

## Ponti antichi e moderni: utilizzo di tecniche geomatiche per il rilievo, la rappresentazione e la modellazione strutturale

Serena Artese, Angela Miceli, Paolo Talarico, Assunta Venneri, Giuseppe Zagari, Raffaele Zinno

Università della Calabria - DIMES Dipartimento di Ingegneria Informatica, Modellistica, Elettronica e Sistemistica  
Via P. Bucci cubo 39/C, 87036 Rende, Italy, tel. +39 0984 494076  
e-mail: (serena.artese, giuseppe.zagari, raffaele.zinno)@unical.it, (angela.miceli.smartlab, paolo.talarico.smartlab, assunta.venneri.smartlab)@gmail.com

### Riassunto

Presso il Laboratorio SmartLab dell'Università della Calabria si sono svolte da diverso tempo attività riguardanti il rilievo, il monitoraggio e la rappresentazione di strutture. Nell'ambito di una campagna di studi in corso dal 2014, sono ampiamente utilizzate le tecniche geomatiche per il rilievo di ponti stradali. I risultati dei rilievi sono utilizzati oltre che per scopi di documentazione e rappresentazione, anche per la ricostruzione dei procedimenti costruttivi, per la modellazione agli elementi finiti e per la simulazione del comportamento strutturale in caso di sisma.

Nell'articolo sono descritte le attività riguardanti due ponti che presentano caratteristiche molto diverse.

Il primo ponte è un manufatto di recentissima realizzazione, con impalcato costituito da travi prefabbricate in cemento armato precompresso e fornito di isolatori sismici, per esso l'attività è rivolta essenzialmente ad ottenere un *as built*, utile per attività di controllo e documentazione. Il secondo ponte risale agli anni '50: si tratta di un ponte ad arco realizzato in cemento armato. Il rilievo in questo caso è finalizzato alla ricostruzione esatta della geometria, all'individuazione di cedimenti fondali ed alla modellazione agli elementi finiti del comportamento della struttura anche in caso di sisma.

Nell'articolo sono descritti le attività svolte, gli strumenti e le tecniche adoperati per il rilievo e la georeferenziazione, le operazioni di modellazione, i risultati numerici relativi alle ipotesi geometriche e gli scostamenti tra modelli ed *as built*.

### Abstract

In the last few years, at the SmartLab laboratory of the University of Calabria, there were developed activities in the field of surveying, monitoring and representation of structures. In the framework of these activities, Geomatics techniques for the surveying of bridges are widely used since 2014. The results of the measurements are used for documentation and representation purposes, as well as for the reconstruction of the constructive procedures. The finite element modeling of the structures has been obtained to simulate their behavior in case of earthquake.

The article describes the activities relating to two bridges, that have very different characteristics. The first bridge has been recently built, and it is characterized by a superstructure realized with precast prestressed concrete girders and provided with seismic isolators. In this case, the activity is mainly aimed to get an "as built", useful for control and documentation. The second bridge dates back to the 50s of the twentieth century: it is an arch bridge made of reinforced concrete. The surveying in this case is aimed to the exact reconstruction of geometry, the identification of foundation settlement and the finite element modeling, to simulate the behavior of the structure in seismic conditions.

The article describes the activities, instruments and techniques used for surveying and modeling operations, along with the deviations between models and "as built".

## Introduzione

Le attività descritte sono state eseguite nell'ambito di una campagna di rilievo e modellazione di ponti stradali. L'esigenza degli enti preposti alla manutenzione dei manufatti stradali (ANAS, Regioni, Province, ecc..) devono affrontare problemi differenti per strutture recenti o datate. Nel primo caso si dispone dei progetti esecutivi e dei disegni di contabilità, per cui l'obiettivo dei rilievi è quello di ottenere il cosiddetto *as built*, da confrontare con il progetto, per attività di collaudo e di contabilizzazione dei lavori eseguiti, oltre che per scopi di documentazione [Fuchs et al., 2004, Zogg and Ingensand, 2008]. Nel caso di strutture datate, molto spesso non è possibile disporre di elaborati progettuali, per cui l'attività di rilievo serve anche per ricostruire le modalità esecutive e scomporre l'organismo strutturale negli elementi che erano stati considerati e dimensionati nella fase progettuale [Lubowiecka et al., 2009]. I modelli geometrici ottenuti sono utilizzati dagli strutturisti per ottenere la modellazione agli elementi finiti e ricavare il comportamento strutturale sotto carichi statici, carichi mobili e azioni sismiche. L'analisi dei risultati dei calcoli consente di individuare le parti critiche delle strutture, eventualmente da rinforzare, che presentano i valori massimi di sollecitazione. I rilievi e le rappresentazioni sono utilizzati, inoltre, per l'individuazione di zone degradate o che presentano distacchi di copriferrì, sulle quali bisogna intervenire con azioni di recupero e restauro.

Un accurato modello agli elementi finiti è utilizzato, infine, per l'identificazione dei modi di vibrare della struttura indipendenti da sollecitazioni esterne, necessari per prevedere il suo comportamento sotto carichi dinamici.

Di seguito sono descritti le operazioni eseguite per il rilievo e la modellazione di due ponti posti su due strade gestite dalla Provincia di Cosenza.

Il primo ponte è un manufatto di recentissima realizzazione, con impalcato costituito da travi prefabbricate in cemento armato precompresso e fornito di isolatori sismici.

Il secondo è un ponte ad arco risalente agli anni '50 realizzato in opera cemento armato. Il rilievo in questo caso è finalizzato alla ricostruzione esatta della geometria, alla ricostruzione del procedimento costruttivo, all'individuazione di cedimenti fondali ed alla modellazione agli elementi finiti del comportamento della struttura anche in caso di sisma.

## Strumenti e metodologia

Si è scelto di utilizzare la tecnologia laser scanner, con fotocamera integrata, così da acquisire grandi quantità di dati, sia geometrici che fotografici, in tempi contenuti.

La scelta del laser scanner per eseguire un rilievo in maniera soddisfacente, con precisione adeguata e completezza di rappresentazione, oltre alle inderogabili considerazioni circa la precisione e la portata, deve tener conto anche di alcune altre caratteristiche pratico-operative. È fondamentale la valutazione delle prese necessarie per una completa visibilità di tutte le parti dell'oggetto da rilevare, e dalle condizioni nelle quali si deve operare per eseguire il rilievo.

È stato utilizzato il laser scanner RIEGL VZ 1000, avente le seguenti caratteristiche:

- Accuratezza del singolo punto           ± 8mm
- Portata   da 1m a 1400m
- Frequenza di campionamento           fino a 122.000 punti/sec
- Campo di vista:                               100°(Verticale) - 360° (Orizzontale)
- Compensatore e magnetometro
- Ricevitore GPS
- Fotocamera NikonD610 con obiettivo da 20 mm calibrata (in asse)
- Acquisizione della forma d'onda dell'impulso di ritorno

Quest'ultima caratteristica permette di discriminare il terreno o un manufatto dalla vegetazione che lo ricopre. L'elaborazione dei dati da laser scanner è stata eseguita con i software RiscanPro® e Geomagic®.

Bisogna osservare che il ricevitore GPS di cui è fornito il laser scanner utilizzato consente solo un posizionamento approssimato della stazione (*single point positioning*) con l'utilizzo del codice ed il metodo delle *pseudorange*, per cui, per ottenere una georeferenziazione accurata è stato utilizzato un ricevitore Leica Viva a doppia frequenza, in grado di ricevere i segnali provenienti dalle costellazioni GPS e GLONASS. Per la restituzione dei rilievi satellitari in modalità differenziale, ci si è avvalsi dei dati acquisiti dalla stazione permanente GNSS alloggiata presso il laboratorio di Geomatica del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università della Calabria, che acquisisce i dati con frequenza di un secondo. L'elaborazione dei dati acquisiti, eseguita con il software Leica Geo-Office®, ha fornito le coordinate dei punti di stazione con approssimazione centimetrica.

### Ponte Arenazza

Il ponte Arenazza, in località Ceramide del Comune di Cetraro (CS), è sito al km 0+250 della Strada Provinciale 270. E' un ponte a due campate, con impalcato costituito da travi in c.a.p. affiancate e sovrastante soletta in c.a.; le travi sono poggiate sulle due spalle e sulla pila centrale, fornite di isolatori sismici. Lo scopo principale del rilievo era la verifica della conformità del manufatto realizzato al progetto. Per questa ragione non era necessario eseguire prese dai due lati della carreggiata, ma bastava ricavare il dimensionamento degli elementi costruttivi (spalle, pila, travi, appoggi). Non ha costituito, pertanto, un problema la presenza di una recinzione metallica che impediva l'accesso alla zona a nord della carreggiata. E' stato sufficiente, inoltre, un solo punto di stazione, scelto in modo tale da poter scansionare la massima parte del manufatto (Figura 1).

Lo strumento, utilizzato con compensatore attivato (*levelled instrument*), la fotocamera esterna Nikon D610 ed il ricevitore GPS montati, è stato configurato con una risoluzione di 0.08°/pt e una velocità di scansione di 120.000 punti al secondo.

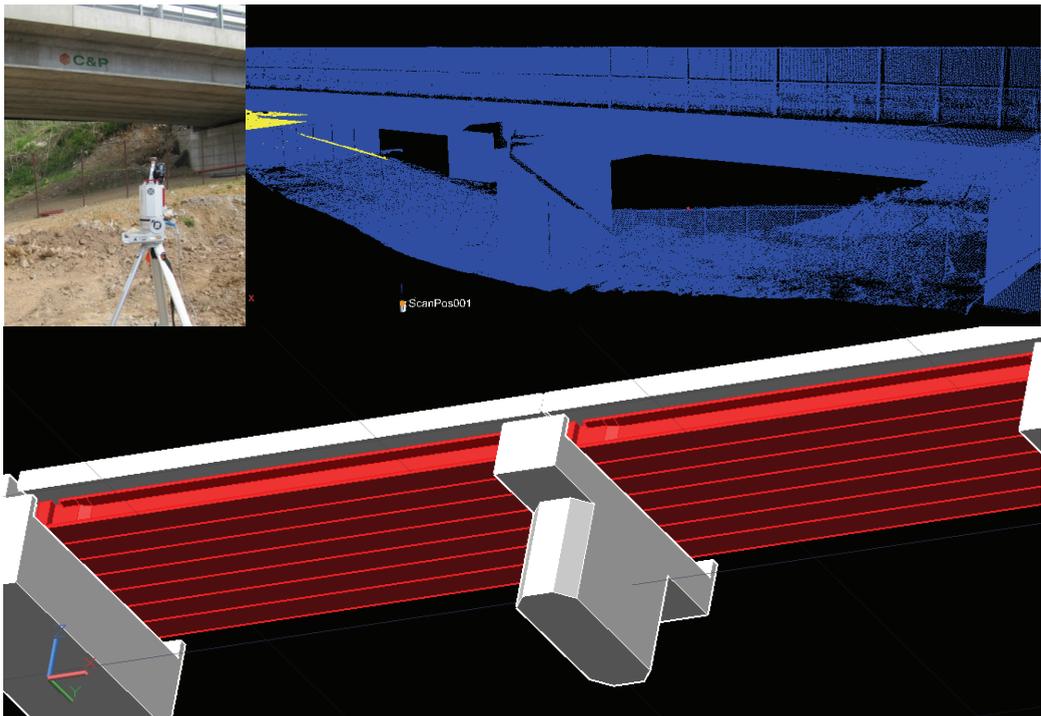


Figura 1 - Il laser scanner in stazione (sx alto), l'unione delle nuvole filtrata (dx alto), il modello (in basso).

Alcuni particolari del ponte (isolatori sismici) sono stati scansionati con una risoluzione di  $0.007^\circ/\text{pt}$ , per poter ricostruire in maniera più accurata la loro geometria.

Per la georeferenziazione sono state utilizzate le coordinate della stazione ricavate mediante GPS, unite alle indicazioni del magnetometro di cui è dotato il laser scanner.

Dopo aver sfolto la nuvola attraverso le operazioni di filtraggio del rumore, filtraggio della ridondanza e decimazione si è passati alla fase di ricostruzione di superfici, tramite *mesh*. Imponendo l'esistenza di primitive geometriche note (piani), è stato ottenuta la geometria semplificata del manufatto, da confrontare con i disegni di progetto. Dal modello tridimensionale si sono ricavate sezioni verticali ed orizzontali. Le prese dettagliate sono state utilizzate per la modellazione degli appoggi.

### Ponte Caprovìdi

Il ponte Caprovìdi, in località S. Angelo del Comune di Cetraro (CS), è sito al km 1+900 della Strada Provinciale 26. E' un ponte ad arco in c.a. gettato in opera, con due pile a stampella convergenti nei plinti di appoggio dell'arco (Figure 2,3)



Figura 2 - Ponte Caprovìdi: Particolare nuvola di punti a colori.

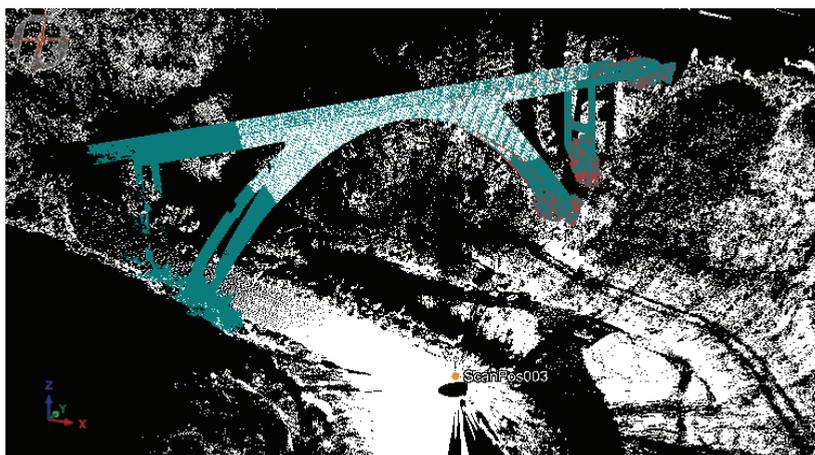


Figura 3 - Ponte Caprovìdi: Unione delle scansioni.

Per il rilievo sono state utilizzate tre scansioni. A causa della situazione topografica, infatti, non è stato possibile accedere alla zona in destra idraulica del fiume, per cui alcune parti risultavano non visibili; anche la folta vegetazione ha costituito un ostacolo che ha impedito di scansionare alcune parti delle spalle del ponte. Infine, le basi di appoggio dell'arco e delle pile a stampella risultano coperte, oltre che da vegetazione, da terreno di riporto. Per ogni scansione è stata prevista una parziale sovrapposizione spaziale con quelle adiacenti.

Sono state eseguite due prese dai due lati del manufatto; per la terza acquisizione, eseguita sotto l'impalcato, lo strumento è stato posizionato con un'inclinazione di 90°. Anche in questo caso, alcuni particolari del ponte sono stati scansionati con una definizione maggiore.

Sono stati posizionati *targets* cilindrici aventi un diametro di 14 cm, per agevolare l'allineamento delle scansioni in fase di post processing. E' stato adoperato il sistema di riferimento della prima una stazione anche per le successive. I *targets*, aventi superfici catarifrangente, sono stati posizionati in modo tale da essere facilmente e chiaramente visibili nelle scansioni.

Per la georeferenziazione accurata sono state utilizzate le acquisizioni eseguite con il ricevitore GNSS a doppia frequenza, post-elaborate insieme ai dati raccolti dalla stazione fissa permanente.

L'operazione di filtraggio e sfoltimento delle nuvole di punti è stato particolarmente delicato. Pur avendo la possibilità di discriminare gli impulsi di ritorno, è stato necessario un approfondito lavoro dell'operatore, in quanto le procedure automatiche erano influenzate dalla vegetazione e dalla geometria dell'opera.

In assenza dei disegni di progetto, il rilievo è finalizzato alla ricostruzione del manufatto, ma anche ad ottenere il progetto iniziale (reverse engineering). Per questo motivo sono stati ricavati due modelli: il primo è ottenuto direttamente dalla *mesh* generata dopo le fasi di *registration*, filtraggio e decimazione; il secondo è il modello geometricamente regolare, che dovrebbe costituire il progetto dell'opera. Il primo modello può essere utilizzato per documentazione, mentre il secondo viene adoperato come base per modellazioni strutturali. Recenti applicazioni mirano ad ottenere il modello ad elementi finiti direttamente dalla nuvola di punti [Castellazzi et al., 2015]. In figura 4 si osserva la *mesh* ottenuta dopo l'eliminazione della vegetazione. E' evidente la mancanza d'informazione, soprattutto nelle zone delle fondazioni.

Le indagini in loco e le misure di dettaglio hanno consentito di integrare i risultati del rilievo con laser scanner e di mettere a punto il modello geometrico più probabile di progetto, rappresentato in figura 5 con gli elementi strutturali principali evidenziati in colori diversi.

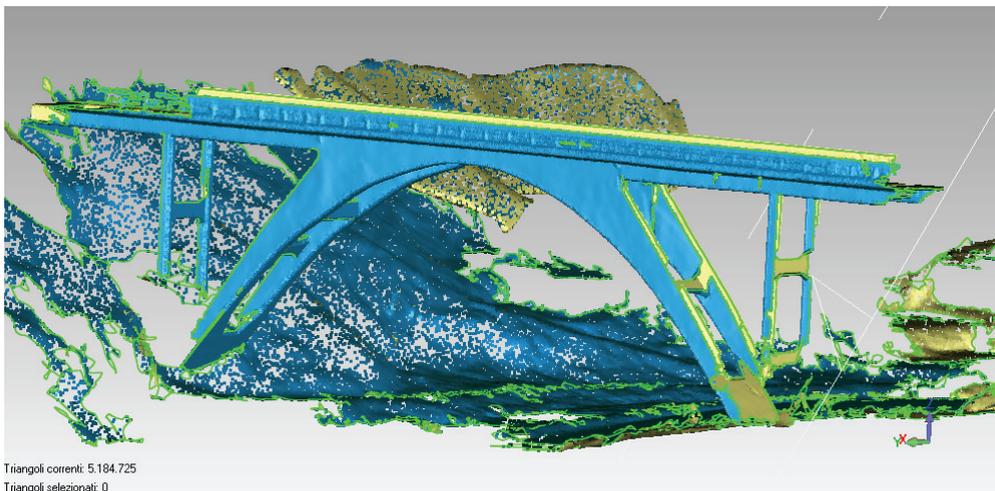


Figura 4 - Ponte Caprovidi: *Mesh*.

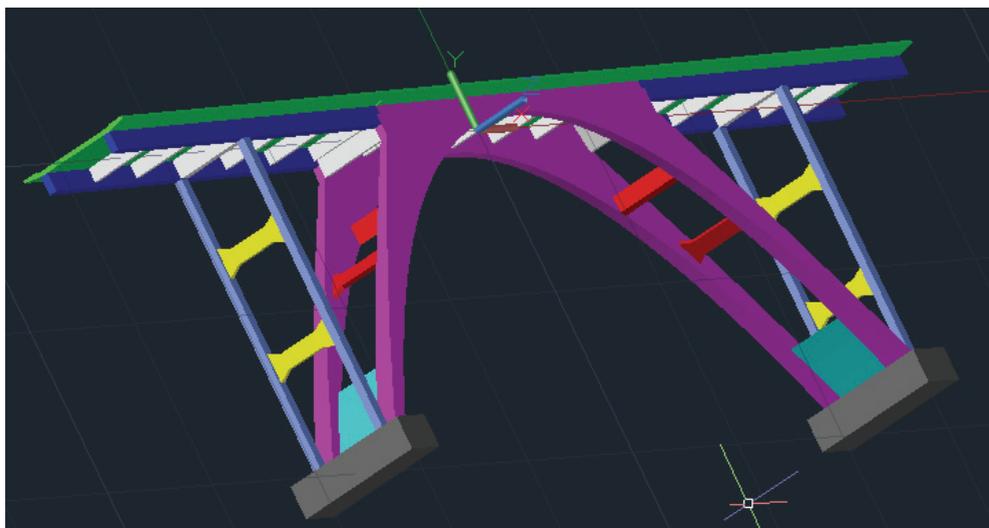


Figura 5 - Ponte Caprovi: Modello CAD.

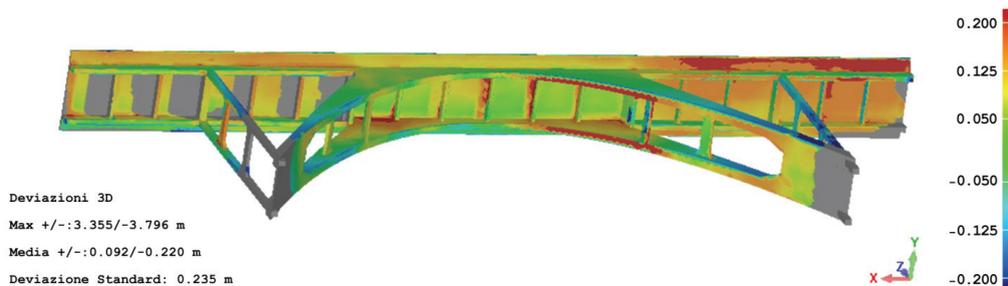


Figura 6 - Scostamenti Punti-Modello.

Nelle figure 6 e 7 sono riportati gli scostamenti tra il modello geometrico “ideale” e la nuvola dei punti. Si può osservare che gli scostamenti sono in genere di ordine centimetrico, rientranti nelle tolleranze di lavorazione per questo genere di strutture gettate in opera. Le zone rosse e blu individuano irregolarità dovute in genere a distacchi di materiale. I valori molto alti delle deviazioni massima e minima sono dovuti alla presenza di alcuni *outliers* non filtrati.

Il modello del progetto è una rappresentazione analitica del volume dell'opera. Durante la vettorializzazione si procede ad eliminare eventuali interferenze tra i vari solidi semplici che formano il volume complessivo. Il modello così ottenuto, in questo caso, è stato utilizzato per l'identificazione dinamica, procedura molto utile anche per individuare possibili danneggiamenti nella struttura. Il modello iniziale è stato trasformato in modello ad elementi finiti (FEM) ed analizzato tramite il software di analisi strutturale Abaqus [ABAQUS, 2014], che tramite procedure automatiche importa il modello grafico vettorializzato e lo converte in una *mesh* di elementi finiti, in questo caso elementi tetraedrici a 4 nodi solidi con solo 3 gradi di libertà per nodo ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ).

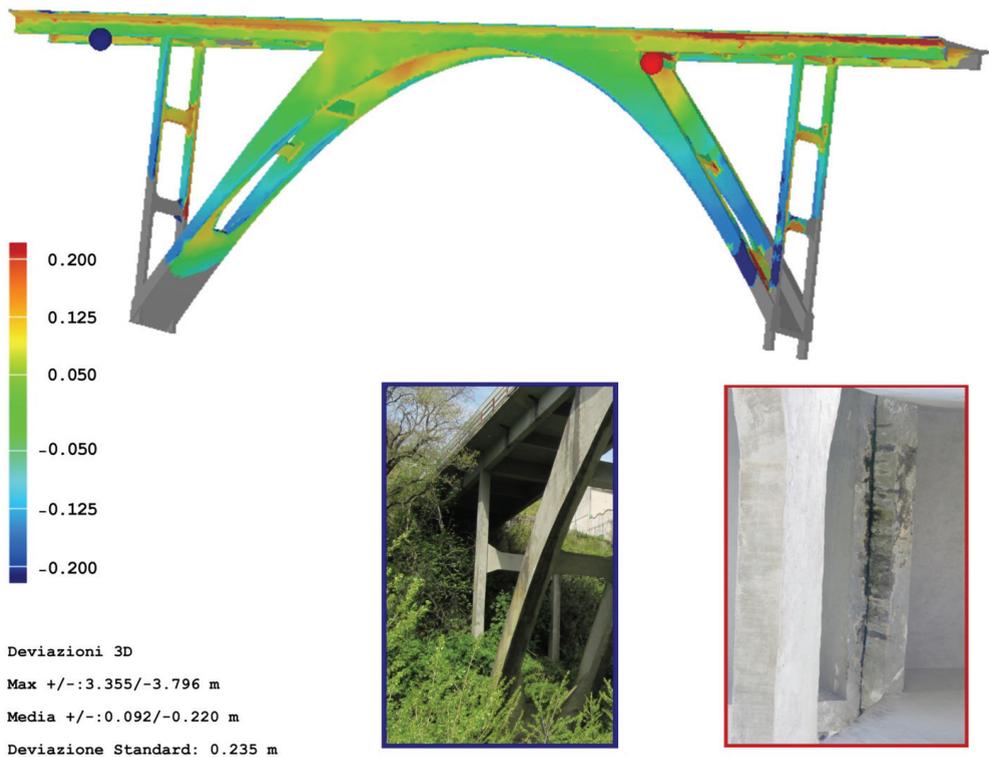


Figura 7 - Scostamenti alti Punti-Modello in corrispondenza di zone deteriorate.

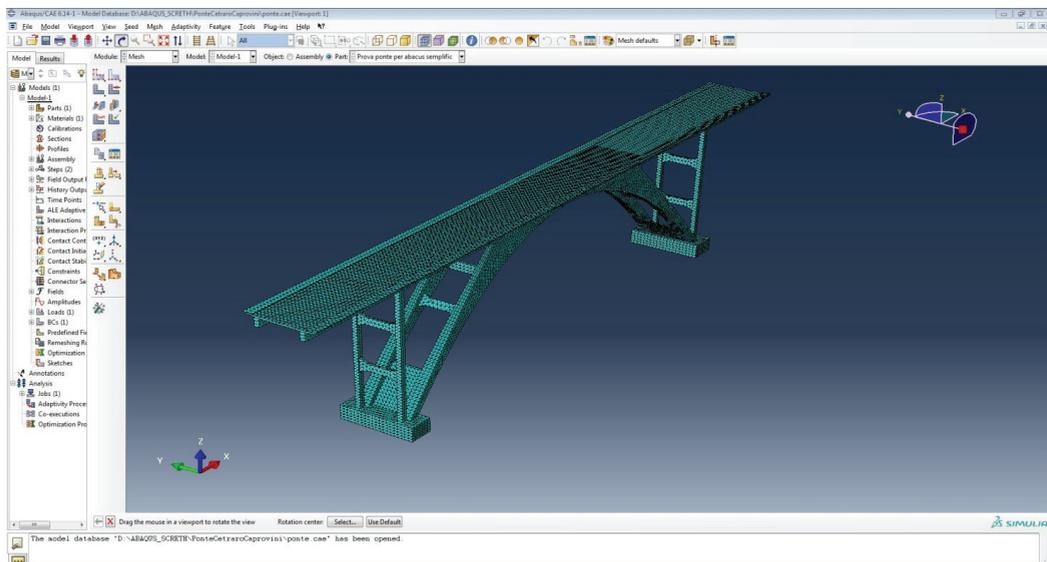


Figura 8 - Modello FEM generato automaticamente a partire dal modello CAD.

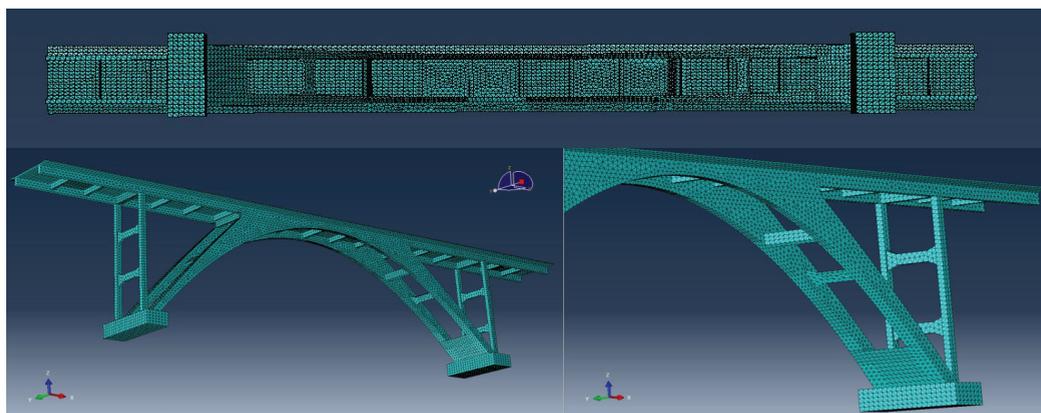


Figura 9 - Viste del modello FEM.

Questa tipologia di elementi ha consentito di generare *mesh* prevalentemente strutturate e comunque abbastanza regolari senza perdere di accuratezza, anche nelle zone a spessore variabile (Figure 8 e 9).

Gli output dei calcoli strutturali eseguiti sul modello agli elementi finiti sono stati confrontati con quelli ottenuti tramite misurazioni in situ ottenute posizionando sull'opera dei trasduttori di accelerazione unidirezionali, disposti in modo adeguato, di tipo piezo-elettrico con sensibilità pari a 10 V/g. Tali sensori hanno consentito di individuare i modi di vibrare reali della struttura sottoposta a rumori ambientali e sollecitazioni non controllate (FDD).

I risultati delle analisi sono in perfetto accordo con le misurazioni in situ e non sono state necessarie particolari procedure di *updating* per identificare le caratteristiche meccaniche della struttura, che sono risultate in accordo con i valori di progetto o misurati in sito.

### Conclusioni e futuri sviluppi

I risultati ottenuti hanno mostrato l'utilità delle tecniche geomatiche sia per la documentazione che per la modellazione strutturale di ponti. Le future attività riguarderanno anche manufatti antichi in muratura di mattoni e di pietrame, che presentano problematiche particolari e dei quali diversi esemplari sono ancora utilizzati.

### Bibliografia

- ABAQUS 6.14 Analysis User's Manual'. Online Documentation Help: Dassault Systèmes.
- Castellazzi G., D'Altri A.M., Bitelli G., Selvaggi I. and Lambertini A. (2015), From laser scanning to finite element analysis of complex buildings by using a semi-automatic procedure, *Sensors*, 15(8), 18360-18380; doi:10.3390/s150818360.
- Fuchs, P.A., Washer, G.A., Chase, S.B., and Moore, M. (2004), Applications of Laser-Based Instrumentation for Highway Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, November/December, pp. 541-549.
- Lubowiecka, I.; Armesto, J.; Arias, P.; Lorenzo, H. (2009) Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics. *Engineering Structures*, 31, 2667-2676.
- Zogg, H.M., and Ingensand, H. (2008), Terrestrial Laser Scanning for Deformation Monitoring – Load Tests on the Felsenau Viaduct (CH), *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVII, Part B5, pp. 555-562.