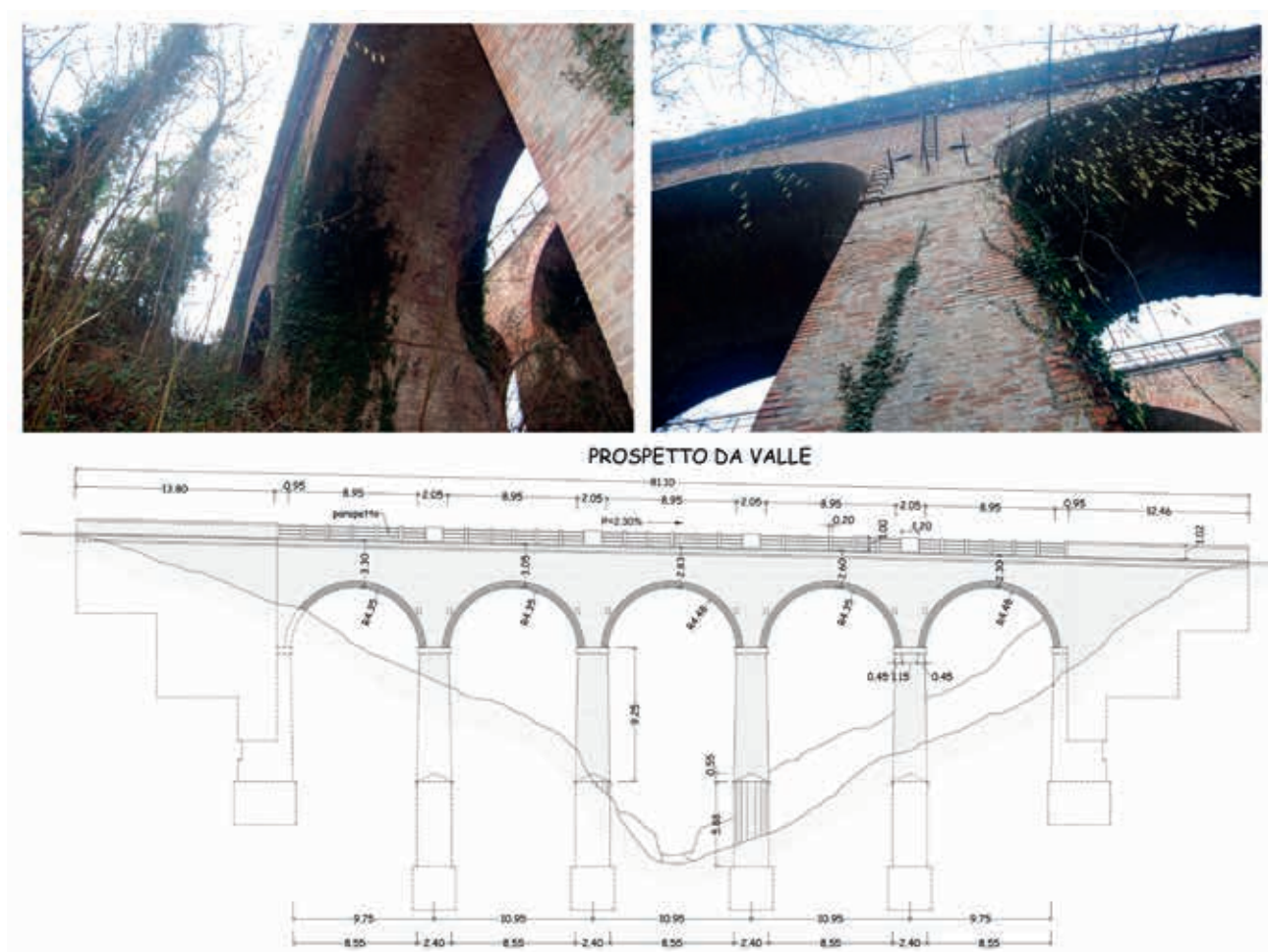


Figura 1 – Viste esterne del ponte e prospetto principale

analisi strutturali al fine di avere un modello affidabile per l'interpretazione dei risultati.

Strumentazione e pianificazione della prova dinamica

Le acquisizioni sono state eseguite mediante la registrazione in continuo di accelerazioni di tipo ambientale derivati dall'eccitazione naturale della struttura causata da fenomeni esterni, quali vento, microsismi e rumori derivanti dall'attività antropica (es. traffico veicolare).

Le prove sono state effettuate con l'ausilio della seguente strumentazione (figura 2):

- Accelerometri sismici (*Integrated Electronic Piezoelectric* - IEPE) KS48C e KB12VD-MMF *voltage sensitivity* 1V/g e *range* di misura $\pm 3g$
- Centralina di Acquisizione Dynamic Data System 8 canali, DaTa 500 (DRC srl), 24-bit Digital Signal Processor (DSP), con *analog anti-aliasing filter* e *high-frequency acquisition range* (0.2Hz to 200kHz).

I sensori sono stati disposti in corrispondenza delle 3 campate centrali, monitorando tutte le direzioni spaziali (figura 3), al fine di determinare le frequenze proprie di vibrazione: trasversalmente e longitudinalmente all'impalcato (direzioni X e Y), verticalmente (direzione Z).

I sensori sono stati resi solidali alla parte strutturale del ponte mediante blocchetti in alluminio tassella-

ti a porzioni in cemento armato poste ai bordi laterali della carreggiata (figura 4).

I dati sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 1.000 Hz per una durata delle acquisizioni di 40 minuti.

Estrazione dei parametri dinamici mediante algoritmo di identificazione

Una volta acquisiti i dati accelerometrici, le storie temporali sono state elaborate dall'algoritmo di identificazione dinamica. La tecnica utilizzata prende il nome di *Operational Modal Analysis* (OMA) che consente di descrivere il comportamento dinamico della struttura semplicemente registrando i bassissimi livelli di vibrazione a cui è sottoposto l'edificio utilizzando l'eccitazione ambientale come input.

L'OMA è una tecnica molto interessante grazie ad una serie di vantaggi: la prova è del tutto non invasiva ed economica, non sono necessarie attrezzature esterne per mettere in vibrazione forzata la struttura e soprattutto il test non interferisce con l'utilizzo della struttura che può rimanere in esercizio durante il monitoraggio.

In questo caso è stato utilizzato l'algoritmo di identificazione *Stochastic Subspace Identification* (SSI) che opera nel dominio del tempo; tale algoritmo è quindi in grado di operare direttamente nelle storie temporali, risolvendo la soluzione del problema in termini di



Figura 2 – Catena di misura

Figura 3 - Layout di prova

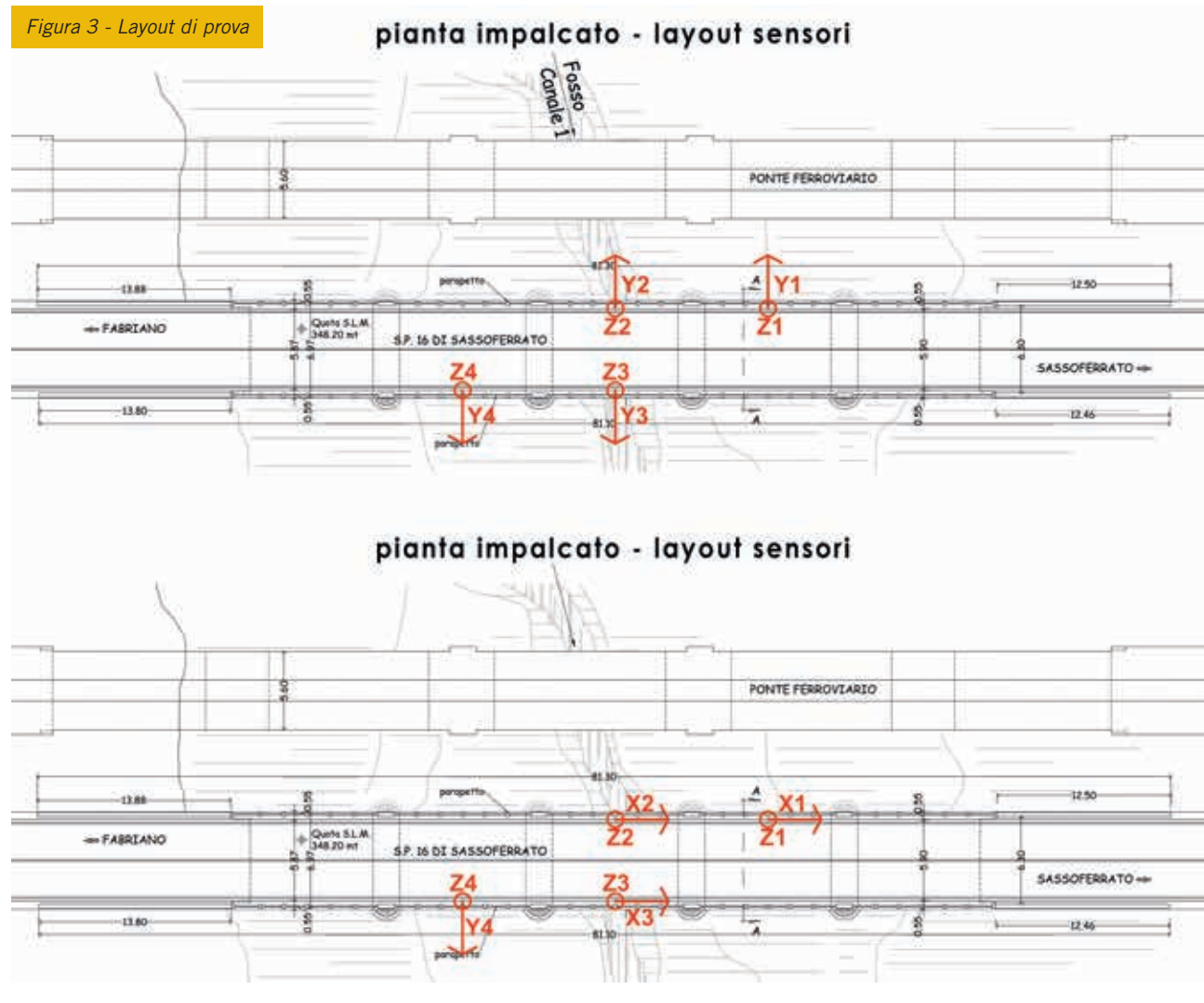


Figura 4 - Installazione degli accelerometri

matrici di stato, per poi risalire ai modi di vibrare sperimentali in maniera analitica.

Di seguito si riporta il diagramma di stabilizzazione con cui sono stati estratti i parametri dinamici del ponte in oggetto (figura 5).

L'algorithmo ha consentito di stimare le prime 3 forme modali, di seguito rappresentate (figura 6), i cui valori relativi a frequenze e smorzamenti associati sono riportati in tabella 1.

Frequency (Hz)	Damping (%)	Tipo di Modo
3,66	0,71	Flessionale Y-Z
6,79	5,74	Flessionale X
10,54	1,35	Flessionale Z

Tabella 1 – Ponte in muratura; estrazione dei parametri dinamici

Analizzando le forme modali si può osservare che il primo modo (3,66 Hz) eccita principalmente la direzione trasversale del ponte (direzione Y), mentre il secondo modo (6,79 Hz) coinvolge completamente la direzione del senso di marcia (direzione X). Il terzo

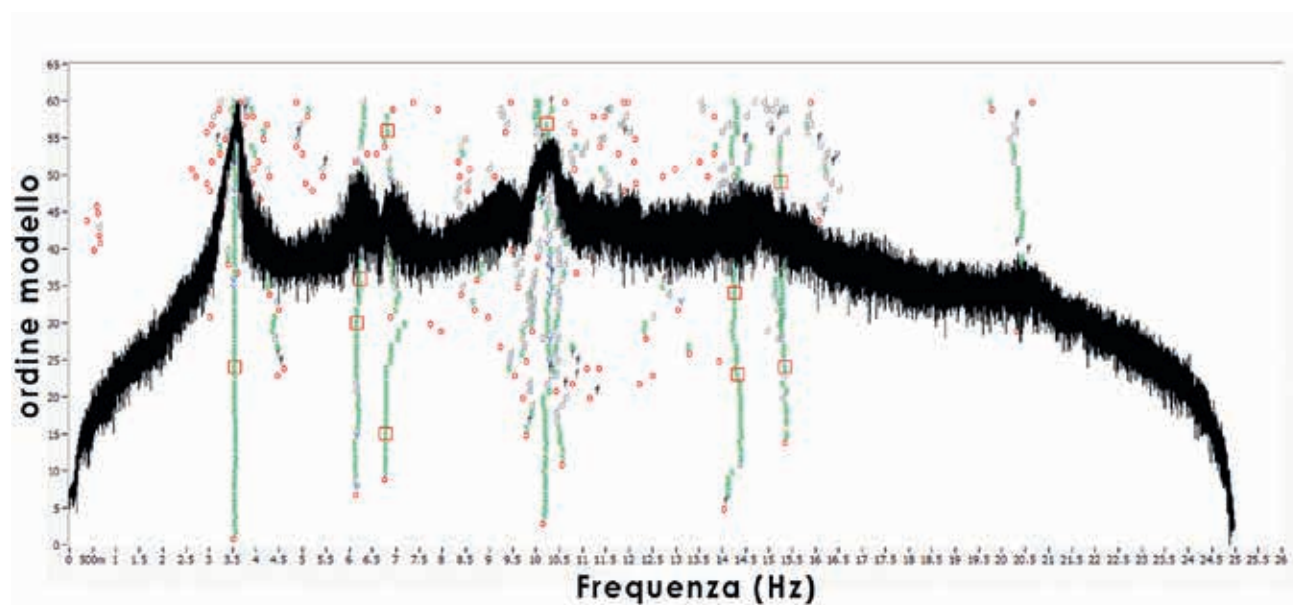


Figura 5 – Diagramma di stabilizzazione

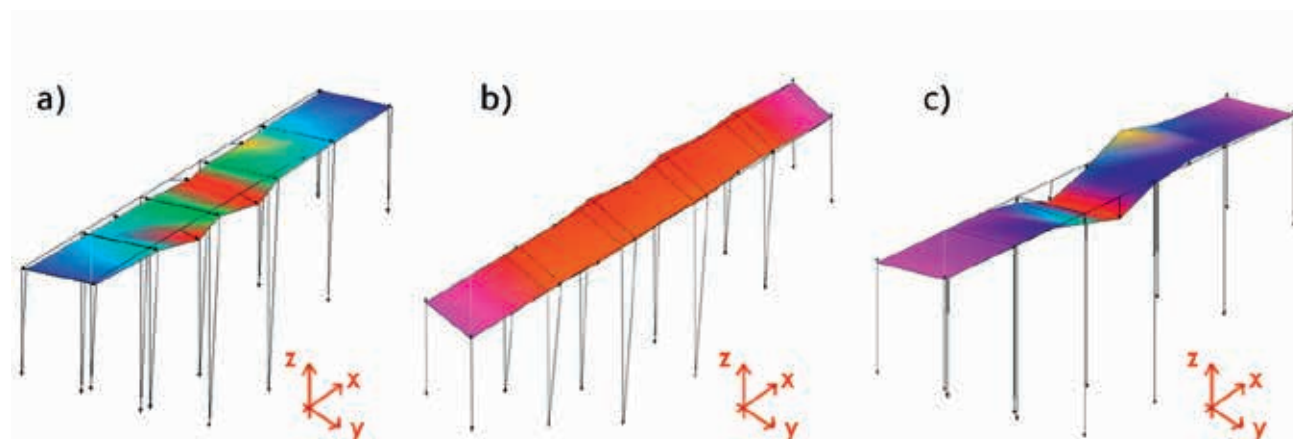


Figura 6 – Forme modali sperimentali: a) modo 1, b) modo 2, c) modo 3

modo di vibrare infine mobilita l'impalcato in direzione gravitazionale Z.

Modellazione e calibrazione del modello FEM

Per l'identificazione del comportamento statico e dinamico del ponte stradale si è seguito un approccio teorico-sperimentale che ha previsto la predisposizione di un modello FEM e la sua taratura con processo iterativo sulla base delle risposte dinamiche sperimentali. Il modello finale, validato sulle indagini dinamiche svolte, è diventato lo strumento di valutazione della risposta statica e dinamica della struttura in campo elastico lineare.

Il modello di calcolo è stato sviluppato e schematizzato come un insieme costituito da: volta, spalle, contrafforti, timpani, rinfiando e riempimento, utilizzando una modellazione con elementi solidi. Il comportamento dei materiali è ipotizzato di tipo elastico-lineare. Si riportano in figura 7 le immagini relative al modello numerico realizzato.

Per la modellazione a elementi finiti sono stati presi in considerazione differenti materiali che costituiscono il manufatto. Le caratteristiche dei materiali sono state determinate da prove in situ semi-distruttive che hanno consentito di determinare i moduli elastici e le tensioni agenti sulle murature (martinetti piatti in configurazione singola e doppia).

Laddove non disponibili ulteriori informazioni da prove in situ, sono stati presi come riferimento i valori indicati dalle NTC 2018.

Con l'obiettivo di calibrare il modello FEM sulla scorta dei risultati ottenuti dall'analisi dinamica, i parametri strutturali del manufatto sono stati opportunamente modificati mediante un processo iterativo. In particolare sono stati variati, in un range di $\pm 10\%$, i moduli elastici e i pesi specifici ottenuti dalle prove sperimentali e quelli dedotti dalle tabelle di normativa. Inoltre le condizioni al contorno (definizione dei vincoli) e l'interazione terreno-struttura sono state introdotte come parametro di calibrazione, ottenendo come risultato finale le proprietà dinamiche della struttura rappresentate in figura 8 e tabella 2 3-1.

Frequency (Hz) OMA	Frequency (Hz) FEM
3,66	3,58
6,79	6,89
10,54	10,27

Tabella 2 – Frequenze ottenute dal modello FEM e confronto con OMA

Il risultato è quindi un modello numerico FEM che riproduce fedelmente il comportamento dinamico della struttura reale. Senza l'ausilio di questi strumenti

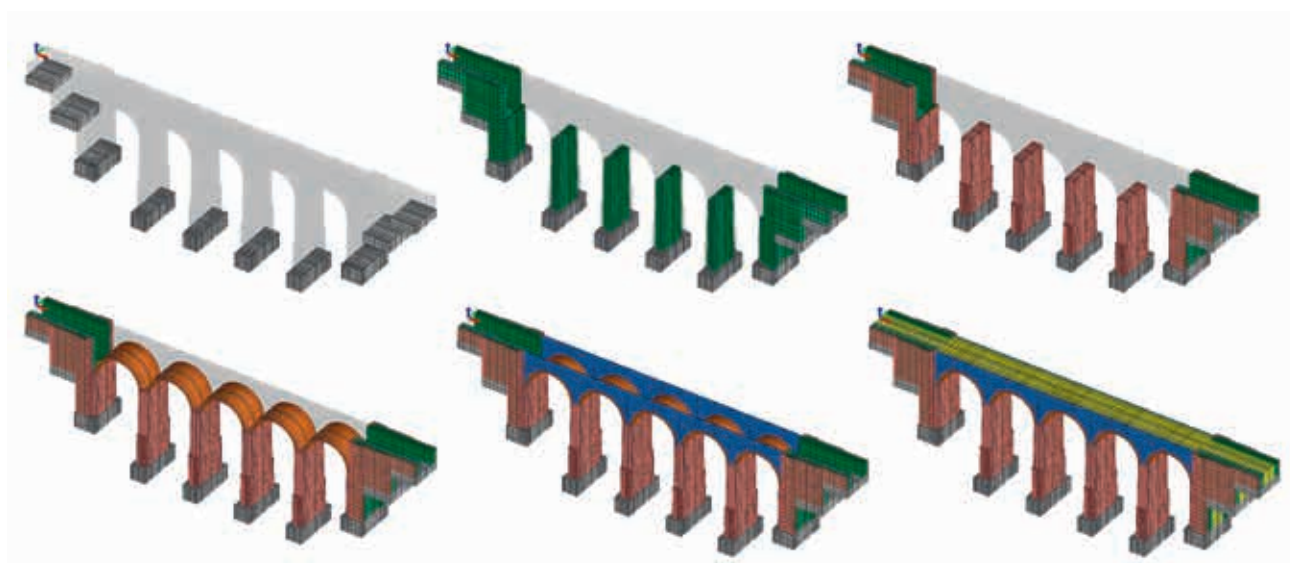


Figura 7 – Modellazione FEM del ponte in muratura

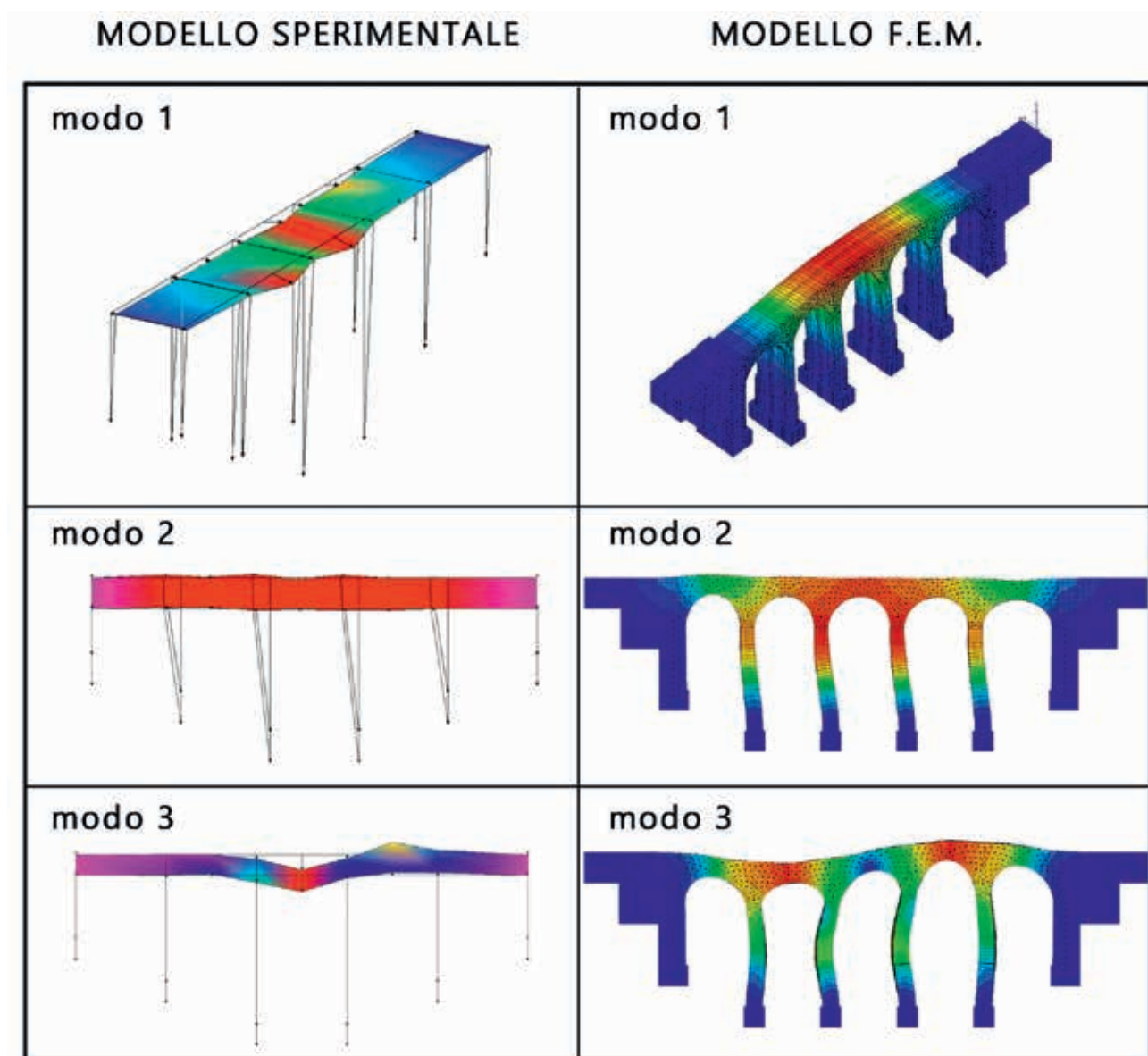


Figura 8 – Confronto tra forme modali sperimentali e numeriche (FEM)

non saremmo stati in grado di valutare la rispondenza del modello FEM sviluppato, ottenendo inevitabilmente una rappresentazione non fedele della struttura reale.

Analisi strutturali e sollecitazioni degli elementi

Il modello FEM calibrato è stato quindi utilizzato per il calcolo delle sollecitazioni nelle volte e nelle pile in

muratura, utilizzando le condizioni di carico agli stati limite SLU e SLV conformemente a quanto previsto al § 5.1.3 delle NTC 2018 e s.m.i.

Si riportano per brevità alcuni risultati delle condizioni più gravose ottenute, sia per le volte che per le pile, in corrispondenza delle condizioni di carico agli SLV.

In condizioni sismiche le tensioni (XX) che le volte sperimentano si spingono a valori elevati: trazioni fino

a valori di circa 39 daN/cm^2 e speculari valori di compressione pari a 39 daN/cm^2 (figure 9 e 10).
Allo stesso modo nelle pile in condizioni sismiche trasversali al ponte, come quelle rappresentate nel-

lo schema della deformata sottostante, le azioni verticali agenti sulle murature di mattoni pieni raggiungono i valori massimi di compressione di -50 daN/cm^2 (sul lato opposto), a fronte dell'instaurarsi di tensioni

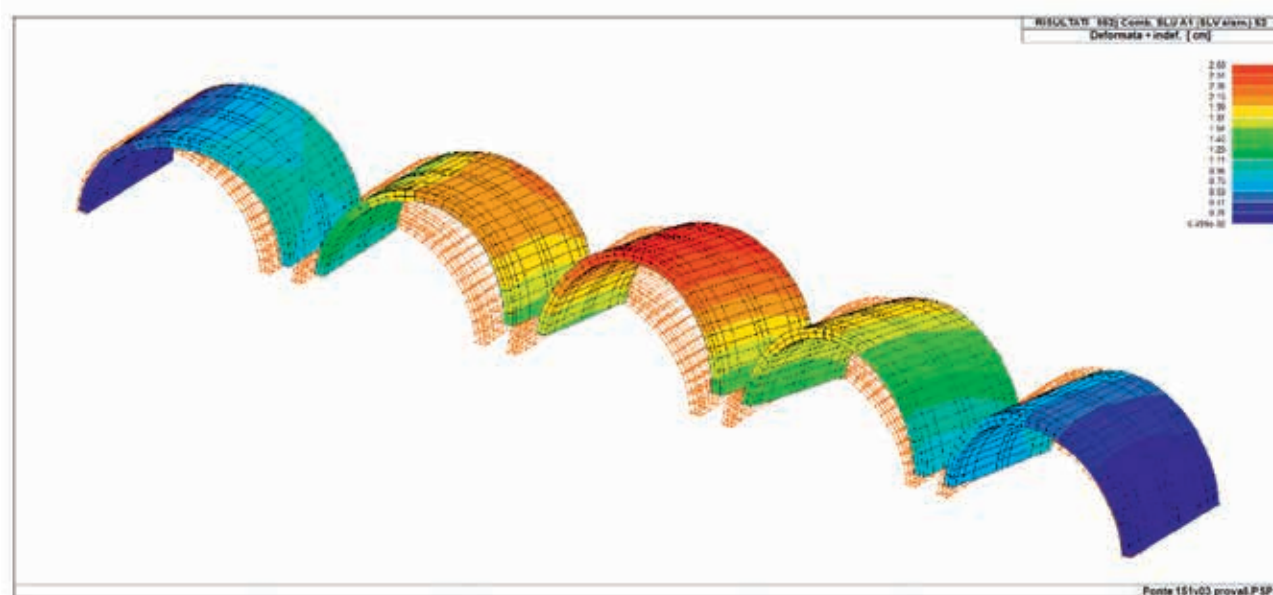


Figura 9 – Vista delle arcate – deformata + indeformata sotto azione sismica perpendicolare

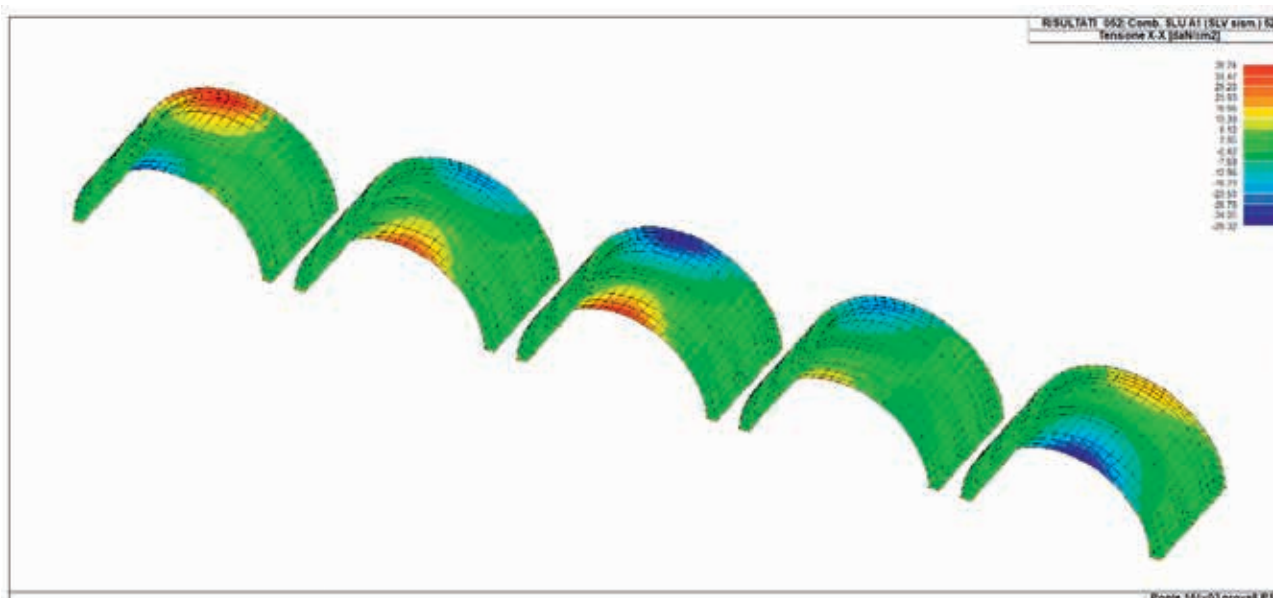


Figura 10 – Vista delle arcate dal basso – tensioni longitudinali (XX) in chiave

di trazione sul fronte di ingresso del sisma pari a 35 daN/cm^2 e oltre (figure 11 e 12).

Intervento di consolidamento delle murature

Le analisi condotte hanno dimostrato che con le attuali azioni sismiche il ponte non è in grado di sostenere azioni statiche e sismiche previste dalle attuali normative.

Inoltre, nella previsione di un prossimo intervento di adeguamento delle barriere di sicurezza stradali per il quale sarà necessario un allargamento della sezione stradale, passando da circa 6,50 m a 9,60 m, si è arrivati alla decisione di realizzare un intervento propeudeutico atto a consolidare l'attuale struttura alquanto degradata.

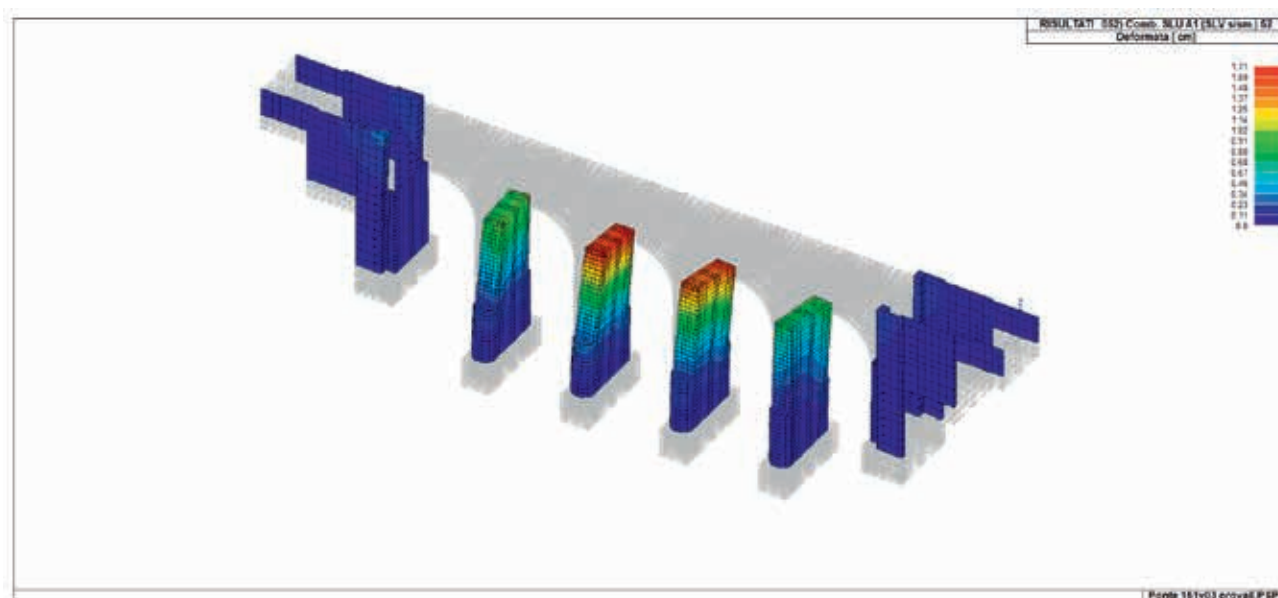


Figura 11 – Vista delle pile – deformata + indeformata sotto azione sismica perpendicolare

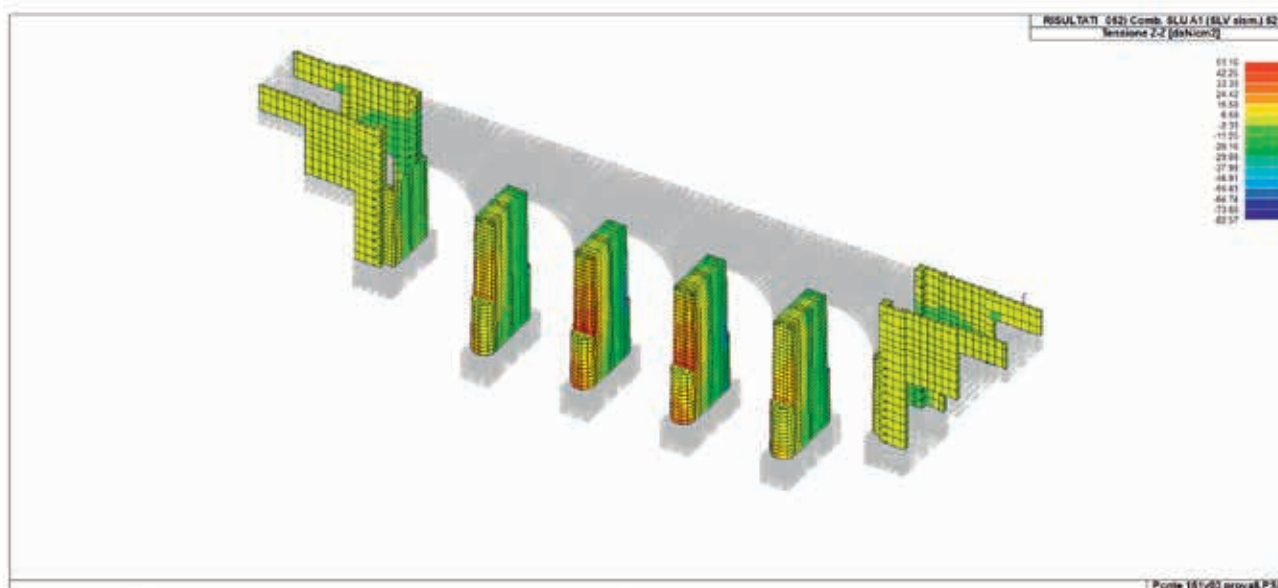


Figura 12 – Vista delle pile – azioni verticali (ZZ)

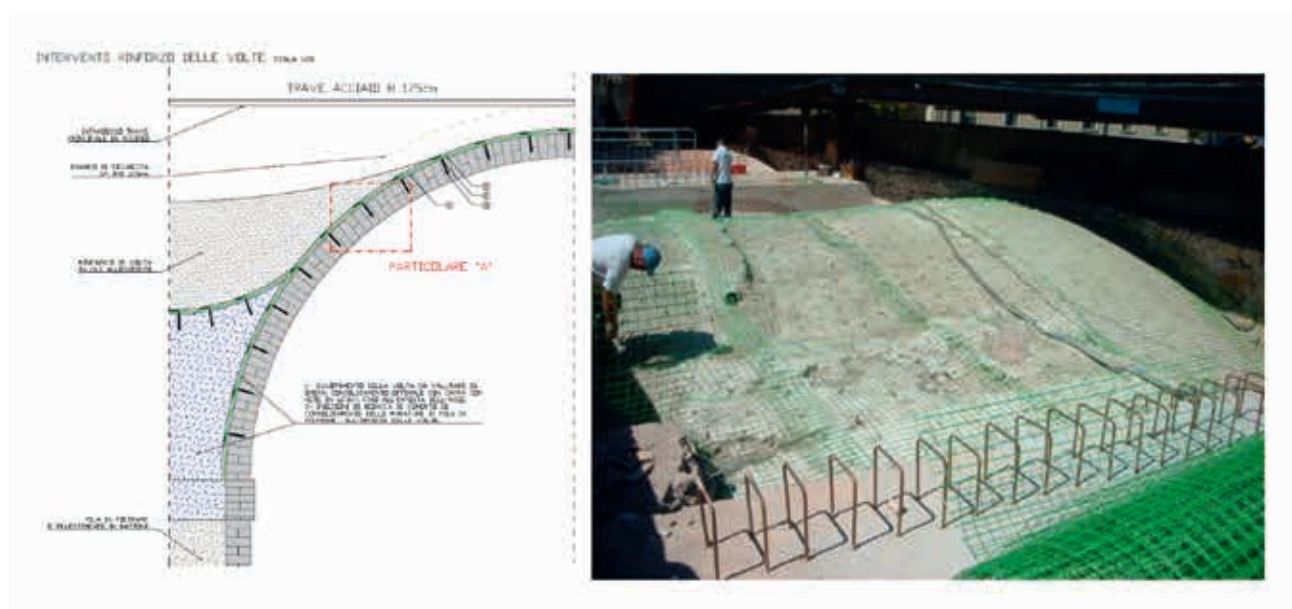


Figura 13 – Intervento di consolidamento dell'estradosso delle volte

In particolare si è deciso di intervenire nelle volte e nelle pile.

Viste le ridotte capacità portanti viene proposto l'intervento di consolidamento delle volte. L'intervento ha l'obiettivo di incrementare la resistenza a compressione delle volte mediante la realizzazione di cappa in cls fibrorinforzata di ridotto spessore al fine di contenere l'incremento delle masse in gioco ed aumentare le prestazioni attualmente insufficienti.

Gli interventi nelle pile hanno allo stesso modo l'obiettivo di incrementare la rigidità e resistenza della base delle pile mediante intonaco fibrorinforzato e di aumentare le prestazioni meccaniche mediante tecnica di "ristilatura armata dei giunti" laddove è necessario mantenere la facciavista dei paramenti murari.

Interventi nelle volte delle murature

Per incrementare le prestazioni della volta in muratura si prevede un intervento mediante realizzazione di cappa armata collaborante con rete in GFRP a maglia 66x66 mm e malta a pura calce idraulica a 15 MPa, n. 4 connessioni a mq con connettori in GFRP, per uno spessore finale di 5 cm. Tale intervento è concepito per limitare al massimo l'incremento delle mas-

se in gioco e per non alterare il comportamento meccanico delle volte. L'inserimento delle barre in materiale composito nello spessore delle volte garantisce in modo ottimale la collaborazione tra la nuova soletta armata con maglia fibrorinforzata e la volta in muratura a due teste esistente (figura 13).

La tecnica prevede la realizzazione di un intonaco armato CRM *Composite Reinforced Mortar*, con applicazione di rete preformata e monolitica in GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), a maglia 66x66 mm, con barre costituite da fibre di vetro lunghe alcalino resistenti impregnate con resina termoindurente di tipo epossidicovinilestere.

Interventi nelle pile: intonaco armato con rete in GFRP

La base delle pile richiede un intervento di consolidamento e ricostruzione delle parti disgregate. Viste le sollecitazioni massime alla base delle pile sono necessari interventi che mirano all'incremento delle prestazioni strutturali. L'intervento proposto consiste nella realizzazione di intonaco armato con rete in GFRP a maglia 66x66 mm, ipotizzando n. 4 connessioni a mq, lunghezza di ancoraggio 60 cm, betoncino con malta a pura calce idraulica a 15 MPa per

uno spessore finale di 4 cm (figura 14). In questo caso quindi non viene garantita la facciavista per un'altezza di circa 1.5 m dalla base delle pile.

La tecnica prevede la realizzazione di intonaco armato CRM *Composite Reinforced Mortar*, mediante applicazione di rete preformata e monolitica in GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), a maglia 66x66 mm.

Il sistema prevede l'inserimento di barre costituite da fibre di vetro lunghe alcalino resistenti impregnate con resina termoindurente di tipo epossidicovinilestere, avente n. 15 barre/metro/lato, peso 420 g/m.

Interventi nelle pile: ristilatura armata dei giunti

Per il rinforzo delle pareti delle pile viene proposto un intervento tipo "reticola" al fine di mantenere la "facciata a vista" delle murature. Il sistema prevede l'applicazione

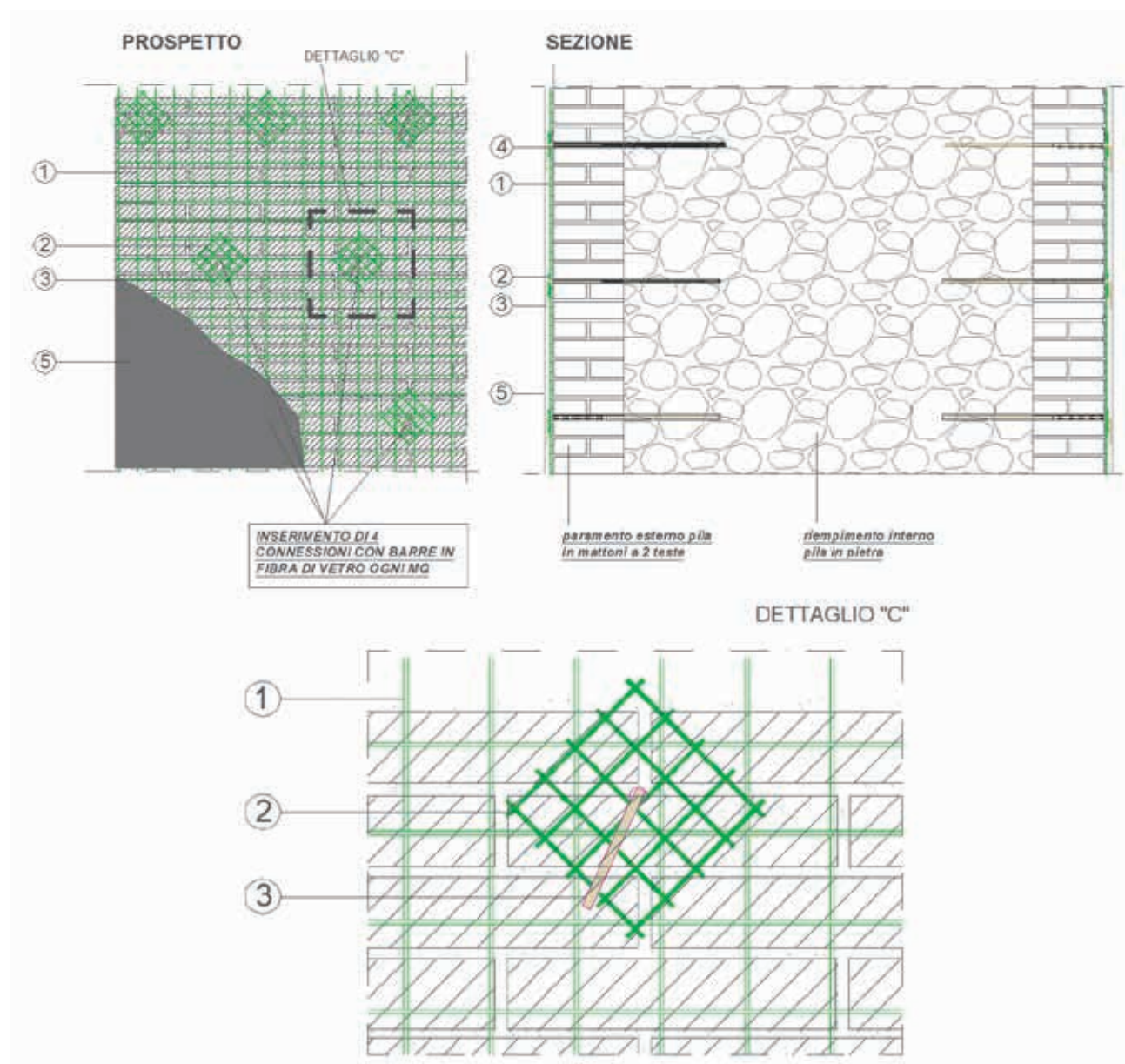


Figura 14 – Intervento di consolidamento delle pile con intonaco armato fibrorinforzato

cazione in corrispondenza dei giunti di malta di trefoli in acciaio inox $\varnothing 3$ che disegna una maglia di 30x30 cm con n. 6 connessioni a mq e ristilatura dei giunti con malta a pura calce idraulica a 15 Mpa (figura 15).

Conclusioni

Il progetto di consolidamento del ponte in muratura di Sassoferrato (opera n. 152 Provincia di Ancona) vuole fornire un approccio metodologico per la salvaguardia dei ponti esistenti. La fase di monitoraggio dinamico preliminare si conferma come un metodo semplice e affidabile per la conoscenza strutturale dei ponti, consentendo di affinare il modello numerico a elemen-

ti finiti che, senza tali valutazioni, avrebbe condotto ad analisi differenti o valutazioni sismiche errate.

Dal punto di vista economico, inoltre, il modello FEM calibrato ha permesso di ottimizzare le soluzioni tecniche di consolidamento individuate, sulla base delle reali criticità che il modello stesso ha evidenziato. Si è insomma scongiurato il rischio di intervenire inutilmente su elementi “sani” o utilizzare tecniche di rinforzo non opportune basate su evidenze FEM “non calibrate”. Le tecnologie di consolidamento utilizzate hanno consentito di non pregiudicare la fruibilità o alterarne in maniera eccessiva le caratteristiche architettoniche, grazie alla loro bassa invasività.

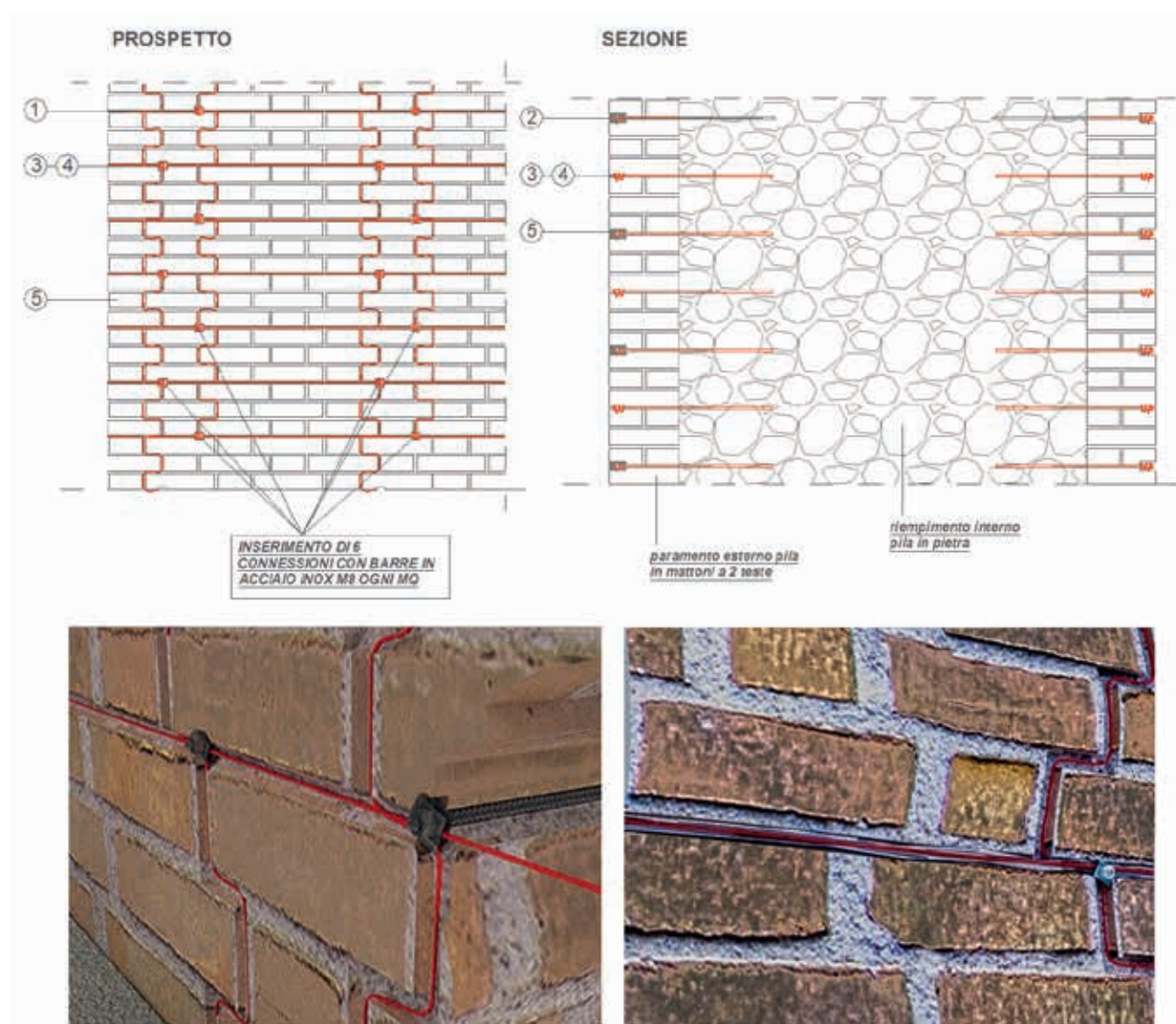


Figura 15 – Intervento di consolidamento delle pile mediante tecnica di ristilatura armata dei giunti