

Arte e tecnica dei ponti romani in pietra

a cura di
Carlo Inglese e Leonardo Paris



Collana Materiali e documenti 58

Arte e tecnica dei ponti romani in pietra

a cura di
Carlo Inglese e Leonardo Paris



SAPIENZA
UNIVERSITÀ EDITRICE

2020

Il presente volume è stato pubblicato grazie al finanziamento
Progetto di Università Medio - Anno: 2015 - prot. C26A15SRLR

Gli elaborati grafici, le cui dimensioni e alta risoluzione
non sono compatibili con il formato della presente pubblicazione,
sono reperibili al seguente link: <http://www.editricesapienza.it/node/7935>

Copyright © 2020

Sapienza Università Editrice

Piazzale Aldo Moro 5 – 00185 Roma

www.editricesapienza.it

editrice.sapienza@uniroma1.it

Iscrizione Registro Operatori Comunicazione n. 11420

ISBN 978-88-9377-150-4

DOI 10.13133/9788893771504

Pubblicato a luglio 2020



Quest'opera è distribuita
con licenza Creative Commons 3.0
diffusa in modalità *open access*.

Cura redazionale: Monica Filippa

Impaginazione/layout a cura di: Carlo Inglese, Leonardo Paris, Monica Filippa

In copertina: Il Ponte di Augusto a Narni (elaborazione grafica di Leonardo Paris)

*L'eurythmia o armonia è quella bellezza
dell'insieme che risulta dal perfetto accordo
delle parti.*

*Si ottiene quando tutti i dettagli dell'opera
si corrispondono simmetricamente
in altezza, larghezza e lunghezza.*

MARCO VITRUVIO POLLIONE
De Architectura, Libro I, cap. II

Indice

Presentazione <i>Carlo Bianchini</i>	1
I ponti lapidei di epoca romana. Ricerca e sperimentazione interdisciplinare <i>Carlo Inglese, Leonardo Paris</i>	3
Prima parte	
Rilievo e modellazione digitale: acquisizione, elaborazione, interpretazione <i>Carlo Inglese, Leonardo Paris</i>	15
Fonti iconografiche per lo studio dei ponti di Roma: il Ponte Emilio e il Ponte Fabricio <i>Paola Quattrini, Monica Filippa</i>	29
Rappresentazione multimediale e interattiva per i ponti romani <i>Tommaso Empler, Adriana Caldarone</i>	59
La raccolta dati in ambiente QGIS per un modello territoriale nazionale dei ponti antichi <i>Francesca Pierdominici</i>	77
Analisi formale, costruttiva e dimensionale dei ponti romani lapidei <i>Carlo Inglese, Leonardo Paris</i>	101

Seconda parte

Ponte Emilio a Roma	117
<i>Giulia Umana</i>	
Ponte Fabricio a Roma	137
<i>Carlo Inglese, Daniele Maiorino</i>	
Ponte di Augusto a Narni	153
<i>Maria Laura Rossi</i>	
Ponte romano a Rieti	173
<i>Leonardo Paris</i>	
Ponte romano ad Alcántara in Spagna	189
<i>Carlo Inglese, Antonio Pizzzo, Roberto Barni</i>	
Bibliografia generale	205
Autori	215

Presentazione

Carlo Bianchini

Pontem perpetui mansurum in saecula mundi fecit divina nobilis arte Lacer (*l'illustre Lacer, con arte divina, costruì il ponte affinché durasse per sempre nell'eternità del mondo*).

Questa frase, incisa sul tempietto ai piedi del Ponte dell'Alcántara dove è sepolto il suo progettista Gaio Giulio Lacer, è a mio avviso l'incipit migliore per questo pregevole volume di Carlo Inglese e Leonardo Paris. L'iscrizione, infatti, rende in maniera sintetica ma pregnante il valore che queste strutture "ingegneristiche" rivestivano nel mondo romano come pezzi di quell'architettura pubblica che ha costituito forse l'impronta più visibile e duratura dell'intera civiltà romana.

Templi, fori, basiliche, terme, teatri, circhi, archi trionfali, palazzi costituiscono aggregandosi (insieme all'edilizia più minuta) le varie formae urbis sparse per l'Impero come poli di aggregazione politica, economica e sociale.

Questo schema polare, tuttavia, non ha molte chances di sopravvivenza in assenza di una rete stabile ed efficiente di connessione: strade e ponti rappresentano dunque quell'infrastruttura indispensabile a garantire sia le comunicazioni tra i vari poli sia, più in generale, la coesione politica e culturale di un territorio vasto come mai si era visto prima nella Storia.

Che la struttura di comunicazione viaria sia stata una delle più originali e anche vantaggiose invenzioni della civiltà romana non vi è dubbio alcuno, e i ponti in questo quadro divengono elementi cruciali di sviluppo in quanto capaci di scavalcare ostacoli orografici altrimenti insormontabili.

Roma stessa è il primo esempio e laboratorio per la messa a punto di questa tipologia e tecnologia: la neo-fondata città ha quasi subito bisogno di un collegamento stabile con la sponda destra del Tevere e non a caso troviamo già nel VI secolo a.C. il Ponte Sublicio (locus costitutivo anche dell'orgoglio nazionale romano: Orazio Coclite lì si oppose da solo al passaggio di re Porsenna) e quindi via via numerose altre strutture stabili (ponti Emilio, III secolo a.C., Milvio, II secolo a. C., Fabricio e Cestio, I secolo a.C.).

Ma il ponte assume per la particolare cultura e religione dei Romani un valore anche altamente simbolico: il collegare, lo scavalcare, il rendere accessibile ciò che è precluso, insito nella divina arte del pontem facere, è anche la peculiare prerogativa dei pontifices sacerdoti deputati ad assicurare, preservare e rafforzare il “collegamento” tra la sponda umana e quella divina. Non a caso gli imperatori da Augusto in poi assumeranno tra i vari titoli e cariche anche quello di pontifex maximus, titolo ancora oggi attribuito al papa della Chiesa cattolica.

Il presente volume di fatto riunisce e contestualizza quanto descritto nelle brevi note che precedono con un'aggiunta non secondaria: l'applicazione di una rigorosa metodologia di ricerca basata su dati raccolti scientificamente.

Cinque le strutture investigate: i ponti Emilio e Fabricio a Roma, il Ponte di Augusto a Narni, il Ponte romano di Rieti e, infine, il Ponte dell'Alcántara in Estremadura.

L'approccio utilizzato è metodologicamente chiaro: i dati storici e storiografici si bilanciano con la lettura “oggettuale” dei manufatti basata su acquisizioni 3D appositamente realizzate con l'obiettivo di presentare una interpretazione solida e razionale delle principali proprietà geometriche, tecnologiche e strutturali di queste costruzioni.

Tuttavia, studiare i ponti romani significa anche gettare una luce su strutture profondamente radicate nella cultura e civiltà romana, operazione che gli autori propongono al lettore senza snaturare però il focus del volume.

Ai ponti romani a Roma (in questo caso Emilio e Fabricio) è comunque riservata una particolare attenzione, sia dal punto di vista dell'approfondimento, anche diacronico, del loro fondamentale ruolo nello sviluppo della città e del suo skyline (significativa la ricerca iconografica proposta), sia dal punto di vista dell'archiviazione e consultazione dei dati e della loro comunicazione.

Quanto al primo tema, una parte rilevante è dedicata alla presentazione di un prodotto realizzato in ambiente QGIS che consente l'interrogazione del vasto database costituito nel corso della ricerca che questo volume racconta.

L'aspetto della comunicazione (anche generalista) propone invece una soluzione per dispositivi mobili che, mediante applicazioni di tecnologie AR/VR/MR, consente agli utenti sia di accedere interattivamente a un vasto database informativo oltre che di visualizzare le ricostruzioni delle strutture non più esistenti in Mixed Reality.

I ponti lapidei di epoca romana. Ricerca e sperimentazione interdisciplinare

Carlo Inglese, Leonardo Paris

1. Introduzione

I resti di un antico ponte sono la rappresentazione tangibile di un affascinante rapporto tra forze contrastanti: da un lato quelle naturali, riferite a contesti ambientali spesso impervi, dall'altro quelle antropiche tese a risolvere, grazie alla tecnica, problemi di gestione e sfruttamento del territorio. Seppure in alcuni casi il contesto ambientale risulta essere fortemente trasformato, questo delicato rapporto, questa tensione tra forze è ancora oggi percepibile non essendo mutati i principali elementi costitutivi.

La valenza archeologica dei resti di un antico ponte viene accentuata da specificità di diverso tipo: considerazioni di carattere costruttivo che rimandano in primo luogo all'evoluzione della tecnica di costruzione di infrastrutture di notevoli dimensioni; valutazioni legate agli aspetti orografici che ne hanno condizionato l'ubicazione, la realizzazione e le fasi di utilizzo; aspetti di natura estetica per cui strutture di questo tipo sono considerate delle vere e proprie opere d'arte (Fig. 1). Si tratta della sintesi estrema di quella triade vitruviana, basata sulla *firmitas*, *utilitas* e *venustas*, che i Romani hanno prima di tutto sperimentato, poi teorizzato e conseguentemente diffuso in gran parte dei territori da loro governati in un arco temporale molto ristretto.

2. Ricerca scientifica

Lo studio dei ponti antichi – in particolare dei ponti lapidei dell'Impero Romano – è da molti anni oggetto di interesse da parte di ricercatori di diversi settori scientifico disciplinari; tra questi alcuni studiosi della Sapienza Università di Roma, afferenti al Dipartimento di Storia, Disegno, Restauro dell'Architettura hanno condiviso un



Fig. 1. Il ponte di Augusto a Narni (foto di Leonardo Paris).

progetto, finanziato nel 2016, dal titolo “Il rilievo digitale integrato, la ricostruzione e la divulgazione virtuale quale forma di conoscenza degli antichi ponti romani in pietra a Roma e nelle province”¹.

La ricerca si è posta l’obiettivo di fornire, sulla base dei casi di studio analizzati inerenti alcuni dei più noti ponti lapidei di epoca romana, un possibile quadro metodologico per l’implementazione

di una piattaforma informativa multidisciplinare e multiscalarare condivisa dall'intera comunità scientifica e, a differenti gradi di approfondimento, dalle comunità locali di riferimento. Il rilievo digitale e la modellazione tridimensionale rappresentano a nostro avviso il necessario punto di partenza per la definizione di un modello di conoscenza che non può prescindere dal dato metrico ma che al tempo stesso deve riguardare tutti gli altri livelli di approfondimento settoriale, da quello archeologico a quello storico documentale, da quello urbanistico a quello strutturale.

Un primo aspetto fondamentale è non solo l'individuazione dei ponti dal punto di vista topografico ma soprattutto la loro caratterizzazione e catalogazione sulla base di valutazioni di carattere storico, architettonico, archeologico, attraverso la compilazione di un elenco ragionato basato sulle fonti storico-bibliografiche, documentarie e archivistiche. Ciò ha consentito di elaborare un primo censimento ragionato dei ponti antichi (Fig. 2), classificabili in un database e mediante una scheda riassuntiva delle caratteristiche storiche, costruttive, tipologiche, sullo stato di conservazione, sulle condizioni ambientali al contorno, sui riferimenti bibliografici e documentali reperibili.

Un altro aspetto, specifico del tema di studio, riguarda sia la lettura architettonica e archeologica delle fasi di cantiere, delle tecniche e delle procedure utilizzate, sia anche le analisi geometrico-proporzionali per la definizione delle tipologie ricorrenti e delle varianti costruttive, anche attraverso l'individuazione di moduli nelle diverse aree geografiche.

Queste ultime considerazioni sono scaturite da un'analisi accurata di alcuni casi studio ritenuti particolarmente significativi in relazione alle loro specifiche caratteristiche. Partendo come detto dal rilievo, un primo obiettivo è stato quello di ottimizzare la fase di acquisizione metrica e morfologica individuando una metodologia operativa che potesse essere estesa al maggior numero di esempi e che tenesse conto, oltre che della natura degli elementi da rilevare, delle specificità strumentali e dei diversi metodi di rilevamento.

I casi di studio sono stati: i ponti Emilio (ponte originario in legno risalente al 179 a.C.; restauri del ponte lapideo voluti da Augusto nel 12 a.C.) e Fabricio (risalente al 62 a.C.) a Roma, il ponte di Augusto a Narni (probabilmente realizzato durante le ristrutturazioni volute da Augusto nel 27 a.C.), il ponte romano di Rieti (ponte originario del III a.C., restauro o rifacimento nel I d.C. attribuibile all'imperatore Claudio), il ponte di Alconetar e di Alcántara (en-

La ricerca ha riguardato anche un'attività di interscambio culturale con alcuni progetti internazionali che si occupano, a diversi livelli, di architettura di epoca romana, delle soluzioni costruttive, e in generale dell'archeologia della costruzione. Tra di essi il progetto scientifico "Análisis de soluciones técnico-constructivas, modelos arquitectónicos y urbanísticos de la arquitectura romana de la Lusitania: Orígenes y transformación de una cultura arquitectónica"² nel quale sono già stati sviluppati diversi sistemi per la catalogazione e la documentazione degli elementi tecnici legati allo studio dei grandi cantieri edili di epoca imperiale romana. In questo senso questo studio può essere inserito in un contesto di riflessione multidisciplinare che ha per oggetto gli aspetti costruttivi del mondo romano, dalla storia delle tecniche e della diffusione dei modelli architettonici fino all'analisi della trasmissione delle conoscenze e dei saperi architettonici. Tali argomenti presentano attualmente una consolidata tradizione scientifica legata a un gruppo di ricerca internazionale che, negli ultimi anni, ha analizzato sistematicamente una serie di concetti nell'ambito della produzione architettonica di epoca romana³.

I risultati della ricerca riguardano pertanto valutazioni di carattere generale che, sulla base di alcune sperimentazioni, intendono definire possibili percorsi metodologici su temi specifici disciplinari e interdisciplinari. Tra questi, il ruolo del rilievo digitale e la conseguente elaborazione dei modelli interpretativi, ruolo accresciuto esponenzialmente negli ultimi decenni grazie alla diffusione di strumenti e metodi che seppure già ampiamente sperimentati e consolidati hanno richiesto, nel caso specifico, l'applicazione di particolari accorgimenti operativi⁴.

Un altro tema riguarda le modalità di lettura critica e di interpretazione della documentazione storico-archivistica, spesso arricchita da immagini che oltre al loro valore iconografico possono in alcuni casi fornire un apporto significativo alla ricostruzione degli eventi storici e delle stratificazioni temporali. Al tempo stesso quelle stesse immagini, se non opportunamente filtrate, contestualizzate e codificate, possono anche ingenerare equivoci⁵.

Un ambito innovativo e di grande interesse è quello della comunicazione dei Beni Culturali, soprattutto se basata su nuove modalità di accesso multimediale integrate da possibili esperienze di realtà virtuale, molto efficaci nel momento in cui si vogliono abbinare

contenuti informativi riferiti a epoche diverse oppure prefigurare possibili scenari di ricostruzione temporale o, ancora, offrire approfondimenti rivolti a studiosi ed esperti⁶.

L'uso delle piattaforme multimediali nei sistemi informativi territoriali rappresenta un altro importante tema di approfondimento (sperimentato in questa ricerca) collegato alla possibilità di geolocalizzare in un unico sistema di riferimento a scala nazionale tutti i ponti antichi, di mettere a sistema le differenti informazioni *open data*, di definire un contenitore implementabile con tutte le informazioni attualmente disponibili (o disponibili in futuro) e interrogabile dalla collettività o da chiunque ne avesse necessità, per scopi non solo divulgativi ma anche scientifici⁷.

Non si deve infine sottovalutare, in una ricerca di questo tipo, la possibilità di prospettare possibili chiavi di lettura alternative a quelle già in uso, analizzando e interpretando la mole di informazioni digitali acquisite. Occorre pertanto combinare le informazioni metriche estrapolate (attraverso opportune interrogazioni) dal dato grezzo rappresentato dalla nuvola di punti con le immagini fotografiche (rese metricamente affidabili) che rappresentano la principale fonte di lettura dei più minuti dettagli costruttivi. La combinazione di queste informazioni consente di approfondire (anche per comparazione) molteplici aspetti legati ai ponti antichi, di natura costruttiva, di utilizzo e riutilizzo dei materiali, di gestione delle fasi di cantiere, ma anche di conoscenza delle principali strategie di progettazione tra teoria e pratica⁸.

3. Sperimentazioni

Tutti questi aspetti combinati insieme rappresentano il filo conduttore delle indagini riferite a casi di studio ritenuti tra i più significativi nel panorama nazionale e internazionale⁹.

Ovviamente i casi di studio non esauriscono l'infinità di sfaccettature che contraddistinguono, di fatto, un ponte che è inevitabilmente un "pezzo unico". È però altresì innegabile che, trattandosi di un'opera prevalentemente strutturale, il ponte antico "deve" essere anche visto come prodotto di una cultura tecnica che fonda evidentemente le sue ragioni sull'applicazioni di criteri di standardizzazione e di ottimizzazione delle fasi costruttive. C'è pertanto, in ogni esempio studiato, la volontà di individuare quel grado di relazione tra l'*unicum* dovuto alle molteplici variabili (tecniche, logi-



Fig. 3. Ponte Emilio e Ponte Fabricio all'Isola Tiberina (foto di Giulia Umana).

stiche, orografiche, ecc.) e lo standard consolidatosi sulla base delle competenze maturate attraverso l'esperienza (in questo senso diventata fondamentale la lettura comparata).

La ricerca si è concentrata su cinque ponti di epoca romana, di cui tre urbani e due extraurbani. Tra i primi sono stati analizzati i due ponti più significativi nel cuore della Capitale, il Ponte Emilio e il Ponte Fabricio, così vicini eppure così diversi per storia, caratteristiche costruttive, conformazioni geometriche (Fig. 3). Già il semplice confronto visivo tra le due arcate del ponte Fabricio – che hanno conservato intatta la loro integrità per più di duemila anni garantendone ancora oggi la funzionalità di collegamento con l'Isola Tiberina – e l'arcata supersite delle sei originarie del Ponte Emilio a valle dell'isola, realizzato pochi anni dopo il primo (il Fabricio è considerato il ponte lapideo più antico di cui si ha conoscenza) consente di ricavare molte informazioni sull'arte e la tecnica di costruzione dei ponti lapidei messa a punto dai Romani nel I secolo a.C. Ma se il Ponte Fabricio è in qualche modo facilmente leggibile avendo subito poche modifiche nel tempo, cosa ben diversa è riuscire a cogliere nei resti del Ponte Emilio l'imponenza della sua configurazione originaria, la sua travagliata storia, fatta di crolli e ricostruzioni, trasformazioni anche architettoniche (si pensi alla sua monumentalizzazione in epoca rinascimentale), adeguamenti strut-



Fig. 4. I resti del ponte romano di Rieti nel fiume Velino (foto di Leonardo Paris).

turali per cercare strenuamente di mantenerne la sua funzionalità, fino all'epilogo di fine Ottocento, scontato ma pur sempre sorprendente, legato alla realizzazione dei muraglioni e alla costruzione del nuovo Ponte Palatino.

Storia ben diversa è quella del ponte romano di Rieti, anch'essa sorprendente per il suo epilogo risalente addirittura al 1930 e i cui resti, quasi completamente immersi delle limpide acque del fiume Velino, configurano un'affascinante quanto unica inversione semantica nella quale il ponte da elemento strutturale progettato per sovrastare il fiume ne è diventato parte integrante, semplice simulacro (Fig. 4).

Molto interessante è l'analisi e il confronto tra i due ponti extraurbani di Narni e di Alcántara che spiccano entrambi per la loro grandiosità e imponenza al cospetto di un contesto ambientale molto caratteristico e suggestivo (Fig. 5). Il loro stato di conservazione sembra ricalcare quanto già evidenziato nel confronto tra il Ponte Fabricio e il Ponte Emilio, se si considera che il Ponte di Alcántara ha mantenuto intatta, nonostante crolli e ricostruzioni, la sua conformazione e integrità mentre il Ponte di Augusto a Narni ha subito crolli, ricostruzioni, ulteriori crolli fino all'attuale cristallizzazione dei suoi resti in l'unica campata superstite. Ma è in questi due ponti



Fig. 5. Il ponte romano di Alcántara e il ponte di Augusto a Narni (foto di Carlo Inglese e Leonardo Paris).

e nelle loro arcate monumentali che emerge con tutta evidenza la profonda conoscenza tecnica e ingegneristica raggiunta dai Romani nei secoli a cavallo tra il I secolo a.C. e il II secolo d.C., soprattutto se si pensa a quanto questi ponti siano così distanti topograficamente ma così simili per dimensioni, accorgimenti tecnici nell'uso dei materiali e nel taglio della pietra, nel ruolo strategico infrastrutturale che hanno assunto durante i secoli.

4. Conclusioni

I singoli casi di studio oggetto di sperimentazione si basano su un'attività di rilievo digitale, di ricerca storico-documentale, ma soprattutto di analisi critica e di approfondimento tecnico-costruttivo sulle caratteristiche principali del progetto, della sua realizzazione e della sua trasformazione nel corso di ben due millenni di storia. La minuziosa lettura dei resti attuali – alla ricerca di indizi spesso non facilmente visibili ad occhio nudo – integrata da un'accurata analisi e interpretazione delle fonti storiche – scritte e iconografiche – diventa così l'occasione per intraprendere un affascinante viaggio nel tempo attraverso cui tuffarsi con l'immaginazione nel pieno di un periodo, quello dell'Impero Romano, così affascinante, intrigante e a volte misterioso.

¹ Si fa riferimento alla Ricerca di Ateneo 2016 della Sapienza Università di Roma, il cui gruppo è composto da: Tommaso Empler, Carlo Inglese, Leonardo Paris, Paola Quattrini e da Marco Di Giovanni, responsabile tecnico del Liralab Sapienza. Hanno collaborato: Wissam Wahbeh, Maria Laura Rossi, Adriana Caldarone, Francesca Pierdominici, Emiliano Della Bella, Michela Armiento, Giulia Umana, Daniele Maiorino. Al gruppo di ricerca afferisce anche Antonio Pizzo, científico titular Instituto de Arqueología-Mérida, CSIC - Spagna. Alcune attività di rilievo si sono avvalse della strumentazione messa a disposizione dal Critevat Centro di Ricerca Interdipartimentale Sapienza.

² Progetto scientifico finanziato dal “Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno Español” nel quadro del “VI Plan de Investigación Científica y Tecnológica” (HAR2012-36963-C05-05), responsabile Antonio Pizzo. Queste ricerche sono legate a un programma scientifico internazionale intrapreso da diversi dipartimenti dell'École Normale Supérieure de Paris, finanziato nell'ambito di un Labex TransferS (S1 – C1).

³ I risultati di queste ricerche che rientrano nell'ambito di quella che è stata definita “archeologia della costruzione” sono stati ampiamente discussi in cinque congressi organizzati, negli ultimi anni, a Mérida (Spagna), Siena e Parigi, Padova e Oxford con l'obiettivo di creare un protocollo comune per lo studio dei cantieri nel mondo antico. I risultati scientifici sono stati pubblicati nella prestigiosa serie “Anejos de Archivo Español de Arqueología”.

⁴ Per approfondimenti si rimanda al capitolo di questo volume “Rilievo e modellazione digitale: acquisizione, elaborazione, interpretazione” di Carlo Inglese e Leonardo Paris.

⁵ Per approfondimenti si rimanda al capitolo di questo volume “Fonti iconografiche per lo studio dei ponti di Roma: il Ponte Emilio e il Ponte Fabricio” di Paola Quattrini e Monica Filippa.

⁶ Per approfondimenti si rimanda al capitolo di questo volume “Rappresentazione multimediale e interattiva per i ponti romani” di Tommaso Empler e Adriana Caldarone.

⁷ Per approfondimenti si rimanda al capitolo di questo volume “La raccolta dati in ambiente QGIS per un modello territoriale nazionale dei ponti antichi” di Francesca Pierdominici.

⁸ Per approfondimenti si rimanda al capitolo di questo volume “Analisi formale, costruttiva e dimensionale dei ponti romani lapidei” di Carlo Inglese e Leonardo Paris.

⁹ Per approfondimenti sui singoli casi studio si rimanda alla seconda parte di questo volume.

PRIMA PARTE

Rilievo e modellazione digitale: acquisizione, elaborazione, interpretazione

Carlo Inglese, Leonardo Paris

1. Introduzione

Gli strumenti e i metodi di indagine per la conoscenza dei manufatti architettonici hanno ricevuto un notevole impulso nell'ultimo decennio grazie alla rapida evoluzione di tecnologie quali lo scanner laser 3D, i nuovi strumenti topografici (*Range-based Modeling*) e la fotogrammetria digitale (*Image-based Modeling*). L'utilizzo coordinato di tali tecnologie, in una metodologia digitale integrata, consente di restituire accurati modelli tridimensionali dell'architettura¹.

L'applicazione delle metodologie di rilievo in un ambito specifico come quello dei ponti antichi ha messo in evidenza alcune peculiarità: la prima è che il ponte non può essere rilevato se non in continuità con il contesto ambientale di cui ne è parte integrante; la seconda è che il ponte mostra una forte componente archeologica e che pertanto vanno adottati gli stessi criteri di rilievo utilizzati delle aree archeologiche; il ponte infine, essendo di fatto anche un'opera infrastrutturale (diremmo oggi di ingegneria civile), va indagato anche dal punto di vista del suo comportamento strutturale.

Sebbene l'attività di rilevamento vada sempre intesa come un unico processo scientifico di conoscenza, da un punto di vista metodologico di valutazione delle principali peculiarità e criticità si possono distinguere tre fasi: acquisizione, elaborazione e interpretazione, ciascuna delle quali con specifiche problematiche.

Ogni attività di rilievo rappresenta evidentemente un *unicum*, in quanto oggi oggetto è un *unicum*. Tuttavia le sperimentazioni messe in atto nello svolgimento della nostra ricerca su alcuni dei più importanti ponti antichi lapidei di epoca romana (tutti rilievi inediti) hanno consentito di definire un protocollo procedurale e di codi-

ficare una metodologia utilizzabile e ripetibile in esempi analoghi. L'impostazione di un simile protocollo non è da intendersi quale semplificazione e standardizzazione del processo di rilevamento, quanto piuttosto quale ausilio all'interno di un percorso critico, al fine di ottenere una ottimizzazione dell'intero processo di rilevamento e analisi.

La codificazione della prassi operativa relativa allo studio dell'architettura romana è parte della metodologia relativa alla "archeologia della costruzione"², disciplina che si allontana dalla lettura stilistica tradizionale dell'architettura per affrontare l'analisi della nascita e la trasformazione dei modelli architettonici in rapporto alle soluzioni tecniche e alle dinamiche operative impiegate nei cantieri edili.

L'omogeneizzazione dei rilievi dei ponti di una determinata regione – nella quale vengono impiegati materiali con le stesse caratteristiche fisiche, durezza e grado di lavorazione – risulta fondamentale per comprendere i vari passaggi dell'organizzazione del lavoro in cantiere, partendo dall'analisi del progetto teorico iniziale fino all'esecuzione finale. In questo senso ad esempio si è potuto costatare, partecipando ad altri progetti di ricerca legati al rilievo dei ponti in Lusitania (Penisola Iberica), l'impiego, in specifiche circostanze orografiche, di soluzioni tecnologiche e di modelli teorici diversi da quelli riscontrati in altre zone.

2. La conoscenza tramite modelli

Le tecniche di acquisizione digitale della forma (*3D shape acquisition*) – basate su strumentazioni ormai consuete quali scanner laser 3D a tempo di volo e a differenza di fase³, georeferenziazione delle scansioni con battute topografiche utilizzando stazioni integrate e metodologia GPS, realizzazione di immagini panoramiche ad alta definizione, comunemente note con il nome di Gigapixel, effettuate mediante una camera di tipo *full-frame* montata su di una testa panoramica motorizzata⁴ – hanno determinato una settorializzazione del processo in sostanziale discontinuità rispetto al rilievo per così dire "tradizionale"; ed è per questo che è oggi possibile analizzarne i diversi aspetti valutando separatamente le tre fasi, dotate di una propria specificità ma pur sempre interconnesse tra loro.

Il ricorso a tecniche di acquisizione digitale che negli ultimi anni hanno avuto una sempre maggiore diffusione – anche grazie a una maggiore maneggevolezza, riduzione dei costi e sviluppo di software

in grado di gestire al meglio dimensioni e interscambiabilità dei file – porta a una tendenziale oggettivazione della fase di acquisizione dei dati. In questa fase pertanto non c'è, o almeno non ci dovrebbe essere, alcun livello di interpretazione o selezione dell'informazione relativa alla conformazione dell'oggetto rilevato. Di contro, come si è potuto sperimentare in tutti i casi studio, una acquisizione fatta senza un'adeguata progettazione che tenesse conto delle condizioni ambientali e degli inevitabili vincoli comporta inevitabilmente una riduzione della qualità nell'elaborazione dei modelli interpretativi.

Prima però di arrivare alla fase di elaborazione dei modelli c'è un altro passaggio altrettanto importante cui porre attenzione per evitare la compromissione dei dati.

La fase di elaborazione riguarda l'insieme delle procedure di ottimizzazione dell'enorme quantità di informazioni resa disponibile con procedure scanner laser (TLS) e fotogrammetriche (anche grazie all'uso di droni, SAPR). Le procedure di registrazione delle diverse nuvole di punti, l'applicazione di filtri di riduzione del rumore, l'omogeneizzazione delle densità, si basano molto spesso su algoritmi automatici o semi automatici di cui occorre conoscere le eventuali controindicazioni onde evitare, appunto, una possibile corruzione del dato che verrà poi utilizzato per l'elaborazione dei modelli⁵.

La fotogrammetria inoltre rende possibile eseguire operazioni di rilevamento in cui si sommano con grande efficacia al puro dato metrico numerose altre informazioni che solo la fotografia riesce a restituire, quali per esempio le tessiture murarie più minute, le differenze stratigrafiche, lo stato di conservazione. Attraverso la fotografia digitale è possibile anche, con i software oggi di uso comune, proporre delle vere e proprie prefigurazioni di progetto molto realistiche. In questo senso un'altra metodologia ampiamente usata è il raddrizzamento fotografico che, grazie all'impiego di software⁶, offre la possibilità di raddrizzare fotogrammi. Questi vengono sottoposti a un trattamento dal punto di vista geometrico al fine di trasformarli in proiezioni ortogonali e, dal punto di vista metrico, potendone controllare la scala, direttamente misurabili. L'impiego di questa metodologia consente di mantenere la precisione geometrica delle singole immagini che possono essere riunite, generando un'unica immagine, e di eliminare le differenze radiometriche esistenti tra le immagini di partenza, dovute alla differente illuminazione in fase di presa o a errori della scansione (Fig. 1).



Fig. 1. Ponte Fabricio, prospetto attuale a monte. Fotoraddrizzamento, dettaglio (elaborazione di Carlo Inglese).

I modelli ottenuti tramite le tecniche di acquisizione digitale – che in prima istanza sono sempre modelli numerici discreti⁷ – lavorano direttamente nello spazio tridimensionale e anche questo fattore rappresenta una sostanziale discontinuità rispetto al rilievo “tradizionale”. I classici modelli grafici come per esempio le doppie proiezioni ortogonali derivano dal modello 3D attraverso idonee interrogazioni ed estrapolazioni di dati (vettoriali o raster). La modellazione tridimensionale consente inoltre di uscire dallo schema a volte troppo rigido dei modelli grafici tradizionali perché è in grado di restituire molteplici viste e, attraverso il movimento, di proporre una nuova dimensione percettiva dell’oggetto rappresentato in una simulazione virtuale di grande valenza comunicativa.

La texturizzazione fotografica di modelli tridimensionali matematici o numerici è senza dubbio oggi il massimo risultato ottenibile come prodotto di un rilievo digitale integrato condotto con le più moderne tecnologie, soprattutto nel campo archeologico (e, come detto, lo studio dei ponti antichi rientra in questo ambito). Vi sono però anche delle controindicazioni all’uso spinto di queste nuove tecnologie perché, per esempio, i modelli tridimensionali texturizzati non sono ancora pienamente standardizzati e pertanto possono risultare difficilmente gestibili sia dagli esperti del settore che da chi ha necessità di acquisire informazioni per fini divulgativi. Inoltre molto spesso questi modelli non hanno come fine la selezione, ma la “semplice” riproposizione di una realtà il più possibile fedele al reale.

C’è da chiedersi quindi in primo luogo quanto questi modelli siano effettivamente oggettivi o se non siano invece il risultato di

elaborazioni che, in quanto tali, operano delle selezioni. Si pensi per esempio alla qualità di una nuvola di punti in cui lo spazio continuo, reale, viene discretizzato in una quantità di punti con differenti risoluzioni, con presenza di vuoti, con renderizzazioni fotografiche che a loro volta possono contenere fattori di disomogeneità nella messa a fuoco o nell'esposizione. Si pensi ancora, come detto, ai processi di trasformazione "automatica" in superfici continue numeriche (*mesh*) o matematiche (NURBS) in cui si fa spesso ricorso a filtri di riduzione del "rumore", sulla base di algoritmi sviluppati per altre applicazioni.

3. La fase di acquisizione

Il primo modello tridimensionale che scaturisce dalla prima fase di acquisizione è la nuvola di punti composta da una matrice che raccoglie prima di tutto le informazioni posizionali di punti nello spazio in coordinate xyz riferite a un sistema cartesiano che può essere relativo o assoluto. A ogni punto è possibile associare altre informazioni come per esempio quelle relative al valore della riflettanza e al colore (RGB). Le nuvole di punti ottenute da scanner laser sono sostanzialmente diverse da quelle ottenute con procedura fotogrammetrica. Questo ha evidenti conseguenze nel momento in cui, soprattutto nei rilievi archeologici, si rende necessario utilizzare entrambe le procedure e integrare le informazioni in un unico modello. Nell'utilizzo dello scanner laser è importante valutare attentamente, in funzione dell'oggetto rilevato, il numero delle stazioni di presa, la loro posizione, la risoluzione strumentale, la risoluzione reale, le interferenze interne ed esterne (Fig. 2).

Tutti questi aspetti, che costituiscono la base indispensabile del progetto di presa, hanno notevoli ripercussioni sul rapporto tra qualità e quantità del modello finale⁸. Diversamente dai beni architettonici nei quali è sempre possibile riconoscere una specifica conformazione (anche nel caso di ruderi), in ambito archeologico ci si trova spesso in situazioni di forte incertezza e indeterminazione della forma e delle stratificazioni che ne sono il fondamento. La nuvola di punti, anche se molto densa, non riesce a rappresentare a volte questa complessità. L'aspetto scaturito dalle molte esperienze di rilievo archeologico digitale e dalle sperimentazioni sui ponti antichi è quello che alcune informazioni fondamentali acquisite dagli archeologi direttamente sul campo, evidenti alla vista, spesso

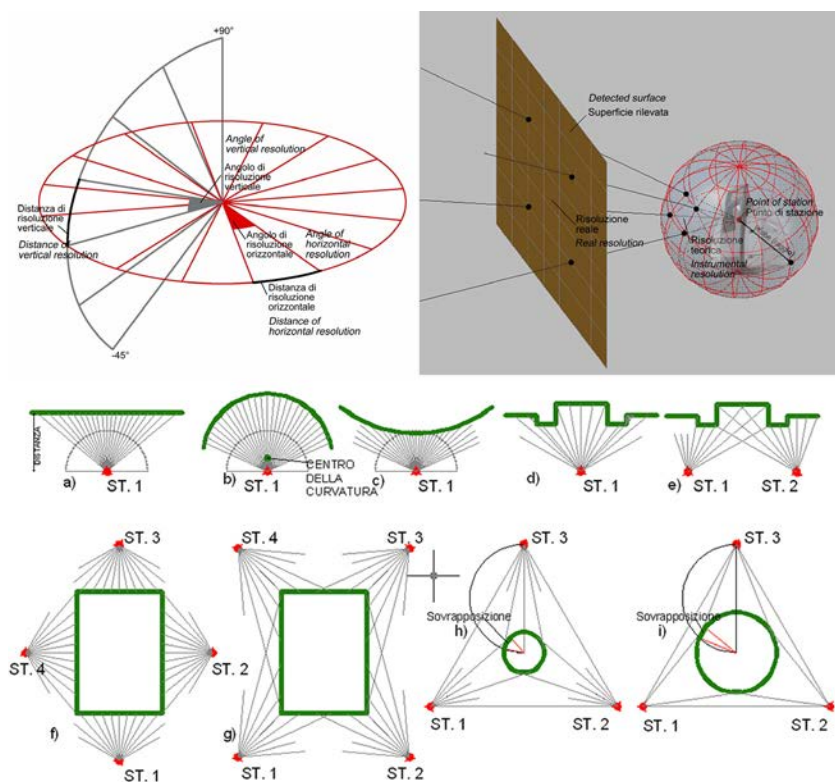


Fig. 2. Risoluzione strumentale e risoluzione reale sono due fattori che condizionano il rapporto tra quantità e qualità di una nuvola di punti; anche il posizionamento dello strumento influenza tale rapporto non solo per interferenze esterne ma anche per la conformazione geometrica della superficie rilevata (elaborazione di Leonardo Paris, da PARIS 2010, pp. 283, 284).

non trovano un riscontro altrettanto evidente nel modello della nuvola di punti⁹.

Questo problema può essere in parte risolto (ma non sempre) nelle applicazioni fotogrammetriche in cui la posizione xyz , al contrario della tecnologia laser, deriva dall'informazione colore. A tutte le considerazioni fatte per la tecnologia *scan laser* occorre aggiungere in questo caso tutte quelle valutazioni riguardanti la qualità dell'immagine fotografica condizionata da numerosi fattori quali la distanza, le caratteristiche del sensore e dell'obiettivo, le condizioni ambientali di ripresa, la sequenza delle diverse immagini utilizzate nell'applicazione dell'algoritmo fotogrammetrico.

Risulta così evidente che il modello scaturito dalla fase di acquisizione, conseguente all'applicazione di metodologie scientifiche



Fig. 3. Difficoltà nel posizionamento dello scanner laser e dei target a riconoscimento automatico. A sinistra: Ponte Emilio; al centro e a destra: Ponte di Augusto a Narni (foto di Leonardo Paris e Wissam Wabbeh).

(quindi necessariamente oggettive, non soggette a interpretazione), deve essere inteso come prodotto in cui il grado di rispondenza con l'oggetto rilevato dipende dal rapporto tra qualità e quantità che deve essere esplicitato dalle scelte e dalle condizioni determinatesi nella fase di acquisizione.

Nelle sperimentazioni eseguite sui casi studio è emersa una ricorrente difficoltà nel posizionamento dello scanner laser per i forti vincoli ambientali, nell'individuazione dei punti ottimali di ripresa in grado di garantire la massima omogeneità della risoluzione reale dei punti acquisiti. Anche la distanza tra strumento e superfici rilevate, così come la distanza tra le diverse stazioni, è stata molto spesso condizionata da impedimenti orografici¹⁰ e dalla presenza, per esempio, di vegetazione¹¹, con la necessità di valutare attentamente anche l'utilizzo dei target a riconoscimento automatico necessari per l'ottimizzazione della fase di *post processing*¹² (Fig. 3).

4. Elaborazione di modelli interpretativi

Nel momento in cui il dato, opportunamente elaborato, restituisce una informazione occorre evidenziare come in ambito archeologico l'elaborazione dei modelli interpretativi assume una specifica valenza. Ai "tradizionali" modelli grafici si associa sempre più spesso il modello tridimensionale. Anzi, come detto, il modello grafico bidimensionale molto spesso deriva dal modello tridimensionale che a sua volta deriva direttamente dalla nuvola di punti.

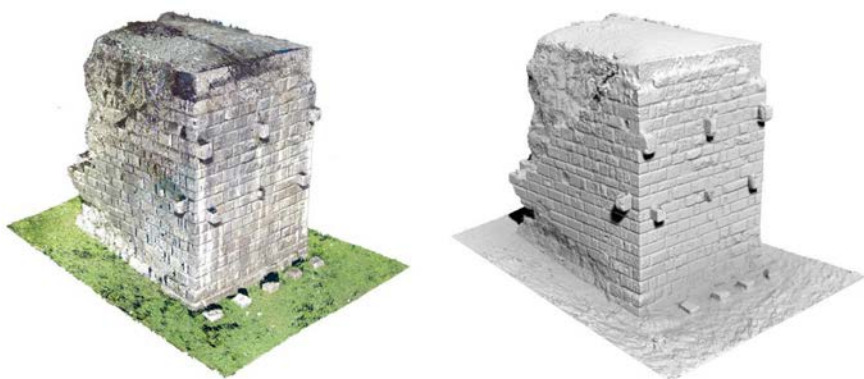


Fig. 4. Conversione di un modello per punti in mesh: pilone del Ponte di Augusto a Narni (elaborazione di Wissam Wabbbeh).

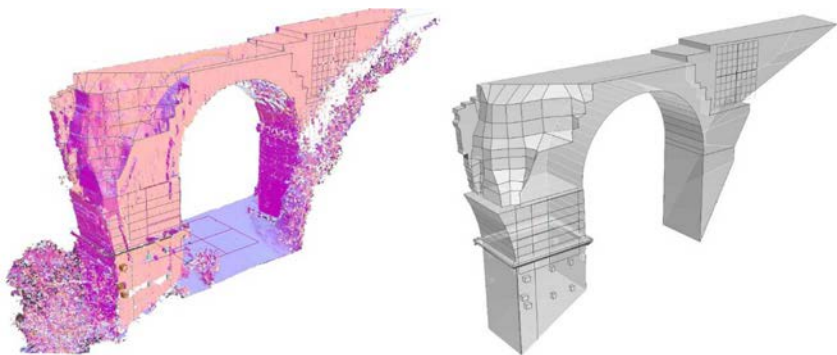


Fig. 5. Elaborazione di un modello numerico semplificato da nuvola di punti utilizzato per verifica strutturale: prima arcata del Ponte di Augusto a Narni (elaborazione di Wissam Wabbbeh).

Tutte le informazioni metriche dedotte da una nuvola di punti possono essere tradotte mantenendo il formato vettoriale (e quindi utilizzabili con altri software di modellazione informatica) oppure possono essere convertite in modalità raster. In quest'ultimo caso diventa ancor più importante valutare attentamente il risultato finale del rilievo in funzione delle diverse scale grafiche di rappresentazione con il conseguente margine di errore grafico.

Nel momento in cui si ritiene opportuno convertire il modello numerico per punti in mesh occorre valutare attentamente quanto accennato in precedenza e cioè che dal punto di vista metrico non vi è alcuna implementazione (Fig. 4). Al contrario è molto probabile che l'applicazione di algoritmi di generazione di superfici *mesh* comporti una perdita di dati per aumentarne la gestibilità software a

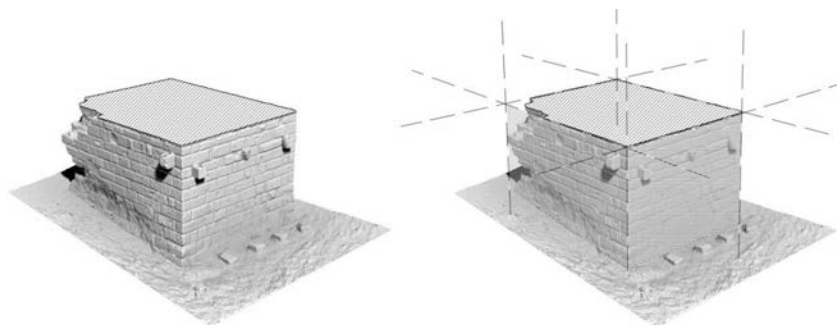


Fig. 6. Interrogazione della nuvola di punti per sezionamento orizzontale e determinazione dei principali allineamenti: pilone del Ponte di Augusto a Narni (elaborazione di Wissam Wabbeh).

scapito della qualità di rispondenza del modello con il reale. Questa perdita di informazioni può essere compensata nel momento in cui si riesce ad abbinare a una superficie l'informazione colore derivata da immagini fotografiche opportunamente elaborate e associate alla superficie stessa garantendone la congruenza metrica (e il conseguente valore di accuratezza).

Questa procedura è in molti casi integrata nei processi di fotogrammetria in cui, come già accennato, il dato metrico deriva dal dato colore anche se occorre rimarcare come la qualità del modello è solo in parte attribuibile alle procedure di acquisizione fotografica. Molto dipende infatti dall'oggetto rilevato e dal suo grado di caratterizzazione delle superfici di cui si compone, cosa che in ambito archeologico è molto frequente.

Le procedure fin qui descritte sono per la maggior parte di tipo automatico o semi automatico; sono pertanto elaborazioni in cui non si è ancora pienamente entrati nel merito dell'oggetto di studio in termini di conoscenza. Compito di chi si occupa di rilievo e rappresentazione non è solo dunque quello di produrre "calchi digitali" ma anche di elaborare modelli in grado di rendere evidenti quegli aspetti peculiari dell'oggetto di studio che, come detto, presenta molte componenti dal punto di vista archeologico, costruttivo, tecnologico, di ingegneria strutturale, di relazione con il contesto urbano e ambientale (solo per citarne alcuni)¹³ (Fig. 5).

È bene ricordare che l'obiettivo principale nel rilievo architettonico o archeologico è la ricerca del cosiddetto "modello geometrico", fatto di punti linee superfici, che è il fondamento di qualsiasi

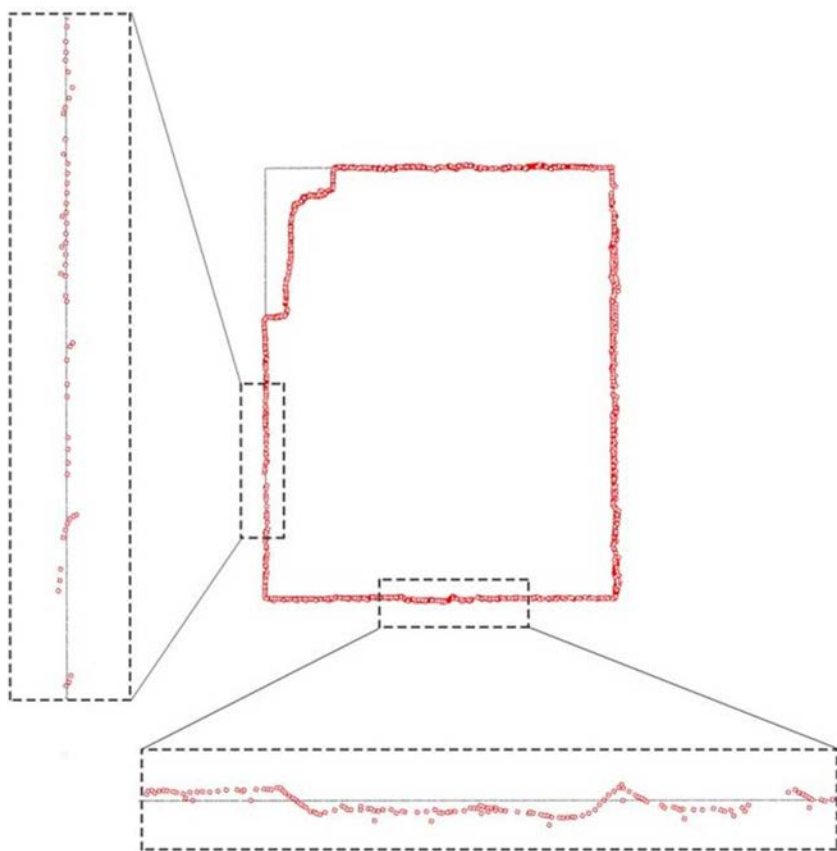
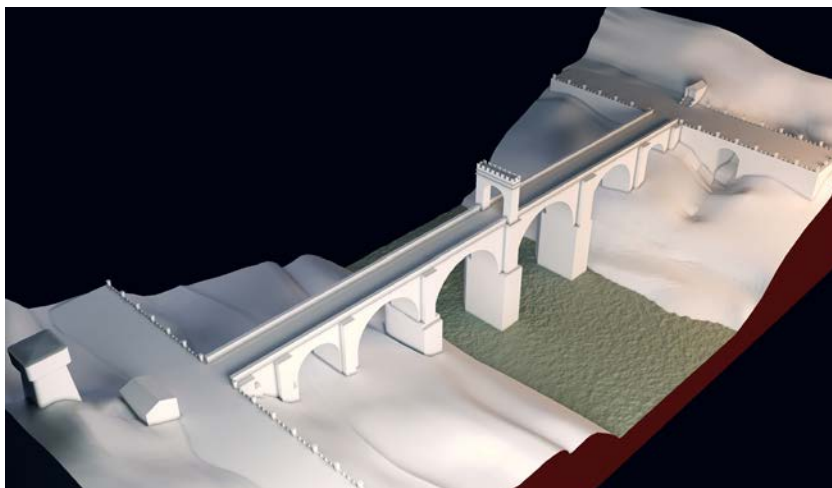


Fig. 7. Interpolazione di punti per l'individuazione dell'allineamento di uno dei piloni del Ponte di Augusto a Narni (elaborazione di Wissam Wabbeh).

artefatto. La rappresentazione del modello geometrico nella sua modalità sintetica – modelli tridimensionali o anche semplicemente bidimensionali (cioè i classici “modelli grafici” come piante, prospetti e sezioni) – consente di indagare la complessità del reale e ricavare informazioni utili per una effettiva conoscenza del manufatto¹⁴.

Applicando una prassi ormai consolidata di gestione della nuvola di punti si è ritenuto in una prima fase più opportuno ricavare sezioni significative (Fig. 6) piuttosto che ricercare soluzioni di conversione dei punti in un modello numerico *mesh*, procedura, quest'ultima, che richiede capacità elaborative molto alte per ottenere alla fine un modello tridimensionale che non contiene informazioni aggiuntive rispetto alla nuvola di punti e che anzi produce degli aggiustamenti automatici o semi automatici dipendenti dagli



Figg. 8, 9. Ponte di Alcántara: render concettuale (elaborazione di Roberto Barni).

algoritmi applicati e dai settaggi dei filtri di riduzione del rumore e del numero di vertici della *mesh* (Fig. 7).

Tuttavia, volendo impiegare i modelli numerici per superfici *mesh* generati a partire da nuvole di punti, bisogna considerare l'infinito numero di poligoni che essi presentano che ne rendono limitata la lavorabilità dal punto di vista della modellazione. Per semplificarli, si ricorre ai modelli cosiddetti matematici, o *low poly*, costituiti cioè



Fig. 10. Modello matematico texturizzato del Ponte Emilio a Roma. Vista render (elaborazione di Giulia Umana).

da pochi poligoni. Su alcuni dei ponti analizzati è stata impiegata una modellazione detta poligonale, che si differenzia da quella NURBS per l'algoritmo che sta alla base del processo di creazione del modello¹⁵ (Figg. 8, 9).

Si è invece voluto privilegiare nei diversi casi studio l'individuazione delle possibili matrici formali che sono state il fondamento del progetto e che consentono oggi di comprendere, anche attraverso comparazione, gli elementi intrinseci nel manufatto¹⁶. Ciò anche al fine di sperimentare nuove forme di rappresentazione attraverso l'elaborazione di modelli tridimensionali matematici.

La elaborazione dei modelli grafici e digitali 3D ha comportato inevitabilmente una selezione e interpretazione dei dati digitali acquisiti, rimarcando pertanto il fatto che il rilievo, pur partendo da dati acquisiti attraverso strumenti digitali avanzati molto affidabili e quindi in qualche modo oggettivi, si concretizza attraverso modelli che sono il prodotto di una sintesi operata e quindi condizionata da scelte che si sono poste man mano (Fig. 10).

5. Conclusioni

Oltre all'applicazione di procedure di acquisizione ed elaborazione di modelli tridimensionali consolidate negli ultimi anni ma

che, come dimostrato, necessitano sempre di adeguamenti e affinamenti in relazione alle specificità del tema di studio, si è voluto anche testare (in particolare nel caso del Ponte di Augusto a Narni) la potenzialità dei processi BIM (*Building Information Modeling*) applicati ai Beni Culturali – si parla in questo caso di HBIM (*Heritage BIM*)¹⁷–. Seppure la ricerca evolva molto rapidamente, il processo e la relativa modellazione BIM applicati ai beni archeologici richiede ancora ulteriori approfondimenti. Difatti, i correnti modelli non permettono di relazionare in modo efficace ed esaustivo tutte le componenti che caratterizzano lo studio di un ponte antico. Diverso, anche se altrettanto complesso, è invece l'utilizzo di piattaforme GIS¹⁸ per le quali non è importante – al momento – la gestione dell'informazione dettagliata tridimensionale (ancora poco gestibile) quanto piuttosto la progettazione di un sistema in grado di gestire e visualizzare informazioni alla scala territoriale nazionale.

¹ Cfr. BIANCHINI ET AL. 2016b.

² Cfr. nota 3 del capitolo di questo volume “I ponti lapidei di epoca romana. Ricerca e sperimentazione interdisciplinare” di Carlo Inglese e Leonardo Paris.

³ Laser scanner 3D Leica C10 e FARO Cam2; stazioni totali Leica TCR 1201, FLEXLINE TS02; stazione GPS Leica 1250.

⁴ Camera digitale di tipo *full-frame* Nikon D800 – sensore da 3.2 Megapixel – con obiettivo Nikon AF 200mm f/4 D ED IF Micro, montata su di una testa panoramica motorizzata Gigapan Epic Pro. Sull'uso dei panorami sferici per il rilievo cfr. PARIS ET AL. 2017.

⁵ I software più diffusi sperimentati nei diversi casi studio sono stati CloudeCube, Rapidform, 3DReshaper, Geomagic, Jrs 3D Reconstructor, Cloud Compare.

⁶ Tra i software più noti si citano RDF, MSR Rollei, Acca Fotus, Ortho 3D.

⁷ La modellazione tridimensionale si compone di modelli matematici, in cui le forme geometriche sono descritte per mezzo di equazioni, e modelli numerici o poligonali in cui tutte le superfici vengono scomposte in forme piane semplici, nella maggior parte dei casi triangoli, attraverso l'individuazione dei vertici. Nel primo caso si ha una rappresentazione di tipo continuo, nel secondo di tipo discreto. Una nuvola di punti, se si immagina che ogni punto sia il vertice di un triangolo, può pertanto essere intesa come un vero e proprio modello tridimensionale di tipo discreto, in quanto la pura e semplice conversione in mesh (cioè in superficie numerica) della nuvola di punti non modifica in alcun modo le informazioni di base. Da quanto detto la nuvola di punti può essere definita come modello nu-

merico per punti, a differenza di una mesh definita come modello numerico per superfici. Cfr. BIANCHINI 2001.

⁸ Cfr. PARIS 2010.

⁹ Cfr. PARIS ET AL. 2012; D'AMELIO, LO BRUTTO 2009.

¹⁰ Lo scanner laser Faro C130X utilizzato ha di fatto una distanza massima di presa affidabile non oltre i 90 m.

¹¹ La maggior parte delle acquisizioni sono state eseguite, per questo motivo, nel periodo invernale.

¹² Trattandosi di rilievo “archeologico” l'uso dei target a riconoscimento automatico (come per esempio le sfere) è fortemente consigliato visto che gli algoritmi automatici di registrazione nuvola da nuvola, basandosi sulle corrispondenze della forma, possono essere condizionati sia dalla scarsa riconoscibilità di forme omologhe sia dalla non sufficiente sovrapposizione di nuvole contigue.

¹³ Cfr. RUSSO, GUIDI 2011.

¹⁴ Cfr. PARIS 2015.

¹⁵ Come è noto la modellazione NURBS – Non Uniform Rational Be Spline – si basa sulla creazione di curve di Bezier e Spline, che permettono un controllo molto elevato delle superfici che si vanno a generare. La modellazione NURBS, dunque, si configura come un metodo intrinsecamente preciso, che permette di descrivere analiticamente una superficie attraverso la sua equazione. La modellazione poligonale, al contrario, si basa sull'approssimazione – più o meno verosimile – degli oggetti reali, permettendo al contempo una gestione più flessibile della geometria del modello. Ad esempio, in un software come Rhinoceros, che si basa sulla modellazione NURBS, un quadrato è il risultato delle quattro curve che lo delimitano e solo queste curve saranno modificabili. Mentre nei software di modellazione poligonale, come Cinema 4D o Modo un quadrato è l'esito della combinazione di vertici (*vertex*), spigoli (*edge*) e facce (*polygon*): tutti e tre questi elementi saranno modificabili.

¹⁶ Un aspetto che accomuna tutti i casi di studio è la ricerca della matrice formale in relazione all'unità di misura del piede romano. Ciò, sia nei ponti ancora in funzione – ma che hanno in ogni caso subito dei cambiamenti (Fabricio e Alcántara), sia nell'analisi dei “resti” (Augusto, Emilio e Rieti), ha consentito interessanti valutazioni per formulare ipotesi sulla conformazione originaria e sulle eventuali modifiche che si sono succedute nel tempo. Per una disamina più approfondita, oltre ai contributi dettagliati di ciascun caso studio (seconda parte di questo volume), si rimanda anche al capitolo di questo volume “Analisi formale, costruttiva e dimensionale dei ponti romani lapidei” di Carlo Inglese e Leonardo Paris.

¹⁷ Cfr. BIANCHINI ET AL. 2016a.

¹⁸ Per una analisi approfondita della sperimentazione si rimanda al capitolo di questo volume “La raccolta dati in ambiente QGIS per un modello territoriale nazionale dei ponti antichi” di Francesca Pierdominici.

Fonti iconografiche per lo studio dei ponti di Roma: il Ponte Emilio e il Ponte Fabricio

Paola Quattrini, Monica Filippa

1. I ponti Emilio e Fabricio nella rappresentazione cartografica di Roma

I due ponti compaiono nelle piante e vedute di Roma a partire dalla seconda metà del XV secolo, inizialmente in forma simbolica per essere riconducibili alla propria categoria tipologica, senza distinzione alcuna rispetto agli altri ponti di Roma. Esempi sono la pianta di Roma di Piero del Massaio¹ (Fig. 1) e quella di Alessandro Strozzi² (Fig. 2) della seconda metà del Quattrocento. Sulla scia di una sempre maggior attenzione verso lo studio del rilievo cartografico, che comincia a concretizzarsi dalla fine del XV, Bartolomeo Marliano³ nel 1534 disegna una fra le prime piante zenitali di Roma (Fig. 3). La rilevanza qui di Ponte Emilio, dei ponti Cestio e Fabricio dell'Isola Tiberina si focalizza, forse per la prima volta, sulla loro importanza strategica di collegamento viario poiché racconta come su di essi si incanalino direttamente le direttrici della consolare Via Aurelia che dalla Porta omonima si dirigono verso il colle del Campidoglio.

Le successive rappresentazioni sono più realistiche, ma non ancora pienamente conformi alle reali caratteristiche architettoniche del monumento. Il fine è spesso ancora infatti la sua riconoscibilità e la possibilità di ricondurlo alla propria categoria tipologica.

Una prima raffigurazione più realistica si ritrova nella pianta in proiezione zenitale di Leonardo Bufalini⁴ del 1551 (Fig. 4). Sono disegnati i tre piloni del *Pons Fabritius* e i cinque di Ponte Emilio – denominato P. PALATINO SEU SENATORI / NUNC S. ME [Santa Maria Egiziaca]⁵ – con le sue sei arcate proiettate, indicate con un tratteggio, così com'era prima dell'alluvione del 1557. Nella pianta di Roma stampata in occasione dell'Anno Santo del 1575 da Antoine Lafrery (Fig.

Fig. 1. Piero del Massaio, pianta di Roma, particolare; dall'alto, stampe dello stesso Codice datate 1469, 1471 e post 1475 (da FRUTAZ 1962, vol. II, tavv. 157, 158, 160).





Fig. 2. Alessandro Strozzi, pianta di Roma, 1474, particolare (da FRUTAZ 1962, vol. II, tan. 159).

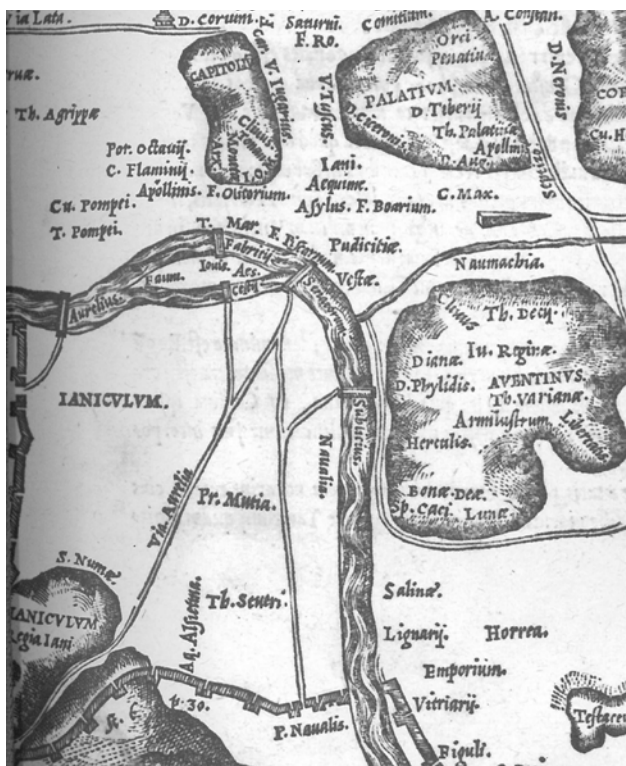


Fig. 3. Bartolomeo Marliano, pianta di Roma, 1544, particolare (FRUTAZ 1962, vol. II, tan. 21).

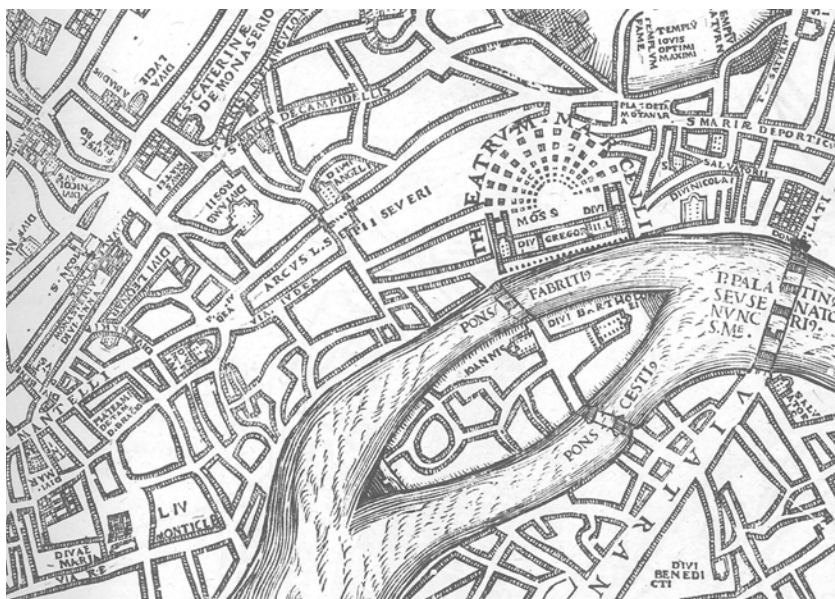


Fig. 4. Leonardo Bufalini, *pianta di Roma*, 1551, particolare (da FRUTAZ 1962, vol. II, tav. 202).



Fig. 5. *Le sette chiese di Roma*, incisione su rame edita da Antoine Lafréry (da Speculum romanae magnificentiae, 1575 (da FRUTAZ 1962, vol. II, tav. 236).

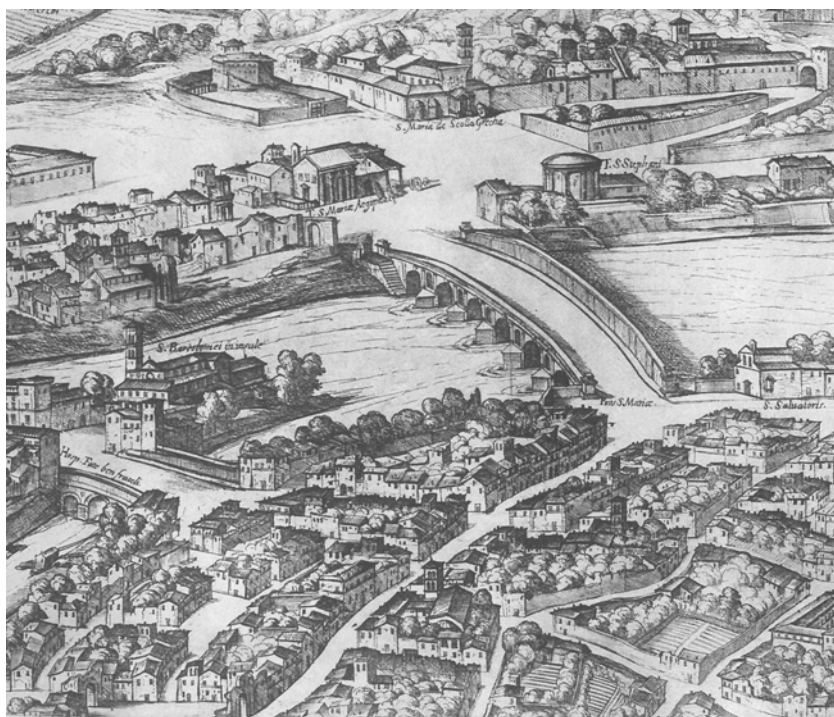


Fig. 6. Antonio Tempesta, *pianta di Roma*, 1593, particolare (da FRUTAZ 1962, vol. II, tav. 267).

5) è riprodotto il Ponte Emilio da poco ricostruito ad opera di Mastro Matteo di Castello⁶. Tale conformazione del ponte avrà però vita breve – un ulteriore esempio con il ponte in questa ricostruzione si trova nella pianta di Roma di Antonio Tempesta (Fig. 6) del 1593⁷ – in quanto con l'alluvione del 1598 delle sei arcate ne rimangono in piedi solo tre sulla riva destra del Tevere. Da quel momento del ponte nessun papa se ne occuperà più e dopo i nomi di Lepido, Palatino, Maggiore, Senatorio e Santa Maria assume l'appellativo di Ponte Rotto.

Come tale compare, ad esempio, nella pianta di Roma di Giovanni Battista Falda del 1676 (Fig. 7)⁸: il «Ponte Senatorio o di S. Maria oggi Ponte rotto» è raffigurato in modo realistico, con le sue arcate residue. È di notevole interesse in questa pianta la rappresentazione del Ponte «4 capi o Fabritio» che mostra la forma della struttura dello sperone frangiflutti sotto il pilone centrale – essendo riprodotto visto da nord – e quella dell'ultima arcata laterale che rivela il sistema mediante il quale il ponte si innestava alla terraferma. Una soluzione presto sparita poiché sarà inglobata all'interno di edifici.



Fig. 7. Giovanni Battista Falda, particolare dell'Isola Tiberina dalla "Nuova pianta et alzata della città di Roma", 1676 (da FRUTAZ 1962, vol. II, tav. 362).

2. I ponti Emilio e Fabricio nei disegni e nelle vedute

Le vedute e i disegni costituiscono una fonte iconografica di notevole rilevanza, fornendo spesso una immagine realistica dei ponti e delle loro trasformazioni avvenute nel corso dei secoli, frutto di una rappresentazione oggettiva, realizzata con spirito scientifico e storicista, evitando ogni completamento analogico dei monumenti. Talvolta però questi non sono rappresentati per loro valore topografico e monumentale ma, soprattutto nel caso delle rovine del Ponte Emilio, come il simbolo romantico di un antico tempo perduto.

Di estrema rilevanza quindi risulta collocare le diverse rappresentazioni nel filone artistico in cui esse nascono, per comprenderne il significato e il portato e poter dunque stabilire se esse costituiscano una fonte attendibile, o se piuttosto vadano considerate soltanto per il proprio valore artistico quando rientrano in un filone più fantasioso.

Le prime testimonianze grafiche dei due ponti risalgono alla fine del XV secolo. Tra queste, vi è un disegno di Giuliano da San-gallo, da cui è stato tratto il disegno dell'Anonimo Escurialense, databile tra circa 1491 e 1509⁹, che raffigura il ramo sinistro del Tevere con il Ponte Fabricio e l'Isola Tiberina (Fig. 8). Il ponte è



Fig. 8. A sinistra, Giuliano da Sangallo, ramo sinistro del Tevere con Ponte Fabricio e l'isola (BAV, Cod. Barb. Lat. 4424); a destra, Anonimo Escorialense, ca 1495 (da Bruno Leoni, *Il ponte Fabricio e la Strage degli Innocenti. Duos Pontes* 2012, fig. 2).

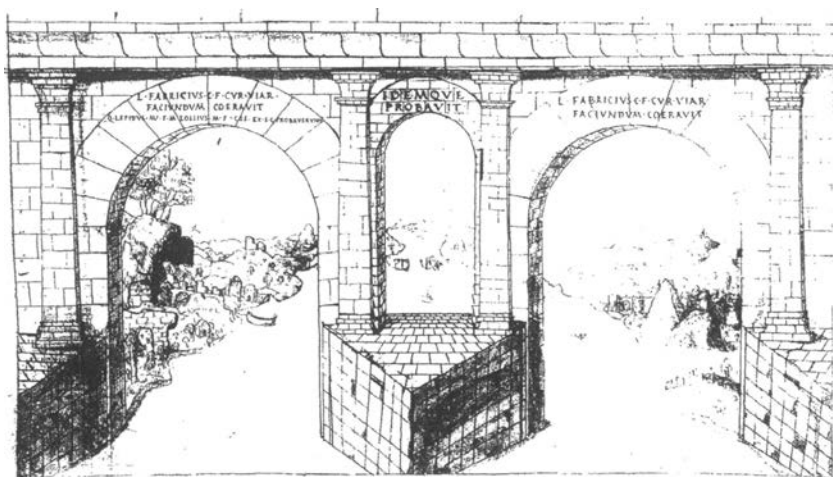


Fig. 9. Stephanus Vinandus Pighius, disegno del Ponte Emilio (da ORLANDI 2008, fig. 1, p. 183).

disegnato dalla riva sinistra del Tevere con un tratto molto pulito, quasi schematico. Più a destra, verso l'isola, è disegnata una delle rare testimonianze della forma e della conclusione del ponte verso terra con l'arco minore che è poi stato inglobato nelle case. Poco distante, più a valle, vi è il Ponte Emilio. La veduta dell'Anonimo viene inserita come sfondo da Marcantonio Raimondi, una trentina di anni dopo, in una incisione con la Strage degli innocenti su soggetto di Raffaello¹⁰, in cui la veduta del Ponte Fabricio risulta invertita¹¹.

Alla seconda metà del Cinquecento risale un interessante disegno del Ponte Fabricio (Fig. 9), il primo documento grafico che riporta in dettaglio e puntualmente le iscrizioni di epoca romana¹².

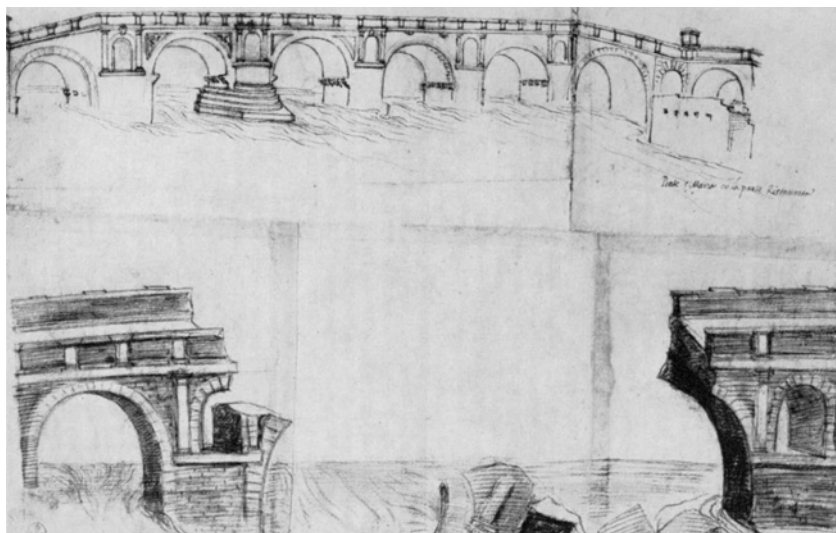


Fig. 10. Giovanni Antonio Dosio, disegno del Ponte Emilio, post 1557 (Firenze, Uffizi, Gabinetto dei Disegni e delle Stampe).

La rilevanza delle fonti iconografiche è in particolar modo evidente nel caso del Ponte Emilio – che nel corso dei secoli subisce numerosi danni e crolli –, in quanto consentono di ricostruirne l'aspetto, oggi andato perduto e altrimenti difficilmente riconoscibile.

È il caso del disegno che Giovanni Antonio Dosio (Fig. 10) esegue osservando il ponte nel 1557, lo stesso anno del suo crollo¹³. Con la matita disegna nella parte inferiore del foglio il pilone con i due archi crollati, e sotto appone la dicitura *Vestigie del Ponte S. Maria Ruinato p. l'inondatione del Tevere l'anno 1557*. Nella parte superiore invece, sopra la scritta *Ponte di S. Maria co[n] la parte Ristaurata*, rappresenta, in un confronto diretto, come si presenta il ponte alla fine del suo completo restauro del 1575 ad opera di Mastro Matteo di Castello. Si tratta di una fonte iconografica di estrema rilevanza in quanto restituisce il ponte “nuovo” con tutti i suoi dettagli in una conformazione che andrà perduta dopo poco più di vent'anni a causa dei danni dell'alluvione del 1598. Nella parte superiore è infatti visibile tutto il ponte, disegnato dalla riva sinistra, dopo la ricostruzione dei due archi e del nuovo pilone che presenta un basamento con frangiflutti a tre gradoni poggiante su una base speronata. Nella parte inferiore il ponte con i due archi crollati è disegnato da un punto di vista più ravvicinato e la struttura è resa in dettaglio con i filari dei mattoni, la posizione dei conci e la disposizione dei blocchi crollati.

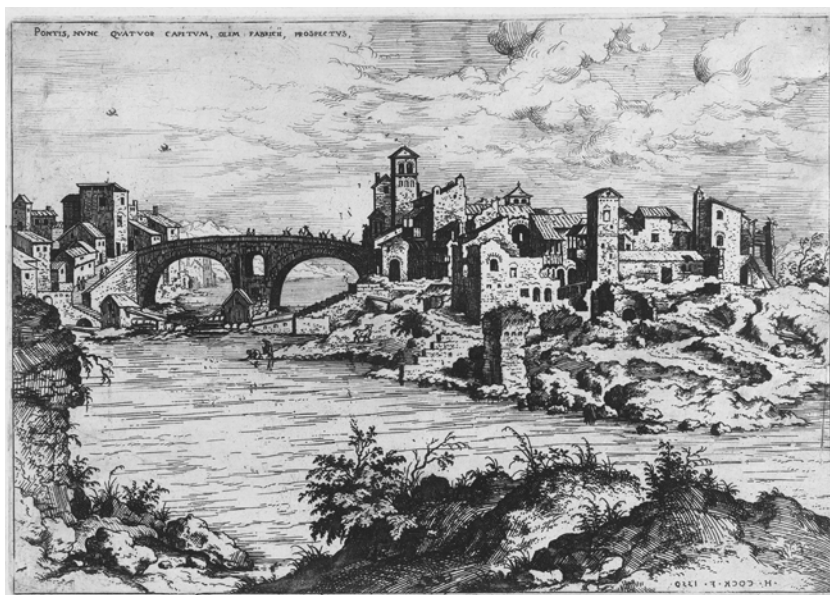


Fig. 11. Heronimus Cock, *L'isola Tiberina e il ramo sinistro del Tevere con Ponte Fabricio e due molini*, 1551 (Rijksmuseum, Amsterdam).

2.1. Il fascino delle rovine: Cinquecento e Seicento

A partire dal XVI secolo e per tutto il Seicento molti artisti, sia appartenenti alle scuole italiane sia straniere, rimangono affascinati dalla monumentalità dei vecchi ponti romani che divengono soggetti di disegni e schizzi di panorami e vedute. Tali fonti iconografiche consentono di ricavare dati per la ricostruzione della storia dell'architettura del monumento, e sono utili per contestualizzare l'oggetto architettonico nel paesaggio urbano dei secoli passati. Il Ponte Rotto, per il suo stato di rovina, ha suscitato un forte interesse ed è stato oggetto di numerose rappresentazioni, come anche l'Isola Tiberina con i suoi due ponti.

Tra le prime riproduzioni che rientrano in questo filone si annovera l'incisione del pittore fiammingo Heronimus Cock (1518-1570)¹⁴, della metà del XVI secolo: «Pontis Nunc Quatuor Caput Olim Fabricis Prospectus», che raffigura l'Isola Tiberina e il ramo sinistro del Tevere con il Ponte Fabricio (Fig. 11).

Nel 1575 Etienne Du Pérac (1520-1607) rappresenta l'Isola Tiberina «così come si presentava nel XVI secolo» vista da Ponte Rotto (Fig. 12), con «il ponte Fabritio, oggi detto de quatro cappi»¹⁵. La precisione topografica e l'attenzione per le forme e i materiali



Fig. 12. Etienne Du Perac, *veduta dell'Isola Tiberina così come si presentava nel XVI secolo*, 1575 (Rijksmuseum, Amsterdam).



Fig. 13. Jan Asselijn, *vista di Ponte Rotto e dei mulini della riva di Trastevere*, 1635-1645 circa (Rijksmuseum, Amsterdam).

dell'architettura che caratterizza l'artista rende questa fonte di notevole interesse.

Da ricordare anche il pittore olandese Jan Asselijn (1610-1652) che nel secolo successivo mostra un particolare interesse per le rovine del Ponte Rotto. Lo rappresenta almeno cinque volte, e sempre con la vista dalla sponda sinistra, per porre in evidenza la sua forma anti-

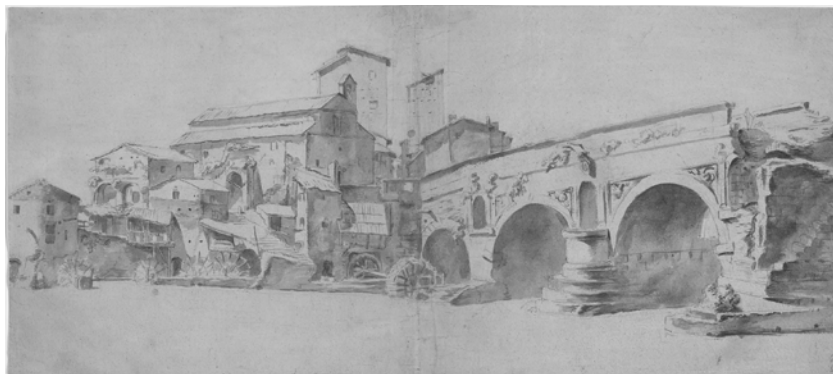


Fig. 14. Jan Asselijn, *vista di Ponte Rotto*, 1635-1639 (Art Institute Chicago).

ca, l'attacco alla terraferma e l'aspetto delle rovine del fronte crollato. Due disegni, realizzati tra il 1645 e il 1650 (Figg. 13, 14), simili tra loro ma con molti elementi architettonici e decorativi diversi, sono preparatori a due quadri a olio, databili tra il 1650 e il 1652 (Figg. 15, 16).

Alla fine del Seicento (1692) risale un disegno di Carlo Fontana – *Prospetto dell'i tre archi restati in piedi del Ponte S. Maria anticamente Senatorio* (Fig. 17) – che illustra lo stato del Ponte Rotto dopo il crollo del 1598, che diventerà definitivo fino alla fine dell'Ottocento. Delle sei arcate originarie rimangono in piedi solo le tre sulla riva destra del Tevere¹⁶.

2.2. *Le vedute del Settecento*

Tra la fine del Seicento e gli inizi del Settecento si diffonde a Roma la rappresentazione vedutistica della città e delle sue architetture che, a parte un filone più fantasioso, predilige la riproduzione oggettiva della realtà con opere molto curate nel dettaglio. Il paesaggio del Tevere con i suoi ponti, l'Isola e le sponde, è un soggetto molto amato dai vedutisti. In particolare tra i principali artisti che hanno disegnato e dipinto Ponte Rotto e Ponte Fabricio troviamo Lievin Cruyl, Gaspar van Wittel, Luca Carlevarij e il Canaletto.

Il fiammingo Lievin Cruyl (1634-1709), che abbandona gli schemi cinquecenteschi e per il quale l'antico diviene parte integrante del contesto urbano, riproduce il Ponte Rotto in un disegno preparatorio¹⁷ per una incisione in controparte (Fig. 18), e in un dipinto eseguito dall'alto dell'Aventino. La rovina del ponte è in primo piano ma, mentre nel disegno è rappresentato con la sua reale inclinazione rispetto al Tevere, nel dipinto viene "raddrizzato" e messo parallelo ai ponti dell'Isola Tiberina.



Fig. 15. Jan Asselijn, veduta del Ponte Rotto, post 1640 - ante 1660 (Brescia, Musei Civici di Arte e Storia. Pinacoteca Tosio Martinengo; Archivio fotografico Musei di Brescia-Fotostudio Rapuzzi).



Fig. 16. Jan Asselijn, veduta del Ponte Rotto, 1650 (©The David Collection, Copenhagen).



Fig. 17. Carlo Fontana, *Prospetto delli tre archi restati in piedi del Ponte S. Maria anticamente Senatorio*, 1692 (immagine tratta dall'opera di G. C. Verspignani *Discorso di Monsignor Gio: Carlo Verspignani, sopra la facile riuscita di restaurare il Ponte Senatorio, hoggi detto Ponte Rotto, 1662. Su concessione del MIBACT. Biblioteca Casanatense*).

Tra la fine del Seicento e l'inizio del Settecento l'olandese Gaspar van Wittel (1653-1736) riproduce nelle sue vedute gli scorci più suggestivi della città e tra questi più volte le rovine di Ponte Rotto. Da un suo disegno¹⁸ che lo raffigura eseguito dalla riva sinistra del Tevere e con lo sfondo del colle dell'Aventino, egli ha tratto almeno otto versioni dipinte (Fig. 19). Un'altra veduta¹⁹ (Fig. 20), dalla riva sinistra del Tevere, mostra in primo piano la parte terminale di Ponte Rotto e a sfondo i due ponti che legano l'Isola Tiberina alla città. Si tratta di una importante fonte iconografica poiché mostra il Ponte



Fig. 18. Lievin Cruyl, *veduta di Ponte Rotto*, 1665 (The Cleveland Museum of Art, Ohio, USA).

Fig. 19. Gaspar van Wittel, veduta di Ponte Rotto (collezione privata).



Fig. 20. Gaspar van Wittel, veduta dell'isola Tiberina, 1685 (Kunsthistorisches Museum Wien).



Fabricio appena tre anni dopo i lavori di consolidamento voluti da papa Innocenzo XI Odescalchi (1679), con la sostituzione del parapetto e dell'originario rivestimento in travertino con uno, ancora attuale, in mattoni (gli originari rivestimenti in travertino sono rimasti nelle ghiera degli archi e nelle lesene ioniche dell'arco di piena centrale).

Il Ponte Rotto assume il valore paradigmatico di una rovina di sfondo nelle vedute del pittore Luca Carlevarijs (1663-1730) pur se raffigurato sempre in modo preciso e realistico. È rappresentato sempre dalla riva sinistra, quella con la vista sulla "rovina". Questo sia nelle vedute più realistiche sia in quelle più fantasiose, come nel caso di una tela in cui viene riprodotto vicino all'Arco di Costantino – entrambi i monumenti sono rappresentati tra l'altro con una certa verosimiglianza – nei pressi di un immaginario porto sul mare (Fig. 21)²⁰.

Il pittore Antonio Canal, il Canaletto (1697-1768), riproduce in una veduta del 1742²¹ (Fig. 22) il Ponte Fabricio in primo piano, con la rovina di Ponte Rotto sullo sfondo resa con segno più scuro. La scelta grafica evidenzia ulteriormente la differenza dello stato di conservazione dei due ponti, il Fabricio è reso con un segno leggero e mostra uno studio attento della disposizione dei singoli conci in pietra, l'Emilio appare decadente e segnato dal tempo.



Fig. 21. Luca Carlevarijs, *Marina con Ponte Rotto*, 1711-1712 (Rovigo, *Accademia dei Concordi*).

Alcune delle vedute più interessanti dell'epoca sono da attribuirsi a Giuseppe Vasi, che mostra un particolare interesse per il Tevere e i suoi ponti. Intorno al 1743 egli pubblica infatti una serie di *Vedute di Roma sul Tevere*, molte delle quali hanno come oggetto i ponti Fabricio e Rotto – quest'ultimo rappresentato con la sua reale inclinazione rispetto al Tevere –, raffigurati in maniera realistica (Fig. 23)²², costituendo così una importante fonte iconografica per lo studio dei ponti nel corso del Settecento.

2.3. La raffigurazione delle antichità tra Settecento e Ottocento

Fra Settecento e Ottocento continua la tradizione secentesca delle riproduzioni che prediligono le rovine dell'antichità, con vedute dei luoghi e dei monumenti celebri di Roma, dando vita alla corrente artistica del Rovinismo che annovera tra i suoi esponenti di maggior rilievo Jean-Baptiste Camille Corot. In Italia ha larga diffusione soprattutto grazie ad alcune opere di Giovanni Battista Piranesi (1720-1778).

I ponti di Roma costituiscono infatti un soggetto ricorrente nelle incisioni di Piranesi²³, rappresentati in modo sistematico e rigoroso anche attraverso sezioni e spaccati, con ogni parte dettagliatamente riprodotta. Alcune tavole però mostrano come vi sia spazio anche per la sua immaginazione fantastica. L'artista rappresenta i ponti da vicino, visti dal basso, contrariamente alle vedute delle epoche precedenti nelle quali essi



Fig. 22. Canaletto, *veduta con il Ponte*, 1742 (Londra, British Museum; © The Trustees of the British Museum).

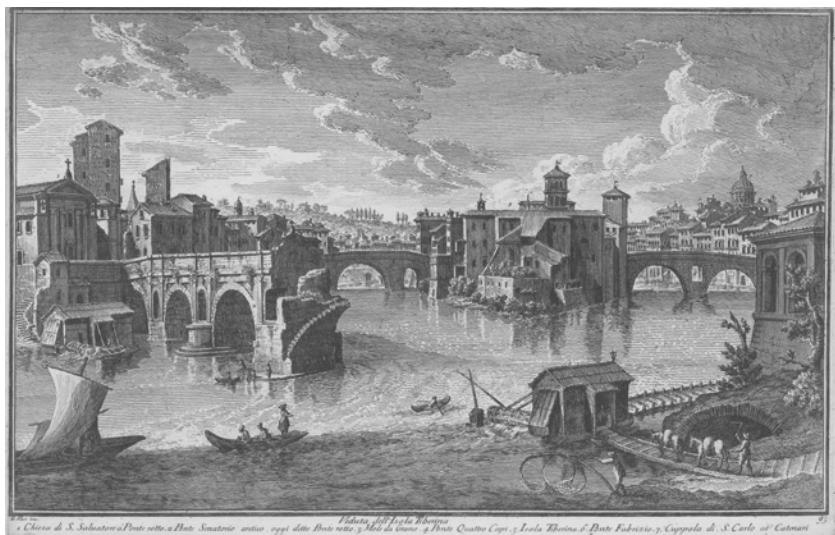


Fig. 23. Giuseppe Vasi, *veduta dell'Isola Tiberina con ponti Fabricio e Cestio*, 1754 (Rijksmuseum, Amsterdam).

erano quasi solo di cornice al paesaggio fluviale del Tevere. Alcune tavole costituiscono uno studio approfondito del monumento, con rilievi quotati, planimetrie, dettagli strutturali e tecnici e con didascalie esplicative.

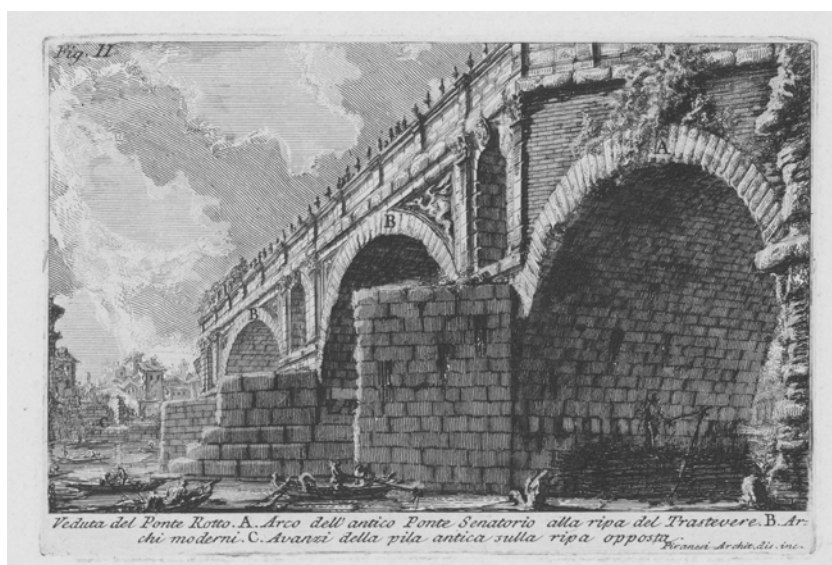


Fig. 24. Giovanni Battista Piranesi, *Ponte Rotto*, 1756, *Le Antichità Romane*, Tomo 1, tav. XX, fig. II.

Particolare attenzione è data alle tecniche costruttive che con meticolosità Piranesi riporta ogni singolo elemento, architettonico e non.

Un esempio è la tavola con il Ponte Rotto visto dalla sponda di Trastevere²⁴ (Fig. 24; cfr. anche Fig. 25, con una altra veduta del ponte) inquadrato dal basso e da un punto di vista molto ravvicinato; la visuale non è quella consueta, cioè quella dalla sponda opposta che consente di riprodurre in primo piano la “rovina”. La didascalia riporta: «A. Arco dell’antico Ponte Senatorio alla Ripa del Trastevere. B. Archi moderni. C. Avanzi della pila antica sulla riva opposta». È presente l’attribuzione cronologica delle varie parti del ponte in base alla puntuale analisi costruttiva di Piranesi, riconducendo alla struttura più antica l’arco A e i resti in C (quindi le due imposte del ponte).

Molta attenzione è data da Piranesi ai ponti dell’Isola Tiberina (Fig. 26), principalmente al Ponte Fabricio, rappresentato in numerose tavole del tomo 4 (XIV, XVI, XVII, XVIII, XIX, XX), soprattutto nel dettaglio di sezioni e spaccati, con didascalie puntuali e spesso con l’indicazione dei dati metrici. In particolare nella tavola XVI (Fig. 27) il ponte “quattro Capi” è rappresentato parzialmente, da vicino, nei suoi dettagli costruttivi attribuiti alle varie fasi di edificazione, così come si evince dalla didascalia, qui riportata in parte: «Questo Ponte è spogliato nel di sopra de’ suoi antichi Finimenti, et



Fig. 25. Giovanni Battista Piranesi, *Ponte Senatorio oggi detto Ponte Rotto*, c. 1748.



Fig. 26. Giovanni Battista Piranesi, *Veduta dell'Isola Tiberina, Le Antichità Romane, Tomo I, tav LV1*.

ornamenti, i quali per avventura rendevanlo un' Opera intera, quale' essere dovea nel suo primiero stato. A Ristauo moderno di Mattoni in mancanza de' Travertini antichi. B Parapetti moderni di mattoni * quivi furono cancellati i Caratteri. C Sperone aggiunto da Consoli posteriori a Fabrizio; si riconosce' il nuovo intacco in D, non eguagliando esso la primiera Fabbrica». La tavola XVII²⁵ presenta il dettaglio delle iscrizioni²⁶, mentre la XVIII (Fig. 28) mostra «la Pianta,

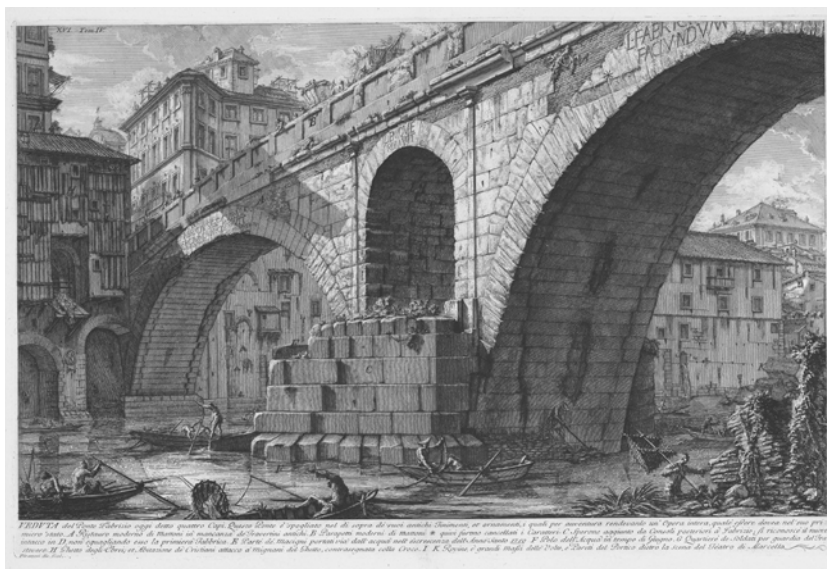


Fig. 27. Giovanni Battista Piranesi, *Ponte Fabricio*, *Le Antichità Romane*, Tomo IV, tav. XVI.

ed Elevazione del Ponte, oggi detto Quattro Capi», arricchite dallo studio di dettaglio di «O. Modinature de Capitelli dell'Arco di mezzo co(n) sua Cornice, e Restremazione del Pilastro P, e Larghezza dello stesso da piede Q, il quale posa senza base. R. Travertino situato nel di sopra dello sperone in S». Le tavole XIX (Fig. 29) e XX (Fig. 30) sono una dettagliata analisi sistematica delle varie parti che costituiscono la struttura del ponte, accompagnata da lunghe didascalie esplicative. Esse costituiscono un nuovo modo di porsi rispetto allo studio dell'architettura e quindi hanno un'indubbia importanza conoscitiva e grafica.

Lo stesso punto di vista del Ponte Rotto presente in Piranesi, quello dalla sponda di Trastevere, si trova in un disegno di Joseph Mallord William Turner (1775-1851) del 1819 (Fig. 31)²⁷. Le sue tre arcate sono raffigurate in alcuni punti più in dettaglio e in altri sono rese in modo più schematico, ma il ponte qui ritorna a essere uno degli elementi del paesaggio fluviale e cittadino, perdendo la propria valenza di rovina romantica.

Anche Jean-Baptiste Camille Corot (1796-1875) ha lasciato numerose vedute romane che riproducono il Ponte Rotto e i ponti dell'Isola Tiberina. Tra queste una classica veduta della rovina del Ponte Rotto con l'Isola e i ponti Fabricio e Cestio (Fig. 32) presa dalla

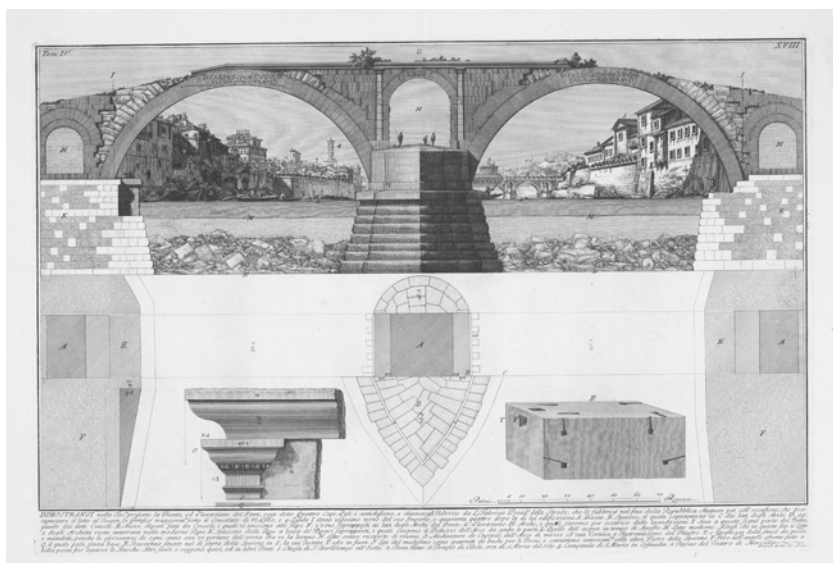


Fig. 28. Giovanni Battista Piranesi, Ponte Fabricio, Le Antichità Romane, Tomo IV, tav. XVIII.

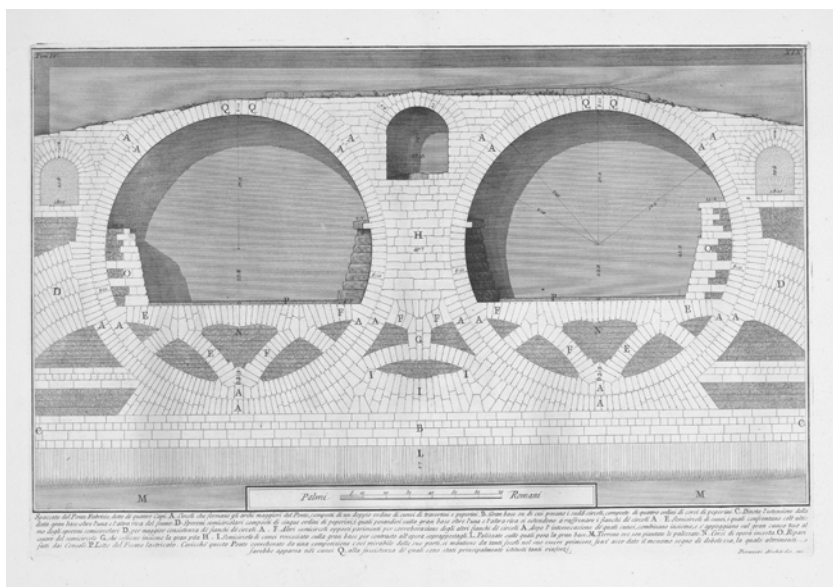


Fig. 29. Giovanni Battista Piranesi, Ponte Fabricio, Le Antichità Romane, Tomo IV, tav. XIX.

riva sinistra. Si tratta di un dipinto su un grande foglio, che mostra l'accuratezza della topografia di Corot e l'attenzione dell'artista verso le caratteristiche architettoniche di ciò che va a rappresentare.

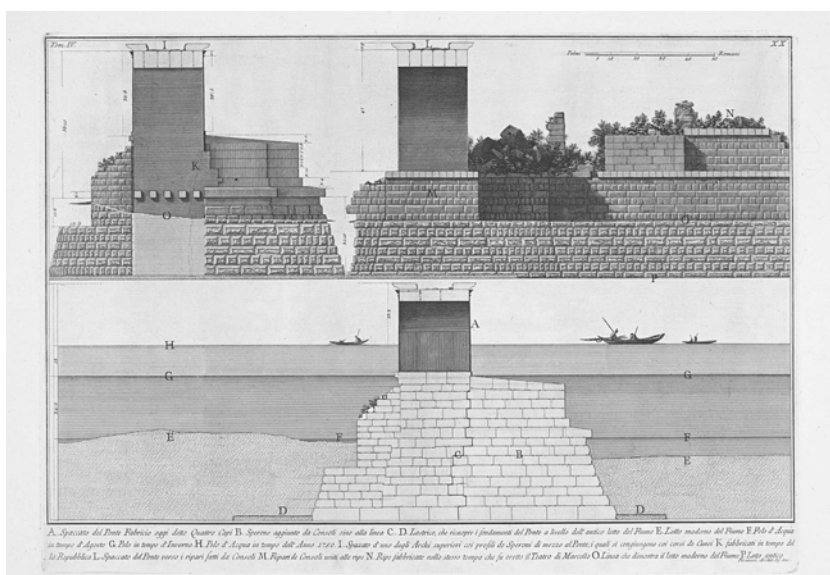


Fig. 30. Giovanni Battista Piranesi, *Ponte Fabricio*, *Le Antichità Romane*, Tomo IV, tav. XX.

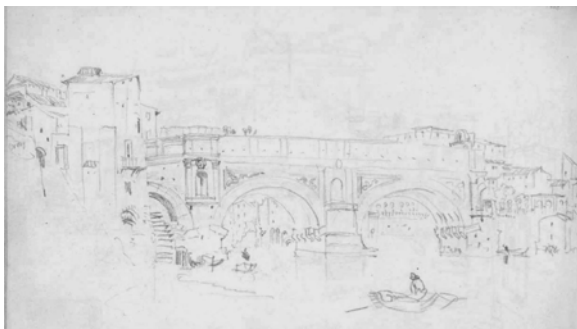
Tra le ultime vedute vanno menzionate quelle di Luigi Rossini (1790-1857) negli anni Venti dell'Ottocento, dopo il quale la stagione delle vedute lascerà il posto alla fotografia.

Coevi, ma con finalità completamente diverse – di studio e analisi dei monumenti antichi – i disegni di Antoine-Marie Delannoy (1800-1860), vincitore del *Grand Prix de Rome* nel 1826, che prende a soggetto per i suoi lavori l'Isola Tiberina e i suoi due ponti. Il Ponte Fabricio (Fig. 33) in particolare viene disegnato in prospettiva, in pianta e con quattro sezioni, poi acquerellati. Il rilievo è finalizzato alla ricostruzione del ponte nella sua forma originaria e quindi nella restituzione del prospetto vengono omessi gli interventi successivi alla costruzione, sia quelli di epoca antica sia quelli seicenteschi con il rifacimento del parapetto in laterizi.

2.4. Il realismo del tardo Ottocento

Alla fine dell'Ottocento risalgono le riproduzioni dei ponti nei noti acquerelli di Ettore Roesler Franz²⁸, che costituiscono una importante documentazione storica di scorci urbani che stanno in quel momento scomparendo, soprattutto lungo le sponde del Tevere a causa della costruzione degli argini. In particolare, intorno al 1883 l'artista ritrae più volte Ponte Rotto da molte angolazioni diverse, sia ancora

*Fig. 31.
William Turner,
Ponte Rotto
dall'Isola
Tiberina, 1819
(Collezione Tate;
photo ©Tate).*



collegato alla riva sinistra dalla passerella metallica di Pietro Lanciani (riprodotta in numerose foto storiche, cfr. Fig. 34) sia come rovina.

A chiudere questa panoramica di immagini dei Ponti Emilio e Fabricio, un particolare della veduta di Roma a volo di uccello di H.E. Tidmarsh e H.W. Brewer del 1890 (Fig. 35), che mostra il Ponte Rotto in un momento di transizione durante i lavori per i muraglioni. La passerella di Lanciani è ancora esistente, le arcate verso Trastevere sono già state demolite e il collegamento alla sponda destra è possibile mediante un ponte Bailey.

3. Conclusioni: del disegno dei ponti

Per individuare almeno nelle linee fondamentali i caratteri della rappresentazione dei ponti romani edificati a Roma, è opportuno mettere a fuoco alcuni elementi chiave, che sono da un lato l'ambiente culturale in cui sono state prodotte le singole immagini, dall'altro l'elaborazione teorica e ideologica che si cela dietro ciascun disegno.

Attraverso le fonti scritte e grafiche talvolta particolarmente numerose, come nel caso dei ponti Emilio e Fabricio, risulta evidente come l'avvicinarsi di crolli, ristrutturazioni e nuovi apporti abbia reso queste strutture polarità antiche in continua modificazione. Diventano perciò oggetto di interesse, fascino e curiosità da parte degli artisti che ne catturano puntualmente le vicende fissandole su carta o tela con la matita, la penna, l'incisione, il carboncino, i gessi, l'olio o l'acquerello.

Dalla prima metà del XV secolo, periodo in cui appaiono le loro immagini iniziali, ai primi anni del XX secolo in cui con la costruzione dei muraglioni sul Tevere i ponti subiscono le ultime trasformazioni sugli attacchi alle rive, si snodano le immagini disegnate come una narrazione che ne racconta le vicende e che allo stesso tempo



Fig. 32. Jean-Baptiste Camille Corot, *vista dell'antico Ponte Rotto, dell'isola Tiberina e del monastero di San Bartolomeo*, 1827.



Fig. 33. Antoine-Marie Delannoy, *prospetto ricostruttivo del Ponte Fabricio*, 1832 (su gentile concessione di Bruno Leoni, dal sito <<http://www.isolatiberina.it>>).

esplicita, attraverso le scelte degli autori, la trasmissione di pensiero, le ideologie, ma anche le sperimentazioni tecniche che ognuno a suo modo cerca di comunicare.

All'interno di questi aspetti in continua evoluzione, il disegno della città e dell'architettura gioca dunque un ruolo notevole costituendo al tempo stesso strumento e punto di riferimento sia per le modifiche progettuali attuate di volta in volta sia per le tante diverse modalità grafiche di trasmetterle.

Dalle prime immagini della metà del XV secolo, dove i ponti nelle piante di città sono schematiche segnalazioni urbane, la rappresentazione cambia grazie all'affinarsi delle tecniche cartografiche e di rilievo. Vengono realizzate piante zenitali con le indicazioni d'uso dei



Fig. 35. Il Ponte Rotto con la passerella metallica di Pietro Lanciani in una foto d'epoca (Tommaso Cuccioni, post 1852 - ante 1865. Immagine conservata presso il Museo di Roma, Archivio Fotografico; copyright Roma, Sovrintendenza Capitolina ai Beni Culturali, Museo di Roma).

ponti scavalcati dai principali assi viari o, in altri casi, dove segnalano anche il numero e le disposizioni dei loro piloni.

Quasi contemporaneamente a queste appaiono le vedute. Quelle imponenti strutture sull'acqua che agganciano la città, diventano importanti momenti di studio, volumetrie pulite da analizzare. Si scelgono i punti di vista, quasi sempre a monte, perché gli speroni frangiflutti sono ulteriori elementi di composizione e di approfondimento strutturale.

Per tutto il XVI secolo l'osservazione, l'analisi e il rilievo guidati dallo spirito scientifico e storicista verso quelle architetture della romanità porta a documentare sempre più spesso e sempre con più rigorosa attendibilità le forme di quei rilevanti collegamenti urbani legati alla memoria classica che tanto spesso sono soggetti a cedimenti, a modificazioni, a ricostruzioni.

In parallelo, con la stessa attenzione ma con atteggiamento opposto, per tutto il Cinquecento, il Seicento e parte del Settecento disegnano quei ponti un gran numero di artisti stranieri, principalmente francesi, tedeschi, olandesi e fiamminghi perché attratti dai monumenti antichi e dall'archeologia, ma anche dalla luce e dalla rappresentazione naturalistica, da una città vitale e lontana dall'essere idealizzata.

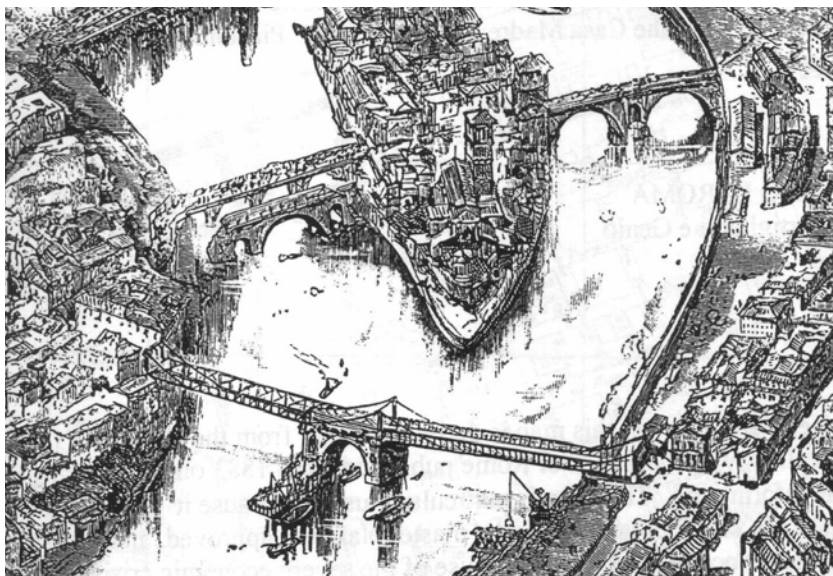


Fig. 35. H.E. Tidmarsh, H.W. Brewer "Rome in 1890", particolare (su gentile concessione di Bruno Leoni, dal sito <<http://www.isolatiberina>>).

Gli interessi, le esperienze, le tecniche e i suoi caratteri sono agli antipodi della tradizione in cui i nordici si formano, puntualizzano la precisione tecnica nel disegno e nella pittura a olio, la micrografia descrittiva, il gusto dei soggetti di genere come paesaggi, scene di ambiente, studi delle luci e dell'atmosfera.

Alla fine del XVII secolo la lunga schiera della corporazione dei *Bentvueghels* ha uno dei suoi ultimi prestigiosi rappresentanti in Gaspar Van Wittel (Figg. 19, 20), olandese, che esegue numerosi disegni preparatori di Ponte Rotto per realizzare almeno otto vedute ad olio su tela e almeno due dell'Isola Tiberina con Ponte Cestio e Ponte Fabricio. A differenza dei compagni di corporazione, la sua profonda esperienza come rilevatore e, nella pittura, come abile elaboratore della camera ottica che l'artista sperimentava dal 1680, dipinge una città più quieta così da mettere in risalto i volumi, le forme, i materiali. E poi il raddoppio specchiato sull'acqua delle strutture dei ponti, in modo da esaltare la loro narrazione.

Nasce alla fine del XVII il Vedutismo e il pensiero filosofico dell'Illuminismo e la rappresentazione dei ponti si esprime attraverso differenti elaborazioni grafiche teoriche e ideologiche. Vi si inseriscono gli ultimi esponenti dei *Bentvueghels* e, fra gli italiani, artisti come Giovanni Antonio Canal (Canaletto) che alza molto il punto di vista

per raccontare un Ponte Fabricio in primo piano visto dall'alto, solido, animato e, allo stesso tempo, un Ponte Rotto poco lontano che, con l'inchiostro e l'acquerello rende con una grafia scura a trasmetterne la decadenza (Fig. 22). Giuseppe Vasi, al contrario, seduto sulla riva sinistra si pone esattamente di fronte a Ponte Rotto interpretandolo attraverso gli effetti della luce più come un monumento che come una rovina, che si inserisce spontaneo e fa parte integrante nel costruito di Trastevere. Dietro, Ponte Fabricio e Ponte Cestio raccontano con una grafica scura l'importanza strategica di quell'allaccio stretto fra le sponde della città e quelle dell'isola (Fig. 23).

Poi Giuseppe Piranesi, eclettico, versatile, difficilmente inseribile all'interno di una schematicità dettata da una suddivisione in stili o correnti artistiche, disegna almeno due volte Ponte Rotto (Figg. 24, 25), poi almeno cinque volte Ponte Fabricio (Figg. 26, 27, 28, 29, 30) dando quattro interpretazioni ideologiche, e quindi grafiche, profondamente diverse dello stesso ponte. Lo inquadra da un orizzonte bassissimo e mostra uno scorcio sorprendente. Piranesi è forse l'unico artista che sceglie di disegnarlo dalla sponda di Trastevere così da eliminare del tutto la scena della rovina mentre le presenze umane dei barcaioi diventano significanti solo per dare la scala di misura dell'imponenza del ponte. Usa la stessa inquadratura anche per Ponte Fabricio. Poi trasmette attraverso il disegno anche l'abilità dell'elaborazione tecnica del rilevatore, del vedutista, e alla fine scardina ogni razionalità illuminista affiancando al rigore dei due ponti l'isola fantastica di un genio interpretativo.

È tra la fine del XVIII secolo e i primi anni del XIX secolo che la pittura paesaggistica si intreccia con lo studio della luce a un livello tale da poter competere con la più blasonata pittura storica.

E a entrambe si affianca la presenza dei *pensionnaires*, che traggono ispirazione dagli studi e dai rilievi archeologici di Giuseppe Piranesi per i loro "*envois de Rome*", che rappresentano le memorie con un occhio acutamente filologico per poi acquerellarle o dipingerle con grande accuratezza.

Con l'Ottocento si apre una nuova fase del Vedutismo, meno eroico, più nostalgico. Roesler Franz nella seconda metà del XIX secolo testimonia con l'acquerello, per conto del Comune di Roma, memorie che sarebbero presto cambiate in modo radicale a seguito dei mutamenti, degli sventramenti e della costruzione degli argini lungo tutto il Tevere resisi necessari per rendere Roma una città "al passo con i tempi", secondo il Piano Regolatore del 1872²⁹.

* Il contributo è stata redatto da Paola Quattrini e Monica Filippa, ad eccezione del paragrafo 3 *Conclusioni: del disegno dei ponti* da attribuirsi a Paola Quattrini.

¹ La pianta è orientata con il nord in basso (FRUTAZ 1962, vol. II, tavv. 157, 158, 160). I ponti sono raffigurati in tutte e tre le stampe dello stesso Codice datate 1469 (Biblioteca Apostolica Vaticana), 1471 e post 1475 – (il *terminus ante quem non* è dato dalla presenza del Ponte Sisto, inaugurato quell'anno; Biblioteca Nazionale di Parigi). Nella prima stampa sono rappresentati in modo simbolico, mentre nelle successive si presentano meglio contestualizzati; nel caso del Ponte Emilio è presente alla sua estremità occidentale la chiesa medievale di San Salvatore al ponte di Santa Maria (S. Salvatoris de pede pontis), poi distrutta per i lavori del Tevere nel 1884.

² FRUTAZ 1962, vol. II, tav. 159. Il Ponte Emilio compare con il nome di «P.S. Maria», per la vicinanza con la chiesa di Santa Maria Egiziaca, situata presso la testata sinistra. Si evidenzia la presenza della chiesa medievale di San Salvatore al ponte di Santa Maria.

³ Pianta di Roma antica pubblicata nel 1544 (prima edizione 1534), inserita tra le pagine 12 e 13 della seconda edizione del volume *Urbis Romae topographiae libri V* (FRUTAZ 1962, vol. II, tav. 21).

⁴ FRUTAZ 1962, vol. II, tav. 202.

⁵ I tre nomi con cui era con più frequenza indicato il ponte.

⁶ FRUTAZ 1962, vol. II, tav. 236.

⁷ FRUTAZ 1962, vol. II, tav. 267.

⁸ “Nvova pianta et alzata della città di Roma con tvtte le strade, piazze et edifici di tempi, palazzi, giardini et altre fabbriche antiche e moderne come si trovano al presente nel pontificato di N.S. Papa Innocentio XI con le loro dichiarazioni nomi et indice copiosissimo”, 1676, incisa su rame e disegnata in proiezione obliqua con alzata (FRUTAZ 1962, vol. II, tav. 362).

⁹ Sangallo in BAV, Cod. Barb. Lat. 4424; Anonimo Escorialense, *Codice Escorialense* folio 27v.

¹⁰ Raimondi ne realizza due versioni, la prima tra il 1511-1512 e la seconda tra il 1513-1515. Cfr. BRUNO LEONI. Il ponte Fabricio e la Strage degli Innocenti. In *Duos Pontes*, 2012; <https://www.academia.edu/4679914/Il_ponte_Fabricio_e_la_Strage_degli_Innocenti> [marzo 2020]).

¹¹ Raimondi incide lo sfondo in modo speculare rispetto all'originale per rendere coerenti le illuminazioni in quanto nel soggetto di Raffaello la luce proviene dalla direzione opposta.

¹² Cod. Berol, f. 118v ; ORLANDI 2008, fig. 1, p. 183. «L'iscrizione, che si conserva tuttora *in situ*, è già presente nelle più antiche raccolte epigrafiche, come la silloge del Signorili o quella di Poggio Bracciolini, dove, tuttavia, si trova trascritta con qualche imprecisione, essendo stata copiata osservandola, come si poteva, dalle rive del Tevere o dall'isola Tiberina. L'unico manoscritto che presenta l'apografo del testo inserito nel disegno del monumento cui appartiene è quello del Pighius [Stephanus Vinandus Pighius alias Étienne Wynants]; *ibid*, p. 178.

¹³ Firenze, Uffizi, Gabinetto dei Disegni e delle Stampe, inv. 2582/A. Giovanni Antonio Dosio. *Roma antica e i disegni di architettura agli Uffizi*. Officina Edizioni, 1976, p. 101.

¹⁴ *Praecipua aliquot Romanae Antiquitatis Ruinarum Monimenta*, 1551.

¹⁵ Etienne Du Pérac, *Vestigi dell'Antichità di Roma*, 1575, tav. 39.

¹⁶ Cfr. il capitolo di questo volume “Ponte Emilio a Roma” di Giulia Umana.

¹⁷ Veduta inserita in *Diciotto Vedute di Roma* (la tavola deriva dai disegni di Lievin Cruyl e fu per la prima volta pubblicata nel *Thesaurus antiquitatum Romanarum* di J. G. Graevius edita da Franz Halm e Peter van der tra il 1694 e il 1699).

¹⁸ Biblioteca Nazionale Centrale Roma, Disegni 3, III, 8.

¹⁹ Pinacoteca Capitolina di Roma, inv. 81.

²⁰ Rovigo, Accademia dei Concordi, inv. n. 88.

²¹ Londra, British Museum.

²² *Magnificenze di Roma Antica e Moderna*, libro V, I *Ponti e gli edifici sul Tevere*, 1754, nn. 91, 93, 94ii.

²³ *Le Antichità romane* del 1756, in quattro volumi. In particolare nel tomo quarto inserisce disegni e i rilievi dei ponti romani.

²⁴ *Le Antichità Romane*, Tomo 1, tav. XX, fig. II.

²⁵ Cfr. il capitolo di questo volume “Ponte Fabricio a Roma” di Carlo Inglese e Daniele Maiorino, fig. 2.

²⁶ La prima riproduzione scientificamente corretta è quella pubblicata nelle tavole di F. Ritsch. *Priscae Latinitatis monumenta epigraphica*. Berolini 1862, tab. LXXXVII. Uno studio approfondito delle iscrizioni è in: ORLANDI 2008.

²⁷ Altri disegni di Turner conservati alla Tate raffigurano i ponti Emilio e Fabricio: Tate D15372, D15376, D16212 D16213, D16249, D16450, D16490, D16491. <<https://www.tate.org.uk/art/artists/joseph-mallord-william-turner-558>>.

²⁸ Si tratta di 120 acquerelli realizzati tra il 1878 e il 1896; cfr. SERGIO CARTOCCI, *Roma Sparita negli acquerelli di E. Roesler Franz al Museo di Roma*. Roma: Oto editore, 1972.

²⁹ Per la redazione di questo capitolo, oltre ai testi già menzionati, ci si è avvalsi anche della consultazione e studio delle seguenti pubblicazioni: *Speculum Romanae magnificentiae*, raccolta di 200 incisioni che, organizzate in tre volumi, costituiscono il formato Stampe IV della Biblioteca Apostolica Vaticana; BARTOLOMEO MARLIANI. *Topographiae Urbis haec nuper adiecta*. 1553, traduzione di Christian Hülsen: *Das Forum Romanum. Seine Geschichte und seine Denkmäler*. Roma: Loescher 1904, p. 36; FRUTAZ 1962; BARBARA JATTA, *Lievin Cruyl e la sua opera grafica, un artista fiammingo nell'Italia del Seicento*. Roma: Belgisch Historisch Instituut te Rome, 1993; CESARE BRANDI. *Canaletto*. Milano: Arnoldo Mondadori Editore, 1960; ALDO RIZZI. *Luca Carlevarij*. Venezia: Alfieri Edizioni d'Arte, 1967; PIETRO ZAMPETTI. *Vedutisti veneziani del Settecento*, Venezia: Alfieri Edizioni d'Arte, 1967; LIONELLO PUPPI, GIUSEPPE BERTO, *L'opera completa del Canaletto*. Milano: Rizzoli, 1968; *Magnificenza di Roma nelle vedute di Giovanni Battista Piranesi*, con una introduzione di Mario Praz e note illustrative di Livio Jannattoni. Milano: Il Polifilo, 1977; PIERRE PINON, FRANÇOIS XAVIER. *Amprimo: Les envois de Rome (1778-1968)*. *Architecture et archéologie*. Roma: École française de Rome, 1988; GIUSEPPE DE NITTO. *Biografia di Luigi Vanvitelli*. In ANTONIO GIANFROTTA (a cura di). *Manoscritti di Luigi Vanvitelli nell'archivio della Reggia di Caserta 1752-1773*. Città di Castello, Ministero per i beni e le attività culturali, 2000; GIOVANNA CURCIO. *Carlo Fontana*. In *Storia dell'Architettura italiana. Il Seicento*. A cura di Aurora Scotti Tosini. Milano: Electa, 2003; BOZENA ANNA KOWALCZYK.

Canaletto: il trionfo della veduta. Catalogo della mostra (Roma, Palazzo Giustiniani, Senato della Repubblica, 12 marzo - 19 giugno 2005). Cinesello Balsamo: Silvana Editoriale, 2005; SIMONE FERRARI. *Vedutismo*. Ginevra-Milano: Skira, 2008; *Giovanni Battista Piranesi, La magnificenza di Roma Antica*. Alessandria: Editore: Treccani, 2008; LEONI 2008; BOZENA ANNA KOWALCZYK. “E tutto si diede a dipingere vedute dal naturale”: Canaletto e Roma. In *Canaletto e i vedutisti. L'incanto dell'acqua*. Catalogo della mostra a cura di L. Tonani (Orta San Giulio, Palazzo Penotti Uberrini, 21 maggio - 18 settembre 2011). Cinisello Balsamo: Silvana editore, 2011; FORNASIERO 2012; PANZA 2012; MARIO BEVILACQUA. Le piante di Roma da Bufalini a Nolli: un modello europeo. In BEVILACQUA, FAGIOLO 2012, pp. 54-87; LEONI 2015; BIFOLCO, RONCA 2018; CORSI, RAGIONIERI 2018.

Rappresentazione multimediale e interattiva per i ponti romani

Tommaso Empler, Adriana Caldarone

1. Introduzione

È stata fino ad oggi rivolta grande attenzione verso le tecniche finalizzate alla conservazione dei Beni Culturali e la loro “preservazione a futura memoria”. Molto meno è stato fatto per estrarre da questo patrimonio un valore sia culturale e formativo che economico. Forse a causa dell’abbondanza di opere, architetture, siti archeologici, importanti mete di turismo culturale che il nostro Paese ospita, difficilmente ci si è preoccupati di come comunicarle e fruirle efficacemente. Questa visione del patrimonio culturale comporta svantaggi a lungo termine per il patrimonio stesso. Se è vero, infatti, che la fruizione “consuma” il bene, è altrettanto vero che per mezzo dell’estrazione di flussi economici, esso autofinanzia, almeno in parte, gli interventi restaurativi e conservativi necessari.

Valorizzare il patrimonio artistico e culturale significa anche connetterlo a un tessuto sociale quanto più ampio possibile, raggiungibile soprattutto con nuove strategie di promozione e comunicazione che utilizzano canali differenti da quelli tradizionali. È per questo motivo che i musei, spesso visti solo come meri contenitori che custodiscono ed espongono oggetti, negli ultimi anni stanno mettendo in atto una trasformazione.

Tra le possibilità più importanti introdotte dall’applicazione del digitale (ICT - *Information and Communications Technology*) nell’ambito del *Cultural Heritage*, c’è sicuramente quella di poter elevare il visitatore da semplice spettatore, che osserva passivamente le informazioni che vengono proposte, a membro partecipante che può incidere con le sue scelte, prendendo quindi parte attivamente al processo di esposizione dei Beni Culturali, filtrando, nascondendo,

approfondendo, effettuando connessioni. Contrapposta quindi a una fruizione “passiva” se ne ha una “attiva”, mediante la quale il destinatario ha la possibilità di interagire e modificare il messaggio che riceve. Appartengono alla prima categoria tutte quelle operazioni che mirano al solo esporre, seppur in modo accattivante. Ne sono un esempio tutti i testi, le immagini e i materiali audiovisivi, anche se fanno uso di innovazioni tecnologiche come la stereoscopia o la computer grafica. Tra gli elementi appartenenti alla seconda categoria si possono riconoscere la realtà aumentata e i *serious game*.

Per tale motivo, la ricerca scientifica nel campo della fruizione dei Beni Culturali è oggi orientata verso la trasposizione della realtà in ambiente virtuale e verso la realizzazione di modelli tridimensionali che possano poi essere percepiti dagli utenti come spazi reali. Le soluzioni grafiche devono, oltre a trasmettere informazioni storiche e scientifiche, creare differenti forme di comunicazione che creano molteplici reazioni e stati d'animo nel pubblico.

La parte di computer grafica che si occupa di tale branca si distingue dalla visualizzazione scientifica di modelli tridimensionali per la finalità di rendere credibile l'esperienza dell'utente, secondo diversi gradi di realismo. La resa dell'ambientazione virtuale non è solo un problema di tecnologia impiegata o di modalità di accesso alle informazioni, ma deve concentrarsi anche sulla composizione dell'immagine, perché è questa a portare con sé il messaggio comunicativo.

Si ipotizza un'applicazione di ICT, come caso esemplificativo, su uno dei ponti romani ancora oggi presenti, anche se con una sola arcata, a Roma: Ponte Emilio o Ponte “Rotto”. L'ipotesi è quella di consentire la visualizzazione del ponte e delle sue trasformazioni nel tempo attraverso una APP per “*portable devices*” (smartphone e tablet) di proprietà dei visitatori/turisti/studiosi/curiosi. Le possibilità offerte dalla *Virtual e Augmented Reality* permettono di visualizzare sull'oggetto inquadrato dalla fotocamera del “*device*” ipotesi ricostruttive statiche e dinamiche.

Prima di definire l'applicazione del caso studio su Ponte Emilio, il presente contributo si pone anche l'obiettivo di analizzare lo stato dell'arte in termini di soluzioni adottate, verificare le procedure d'interazione a disposizione, le caratteristiche delle modellazioni 3D per ricostruzioni virtuali e le modalità e gli strumenti per la fruizione.

2. Stato dell'arte e soluzioni adottate nel settore del Cultural Heritage

2.1 Il Foro di Augusto 2000 anni dopo e il Foro di Cesare

Nel 2014, in occasione del bimillenario della morte di Augusto (19 agosto del 14 d.C.), Zètema Progetto Cultura ha prodotto una video installazione celebrativa¹, che si è andata a inserire in un più ampio intervento di valorizzazione dei Fori Imperiali. L'iniziativa, replicata ogni anno, ha ricevuto un grande consenso di pubblico generando un notevole valore economico e culturale per la città di Roma. Si tratta di una proiezione mappata sui resti del Foro di Augusto che illustra, mediante l'uso di ricostruzioni in computer grafica, come si presentassero questi luoghi all'epoca dell'Impero Romano. Si viene guidati nelle vicende del Foro e della Roma antica da una narrazione, affidata alla voce di Piero Angela, ascoltabile tramite delle cuffie senza fili. Il tutto è osservabile dalle tribune disposte per l'occasione sul marciapiede di via Alessandrina, proprio di fronte al sito archeologico. Gli spettacoli si svolgono in orario serale per permettere di vedere la proiezione e, essendo all'aperto, vengono effettuati solamente nei mesi tra aprile e ottobre escluse le giornate di pioggia. Nonostante queste limitazioni l'iniziativa sta avendo molto successo perché riesce a mettere a confronto, con coinvolgente chiarezza, ciò che è e ciò che è stato, risvegliando l'interesse non solo dei più appassionati ma anche di semplici curiosi.

Nel 2016 il programma si è arricchito di un nuovo viaggio nella storia dell'antica Roma, che propone, secondo le stesse modalità del Foro di Augusto, un affascinante percorso nella storia del vicino Foro di Cesare.

2.2. Paris 3D saga

Il progetto, prodotto da Dassault Systemes, inizia con un enorme lavoro di ricostruzione 3D di Parigi² e dei suoi principali monumenti in varie epoche. Tutto ciò permette di intraprendere un viaggio virtuale per la città, in parte seguendo una narrazione e in parte navigando liberamente, attraverso i vari momenti storici, a partire dal periodo gallico fino ad arrivare a vedere i diversi stadi costruttivi della Torre Eiffel tra il 1886 e il 1889.

Questo lavoro viene sfruttato in diverse declinazioni sulla maggior parte delle piattaforme possibili: tablet, navigazione online, realtà aumentata, libri, filmati. Tuttavia l'utilizzo più interessante è senz'altro

l'installazione interattiva, tramite la quale il "viaggiatore" viene immerso nel mondo virtuale, proiettato su pareti e pavimento, che può navigare con l'aiuto di un sofisticato *joystick*. Per aumentare il coinvolgimento, tutto questo è osservabile anche in stereoscopia; un sistema di tracciamento che utilizza telecamere a infrarosso, infatti, rileva la posizione dell'utente modificando la visuale di conseguenza.

3. Procedura d'interazione

3.1. Interfaccia

Parlando d'interazione si deve, prima di tutto, definire il concetto di interfaccia, che letteralmente significa "ciò che sta in mezzo" ovvero l'ambito delle possibili interazioni tra due entità qualsiasi.

Mihai Nadin nel 1988 fornisce una definizione: «L'interfaccia, di qualunque tipo, specifica l'insieme ottimale di segni per l'interazione tra due entità, sia animate che inanimate. In senso stretto, l'interfaccia utente specifica l'azione che un utente deve compiere per accedere alle diverse parti di un sistema, secondo l'organizzazione del modello concettuale su cui si basa il sistema stesso»³. Questa definizione fornisce anche delle linee guida per una corretta progettazione di un'interfaccia; infatti, occorre: organizzare i contenuti in strutture opportune; scegliere la metodologia di presentazione dei contenuti e in generale stabilire il "*look and feel*" dell'interfaccia; definire il modello concettuale su cui basare le regole di interazione; definire le azioni ed il linguaggio di interazione.

La differenza fra l'interazione tradizionale e quella naturale sta proprio nel metodo di applicazione di tali linee guida.

L'*interaction design* viene definita come l'arte di facilitare, istigare e guidare⁴ i comportamenti attraverso la realizzazione di stimoli.

L'interazione naturale è definita in termini di "esperienza": le persone comunicano in maniera naturale tramite espressioni vocali, gestuali ed emotive, esplorando gli ambienti attraverso la visione e la manipolazione di oggetti fisici. La chiave di volta per permettere loro di interagire con la tecnologia nello stesso modo in cui interagiscono fra loro nella vita di ogni giorno⁵.

Fare ricerca nell'ambito dell'interazione naturale significa lavorare a livello multidisciplinare coinvolgendo ambiti di studio quali l'*interaction design* e l'HCI (*Human-computer interaction*), l'ergonomia, la *computer science*, le scienze cognitive e della comunicazione, l'arte visiva, la creatività.

3.2. Interfacce multimodali

Per lungo tempo l'interazione uomo-macchina è stata limitata all'uso di un display grafico, di una tastiera e di un mouse. Recentemente la disponibilità di tecniche di riconoscimento visivo, sonoro e della parola, insieme a sistemi di proiezione e ad altri dispositivi multimediali, hanno suggerito lo sviluppo di una più ricca e multimodale interazione tra l'uomo e l'elaboratore elettronico. A tale scopo è sorta una nuova area di studio della *Human Computer Interaction*, quella sulle interfacce multimodali, il cui obiettivo è quello di consentire una migliore comunicazione tra l'uomo e il computer attraverso una sorta di "antropomorfizzazione" di quest'ultimo.

Si parla di multimodalità quando un qualsiasi tipo di interazione coinvolge più di un canale percettivo (o *input* di comunicazione); l'esempio più eclatante è senz'altro la comunicazione umana: durante una conversazione vengono stimolati contemporaneamente la vista, l'udito, il tatto e anche l'olfatto.

Rimanendo nell'ambito della *Human Computer Interaction*, una definizione di multimodalità è la seguente: la comunicazione con sistemi di computer attraverso le modalità di *input* percettivi comunemente utilizzate dall'uomo per interagire con il mondo. Si parla quindi di un'interazione non più ristretta all'uso della tastiera o del mouse, ma che avviene attraverso la parola, i gesti o la scrittura.

Nonostante le modalità di interazione siano molto evolute e continuino a perfezionarsi, esse comunque non raggiungono ancora i livelli del linguaggio naturale. Ciò non significa che sia necessario soppiantarle totalmente, anche perché studi in merito hanno evidenziato l'efficacia non solo del linguaggio sia scritto che parlato, ma anche delle indicazioni grafiche e delle selezioni via mouse sul video⁶. Piuttosto ci stiamo muovendo verso un arricchimento della comunicazione in cui il miglioramento della qualità dell'interazione uomo-macchina sia rivolto anche alle persone poco esperte o ai disabili, che pur conoscendo molto bene gli standard attuali, hanno problemi di tipo fisico che impediscono loro di interagire correttamente con il computer.

L'utilizzo del linguaggio naturale potrebbe abbattere questi ostacoli. Per raggiungere un tale obiettivo, l'interfaccia tra l'utente e l'ambiente intelligente dovrebbe essere completamente trasparente e la comunicazione dovrebbe appunto essere multimodale come quella tra esseri umani. Certi livelli potranno essere raggiunti solo quando il computer avrà "imparato" piuttosto bene il linguaggio dell'utente. Per questa ragione

stanno proseguendo gli studi nel campo del riconoscimento vocale e nella comprensione artificiale dei linguaggi umani (verbali e non).

Naturalmente l'uso di sistemi multimodali comporta alcuni problemi tecnici non trascurabili. Ricordiamo che il supporto indispensabile alla multimodalità è sicuramente la multimedialità, ovvero la presenza contemporanea di più meccanismi di output (audio, video, etc.).

3.3. *Natural Human Computer Interaction*

Il concetto di *Natural Human Computer Interaction* (NHCI) è nato alla fine degli anni Novanta come possibile soluzione per eliminare lo scarto fra uomini e sistemi computerizzati. Reclama l'introduzione di interfacce utilizzabili in modo naturale e intuitivo, sfruttando risultati e sviluppi in tema di *pattern recognition e image and speech under standing*⁷. Le principali tecniche artificiali utilizzate per la comprensione del linguaggio umano riguardano appunto l'espressività verbale e gestuale.

3.4. *Interaction Design*

Creando relazioni significative tra le persone, i prodotti e i servizi che utilizzano, dai computer ai dispositivi mobili, la *User Interface Design* (UI) è una parte della *User Experience*. È il mezzo attraverso cui l'utente interagisce con il sito o l'applicazione. È importante che la UI sia fatta secondo gli standard di usabilità "massima praticità".

I principi dell'*Experience Design* possono essere riassunti in: non essere invadenti; creare una gerarchia che soddisfi i bisogni della gente; limitare le distrazioni; fornire informazioni interessanti; fornire indicazioni e spunti; fornire un contesto; usare costrizioni adeguatamente; rendere le azioni reversibili; fornire una risposta; fare una buona prima impressione.

Siamo entrati nell'era della gestualità interattiva. La facilità d'uso di un *touchscreen* si è ottenuta grazie al professore Ben Shneiderman dell'Università del Maryland. La manipolazione diretta è la capacità di muovere oggetti digitali su uno schermo senza l'uso di comandi; per esempio si trascina un file in un cestino sul desktop, invece di digitare il comando specifico. I *touchscreen* e le interfacce gestuali portano la manipolazione diretta a un alto livello. Ora, gli utenti possono semplicemente toccare la voce che vogliono manipolare direttamente sullo schermo, spostandolo, rendendolo più grande e così via. La manipolazione diretta usa il corpo per controllare il digitale (e talvolta anche lo spazio fisico) che ci circonda. La manipolazione indiretta utilizza invece interfacce gestuali eliminando il contatto diretto dell'utente.

4. Modellazione 3D per ricostruzioni virtuali

La creazione di ambienti tridimensionali virtuali permette all'utente di interagire in modo dinamico con lo spazio o l'oggetto ricostruito. Le soluzioni grafiche devono essere accurate così che l'utente possa poi vivere tali ambienti come spazi "reali", devono trasmettere informazioni storiche e scientifiche creando diversi livelli di comunicazione. Il pubblico interagisce in modo dinamico con lo spazio ricostruito, arricchisce la propria conoscenza e, tramite la sua *"experience"*, arricchisce lo studioso di informazioni che permetteranno di aumentare la precisione e veridicità della ricostruzione nelle elaborazioni successive.

Una piattaforma multimediale così costituita non ha solo scopi comunicativi: contribuisce a salvaguardare il patrimonio architettonico, archeologico e ambientale innescando processi economici di sviluppo sostenibile⁸; diventa strumento di ricerca alimentando il dibattito critico riguardante i gradi di affidabilità della ricostruzione, l'interpretazione dei dati di partenza, la gestione delle fonti⁹, quindi l'intero percorso ricostruttivo dello studioso. Il modello tridimensionale diventa dunque piattaforma e interfaccia di accesso ai contenuti culturali e contenitore stesso di informazioni, caratterizzandosi come modello informativo e interrogabile.

La trasposizione di un oggetto in ambiente virtuale o la riproduzione digitale di un bene di valore storico per la creazione di piattaforme multimediali è innanzitutto un "processo" in cui, attraverso la grafica digitale, si realizza uno spazio percorribile in tre dimensioni, visualizzato in "prospettiva dinamica interattiva"¹⁰. Tale processo di analisi, sintesi, registrazione, ricostruzione, comunicazione, segue un *workflow* che, riassuntivamente, passa per i seguenti step¹¹:

- acquisizione dei dati tramite tecniche integrate di rilievo;
- rielaborazione e interpretazione dei dati per la costruzione di un modello NURBS o poligonale dell'oggetto esistente;
- ricostruzione tridimensionale dell'oggetto nella sua interezza tramite ipotesi interpretative sulla base di proprietà geometriche, comparazione e analisi storiche;
- texturizzazione del modello tridimensionale ottenuto;
- renderizzazione e creazione dell'ambiente virtuale;
- ottimizzazione dei file digitali per la fruizione *real time*.

Negli anni le metodologie di rilievo sono giunte via via a seguire procedure consolidate nei processi di acquisizione dei dati, tramite l'utilizzo di tecniche fotogrammetriche (o più in generale

image-based), di strumentazione *range-based*¹² come stazioni totali, laser scanner, georadar, ecc.) e il più tradizionale rilievo diretto. Nessuna tecnica presa singolarmente risulta essere esaustiva e sufficiente tale da ottenere un rilievo geometricamente accurato, al contrario risulta necessario prevedere un utilizzo complementare di metodologie e strumentazioni adottando di volta in volta scelte che ottimizzino i processi di acquisizione e restituzione.

La modellazione 3D, in particolare nel campo della ricostruzione virtuale di un oggetto archeologico, comporta la ricostruzione dell'architettura originaria tramite i dati forniti dal rilievo. È dunque compito del modellatore effettuare una "scelta" tra le misure rilevate e ricostruire criticamente la forma in termini di affidabilità e completezza. Le ipotesi costruttive dovranno essere avvalorate da ricerca storica e confrontate con elementi rapportabili ad esso per similitudine.

Il modello risultante deve definire l'oggetto in diversi livelli di dettaglio e, tramite i *rendering*, simularne percettivamente le caratteristiche materiche. L'operatore, tanto nella costruzione del modello quanto nella sua visualizzazione, deve considerare le limitazioni derivanti dai sistemi software e hardware a sua disposizione. Ciò è particolarmente evidente in caso di applicazioni di realtà virtuale dove bisogna considerare facilità di navigazione, capacità del modello di registrare contenuti informativi, memoria dei dispositivi, capacità comunicative, affidabilità della ricostruzione, etc. Anche in questo caso l'operatore dovrà effettuare delle scelte a monte che possano prediligere, nel risultato, il fotorealismo o la scientificità, l'accuratezza di dettaglio, la leggerezza del file.

Le scelte dunque dipendono dai più disparati fattori, sia nelle fasi di rilievo che in quelle di restituzione, interpretazione e ricostruzione. Alcuni sono tecnici e metodologici, altri logistici, altri ancora derivanti da tempistiche o fattori economici, altri infine dettati dal fruitore finale del modello. Risulta dunque necessario stabilire a monte gli obiettivi a cui un modello deve rispondere¹³.

4.1. Procedure di modellazione 3D per la fruizione real time

Qualora lo scopo delle ricostruzioni virtuali sia quello di creare animazioni o applicazioni di VR, o quello di rendere tale modello fruibile e navigabile on line, è necessario ricorrere ad accorgimenti che ottimizzino la visualizzazione e la fruizione da parte degli utenti. In questo contesto è possibile parlare di *real time rendering*. Il termine

si riferisce alla capacità di un processore grafico di generare immagini in modo veloce da permettere una visualizzazione fluida da parte dell'osservatore. Quest'ultimo è quindi in grado di interagire con l'ambiente virtuale e non percepisce alcun ritardo tra i comandi di avvio e le risposte del sistema. Nonostante l'aumento delle potenze dei processori per l'elaborazione dati, si ricorre spesso a diverse tecniche che alleggeriscano i file digitali di partenza.

Una prima azione per ridurre la pesantezza dei file, ancor prima di passare alla fase di *rendering*, consiste in una tecnica denominata *retopology*: l'oggetto modellato in *mesh* (o in esse convertito) subisce delle trasformazioni che modificano la sua topologia senza vararne la forma. Lo scopo è quello di ridurre il numero di poligoni che compongono l'elemento passando da un modello *hi-poly* a un modello *low-poly* prima dell'esportazione in un software di renderizzazione. Questo permette un alleggerimento sia a livello di RAM che di calcolo del motore di *rendering* nella fase successiva. Esistono ad oggi diversi software che attuano una procedura semiautomatica come Z-brush, Topogun, Blender¹⁴.

La tecnica del *retopology* spesso riduce le caratteristiche percettive globali di una scena virtuale, in particolare relativamente a ricostruzioni archeologiche e alla visualizzazione di elementi scultorei complessi. Per poter rappresentare tali oggetti senza appesantire i motori di renderizzazione, è possibile procedere per livelli di dettaglio o LOD (*Level Of Detail*)¹⁵. Ad esempio gli elementi scultorei vengono descritti da superfici con un alto livello di poligoni e si inseriscono in una o più versioni del modello complessivo *low-poly* o "modello master". In questo modo nascono diversi "modelli derivati" e gerarchici, la cui complessità poligonale e il cui caricamento varia a seconda della distanza dal punto di vista dell'osservatore nella scena. Si crea una "scena organizzata" a seconda degli oggetti visibili nella "piramide di visualizzazione" in modo da non processare inutilmente poligoni di oggetti non visibili a grande distanza. Ulteriore ottimizzazione del carico per l'hardware si ottiene attraverso una tecnica denominata "*culling*": se l'elemento non è visualizzato nella scena, pur facendone parte, i suoi poligoni non vengono caricati e renderizzati nell'immagine.

L'aggiunta di particolari geometrici sulla superficie di un oggetto risulta comunque spesso proibitiva per i processori grafici ma, senza agire direttamente sul modello, è possibile in fase di renderiz-

zazione ricorrere ad alcune tecniche, quali ad esempio *texture mapping*, *bump mapping* o tecniche di *baking*, operabili sia attraverso i più comuni software che attraverso *plug-in* degli stessi. Tali espedienti procedurali agevolano la fruizione della scena virtuale, ottimizzando la visualizzazione e raggiungendo buoni livelli fotorealistici. Le scelte non sono funzionali soltanto al risultato della rappresentazione, al fotorealismo e alla velocità di interazione, ma si configurano anche in base a finalità comunicative e scientificità delle informazioni.

5. Modalità e strumenti per la fruizione

Si sente oggi sempre più spesso parlare di “*Virtual Reality*” nei più disparati ambiti, come quello dell'intrattenimento e dei videogame, del marketing pubblicitario e del commercio, dei Beni Culturali. L'obiettivo principale, in linea generale, è quello di comunicare all'utente attraverso la sovrapposizione di diversi livelli informativi e multimediali che trascendano l'esperienza “reale”. Tuttavia in tale contesto si assiste all'uso improprio dell'accezione di “Realtà Virtuale”, in quanto la sempre più stretta contaminazione tra reale e virtuale ha indotto a una distinzione tra diverse applicazioni e modalità di accesso: *Virtual Reality* (VR), *Augmented Reality* (AR), *Mixed Reality* (MR).

Con il termine *Virtual Reality* si indica una simulazione che si avvicina a essere percepita come una realtà effettiva. Si tratta di un sistema di interazione *stand-alone*, il soggetto fruitore si sente introdotto in una realtà altra e può osservare lo spazio digitale nel quale è immerso. Nell'ambito dei Beni Culturali, a livello percettivo e comunicativo, l'introduzione di un utente ad esempio in uno spazio archeologico ricostruito è sicuramente di grande impatto, ma anche fonte di alcune criticità, diverse per natura: in primo luogo, l'utente rischia di concentrarsi unicamente su ciò che viene definito dall'*experiential marketing* il “*wow factor*”, derivante dall'uso della tecnologia in sé, lasciando in secondo piano i contenuti informativi; in secondo luogo, l'accesso facilitato alla realtà virtuale indipendentemente dal luogo in cui l'utente si trovi, potrebbe diminuire il grado empatico con il luogo e il manufatto, la percezione del contesto storico o la consistenza materica dei reperti; infine sono ben tangibili le problematiche legate all'immagine e al “cortocircuito” che si crea, derivante dal contrasto tra i segnali visivi e la percezione del movimento, tali da creare il cosiddetto *motion sickness*. Al fine di evitare tale fenomeno è necessario: porre

attenzione a incongruenze tra i movimenti reali dell'utente rispetto a quelli del virtuale; curare l'ottimizzazione in modo da assicurare almeno 60 fps (*frame per second*) sulla piattaforma di sviluppo; non costringere l'utente a dover girare più volte su se stesso concentrando i contenuti all'interno dei 180°.

Con il termine *Augmented Reality* si indica generalmente la sovrapposizione di elementi virtuali rispetto alla realtà che circonda un osservatore. Il soggetto fruitore si muove in uno spazio reale che si amplia grazie all'introduzione di informazioni digitali aggiuntive. Nel campo della comunicazione dei Beni Culturali un utente, osservando uno spazio composto da elementi reali e virtuali, può inoltre accedere automaticamente a differenti tipologie di contenuti (testuali, audio, video, di indicazione o orientamento) riguardanti quello stesso spazio.

Il termine *Mixed Reality* si riferisce all'unione tra l'immersività tipica della VR e il contatto con lo spazio reale caratteristico dell'AR. La MR permette di superare e aumentare le informazioni recepite dai soli dati percettivi visivi, a differenza della realtà virtuale non provoca effetti di *motion sickness* e non altera la percezione del contesto. Si tratta di un livello più avanzato di AR nel quale sono maggiori gli elementi virtuali rispetto a quelli reali. Il soggetto fruitore si muove in uno spazio ibrido e può interagire con gli elementi virtuali.

I principali problemi tecnici, riguardanti sia la realtà aumentata che la *Mixed Reality*, nascono dalle difficoltà di costruire una realtà "ibrida" integrando la visione reale con quella virtuale e sono relativi al perfetto *overlap* tra le immagini proiettate virtualmente e gli oggetti reali. Per ovviare a tali problematiche risulta necessario conoscere lo spazio su cui verrà sovrapposta la scena virtuale in modo accurato e il centro di proiezione delle immagini digitali stesse (che generalmente corrisponde a un dispositivo in possesso dell'utente). Per fare ciò è dunque indispensabile conoscere la posizione dell'osservatore nello spazio reale e in quello digitale. Per tale motivo esistono, oltre alla geolocalizzazione tramite sistemi di posizionamento globale (GPS), due principali modalità di tracciamento della posizione dell'osservatore: riconoscimento di marcatori e tracciabilità dello spazio.

Nel primo caso è possibile parlare di sistema passivo: è l'impulso fornito dal marcatore esterno che permette di calcolare la posizione dell'osservatore. Nella scena viene posto un *marker* (bidimensionale o tridimensionale), l'utente ha a disposizione un visore o un *device* for-

nito di telecamera. Il processore del visore o del dispositivo interpreta il flusso video proveniente dalla telecamera sul visore, riconosce il *marker* nella scena e calcola la trasformazione di coordinate tra la telecamera e il mondo reale. Una volta che si conosce la reale posizione della telecamera e dei visori, è possibile avviare il processo di collimazione ottica e i modelli 3D digitali vengono proiettati sul marcatore reale. In questo modo il punto di vista e il centro di proiezione sono vincolati e preferenziali. Si dividono in: sistemi di *ARTag* (sono basati sul riconoscimento di *pattern* bidimensionali generalmente stampati e preimpostati nel dispositivo di riconoscimento); *marker* geometrici (sono basati sul riconoscimento di forme tridimensionali, preimpostate nel dispositivo atto alla loro individuazione).

Si possono distinguere due diverse tipologie di tracciabilità spazio: sistema passivo e sistema attivo. Nel primo caso si prevede un sistema di triangolazione a stretto raggio basato su tecnologia *bluetooth*, in grado di sfruttare la posizione del dispositivo impugnato dal visitatore per attivare di volta in volta i vari contenuti in AR e sovrapporli in maniera puntuale all'oggetto reale anche in assenza di *marker*. Nel secondo caso è possibile parlare di sistema attivo in quanto è la telecamera del dispositivo posseduto dall'utente a riconoscere l'ambiente circostante e mappare la posizione degli oggetti al suo interno. Il sistema è ancora in fase di sperimentazione e si basa su due tecniche differenti portate avanti l'una da Microsoft, l'altra da Google.

I sistemi *real time* sono in grado di offrire differenti livelli di interazione, da quelli più ridotti (come i sistemi creati con software QuickTime VR) a quelli che permettono un'elevatissima interazione tra soggetto e dato, come nel caso di giochi *multiplayer* di ultima generazione.

I sistemi di interazione tra uomo e ambiente virtuale si attuano attraverso le seguenti e principali modalità:

- *raycasting*: tecnica che si basa sul calcolo del percorso fatto dai raggi di luce che tracciano un percorso da un fonte emittente a una superficie. Sia il raggio che il *collider* si trovano in ambiente virtuale. Generalmente utilizzata nei dispositivi ottici (visori), le funzioni interattive si attivano quando lo sguardo dell'utente (lenti come fonte di emissione dei raggi) individua un oggetto virtuale specifico identificato come *collider*;

- *controller*: si tratta di dispositivi aggiuntivi e *plug-in*, utilizzati in ambito *gaming*. Forniscono input come il movimento in ambiente virtuale o l'attivazione di funzioni interattive tramite pulsanti;

- *kinect*: si basa sul tracciamento dei movimenti dell'utente tramite telecamera a infrarossi o scanner 3D a luce strutturata. Una volta individuata la posizione dell'utente, i suoi movimenti verranno trasposti nello stesso sistema di coordinate riferite all'ambiente virtuale. Il soggetto fruitore può interagire con gli oggetti e gli spazi virtuali senza l'uso di mezzi altri;

- *leap Motion 3D*: utilizza telecamere e led infrarossi progettata per identificare dita (o oggetti simili come una penna) con una precisione di 0,01 mm. Funzionamento simile alla *kinect*, si differenzia da quest'ultima per l'area di funzionamento più piccola e per la migliore precisione.

Ad ogni modalità di accesso ad AR, MR e VR corrispondono dispositivi differenti per tecnologia e funzionamento.

I principali apparecchi presenti sul mercato sono: Google cardboard; Samsung Gear VR; Oculus rift; Microsoft HoloLens; Google Tango Project. I primi due sono forniti di uno *slot* per *smartphone* che utilizzano come schermo. Danno all'osservatore la possibilità di muoversi nello spazio (limitatamente alle condizioni di *motion sickness* e di spazio fruibile) e di interagire con gli oggetti pur se in modo superficiale, offrono una bassa qualità dell'esperienza sia in VR che in AR o MR e sono compatibili solo con alcuni dispositivi. Gli Oculus rift al contrario offrono una qualità dell'esperienza elevata in VR, ma necessitano del collegamento a un computer tramite cavo. La mobilità dell'utente è limitata in quanto è necessario che rimanga in una posizione fissa. I Microsoft HoloLens sono dispositivi di nuova generazione per quanto riguarda la MR. Riescono a ovviare al punto di vista vincolato sfruttando il principio dell'ologramma: il sistema di proiezione dell'immagine è interno e non ha bisogno di marker esterni. Il riconoscimento dell'ambiente circostante avviene tramite una fotocamera digitale interna, secondo un sistema "attivo" (la telecamera traccia l'ambiente). L'ologramma viene così "disegnato" internamente in tempo reale sugli oggetti tracciati e di cui il visore conosce la posizione. Un sensore a infrarossi, ancora interno ai visori, figlio della tecnologia *kinect*, rileva i movimenti e guida l'interazione uomo-oggetto virtuale. Tuttavia l'utente non è libero di muoversi nello spazio tridimensionale in quanto il processore dovrebbe ricalcolare e ri-mappare l'ambiente per poter proiettare nuovamente un'immagine con una frequenza di aggiornamento di molto elevata. Generalmente funzionano in ambienti chiusi e per spazi limitati.

Project Tango (attualmente disponibile solo per *device* e presto anche per visori) è una recente tecnologia sviluppata da Google. Nasce come dispositivo mobile in grado di tracciare con un sensore di profondità la morfologia dello spazio circostante l'osservatore. Lo spazio tridimensionale viene mappato e registrato in una nuova di punti integrata di valori RGB in tempo reale. Il dispositivo restituisce dunque un modello tridimensionale digitale, contenuto nella memoria interna, nel quale inserisce gli oggetti virtuali. L'utente può muoversi nello spazio circostante reale nel quale gli oggetti virtuali sono inseriti e nello stesso tempo interagire con gli elementi proiettati che variano la propria prospettiva in relazione alla posizione dell'utilizzatore. Questo è possibile in quanto gli oggetti digitali vengono inseriti direttamente nel modello tridimensionale virtuale dell'ambiente reale. È dunque l'utente stesso a tracciare la posizione degli oggetti reali e non viceversa, inserendo tutto in un unico sistema di riferimento. Tale sistema può quindi considerarsi "attivo". Osservatore, oggetti virtuali e reali sono inseriti nel medesimo sistema di coordinate tridimensionali. L'utente può quindi interagire con essi grazie ai sistemi di *leap motion* integrati direttamente nel dispositivo.

6. Il caso studio: il Ponte Rotto a Roma

Nel contesto sopra descritto si è voluto mettere a punto un prodotto multimediale e un'applicazione per smartphone, e più in generale per *portable device*, per la valorizzazione e la divulgazione dei ponti sul fiume Tevere a Roma.

La tecnologia scelta si basa sulla *Mixed e Augmented Reality*. Google Project Tango offre la possibilità di sovrapporre elementi virtuali ad elementi dello spazio reale senza grossi problemi relativi all'*overlap* delle due immagini, utilizzando una semplice telecamera del proprio dispositivo (ad oggi disponibile solo per dispositivi Android). L'utilizzo di tale tecnologia permette anche di superare i problemi relativi alla tracciabilità dell'utente, in particolare negli spazi esterni, e dunque alla riconoscibilità del centro di proiezione delle immagini digitali come già precedentemente descritto (Fig. 1).

L'applicazione consente di accedere a diversi livelli informativi e la distribuzione delle informazioni avviene secondo dei blocchi logici.

Primo livello e menù principale: mappa schematica rappresentante i ponti e la loro localizzazione lungo il fiume Tevere. Ogni elemento è cliccabile e consente l'accesso ai successivi livelli. Un elenco paralle-



Fig. 1. Immagine reale e immagine virtuale sono sovrapponibili grazie ad algoritmi di marker tracking.

lo suddivide i ponti secondo l'epoca di costruzione¹⁶ classificandoli secondo: 1. ponti romani; 2. ponti della Roma papale; 3. ponti moderni; 4. ponti contemporanei.

I livelli successivi possono considerarsi blocchi logici paralleli e approfondiscono le tematiche riguardanti il singolo ponte. Nello specifico il caso studio ha affrontato il *Ponte Aemilius*, detto anche Ponte Rotto, posto poco più a sud dell'isola Tiberina. Nel menù successivo sono visualizzabili e cliccabili le seguenti opzioni:

- realtà aumentata
- storie e folklore
- particolari architettonici.

Nella prima opzione, il sistema consente di visualizzare diversi livelli di informazioni tridimensionali. L'utente, posto in una posizione predeterminata e preferenziale, tramite telecamera del proprio dispositivo inquadra l'oggetto. Un *marker* geometrico tridimensionale preimpostato riconosce la forma su cui proiettare gli oggetti virtuali. Il ponte viene ricostruito virtualmente in sovrapposizione all'immagine attuale visualizzabile sul *display*. Una *timeline* permette di navigare nelle ricostruzioni delle diverse fasi storiche: romana, rinascimentale e ottocentesca (Figg. 2, 3).

Nella seconda opzione l'utente ha la possibilità di accedere a contenuti informativi in forma audio-visiva. Una serie di video animati riferiscono notizie storiche e leggende sul ponte tramite i



Fig. 2. Modello ricostruttivo rinascimentale e linea del tempo selezionabile.

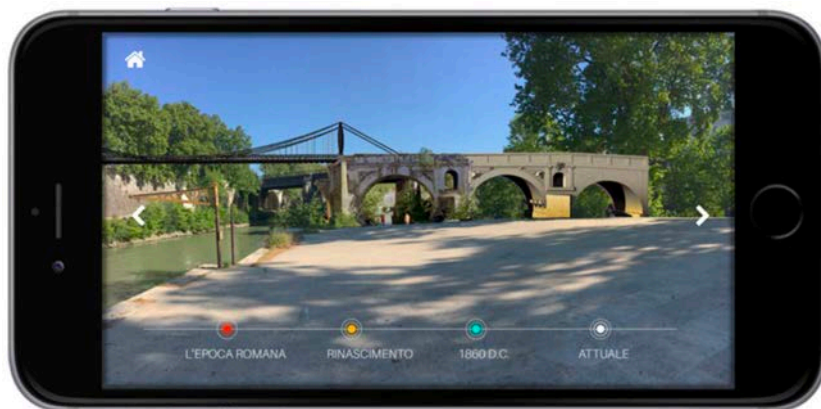


Fig. 3. Modello ricostruttivo relativo all'epoca ottocentesca e linea del tempo selezionabile.

personaggi che lo hanno attraversato o le vicende a cui è stato sottoposto. Sono state individuate sette differenti *storyboard* divise per epoca storica: Roma antica, Medioevo e Rinascimento, Ottocento. Degli elementi testuali approfondiscono alcune curiosità come ad esempio il Ponte Rotto nell'arte e nel cinema (Fig. 4).

Infine nella terza opzione, un'interfaccia che rappresenta lo stato attuale del ponte, permette all'utente di cliccare su alcuni elementi evidenziati e di accedere a notizie relative a particolari architettonici e dettagli tecnici (Figg. 5, 6).

La piattaforma multimediale così studiata combina contenuti scientifici, ludici, narrativi alternando diversi registri: emotivo, riflessivo, di istruzione. L'utente vive un'esperienza didattica e immersiva grazie ai diversi livelli di comunicazione. I contenuti testuali han-



Fig. 4. *Storie e folklore. Filmato animato che riproduce leggende dell'epoca romana.*

no la capacità di essere facilmente percepibili e comprensibili da un pubblico vasto. Le ricostruzioni tridimensionali, visualizzabili tramite realtà aumentata, uniscono aspetti ricreativi e trasmettono, tramite un'unica interfaccia, tutto il processo di analisi / sintesi, registrazione / interpretazione e ricostruzione a monte dell'operazione. I contenuti audio e visivi legano la narrazione, anche di leggende e curiosità ai contenuti scientifici. Lo *storytelling* gioca un ruolo fondamentale nella trasmissione delle informazioni, stimola curiosità e genera maggiori facoltà di apprendimento. È possibile dunque comunicare non solo raccolta, analisi e interpretazione dei dati, ma anche storie, culture, vicende unendo aspetti sociologici e antropologici a quelli storico-scientifici che più accrescono la curiosità degli utenti¹⁷.

¹ <<http://www.viaggioneifori.it/>> [dicembre 2019].

² <<http://paris.3ds.com/>> [dicembre 2020].

³ MIHAI NADIN. Interface design: A semiotic paradigm. *Semiotica* 69 (3-4), January 1988, p. 272.

⁴ SAFFER 2006.

⁵ NORMAN 1998.

⁶ NORMAN 1999.

⁷ MARSIC ET AL. 2000.

⁸ TOSTO 2010.

⁹ BORGHINI 2011.

¹⁰ MIGLIARI 2008.



Fig. 5. Il Ponte Rotto nello stato attuale, a cui sono sovrapposti elementi grafici che evidenziano oggetti intelligenti.



Fig. 6. Modello 3D del particolare architettonico. Il modello è navigabile e dà accesso a ulteriori informazioni.

¹¹ EMPLER 2017.

¹² MESCHINI 2011.

¹³ DEMETRESCU 2011.

¹⁴ ALIPERTA 2015.

¹⁵ PESCARIN 2011.

¹⁶ I modelli ricostruttivi delle diverse epoche e dei particolari architettonici del Ponte Rotto, qui di seguito mostrati, sono stati realizzati da Giulia Umana. Il rilievo da cui è stato ricavato il modello è stato eseguito da Leonardo Paris e Maria Laura Rossi tramite strumentazione LS del Critevat, Sapienza Università di Roma. Le immagini finali sono invece state realizzate nell'ambito di una tesi di laurea del Corso di Laurea Magistrale in Design Comunicazione Visiva e Multimediale, Facoltà di Architettura, Sapienza Università di Roma, candidati: Huijie Xu, Hairuo Liu.

¹⁷ DE FELICE 2016; FERDANI 2016.

La raccolta dati in ambiente QGIS per un modello territoriale nazionale dei ponti antichi

Francesca Pierdominici

1. I Sistemi Informativi Geografici applicati al patrimonio storico documentale

I sistemi GIS (Sistemi Informativi Geografici) consentono di elaborare modelli di simulazione/rappresentazione della realtà di un territorio con un potenziale livello di definizione equiparabile a quello di un prototipo per la produzione industriale di oggetti.

Il GIS si basa su una simulazione di dati geometrici, topologici e degli attributi. Tutti gli elementi rappresentati sono georeferenziali; la georeferenzialità degli oggetti permette di contestualizzare elementi e informazioni inserendoli come tasselli nel mosaico mondo.

Una delle caratteristiche peculiari dei sistemi GIS è la possibilità di aggiornare continuamente i dati combinandoli secondo più criteri logico/relazionali. Nel GIS il concetto di topologia viene applicato secondo due modalità: in termini spaziali agli elementi formali (i segni della planimetria) per cui di un oggetto si conoscono le coordinate, le dimensioni, ma anche le relazioni topologiche di connessione, adiacenza e inclusione; in termini concettuali ai dati/attributi riferiti agli elementi formali.

La possibilità di manipolare i dati, connetterli e sovrapporli (*overlay mapping*) secondo criteri associativi logici ha come importante ricaduta la costruzione di un modello flessibile. Allo stesso tempo la costruzione di relazioni topologiche tra i dati consente di effettuare letture tematiche ed estrarre più rappresentazioni dallo stesso modello. Lo stesso concetto di “legenda” si amplifica, la struttura concettuale dei contenuti della rappresentazione cartografica non è più una forma chiusa e fissa.

Diversamente da altri sistemi basati prevalentemente sulla rappresentazione geometrico/formale e quindi in grado di produrre modelli destinati a invecchiare nel tempo rispetto alle evoluzioni/modificazioni del territorio, il GIS si basa su di un modello che se costruito con un adeguata struttura logica può essere continuamente implementato e aggiornato. Il GIS per le sue caratteristiche accompagna il terzo passaggio nell'evoluzione della rappresentazione cartografica: disegno a tratti - cartografia numerica - database con componente spaziale.

2. Open data: mapping in QGIS

Il progetto di mappatura dei ponti antichi in Italia si basa sulla ricerca storico-documentale che nella sua prima fase ha riguardato 180 siti dislocati sul territorio nazionale. Considerata l'estensione areale del progetto cartografico è opportuno descrivere le principali problematiche relative alla gestione in ambiente GIS degli *open data* prodotti sia da enti pubblici sia da soggetti privati con particolare attenzione all'aspetto della georeferenziazione e dell'organizzazione dei dati territoriali.

Le mappe georeferenziate dell'intero territorio nazionale generalmente sono in una rappresentazione che va dalla scala 1:10.000.000 a 1:5.000.000¹ e si basano su una cartografia riferita al sistema di proiezione geotecnico UTM² (Fig. 1). Questo tipo di mappe, consultabili ad esempio sul geoportale nazionale, contengono informazioni del territorio di carattere generale (bacini idrografici primari e secondari, infrastrutture ferroviarie nazionali, DTM, etc.), mentre nei geoportali regionali è possibile consultare i dati territoriali specifici.

I processi con cui vengono acquisiti i dati per la costruzione della cartografia sono di vario tipo e dipendono anche dalle specificità del tipo di cartografia che si vuole elaborare (Fig. 2).

In ambiente GIS usualmente gli oggetti rilevati vengono inseriti su una data mappa per acquisizione di coordinate GPS rilevate sul posto, per inserimento di un elemento georeferenziato corrispondente all'oggetto reale, per individuazione sulla stessa mappa cartografica georeferenziata. Nel caso specifico dei 180 ponti antichi sparsi sull'intero territorio nazionale l'acquisizione diretta dei dati in GPS mediante sopralluogo è stata esclusa a priori. Si è quindi optato per l'acquisizione indiretta dei dati, la cosiddetta "mappatura da poltrona": mediante una ricerca iniziale bibliografica e sui siti web è



Fig. 1. La localizzazione dei 180 ponti antichi censiti, base webmap Google satellite.

stato realizzato un censimento con la localizzazione dei 180 ponti in base alla provincia di appartenenza, al tracciato stradale interessato, al corso d'acqua attraversato e alle coordinate di riferimento reperite sulla carta web Google Maps. Questo censimento corredato delle descrizioni di diversi ponti ha costituito la base dati iniziale del progetto di mappatura in GIS.

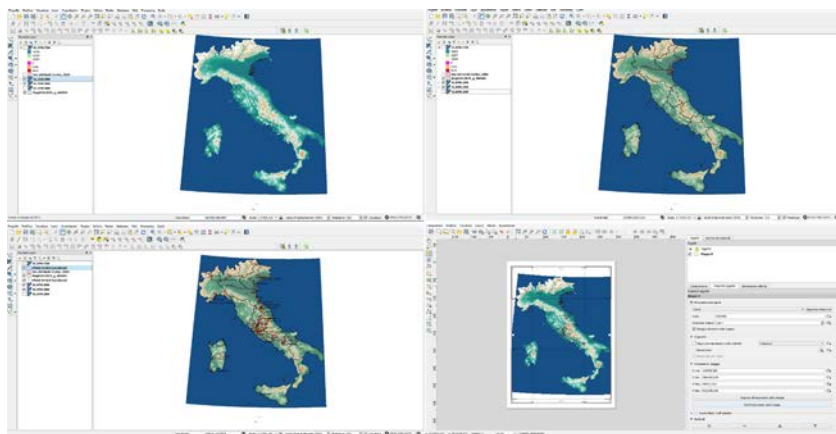


Fig. 2. Elaborazione grafica in ambiente GIS del modello digitale del terreno - 20 metri - servizio WCS del Geoportale nazionale. La velocità di elaborazione è subordinata alla potenza del processore e alla velocità e stabilità del collegamento Internet.

L'indagine operativa compiuta riguarda quindi la costruzione, mediante il software *open source* QGIS³, di un modello cartografico di simulazione e rappresentazione degli elementi "ponti antichi", mentre in parallelo è stata effettuata la sistematizzazione e il completamento della raccolta dati al fine di produrre una griglia di attributi organizzata secondo diverse categorie di lettura del patrimonio storico-archeologico.

Date le caratteristiche sopra descritte dei dati di ingresso e della scala di rappresentazione della carta in uscita, l'impostazione delle condizioni iniziali del progetto GIS ha comportato la valutazione e verifica di alcuni aspetti tecnici e necessità operative riguardanti essenzialmente la gestione in ambiente GIS: dei Sistemi di Riferimento (SR), dei database con componente spaziale (la mappa cartografica di tipo GIS), nonché la sistematizzazione dei dati per la produzione di carte tematiche.

3. Sistemi di Riferimento e database con componente spaziale

I Sistemi di Riferimento (SR) costituiscono allo stesso tempo l'elemento di forza e di debolezza nella cartografia digitale prodotta in ambiente GIS e nella cartografia web come Google Maps, Bing, Open Street Maps, etc.

Grazie all'adesione dell'Italia al progetto Open Data, dal 2016 diverse amministrazioni pubbliche hanno reso disponibile on line la cartografia tecnica: quindi oltre ai servizi già forniti in passato dal ge-

oportale nazionale (WMS, WFS, WCS)⁴, le regioni hanno reso fruibili tra gli altri dati anche le Carte Tecniche Regionali Numeriche (CTRN) e ad esempio l'Istituto di Statistiche Italiane ISTAT⁵ ha messo a disposizione le basi vettoriali dei confini amministrativi italiani.

Questa innovazione di fatto ha allargato la platea dei fruitori dei dati cartografici digitali. Infatti se fino a qualche anno fa l'accesso ai dati di tipo WMS-WCS (per esempio) era subordinato alla dotazione di computer con processori molto potenti nonché a una rete stabile e molto veloce, oggi l'evoluzione dei formati dei dati, la facilità di reperirli on line, nonché lo sviluppo delle tecniche di gestione degli stessi mediante software *open source* permette a chiunque abbia un pc e una connessione Internet (stabile) di operare in ambito cartografico. Tutti i file cartografici di tipo raster e vettoriali sono georeferenziati, ossia sono riferiti a un dato Sistema di Riferimento SR, per cui è possibile richiamarli in ambiente GIS e comporre una mappa di una data porzione di territorio.

Nonostante questo auspicato e felice avvio degli *open data*, il problema cogente resta quello della interoperabilità e dello scambio dei dati territoriali tra le regioni e in generale gli enti pubblici. La questione si pone ogni qualvolta si affrontano progetti di livello nazionale che richiedono una base cartografica omogenea e unitaria, come potrebbe essere appunto nel caso dell'attuale ricerca.

Il tema non è di ordine solo nazionale, nel mondo sono utilizzati diversi Sistemi Proiettivi geodetici e geografici⁶ in funzione anche delle specificità morfologico-dimensionali delle porzioni di superficie terrestri indagate. Per ogni Sistema Proiettivo (tridimensionale) esiste una varietà di Sistemi di Riferimento⁷ (bidimensionali).

Ad oggi sul territorio nazionale coesistono diversi Sistemi Geodetici di Riferimento di tipo UTM, creati nel tempo per rispondere alle crescenti esigenze di uniformare i dati geotopocartografici: SR ETRF2000 (è il più recente ed è diventato obbligatorio a livello nazionale con il D.M. 10 novembre 2011⁸); ETRF89⁹; ED50 (European Datum 1950)¹⁰; ROMA40, storico sistema nazionale utilizzato fino agli anni Sessanta del Novecento.

A questi Sistemi Geodetici di Riferimento corrisponde una varietà di Sistemi di Riferimento Cartografici a cui sono riferite le Carte Tecniche Regionali: Monte Mario/Italy Zone 1,2 (fusi O, E, Datum: Roma 40); ED50/UTM zone 32,33,34N (Datum: ED50); WGS84/UTM zone 32,33,34N (Datum: WGS84); ETRS89/UTM zone

32,33,34N (Datum: ETRS89); IGM95/UTM zone 32,33,34N (Datum: IGM95) RDN2008/TM zone 32,33,34N (Datum: IGM95). Alcune CTR infatti fanno riferimento al SR ETRS89/UTM (ad es. Regione Emilia Romagna¹¹), altre al SR D50, altre al più datato SR Roma 40 (ad es. Regione Lazio e Umbria¹²), mentre la cartografia numerica ISTAT è disponibile sia in SR D50, sia nel più recente WGS84 UTM.

Questo aspetto ha delle importanti ricadute nella gestione in ambiente GIS delle CTRN riferite a diversi SR. La compresenza in una mappa di dati legati a differenti SR inficia il rigore nella rappresentazione cartografica ogni qual volta si ha necessità di veicolare i dati territoriali da un SR all'altro; non a caso l'Istituto Geografico Militare al fine di facilitare l'uso di alcune moderne librerie geografiche ha emesso diverse note informative sull'uso corretto del GIS, raccomandando la corretta identificazione del SR a cui i *dataset* sono riferiti per poter gestire le proiezioni; l'adozione dei più recenti sistemi proiettati RDN2008¹³ e ha inoltre messo a disposizione sul proprio portale un servizio di conversione (Verto¹⁴) proprio per garantire il rigore dei dati cartografici all'interno dei gliati IGM¹⁵.

Il tema delle distorsioni/deformazioni nelle mappe cartografiche, pur avendo un certo trascorso storico, è più che mai attuale. Come noto, nelle proiezioni cartografiche non è possibile proiettare una superficie sferica o ellissoidale su un piano senza distorsioni; per conservare nella proiezione sul piano determinate caratteristiche dell'oggetto, le distorsioni sono controllate con i sistemi proiettivi¹⁶. Le proiezioni cartografiche conservano determinate caratteristiche: le aree, gli angoli, la distanza o particolari proprietà come i cerchi massimi (l'intersezione fra la Terra e un piano che passa per il suo centro), che vengono rappresentati come linee diritte. Le proiezioni e le carte che conservano le caratteristiche degli angoli vengono chiamate conformi, mentre le proiezioni e le carte che conservano le dimensioni delle aree sono definite equivalenti¹⁷.

Nella cartografia web ad esempio, il Sistema di Riferimento più comune è il SR WGS84/Pseudo Mercator- Spherical Mercator¹⁸, EPSG: 900913 - 3587 - 54004 - 41001- 102113 -102100 -3785; questo SR deriva da una proiezione di tipo non conforme.

Anche i software di tipo GIS possono presentare un Sistema di Riferimento preimpostato, il software Open Source QGIS utilizza il SR WGS84 World EPSG: 4326¹⁹, si tratta di una proiezione conforme con il meridiano principale coincidente con il meridiano

Greenwich. Nel GIS però è possibile impostare il SR che si ritiene più pertinente al progetto cartografico specifico in base al SR dei dati territoriali selezionati, QGIS ad esempio supporta fino a 7.000 SR standard²⁰.

La questione dei differenti SR cartografici sembra quindi abbastanza gestibile in ambiente GIS, tuttavia se si volesse oggi comporre una base cartografica di dati territoriali mediante un mosaico delle CTRN andrebbe considerato il differente grado di adeguamento delle singole regioni al modello di DataBaseGeoTopografico (DBTG) indicato dal D.M. 10 novembre 2011.

Ancora oggi infatti in Italia è in corso di attuazione la direttiva europea INSPIRE 2007 (INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe, 2007/2/EC del 14 marzo 2007). Questo progetto della Commissione Europea prevede che ogni Stato dell'Unione deve implementare la sua Infrastruttura di Dati Territoriali nazionale, coordinando quelle di livello sub-nazionale. Tale infrastruttura riferita ai dati geografici può essere indicativamente descritta attraverso due componenti principali: i Sistemi di Riferimento e i database con componente spaziale. In Italia il D.M. 10 novembre 2011 ha di fatto recepito la direttiva INSPIRE, fornendo le specifiche per la costruzione di un database geotopografico basato su: adozione del Sistema di Riferimento Geodetico Nazionale, mediante regole tecniche per il contenuto dei database geotopografici; definizione del contenuto e modalità di costituzione del Repertorio Nazionale Dati Territoriali; formazione, documentazione e scambio di ortofoto digitali alla scala nominale 1:10.000.

Tali indicazioni sono state assorbite nell'Accordo Quadro di cooperazione interregionale permanente per il potenziamento della società dell'informazione e dell'*e-gouvernement*, sottoscritto dalle Regioni e Province Autonome e dal Centro Interregionale dei Sistemi Informativi Statistici e Geografici (CISIS)²¹; tuttavia permangono ancora delle differenze tra regione e regione rispetto agli aspetti operativi.

Per spiegare meglio il problema consideriamo due temi indicati dal D.M. 10 novembre 2011: l'organizzazione degli oggetti nel DataBase Territoriale Geografico (DBTG) e la rappresentazione cartografica con i relativi formati di distribuzione.

Il DBTG organizza gli oggetti raggruppandoli in "classi" (ad esempio immobili e antropizzazioni, vegetazione, etc.)²²; a ogni classe corrispondono: la struttura degli attributi; i domini (liste di valori predefiniti) per gli eventuali attributi enumerati; le componenti

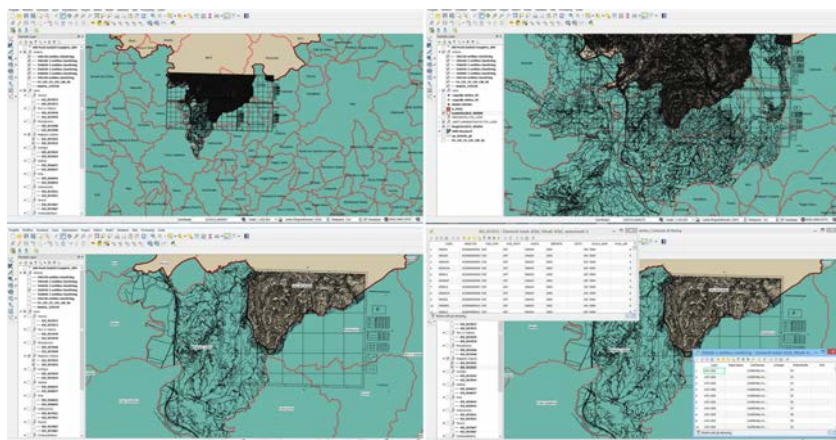


Fig. 3. Sovrapposizione dei livelli informativi vettoriali (*shape file*) delle CTR Lazio e Umbria, confronto tra gli strati informativi e l'organizzazione delle relative griglie degli attributi.

spaziali; eventuali vincoli relazionali con oggetti di altre classi che possono coinvolgere anche le componenti spaziali.

La rappresentazione cartografica e i formati di distribuzione fanno in parte riferimento ai contenuti del National Core²³, finalizzati a una migliore fruizione delle informazioni e a una loro resa grafica omogenea, ma recentemente sono sempre più orientati verso gli standard *open source* esistenti sia in ambiente GIS desktop che web.

Se effettuiamo ad esempio una comparazione in ambiente GIS fra le CTR di Lazio e Umbria che utilizzano il SR UTM 3004, è evidente la diversità della rappresentazione grafica, del formato degli strati informativi (*shape* e *dxf* file) e della corrispondente struttura della griglia attributi (Fig. 3).

Le disomogeneità nella cartografia ufficiale rendono dunque non sempre agevole la gestione operativa dei dati almeno da parte degli utenti esterni che tuttavia continuano a crescere, alimentando sempre più la richiesta di SR e *dataset* omogenei. A fronte della situazione contingente è stata esclusa nella presente ricerca la possibilità di comporre in modo agile una mappa mosaico di CTRN, sia pure costruito con due massimo tre strati informativi. L'orientamento pertanto è stato quello di prendere in considerazione come fonte dati territoriali la cartografia web *open source*.

4. Impostazione del progetto GIS e verifiche operative

La scelta per la base cartografica vettoriale è dunque caduta sul *dataset* ISTAT riferito al SR WGS84 UTM zone 32m EPSG: 32632²⁴.

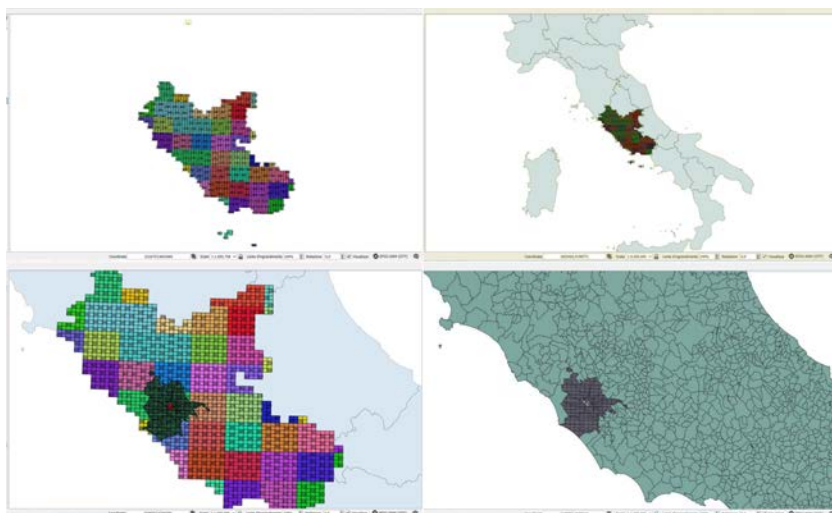


Fig. 4. Sovrapposizione quadro di unione CTR Lazio - limiti amministrativi Comune di Roma CTR Lazio - Italia, limiti amministrativi regionali e comunali ISTAT.

Questa base vettoriale presenta dei vantaggi: non necessita di comporre tra loro gli elementi vettoriali e possiede pochissimi “strati” informativi (*layer*), permettendo una rapida elaborazione grafica in ambiente GIS. Il punto debole rispetto alla CTRN²⁵ è chiaramente la totale assenza di rappresentazione degli elementi componenti il territorio ossia dei *layer* corrispondenti a: orografia; altimetria; idrografia; infrastrutture; edificato; etc.

Questo ultimo aspetto ha posto la questione, non secondaria, di come poter fattivamente mappare i ponti antichi del territorio nazionale, e considerato che diversi ponti sono già presenti nelle Carte Tecniche Regionali, prima di abbandonare definitivamente l'utilizzo almeno parziale delle CTRN *open data* è stata eseguita una verifica in QGIS per cercare di assegnare ai file vettoriali eterogenei lo stesso SR. Come area campione è stata scelta la città di Roma, considerato che il territorio della Provincia di Roma presenta la maggiore concentrazione di manufatti con ben 39 ponti, di cui ben 8 ricadenti nel Centro Storico. Una consistente porzione dell'area è descritta nell'elemento cartografico 374101 della CTR Lazio, scala 1:5.000. L'elemento cartografico comune alla base ISTAT e alla CTR Lazio è lo *shape file* corrispondente al *layer* “limite amministrativo”²⁶ del Comune di Roma (Fig. 4). L'esito positivo del test ha permesso di organizzare in QGIS una mappa tematica in una scala di definizione molto

alta, con base CTRN Lazio, per analizzare in dettaglio alcuni ponti antichi localizzati nel Centro Storico della città di Roma.

Verificata la compatibilità fra i due file vettoriali appartenenti a SR diversi, si pone la questione successiva della sovrapposizione alla base vettoriale ISTAT di almeno una mappa raster che contenga gli elementi componenti il territorio italiano. Tale mappa dettagliata, aggiornata e disponibile on line, va selezionata tra le mappe web come Google Maps, Bing, Open Street Maps.

I software GIS utilizzano le mappe web tramite le API Key (i codici di programmazione-*script*) concesse dalle società proprietarie dei diritti. QGIS ad esempio ha accesso libero ai servizi standard di cartografia web offerti da Open Street Maps; a tal riguardo si ricorda che a partire dal 2017 Google Maps e altre società hanno subordinato il rilascio della API a titolo gratuito alla condizione che le *webmap* siano impiegate per attività di *testing*.

Tra le varie *webmap* Open Street Maps presenta un livello di definizione dei dati territoriali più o meno equivalente a quello di Google Maps, inoltre consente tramite il *plugin* Quick OSM di interrogare in ambiente QGIS la mappa per estrarne i dati specifici con componente spaziale, ossia per ricavare gli *shape* file (Fig. 5). Questa funzionalità permette di selezionare a priori gli elementi spaziali della mappa, determinando di fatto una maggiore agilità e velocità nella redazione di carte tematiche in ambiente GIS (in una CTRN il processo selettivo è esattamente inverso poiché ogni strato informativo copre tutto il territorio rappresentato). Per tali ragioni la scelta sulla cartografia web da utilizzare per il progetto QGIS sui ponti antichi di Italia è ricaduta infine su Open Street Maps (OSM). In particolare si è optato per procedere in ambiente GIS impostando il progetto con SR MonteMario/Italy zone 2 EPSG:3004 in modalità OTF, utilizzando come base la cartografia vettoriale ISTAT, caricando la carta web Open Street Maps, ed effettuando il rilievo visivo sulla mappa OSM ed estraendo tramite Quick OSM i dati (gli *shape* file) corrispondenti ai ponti localizzati, per i quali sono state successivamente ricavate in QGIS le coordinate x,y .

5. Costruzione del modello relazionale. Criteri adottati per il caso studio

Data la scala di rappresentazione delle mappe cartografiche, il progetto di ricerca da un lato si avvale delle metodologie dell'analisi del paesaggio propedeutiche alla redazione dei Piani di Asset-

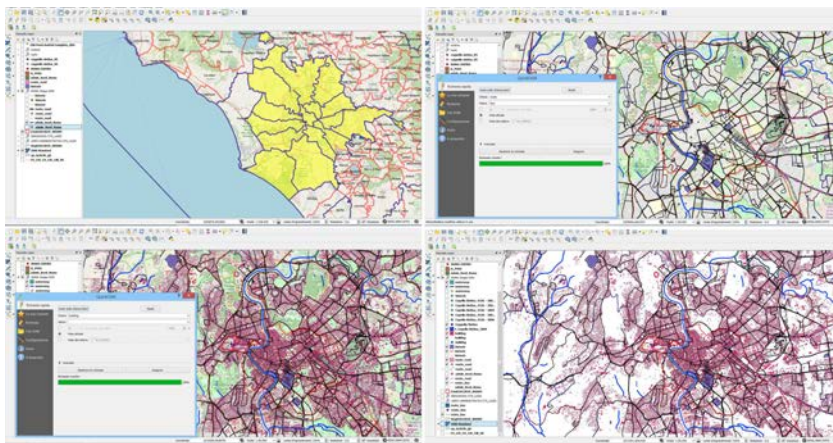


Fig. 5. Interrogazione in ambiente QGIS della webmap Open Street Maps mediante l'app QuickOSM ed estrazione dei file vettoriali (shape file) corrispondenti (dati mappa © collaboratori di OpenStreetMap).

to, dall'altra delle possibilità di rappresentazione ed elaborazione dei dati naturalistici, archeologici, storici e territoriali offerti dai software GIS Open Source, per una ricostruzione diacronica del paesaggio stratificato finalizzata alla individuazione delle criticità e priorità di intervento per il recupero e la valorizzazione dei ponti antichi.

Rappresentare in QGIS i ponti antichi d'Italia, ossia mappare questi manufatti su cartografia digitale in scala 1:5.000.000, implica necessariamente fare riferimento anche agli elementi che ne hanno determinato la loro posizione sul territorio: i tracciati viari e i corsi d'acqua (Fig. 6). Non si può non considerare che l'ostacolo al proseguimento di un tracciato viario, generalmente costituito dalla morfologia e dall'idrografia di un dato paesaggio, ha determinato di volta in volta una specifica soluzione tecnica di attraversamento, generando i modelli dei ponti e delle relative strutture giunte nel tempo fino a noi.

La mappa redatta su base vettoriale ISTAT è quindi stata arricchita dei vettori strade e fiumi attraverso l'estrapolazione degli elementi geometrici mediante il *plugin* QuickMaps direttamente dalla carta web Open Street Maps.

I singoli ponti sono stati individuati sulla mappa georeferenziata sotto forma di elementi geometrici puntuali dotati di coordinate cartografiche x,y . Questa attività di localizzazione è stata svolta in parallelo in ambiti diversi: dalla semplice ricerca topo-

ID	NOME ATTUALE	NOME ORIGINARIO	ALTRE DENOMINAZIONI STORICHE	REGIONE	PROVINCIA	LOCALITÀ	STRADA	EPoca	COMMITTENTE	PROGETTISTA	TECNICA COSTRUTTIVA	STRUTTURA	Tipo di arco	Volte	Numero di campate	Lunghezza	Larghezza	Altezza	Stato di conservazione	Funzione	Note
1	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
2	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
3	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
4	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
5	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
6	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
7	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
8	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
9	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
10	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
11	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
12	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
13	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
14	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
15	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
16	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
17	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
18	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
19	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	
20	ARCO DI S. PIETRO	ARCO DI S. PIETRO		LAZIO	ROMA	ROMA		ROMA				ARCO	ARCO A TRE VOLTATE	3	100	10	10	BUONO	MONUMENTO	ARCO DI S. PIETRO	

Fig. 7. Database I ponti antichi. Estratto di 20 elementi censiti con le corrispondenti categorie di attributi.

6. Griglia attributi e carte tematiche

Da questa base cartografica sono state ricavate delle carte tematiche ispirate ai criteri di ricerca sia della topografia storica, sia dell'archeologia per l'architettura; i dati sono organizzati sotto forma di database relazionale in forma di tabella. Agli elementi geometrici corrispondenti ai ponti georeferenziati è stata assegnata una griglia di attributi (database) organizzati secondo i seguenti temi di lettura: nome attuale - nome originario - altre denominazioni storiche - corso d'acqua - regione - provincia - località - riferimenti topografici - strada - epoca - committente - progettista - tecnica costruttiva - struttura - tipo di arco-volta - numero di campate - lunghezza - larghezza - altezza - stato di conservazione - funzione - note (Fig. 7).

Mediante le tecniche di interrogazione del GIS sono state estratte delle mappe tematiche sui ponti in scala 1:5.000.000. Le carte vengono prodotte impostando delle interrogazioni filtro (*query*) a cui il sistema QGIS risponde evidenziando o riportando nella carta le entità grafiche collegate ai record selezionati che soddisfino tali richieste.

Una parte della ricerca è stata dedicata alla individuazione approssimativa sulla mappa degli antichi tracciati viari romani²⁸ connessi ai 180 ponti e ai centri abitati interessati. Per individuare le zone interessate dal presunto attraversamento viario si è fatto ricorso sia ai testi specialistici²⁹ sia al *dataset* presente nella cartografia web OSM. Ad esempio per delineare la via Appia Traiana sono state usate le descrizioni del percorso e dei centri abitati che il tracciato si

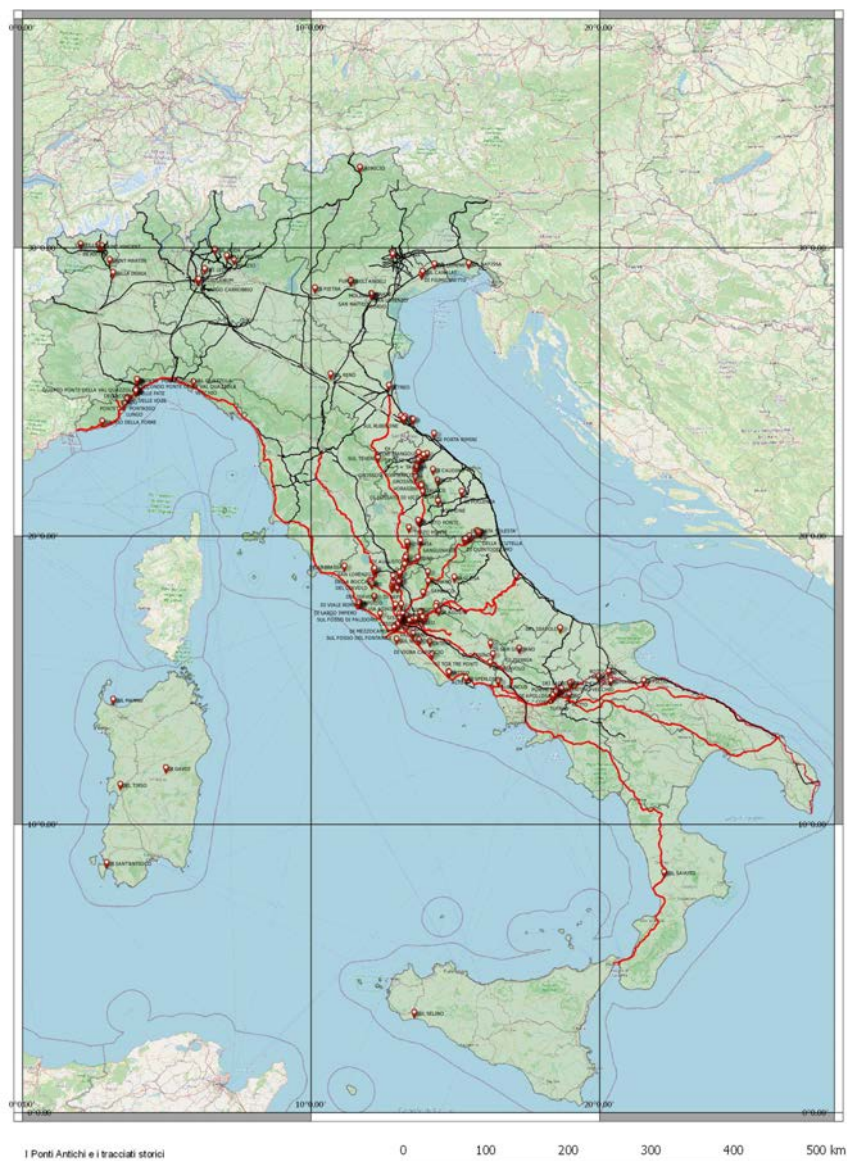


Fig. 8. I ponti antichi e i tracciati storici individuati per approssimazione su base web Open Street Maps (dati mappa © collaboratori di OpenStreetMap).

presume incontrasse fra Benevento e Brindisi. Considerato che una cospicua parte di questi tracciati è stata modificata nel tempo o è andata del tutto persa³⁰, sono state rappresentate nella mappa le sole strade approssimativamente corrispondenti a quelle attuali indicate nelle carte tecniche regionali e web (Fig. 8).

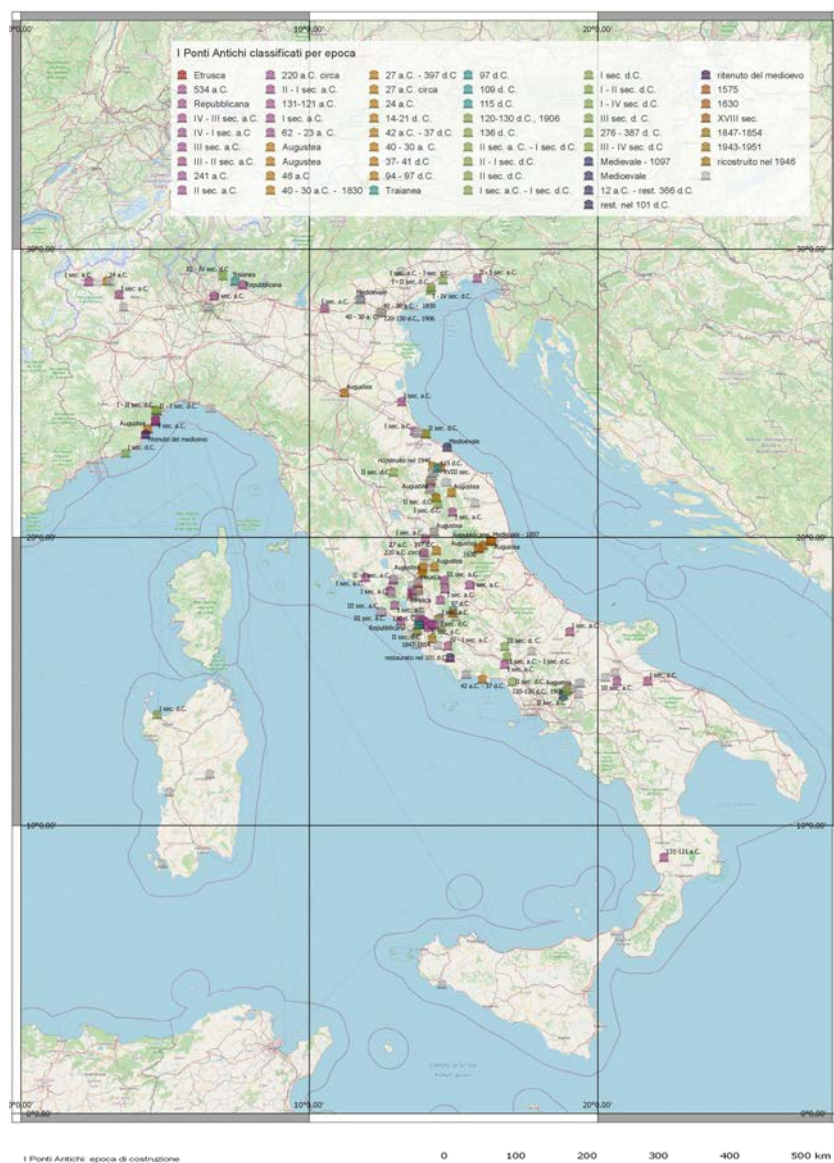


Fig. 9. I ponti antichi per epoca di costruzione, base web Open Street Maps (© collaboratori di OpenStreetMap).

Il periodo storico di costruzione dei ponti antichi, seppure generalmente riferito all'età etrusca e romana, è in realtà molto più ampio in quanto tiene conto anche delle modifiche e trasformazioni dei manufatti e arriva in alcuni casi ai giorni nostri in corrispondenza dei recenti interventi di restauro. È questo il caso, ad



Fig. 10. I ponti antichi per stato di conservazione, base web Google Terrain.

esempio, del ponte Furo sul Retrone a Vicenza, restaurato nel 2014, o del ponte dell'Acquarola sull'Aniene a Tivoli³¹ il cui restauro è iniziato nel 2016 (Fig. 9).

Per i dati dimensionali e lo stato di conservazione si è fatto riferimento ai testi storico-documentari, al lavoro degli scavi condotti

dalle Soprintendenze e alle indagini specialistiche di professionisti del settore, nonché ai sopralluoghi di appassionati della storia e del paesaggio che hanno condiviso i riferimenti topografici e a volte anche le coordinate sul web (Fig. 10).

Per quanto riguarda la classificazione dell'assetto, delle tecniche costruttive e della morfologia dei ponti si è tenuto conto degli studi di topografia storica³² e delle analisi sugli impianti architettonici³³; là dove possibile è stato quindi distinto: l'assetto del ponte rispetto alla strada (obliquo; convergente; ad S slargata, etc.); le tecniche costruttive (*opus quadratum*; *opus caementicium*; apparecchio ciclopico; etc.); la struttura (a schiena d'asino; lineare) (Fig. 11); il numero e la geometria delle campate (archi a tutto sesto, a sesto ribassato, a sesto acuto, etc.) (Fig. 12). Come verifica dell'accuratezza della localizzazione dei ponti rispetto ai dati territoriali CTR, è stata fatta in GIS una rappresentazione in scala 1:5.000 circoscritta all'area del Centro Storico di Roma corrispondente all'Isola Tiberina, dove si trovano i ponti Cestio, Fabricio ed Emilio. Di quest'ultimo ponte in particolare è leggibile la scheda con i dati raccolti (Fig. 13).

7. Conclusioni

Questo studio non può certamente considerarsi esaustivo, tuttavia può indicare una direzione e offrire spunti per un progetto di ricerca sui ponti antichi che potrebbe essere finalizzato anche a una pubblicazione web, dotata di un certo livello di scambio dati con utenti più o meno specializzati per un monitoraggio continuo del patrimonio storico testimoniale sul territorio italiano. In una realtà sempre più in rapida trasformazione, le esperienze di operatori privati in ambito cartografico come Open Street Maps o Google Maps indicano la necessità-opportunità di aprire il processo di mappatura anche ad utenti non specializzati per operare aggiornamenti della cartografia in tempo reale.

La cartografia dunque sta evolvendo in parallelo secondo processi attuati dall'alto (le amministrazioni e gli enti pubblici) e operati dal basso. A tal riguardo va menzionato il ruolo crescente che ricopre in questo contesto il GPS a partire dagli anni Ottanta del secolo scorso. Oggi il semplice utente è in grado di fotografare e georeferenziare un sito archeologico visitato durante un'escursione e inviare la posizione sotto forma di coordinate GPS che vengono acquisite in ambito GIS e restituite su mappa cartografica (su questo principio ad esempio si

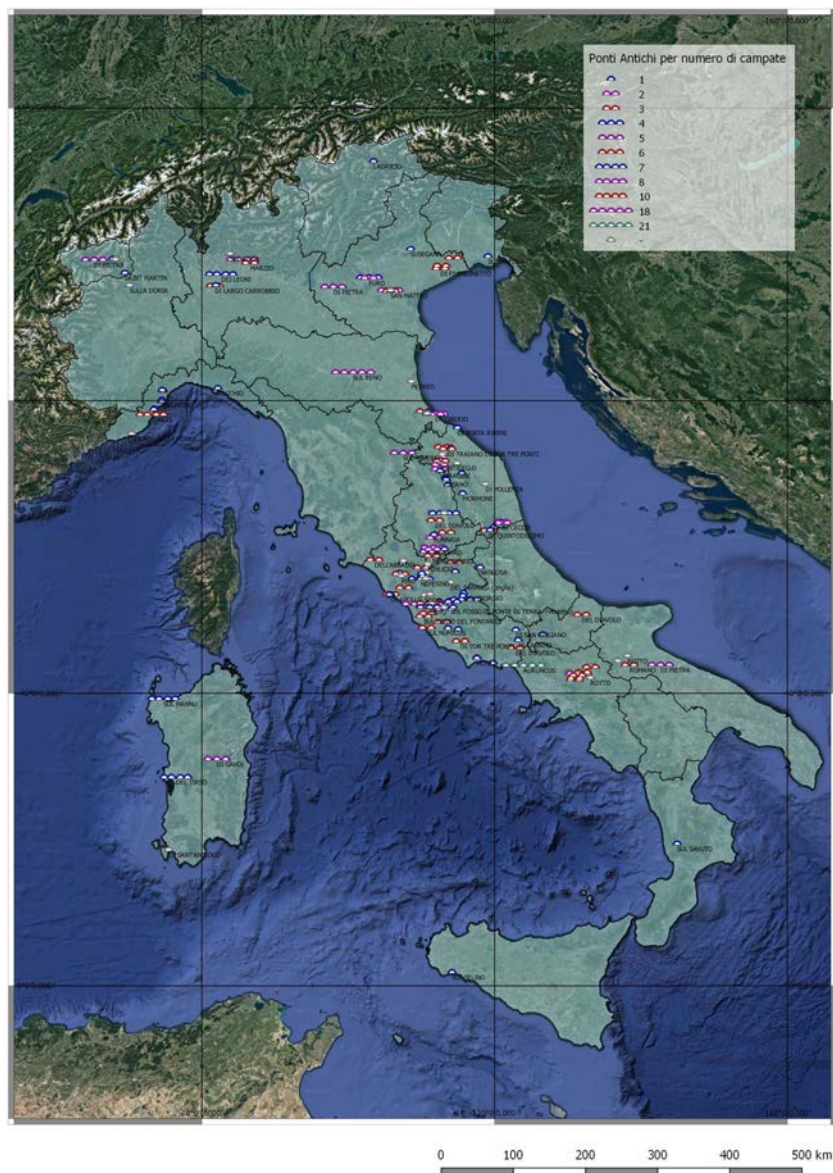


Fig. 11. I ponti antichi classificati per il numero di campate, base web Google satellite.

basa la cartografia web di Open Street Maps). In parallelo le amministrazioni pubbliche stanno utilizzando la tecnologia GPS per mappare rapidamente il territorio; a tal riguardo è interessante il progetto avviato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare basato sulla raccolta dati con tecnica LiDAR³⁴ (*Light Detection and Ran-*



Fig. 12. I Ponti antichi classificati per struttura, base web Stamen Background (© Stamen Design, con licenza Creative Commons Attribution (CC BY 3.0)).

ging o Laser Imaging Detection and Ranging) che consente l'elaborazione di DTM (Digital Terrain Model) e di DSM (Digital Surface Model) aggiornati in scala 1:5.000 e acquisibili in ambiente GIS (Fig. 14).

Un modello così organizzato, costruito con sistemi di tipo GIS *open source* e messo in rete, diventa uno strumento sempre attuale e

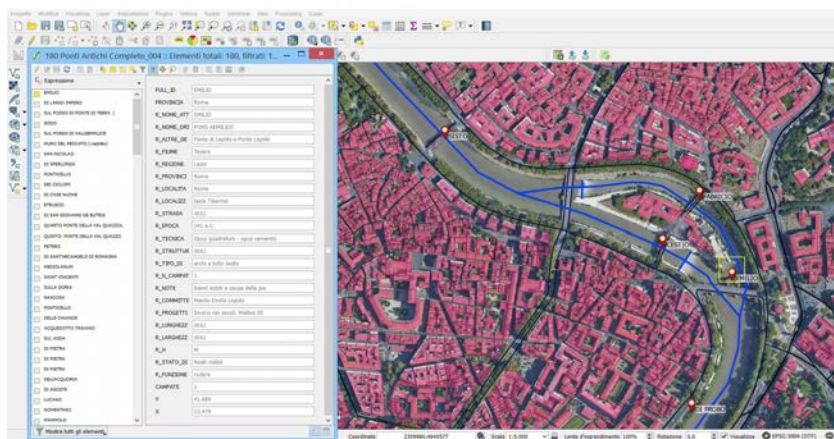


Fig. 13. I ponti antichi: il Ponte Emilio a Roma. La mappa in scala 1:5.000 mostra la sovrapposizione della CTR Lazio agli shape file ricavati da OSM e alla base web Google Satellite, a sinistra la scheda degli attributi del Ponte Emilio selezionato nella mappa.

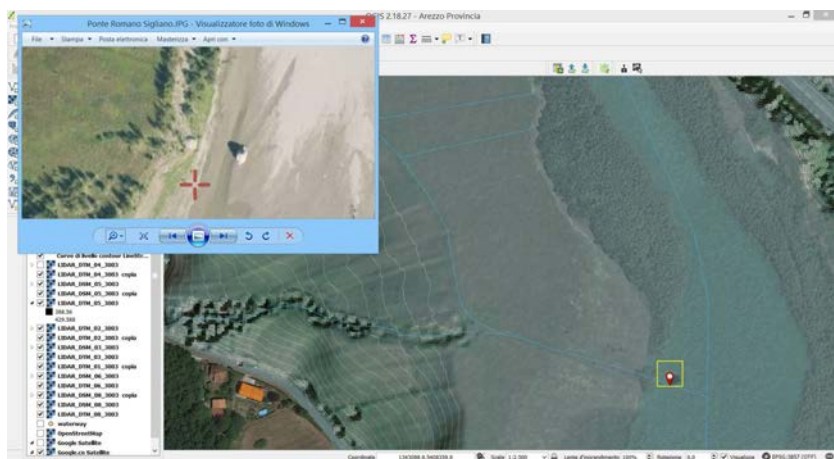


Fig. 14. Il ponte sul Tevere a Stigliano (Arezzo); esempio di DTM e DSM sovrapposti ricavati dai dati LiDAR, base mappa web Google satellite, confronto con mappa web Apple map (cfr. nota 35).

in continua evoluzione sia ai fini della raccolta che della condivisione dei dati. Non si può non tenere conto del grande sviluppo che il GIS ha avuto negli ultimi anni sia nelle applicazioni per i pc e sia soprattutto in quelle per gli smartphone, senza peraltro considerare la presenza ormai massiva sul web delle mappe tematiche GIS, utilizzate sempre più da un numero crescente di società accreditate sul web per veicolare i dati come la meteorologia, l'economia, la demografia, etc.

La ricerca ha riguardato pertanto la costruzione di un modello di simulazione-rappresentazione dell'area indagata con un sistema GIS di tipo *open source* per la messa a punto di indagini conoscitive propedeutiche al Piano di Riqualificazione Generale dei Ponti Antichi in Italia (Beni Culturali). In questa direzione il GIS può fornire un valido supporto alla valutazione e revisione dei programmi e degli interventi sul territorio nonché consentire il monitoraggio delle azioni intraprese per la conservazione del patrimonio storico-archeologico. A sua volta la necessità di rappresentazione del Piano attraverso un database con componenti spaziali potrebbe costituire un ulteriore passo verso la costruenda cartografia digitale nazionale omogenea e *open data*³⁵.

¹ La porzione di superficie terrestre su cui insiste il territorio italiano ha un'estensione complessiva di 302.073 kmq e si estende tra i 35° di latitudine Nord dell'isola di Lampedusa e i 47° di latitudine Nord della Vetta d'Italia (nelle Alpi Aurine) e tra i 6° di longitudine Est della rocca di Chardonnet e i 18° di longitudine Est del Capo di Otranto.

² In Italia, come noto, il Sistema Proiettivo adottato è l'ellissoide internazionale Roma40 che è stato proiettato sul piano dal prof. Boaga utilizzando la proiezione Trasversa di Mercatore (o conforme di Gauss).

³ <www.qgis.org>.

⁴ WMS (Web Map Service), WFS (Web Feature Service), WCS (Web Coverage Service).

⁵ Cfr.: <www.istat.it/it/dati-analisi-e-prodotti/open-data>

⁶ Si ricorda che per ricavare le rappresentazioni cartografiche si utilizzano correntemente le coordinate tridimensionali (geodetiche, geografiche) e le coordinate piane. Le coordinate tridimensionali geodetiche si riferiscono anche a coordinate ellissoidali, si utilizzano per aree di dimensioni contenute e hanno la proprietà di considerare lo schiacciamento della Terra; sono la latitudine e la longitudine geodetiche, con o senza l'altitudine. Un datum geodetico definisce le relazioni delle coordinate geodetiche con la Terra. Le coordinate geodetiche φ , λ e l'altitudine h possono essere trasformate in un sistema cartesiano tridimensionale riferito al centro della Terra.

⁷ A grandi linee, un datum è un insieme di parametri di base che vengono considerati come un riferimento per definire altri parametri. Un datum geodetico descrive la relazione di origine e orientamento degli assi su un sistema di coordinate rispetto alla Terra. Un datum a due dimensioni serve come riferimento per la definizio-

ne di coordinate bidimensionali su una superficie. Tale superficie può essere un ellissoide, una sfera o anche un piano se la regione a cui siamo interessati è relativamente piccola. Un datum a una dimensione o datum verticale è una base per la definizione delle altezze e in generale è in relazione con il livello medio del mare.

⁸ Recepimento al livello nazionale della direttiva INSPIRE (Technical Guidelines Annex I - D2.8.I.1).

⁹ Inizialmente indicato anche dall'IGM in maniera non del tutto corretta come WGS84.

¹⁰ Sistema europeo utilizzato in Italia a scopi cartografici dagli anni Sessanta del Novecento fino al 1996; a questo sistema si riferisce ancora il taglio di gran parte della CTR.

¹¹ <www.geoportale.regione.emilia-romagna.it>.

¹² <www.dati.lazio.it>; <www.umbriageo.regione.umbria.it>.

¹³ Istituto Geografico Militare - Direzione Geodetica - Nota per il corretto utilizzo dei sistemi geodetici di riferimento all'interno del Software GIS aggiornata a febbraio 2019.

¹⁴ <www.igmi.org/it/verto-on-line>.

¹⁵ I grigliati sono di due tipi: il GK1 copre un'area pari a un cerchio di raggio 10 km con centro coincidente con un punto della rete di caposaldi trigonometrici IGM95; il GK2 coincide con l'area rappresentata dalle carte/tavolette IGM della serie 50L, in scala 1:50.000. Questo software trasforma indistintamente coordinate geografiche (latitudine e longitudine) e coordinate piane (nord, est).

¹⁶ La trasformazione più semplice assume che la coordinata "x" del piano sia equivalente a φ , e la coordinata "y" del piano sia equivalente a λ . Il risultato è conosciuto come proiezione di Plate Carrée. Sebbene questa trasformazione sia semplice, comporta significative distorsioni nella posizione delle coordinate e produce aree, gran parte delle distanze e angoli distorti o deformati nel piano.

¹⁷ LAPAINE, USERY 2016.

¹⁸ C'è una grande differenza tra la Web Mercator (creata da Google Maps) e le proiezioni originali di Mercatore (1569): queste ultime venivano e sono utilizzate nella navigazione perché le linee di rotta sono curve lossodromiche (diritte), linee di direzione vera costante, che i naviganti usavano per navigare prima dei GPS; nelle proiezioni Web Mercator invece le linee di rotta non sono lossodromiche. La Web Mercator è una cartografia con datum WGS84 (quindi, ellissoidale), coordinate latitudine/longitudine in direzione est/nord, e usa le equazioni sferiche di Mercatore (dove $R = a$). Questa proiezione è diventata popolare grazie a Google Maps (e non Google Earth). L'ellissoide di riferimento è sempre il WGS84, e il raggio della sfera "R" è uguale al semiasse maggiore "a" dell'ellissoide WGS84. In sintesi la Web Mercator è una proiezione cilindrica; i suoi meridiani sono rette equamente spaziate; i suoi paralleli sono rette non equamente spaziate, ma in modo diverso rispetto alla proiezione conforme di Mercatore; le sue lossodromiche (linee di rotta) non sono rette; non è prospettica; i suoi poli sono all'infinito e soprattutto non è conforme. Ma la Web Mercator è una proiezione che ha fatto il salto dal settore web al settore GIS, che è un altro mondo, prova ne sono i codici EPSG, Esri e FME per la Web Mercator.

¹⁹ L'introduzione dei codici tipo EPSG o Esri e FME per l'identificazione degli SR consente di gestire la conversione delle coordinate tra SR tridimensionali (geotetici e geografici) e tra SR cartografici.

²⁰ La gran parte dei software GIS attinge i SR dalla banca dati EPSG (European Petroleum Survey Group) Geodetic Parameter Dataset1). Questo archivio contiene gran parte dei SR utilizzati nel mondo, oltre ai relativi sistemi proiettati e alle modalità di trasformazione fra sistemi, tuttavia in ambiente GIS in caso di dati riferiti a SR molto diversi fra loro, permane il problema delle distorsioni/deformazioni e/o di errori di rappresentazione delle effettive lunghezze/distanze. Ne consegue quindi che la scelta della cartografia vettoriale per un progetto GIS va fatta anche in base al SR prevalente a cui i dati sono riferiti.

²¹ CISIS (<www.cisis.it>) è un'associazione tra le Regioni e le Province autonome, senza fine di lucro, costituita al fine di garantire un efficace coordinamento degli strumenti informativi, di informazione geografica e statistica, nonché per assicurare il miglior raccordo tra le Regioni e le Province autonome, lo Stato e gli Enti locali.

²² Tale inquadramento non compare in modo esplicito nel DBGT, la cui struttura comprende solo le classi: 00 - Informazioni geodetiche, fotogrammetriche e metainformazione; 01 - Viabilità, mobilità e trasporti; 02 - Immobili ed antropizzazioni; 03 - Gestione viabilità e indirizzi; 04 - Idrografia; 05 - Orografia; 06 - Vegetazione; 07 - Reti tecnologiche; 08 - Località significative e scritte cartografiche; 09 - Ambiti amministrativi; 10 - Aree di pertinenza.

²³ Per *National Core* (NC) si intende il contenuto informativo minimo che le Amministrazioni che producono dati territoriali nell'ambito della propria attività istituzionale devono garantire per i DB Geotopografici, consentendo la realizzazione di un DB omogeneo e a copertura nazionale.

²⁴ Il SR WGS 84 UTM zone 32N (denominato in EPSG: 3262): World Geodetic System 1984 è un ellissoide con primo meridiano coincidente con il meridiano Greenwich. Questo sistema di riferimento è adatto a rappresentazioni a larga scala come nel caso oggetto di studio in cui il territorio indagato è nazionale.

²⁵ Il *dataset* delle CTRN si basa su diverse carte tematiche e in particolare sulle carte tecniche in scala 1:10.000 e 1:5.000. Pertanto le CTRN sono state escluse per costruire una mappa cartografica in scala 1:5.000.000 sia perché presentano un'alta scala di definizione, sia perché presentano livelli informativi (*layer*) e SR eterogenei da regione a regione, rallentando in ambiente GIS l'elaborazione grafica.

²⁶ La verifica operativa è consistita nell'impostare il progetto in QGIS con SR Montemario/Italy zone 2 EPSG: 3004 e abilitare la modalità OTF (*On The Fly*: proiezione al volo). Quindi è stato caricato il quadro di unione dei file vettoriali della Regione Lazio e lo *shape* file ISTAT corrispondente all'Italia suddivisa in regioni (Reg01012019_WGS84), a questo file è stato assegnato il SR del progetto EPSG: 3004: la proiezione al volo mostra i due *shape* file ben allineati. Quindi si è proceduto con un'ulteriore verifica inserendo gli *shape* file dei Municipi del Comune di Roma della CTRN Lazio e della base ISTAT divisa in Comuni. Anche a questi file è stato assegnato il SR di progetto: la proiezione al volo mostra anche questi *shape* file ben allineati.

²⁷ VECCHIETTI 2004.

²⁸ I tracciati storici presi in considerazione sono: Amerina (Roma-Perugia); Annia I (Adria-Aquileia), Appia (Roma-Brindisi), Appia Traiana (Benevento-Otranto); Aurelia (Roma-Luni); Casilina (Roma-Capua); Cassia (Roma-Firenze); Claudia Tiburtina (Corfinio-Pescara); delle Gallie (Aosta); Emilia (Rimini-Aosta); Emilia Scauri (Luni-Genova); Flacca (Terracina-Formia); Flaminia (Roma-Rimini); Giulia Augusta (Tortona-Arles); Labicana (Roma-Labico), Latina (Roma-Capua); Nomentana (Roma-Mentana); Ostiense (Roma-Ostia); Popilia I (Capua-Reggio Calabria), Popilia II (Padova-Rimini); Portuense (Roma-Porto); Postumia (Genova-Aquileia); Prenestina (Roma-Preneste); Salaria (Roma-Ascoli Piceno); Severiana (Ostia Antica-Terracina); Tiberina (tratto Gallese-Viterbo); Tiburtina (Roma-Tivoli); Tiburtina Valeria (Tivoli-Corfinio); Traina calabro (Brindisi-Otranto); Tuscolana (Roma-Tuscolo).

²⁹ DE BENEDETTIS, CAIAZZA 2011.

³⁰ DI ROCCO 2009.

³¹ NIBBY 1942.

³² QUILICI 1995.

³³ GALLIAZZO 2004.

³⁴ Progetti PST-A (Contratto 140), PST-A Estensione 2008 (Contratto 145), MIADRA (Contratto 155) e MIADRA Estensione (Contratto 172) con risoluzione. I prodotti LiDAR associati al reticolo sono DTM, DSM First, DSM Last, Punti XYZ e Intensity. Risoluzione 1:5.000.

³⁵ <www.openstreetmap.org/copyright; www.opendatacommons.org/licenses/odbl>; © Stamen Design, con licenza Creative Commons Attribution (CC BY 3.0); <www.satellites.pro - Apple map; www.google.it/maps - Google LLC>.

Analisi formale, costruttiva e dimensionale dei ponti romani lapidei

Carlo Inglese, Leonardo Paris

Introduzione

Lo studio di un ponte antico, e in particolar modo di un ponte lapideo di epoca romana, interessa molteplici aspetti di natura archeologica, architettonica, storico-documentale, ambientale, strutturale, tecnico-costruttiva, ma anche geologica, idraulica, infrastrutturale, territoriale. I processi di conservazione, restauro e valorizzazione si basano quindi su metodologie di indagine fortemente multidisciplinari nelle quali l'attività di rilievo ed elaborazione dei relativi modelli di rappresentazione costituisce il fondamentale anello di congiunzione.

L'uso integrato delle più moderne tecnologie digitali consente oggi di superare numerose problematiche legate alla specificità dell'oggetto di studio¹. L'uso ricorrente alla modellazione tridimensionale ha ampliato infatti notevolmente il livello e il grado della rappresentazione consentendo una maggiore versatilità nella diffusione e divulgazione in tutti i settori di ricerca correlati².

C'è inoltre un ulteriore ambito di approfondimento che non dovrebbe essere sottovalutato e che può rappresentare un interessante filone di ricerca, quello dell'ausilio delle più moderne tecnologie digitali alla comprensione delle conoscenze tecniche dei Romani e delle contaminazioni indotte dagli apporti delle culture locali nel periodo di massima espansione dell'Impero.

Un elemento che accomuna le numerose opere di ingegneria infrastrutturale disseminate in Italia e più in generale nei territori dell'Impero è quello della loro conformazione, basata essenzialmente su una componente strutturale di piloni e archi a sostegno del piano di attraversamento. Come è facile immaginare tale conformazione è strettamente correlata alle caratteristiche geomorfologiche del sito,

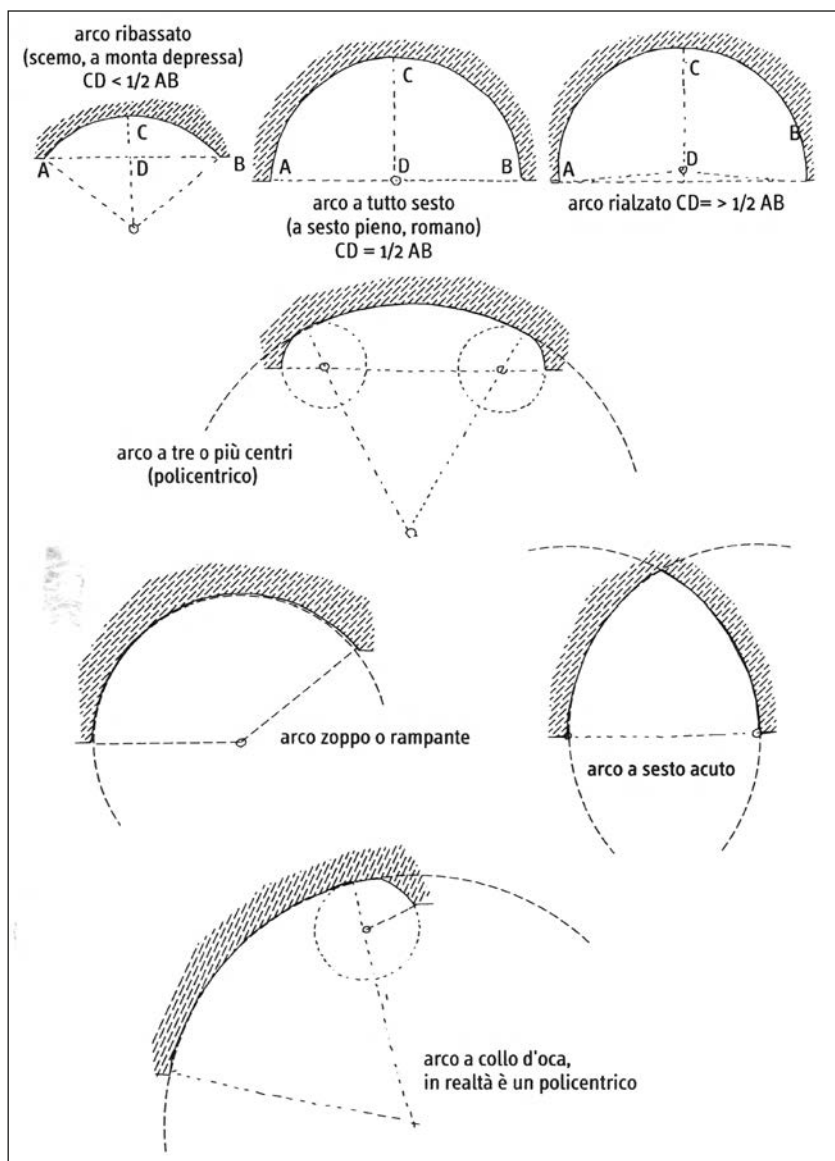


Fig. 1. Classificazione degli archi (da CAIROLI GIULIANI 2018, p. 99).

all'importanza strategica dell'opera strutturale e alle tecniche costruttive che, soprattutto nelle epoche più antiche, hanno riguardato la progressiva sostituzione della tecnologia in legno con quella lapidea.

Dal punto di vista strutturale è largamente diffuso, nella letteratura sull'argomento, il concetto che i ponti lapidei romani sono caratterizzati dall'uso quasi esclusivo dell'arco a tutto sesto, proba-

bilmente perché questa era la forma costruttiva più semplice da realizzare (Fig. 1). Infatti, per un arco di spessore costante, ogni concio (porzione costitutiva dell'arco) in pietra o in mattoni – legati in qualche modo tra loro con cemento pozzolanico – è delimitato da due cerchi concentrici e da due raggi contigui, tutti uscenti da un unico centro, cosicché tutti i conci risultano uguali fra loro³.

Dal punto di vista costruttivo in genere i ponti lapidei erano realizzati con grosse “cassature” in blocchi di pietra; all'interno delle quali venivano inseriti pietrame e *opus caementicium*; il rivestimento esterno era lapideo, generalmente in travertino o marmo (per i ponti urbani), tufo, ardesia o pietra locale (nel caso di alcuni ponti realizzati nelle province romane) (Fig. 2).

Un elemento molto importante era rappresentato dalle fondazioni dei piloni immerse nei corsi d'acqua. Vitruvio nel suo *De Architectura* (V.XII) illustra la realizzazione delle fondazioni immerse⁴.

Un elemento costruttivo, o meglio provvisorio, che rivestiva un ruolo molto delicato per l'intera riuscita dell'opera era rappresentato dalle centine di legno⁵ per la realizzazione delle arcate (Fig. 3). Al di là dell'aspetto puramente costruttivo, dal punto di vista geometrico la centina può essere letta come una curva generatrice, che determina il sesto dell'arco, che scorre lungo due rette direttrici rappresentate dai piani di imposta delle volte delle arcate del ponte, che genera una superficie di traslazione, definibile anche come superficie cilindrica (la volta a botte).

La costruzione della volta richiedeva una centina semicircolare, facilmente costruibile e regolabile in opera dai carpentieri, sulla quale venivano appoggiati in sequenza i singoli conci, nel caso di un arco realizzato in blocchi lapidei⁶. La centina poteva essere appoggiata direttamente a terra, o su una sporgenza in corrispondenza del punto d'imposta della volta; quest'ultima soluzione, utile per risparmiare legno, fu ampiamente adottata dai Romani. Inoltre, sia per motivazioni statiche che per razionalizzare il lavoro e risparmiare materiale, i costruttori montavano le volte in file parallele di conci, in modo che ogni ordine fosse indipendente, e così le centine della volta a botte non erano altro che archi di circonferenza giacenti su piani tra loro paralleli. La stessa centina veniva poi spostata per costruire gli altri archi. Montata la centina, l'arco veniva realizzato con la giustapposizione dei conci l'uno sull'altro a partire dalle due estremità, cioè dalle imposte orizzontali, sino ad arrivare alla posa

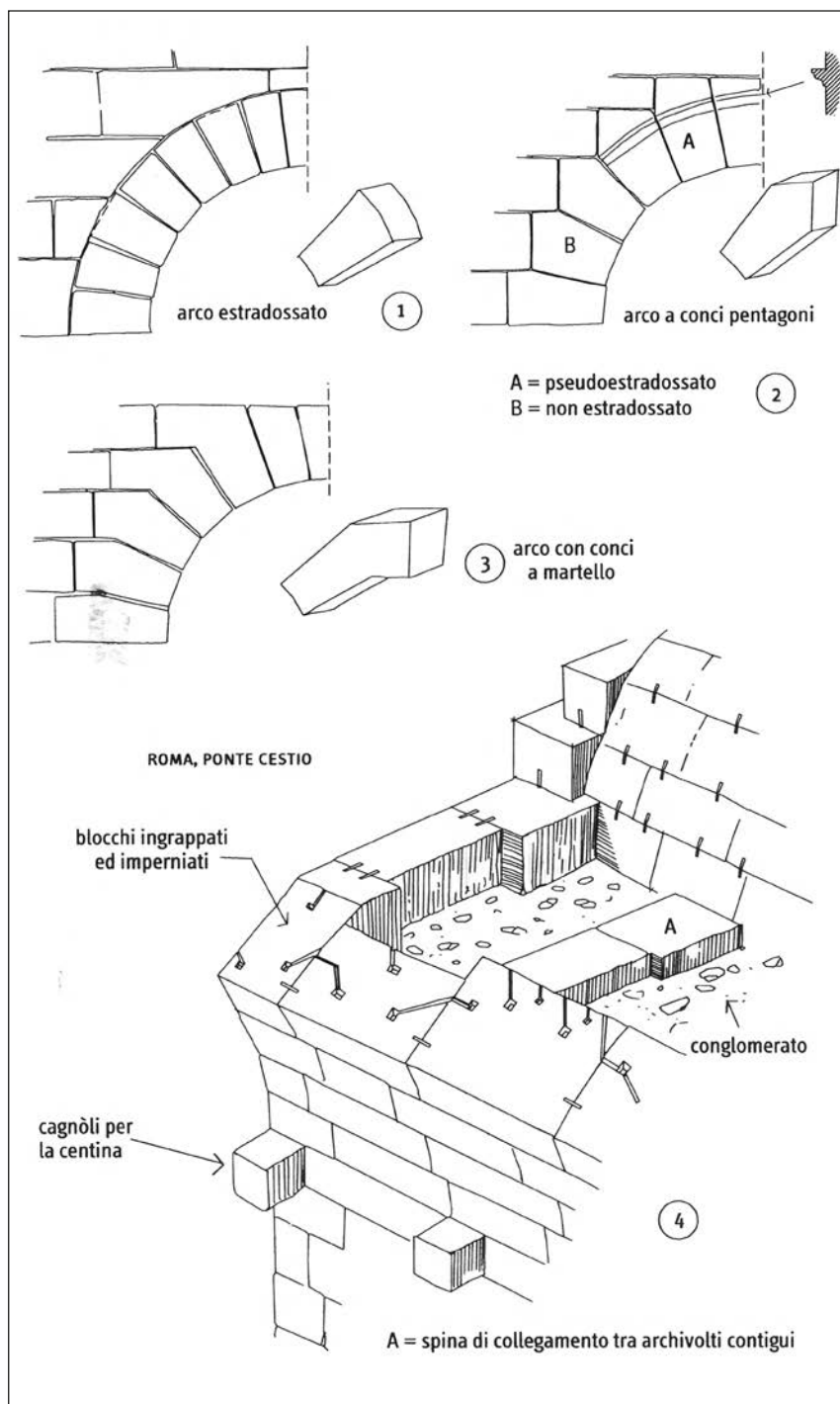


Fig. 2. Archi di conci (da CAIROLI GIULIANI 2018, p. 105).

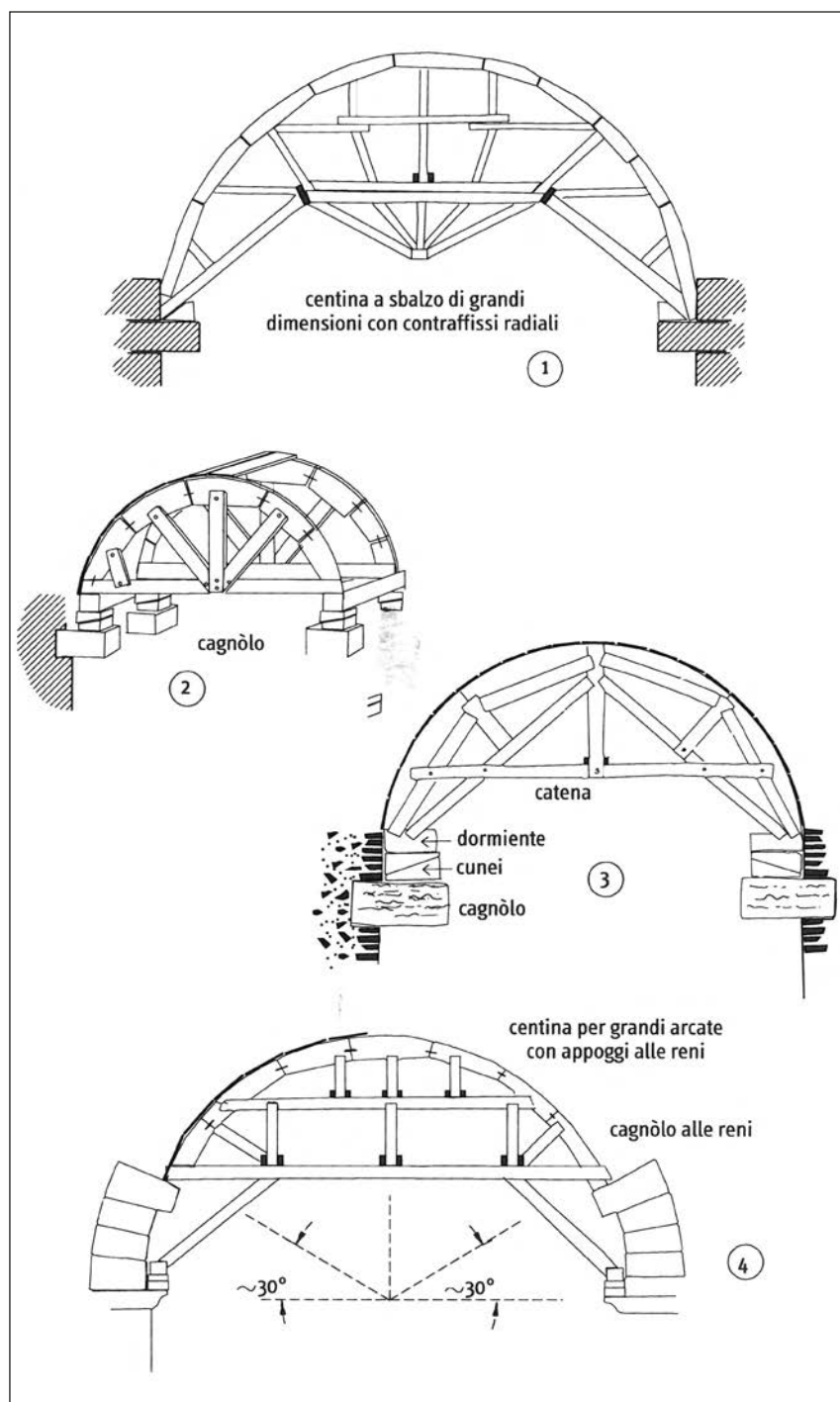


Fig. 3. Armature a sbalzo (da CAIROLI GIULIANI 2018, p. 135).

dell'ultimo concio di sommità, il concio di chiave (o anche semplicemente chiave dell'arco).

Considerando le singole esperienze di studio condotte, si possono effettuare una serie di considerazioni basate su alcune caratteristiche scaturite dall'analisi dei modelli dei ponti studiati.

Due delle tipologie principali nelle quali si possono inserire efficacemente i ponti lapidei romani da noi studiati sono quelle dei ponti urbani e dei ponti extraurbani. I primi collegavano due parti della città separate da un fiume, i secondi invece erano costruzioni realizzate al di fuori delle cinte urbane in corrispondenza di corsi d'acqua ampi o dal flusso impetuoso, per superare i quali non erano sufficienti i guadi. Naturalmente le due categorie avevano caratteristiche molto simili, anche se possono essere riconosciute alcune differenze tecnico costruttive. In primo luogo possiamo affermare che i ponti urbani studiati a Roma hanno dimensioni ridotte, 60-80 m, o medie, 130-135 m, chiaramente dipendenti dalla loro posizione lungo il corso del Tevere e dalla larghezza del fiume nel punto prescelto per l'attraversamento. I ponti extraurbani invece raggiungono, in alcuni casi, lunghezze notevoli come nel caso del ponte spagnolo di Alcántara, di 191 m.

I principali ponti lapidei all'interno di Roma sono, tra quelli oggi non più esistenti, il Ponte Sublicio dell'VIII secolo a.C. (ubicato all'altezza dell'odierna via del Porto), il Ponte di Agrippa del II secolo a.C. (per collegare la riva sinistra del Tevere a Trastevere, all'altezza dell'attuale lungotevere dei Vallati), il Ponte Neroniano o Trionfale risalente al I secolo d.C., il Ponte di Probo o di Teodosio del III secolo d.C.

Tra i ponti giunti a noi profondamente modificati o esistenti in parte, annotiamo il Ponte Emilio (Ponte Rotto) costruito nel 179 a.C. ed edificato in pietra nel 142 a.C., originariamente a 7 campate delle quali l'attuale è l'unica superstite (lunghezza, non accertata, 71,70 m). Il Ponte Elio o Sant'Angelo, costruito nel 130-134 d.C. a 5 arcate rivestito in travertino e peperino (attualmente lunghezza 130-135 m, larghezza 9 m).

Infine, tra i ponti giunti ai nostri giorni, si annoverano: Ponte Milvio, costruito nel 110-109 a.C. costituito da 6 campate di cui quelle centrali maggiori di quelle laterali, i cui 5 piloni sono provvisti di frangiflutti a base triangolare (lunghezza 132-136 m, larghezza 8-15,50 m); Ponte Fabricio, costruito nel 62 a.C., che collega l'Isola Tiberina con la sponda sinistra del Tevere, a 2 arcate, originaria-

mente in blocchi di travertino (lunghezza 58-62 m, larghezza 5,60 m); Ponte Cestio, costruito nel 46-44 a.C., costituito da 3 arcate con arco centrale maggiore, in blocchi di travertino (lunghezza 80,40 m, larghezza 8,20 m).

Tra i ponti extraurbani uno dei più imponenti, giunto a noi quasi intatto, è il ponte spagnolo della omonima cittadina di Alcántara situato nella provincia di Cáceres in Estremadura al confine con il Portogallo, realizzato nel 104-106 d.C. per superare l'imponente fiume *Tagus* l'odierno Tago, il maggiore dei fiumi spagnoli. Il ponte è caratterizzato da una dimensione notevole, circa 191 m di lunghezza per un'altezza del piano viario dalla quota dell'acqua di circa 50 m. La struttura realizzata è basata su 6 arcate di dimensioni differenti con 2 arcate maggiori al centro del fiume (larghezza circa 30 m), 2 medie (larghezza circa 26 m) e 2 minori (larghezza circa 15 m) ai lati in corrispondenza con le strade, secondo una struttura notevolmente diffusa in questo tipo di strutture. I piloni di imposta delle arcate sono realizzati a quote differenti ciò chiaramente per accompagnare il declinare ripido delle sponde, consentendo di mantenere il piano viario a una unica quota, senza dover ricorrere a conformazioni "a schiena d'asino" (nel versante nord-ovest, per esempio, in meno di 50 m si ha un dislivello di quota pari a circa 30 m).

Il nostro studio ci ha consentito inoltre, basandosi sull'analisi delle caratteristiche geometriche degli archi, di ampliare la classica classificazione suddivisa in archi a tutto sesto (archi descritti da una semicirconferenza regolare) e a sesto ribassato, con un'altra categoria nella quale far rientrare i ponti ad arco policentrico.

Quanto detto rafforza sempre più la considerazione che la civiltà romana ha raggiunto delle grandi conoscenze nell'ambito dell'ingegneria idraulica.

Si può ritenere in particolare che i Romani avessero messo a punto un sistema con un preciso ritmo nella successione delle arcate, con archi e pile più grandi al centro, dove la corrente assumeva maggiori velocità, e più piccoli ai lati. Tale conformazione di archi, per così dire, degradanti verso le estremità è una delle caratteristiche precipue di queste strutture antiche.

Un'altra considerazione riguarda l'aspetto dell'economia della fase di cantiere e in particolare la ripetitività delle arcate che, pur se spesso con ritmi differenti, è stata osservata nella totalità dei ponti analizzati. Nell'ottica di ottimizzare le lavorazioni nel cantiere, e

dunque i costi, si ricorreva, compatibilmente con le necessità di ciascuna singola località, a uno stesso valore della luce delle arcate, o comunque a valori ripetibili, in modo da poter reimpiegare parte delle opere provvisorie di centinatura.

Proprio questo particolare, unitamente alla qualità di legname di cui ci si poteva approvvigionare, spesso era alla base della morfologia del ponte e della dimensione, numero e alternanza delle arcate costituenti, o comunque influenzava fortemente questi elementi.

Ponti con arcate a tutto sesto

Questa tipologia consentiva di superare una grande distanza tra le sponde di un fiume ma, per mantenere le imposte delle arcate all'altezza delle sponde, si aveva la necessità di alzare molto il piano di calpestio. Un altro accorgimento fu quello di progettare archi di luce sempre maggiore, con un conseguente minore numero di piloni disposti nel fiume che necessitavano, tuttavia, di un'altezza molto elevata (Ponte di Alcántara). Ciò avveniva anche quando le sponde del fiume declinavano verso il ponte da un livello più alto, e le arcate, dunque, si trovavano a una quota più bassa (Ponte di Augusto a Narni).

Il ridotto numero di piloni o la loro consistente altezza spesso mettevano in crisi l'intera struttura a causa dell'azione delle acque; una soluzione per limitare la spinta della corrente fu quella dell'inserimento nei piloni di archi minori, che garantivano lo sfogo della piena (Ponte Fabricio). La derivazione tecnica di questo elemento è da ricercare negli acquedotti romani, nei quali il canale di scorrimento dell'acqua doveva trovarsi a una quota molto elevata per garantire un piano costantemente degradante per il trasporto su distanze enormi, e quindi occorre la realizzazione di piloni di altezza piuttosto elevata (cfr. Acquedotto di Segovia in Spagna: seconda metà I secolo d.C. - primi del II d.C., Vespasiano o Nerva; Pont du Gard in Francia: 17 a.C., costruito da Agrippa sotto l'imperatore Augusto).

Nel gruppo dei ponti con arcate a tutto sesto, tra gli esempi da noi studiati, possiamo comprendere il Ponte Emilio a Roma, il Ponte di Augusto a Narni e il Ponte di Alcántara.

Ponti con archi ribassati

In questa tipologia il ribassamento degli archi consentiva di mantenere il piano di calpestio molto più basso, senza doversi innalzare troppo rispetto alle rive; ciò però esponeva maggiormente il

ponte, o meglio il piano di calpestio, alla forza delle acque, venendo spesso sommerso da queste, e in molti casi distrutto dall'impeto del fiume (Ponte di Rieti, Ponte di Alconetar). Le sponde e il ponte si trovavano dunque alla stessa quota (o simile); il ponte aveva così un andamento più lineare e piano.

L'impiego di archi a sesto ribassato consentiva dunque il superamento di uno dei problemi posti dalla tradizionale tecnica romana dell'arcata a tutto sesto ripetuta – le ripide rampe di accesso –, ponendone tuttavia un altro, forse ben maggiore, quello dell'ostruzione del letto del fiume in caso di crollo in caso di piena del un gran numero di pile.

Tra i ponti con archi a sesto ribassato possiamo annoverare il Ponte di Alconetar e, seppur in maniera non del tutto evidente, il Ponte Fabricio a Roma nel quale il piano di imposta degli archi a tutto sesto (con un unico centro) è rintracciabile sensibilmente più in basso (circa 2 m) rispetto ai piloni da cui si elevano.

Un particolare tipo di ponte ad archi ribassati è quello ad archi policentrici, il cui sesto è definito da archi con differenti curvature a centri disposti su piani di imposta diversi (Ponte di Rieti).

Dimensionamento metrico, geometrico, proporzionale

Basandoci sui modelli bidimensionali ottenuti, generalmente, dai modelli numerici a nuvole di punti o a superfici mesh, una prima lettura dei dati, in una comparazione metrica – che utilizza come unità di misura il piede romano, 0,296 m –, ci consente di ricondurre i ponti studiati a tre categorie che si presentano ricorrenti (Tabella 1): ponti maggiori, caratterizzati da una lunghezza totale superiore ai 150 m (a partire quindi da 500 piedi circa); ponti medi, con lunghezze comprese tra i 150 e i 100 m (506 e 337 piedi); ponti minori, con lunghezze inferiori ai 70 m (236 piedi circa).

Tra i maggiori trova posto sicuramente il Ponte di Alcántara, formato da 6 arcate a tutto sesto, di lunghezza totale pari a circa 191 m (645 piedi) e larghezza di 6,90 (23,3 piedi). Il Ponte di Alconetar, malgrado sia ridotto a poco più di un rudere con solo una prima parte delle arcate ancora esistenti, dopo le note vicende storiche e lo smontaggio dal sito originario alla posizione attuale, è sicuramente tra i ponti più grandi a noi noti. Originariamente costituito da 16 arcate a sesto ribassato, per una lunghezza presumibile di circa 300 m (1.013 piedi), si presenta oggi con 6 arcate

ponete	categoria	numero arcate	lunghezza	larghezza	ritmo arcate	sesto
Alcántara	maggiore	6	191,42 m 646,7 p	6,90 m 23,3 p	ABCCBA	tutto sesto
Alconetar	maggiore	(16 originarie) 6 (residue)	95,80 m 323 p	6,80 m 23 p		ribassato
Emilio	medio	6	134,21 m 453,40 p	8,40 m 28,37 p	ABCCBA	tutto sesto
Augusto a Narni	medio	3	89,13 m 301,10 p	8 m 27 p	ABA	tutto sesto
		4	114,80 m 387,8 p	8 m 27 p	ABAC	tutto sesto
Fabricio	minore	2 (+ 3 archi minori)	62,97 m 212,73 p	6,30 m 21,28 p	AA	tutto sesto
Rieti	minore		38,90 m 131,40 p	6,20 m 20,94 p	ABA	ribassato

Fig. 4. *Tabella comparativa delle principali caratteristiche dei ponti.*

superstiti di lunghezza pari a 95,80 m (323 piedi) e una larghezza di 6,80 m (23 piedi).

Tra i ponti medi, così come riscontrato nel nostro studio, possiamo ascrivere il Ponte Emilio a Roma, con le sue 6 arcate a tutto sesto, per una lunghezza di circa 134,21 m (453,4 piedi) e una larghezza di 8,40 m (28,37 piedi). Rientra in questa categoria anche il Ponte di Augusto a Narni, con le sue 3 arcate (se consideriamo una delle due ipotesi ricostruttive di Maria Laura Rossi⁷) pari a una lunghezza totale di 89,13 m (301,10 piedi) e una larghezza di 8 m (27 piedi); questo ponte rientrerebbe in tale categoria anche considerando l'alternativa ipotesi ricostruttiva proposta dalla studiosa che lo vede costituito da 4 arcate con una lunghezza totale di 114,80 m (387,8 piedi) e larghezza uguale alla precedente di 8 m (27 piedi).

Il Ponte Fabricio a Roma, 2 arcate a tutto sesto (e i 3 archetti minori per lo sfogo di piena), rientra, invece, nella categoria dei ponti minori con 62,97 m (212,73 piedi) di lunghezza e una larghezza di 6,30 m (21,28 piedi).

Malgrado le difficili ipotesi ricostruttive, basate sull'unico arco superstite presumibilmente a sesto ribassato dei 3 originari, il ponte di Rieti è sicuramente da considerare nella categoria dei ponti minori, con la sua lunghezza presunta di circa 39 m (131 piedi) e una larghezza di 6,20 m (20,94 piedi) (Fig. 4).

A questa lettura metrica di carattere generale se ne può affiancare un'altra basata sulle dimensioni delle arcate dei ponti analizzati.

Anche in questo caso abbiamo distinto tre categorie di arcate: grandi, con diametro compreso tra i 27 m e gli oltre 30 m (92-100 piedi e oltre); medie, con diametro compreso tra i 19 m e i 26 m

circa (da 64 a 88 piedi); piccole, dai 13 m ai 17 m circa (tra 44 e 57 piedi).

Tra le arcate grandi possiamo comprendere le 2 arcate centrali del Ponte di Alcántara pari a circa 27-28 m, e quella centrale di Narni di quasi 31 m; nelle medie riconosciamo le due del Ponte Fabricio di circa 25-26 m, le 2 di Alcántara di circa 22-23 m, e le 2 di Narni di circa 19,55 m.; nelle arcate piccole, infine, riconosciamo le 2 laterali di Alcántara di 13,50 m, quella di Narni di 15,73 m, quella ipotizzata di Rieti di circa 13,60 m; in conclusione tutte e 6 le arcate del Ponte Emilio, uguali a coppie di due, con diametri rispettivamente di 13,26 m, 15,10 m e 16,60 m.

In questa analisi le arcate vengono misurate, naturalmente, sul piano di imposta dell'arco corrispondente, geometricamente, al diametro della circonferenza che lo inscritte e costruttivamente alla sommità dei piloni della struttura portante. Da un punto di vista tecnico costruttivo questo piano di imposta non è sempre coincidente con il piano su cui si appoggiano le centine, le opere provvisorie per la formazione dell'arco, in quanto spesso si ravvisano delle cornici, costruite immediatamente al di sotto dei piani di imposta geometrici, per il sostegno delle centine stesse.

Quanto detto porta alla considerazione che un ponte definito minore da un punto di vista dimensionale non corrisponde necessariamente a una maggiore facilità di esecuzione, in quanto un ponte minore può essere costituito da archi singolarmente di grandi dimensioni.

Un'ultima interessante valutazione può essere tratta dall'osservazione del ritmo di successione delle arcate nei vari ponti, con le relative motivazioni geometrico proporzionali, a loro volta intimamente connesse con quelle tecnico costruttive.

In tale ottica la successione più impiegata è quella solitamente definita dal ritmo ABCCBA (Alcántara, Emilio) che rende la lettura geometrica del ponte, dal punto di vista estetico, molto armoniosa. Dal punto di vista costruttivo possiamo fare due riflessioni: da una parte questo ritmo viene impiegato per superare rive molto scoscese come nel caso di Alcántara, con un progressivo rimpicciolimento degli archi dal centro verso gli approdi sulla terraferma; spesso, tuttavia, lo si ritrova laddove si tenta di mantenere un ritmo cadenzato, dal punto di vista formale, di una infilata di archi molto simili, come nel caso della successione del Ponte Emilio (le arcate come visto hanno una variazione dimensionale tra archi contigui di circa 1,50 m).

ponte	numero arcate	arcate	larghezza	pie di	ritmo arcate	sesto
Alcántara	6	2 grandi 2 medie 2 piccole	27-28 m 22-23 m 13,5 m	92-96 p 76-78 p 45 p	ABCCBA	tutto sesto
Alconetar	(16 originarie) 6 (residue)					ribassato
Emilio	6	6 piccole	13,26 m 15,10 m 16,60 m	44,8 p 51 p 56 p	ABCCBA	tutto sesto
Augusto a Narni	3	1 grande 2 medie	30,83 m 19,55 m	104 p 66 p	ABA	tutto sesto
	4	1 grande 2 medie 1 piccola	30,83 m 19,55 m 15,73 m	104 p 66 p 53 p	ABAC	tutto sesto
Fabrizio	2	2 medie	25-26 m	84-88 p	AA	tutto sesto
Rieti	(3 originarie) 1 (residua)	1 piccola	13,60 m	46 p	ABA	ribassato

Fig. 5. Tabella comparativa delle caratteristiche delle arcate.

Un'altra successione impiegata è ABA, in genere utilizzata in ponti realizzati su un numero limitato di arcate, caratterizzati da una centrale maggiore, che in genere supera quasi totalmente il letto del fiume, e due, proporzionalmente, più piccole sui lati che colmano la distanza con le rive (Fig. 5).

Conclusioni

L'analisi e l'interpretazione geometrico costruttiva di un manufatto storico rivestono una notevole importanza nel processo di conoscenza perché consentono di evidenziare aspetti specifici sul ruolo e sul significato del progetto. In questo senso il progetto assume, al pari della sua realizzazione, la valenza di vero e proprio prodotto culturale. Nel caso specifico dei ponti romani in pietra, in tutti i casi oggetto di studio si è potuto verificare come il progetto, fondato su una efficace combinazione della triade vitruviana di *utilitas*, *firmitas* e *venustas*, rappresenti la massima espressione di quella sintesi di arte e tecnica che ha caratterizzato tutta l'architettura romana.

L'arco, di cui i Romani sono stati i massimi estensori in architettura e ingegneria, diventa l'elemento geometrico fondamentale dell'intera composizione. Nella realizzazione dei grandi ponti in pietra, i rigidi vincoli geometrici dell'arco a tutto sesto – che, come abbiamo visto, determinano uno stretto rapporto tra campata, piano di imposta e piano di attraversamento – lasciano spesso spazio a soluzioni formali

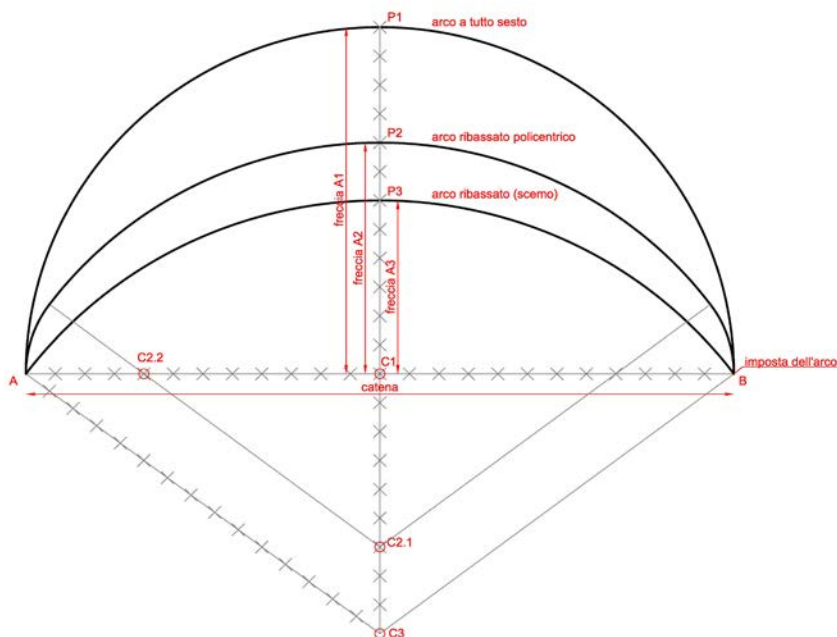


Fig. 6. Analisi geometriche di tre possibili configurazioni di archi: a tutto sesto, ribassato policentrico, ribassato semplice (scemo). I tre archi, impostati sulla stessa catena (AB), hanno differenti frecce (e quindi punti di colmo P1, P2, P3). Nell'arco a tutto sesto la freccia è pari a metà della catena, nelle altre configurazioni il rapporto è variabile ($< AB/2$). Nell'arco a tutto sesto il centro (C1) appartiene alla catena (AB), in quello ribassato semplice (scemo) il centro (C3) è al di sotto. L'arco ribassato policentrico (semiovale) ha generalmente tre centri: C2.1 al di sotto della catena e i due (C2.2., simmetrici rispetto all'asse verticale) che giacciono su di essa. La conformazione dell'arco ribassato policentrico (e quindi anche la sua freccia) può variare sensibilmente in funzione della posizione dei suoi centri. Le tre configurazioni riportate in figura si basano su una ipotetica correlazione modulare (catena di 24 moduli) tra i diversi centri e le corrispondenti frecce. Da un punto di vista progettuale questo approccio modulare (tradotto in piedi romani) consente di avere un maggiore controllo durante la fase di costruzione soprattutto in quei cantieri caratterizzati da condizioni orografiche complesse (elaborazione di Leonardo Paris).

alternative basate sulla versatilità geometrica dell'arco ribassato. Spesso in questi casi è più difficile riuscire a identificare tramite il rilievo la reale matrice geometrica del progetto, considerata la forte caratteristica archeologica di molti resti. Applicando però un metodo rigoroso di interpretazione geometrico-formale-proporzionale è però possibile riuscire a formulare delle ipotesi attendibili anche in quei casi in cui i resti attuali sono molto frammentati (Fig. 6).

¹ Per approfondimenti cfr. infra “Rilievo e modellazione digitale: acquisizione, elaborazione, interpretazione.” a cura degli stessi autori.

² Per approfondimenti cfr. infra: “ Fonti iconografiche per lo studio dei ponti di Roma: il Ponte Emilio e il Ponte Fabricio” di Paola Quattrini e Monica Filippa sul ruolo ed il significato dell'iconografia nelle immagini storico-archivistiche; “Rappresentazione multimediale e interattiva per i ponti romani” di Adriana Caldarone e Tommaso Empler, per gli aspetti legati alla Comunicazione Multimediale dei Beni Culturali; “La raccolta dati in ambiente QGIS per un modello territoriale nazionale dei ponti antichi” di Francesca Pierdominici, per gli aspetti legati alla elaborazione e gestione di piattaforme Gis a scala territoriale ed urbana.

³ Sui sistemi spingenti nell'antichità e sugli archi in particolare si veda CAIROLI GIULIANI 1997, pp. 71-83.

⁴ Si costruisce una cassaforma con funzione di diga con pile di assi di quercia tenuti insieme da catene o assi trasversali che vengono saldamente ancorate al fondo. Quindi si pulisce e si livella quella parte di fondale che rimane internamente alla cassaforma, e si riempie lo spazio interno fin sopra il livello dell'acqua con una malta realizzata con due parti di pozzolana e una di calce mescolate con acqua e pietrame. Se non si può reperire la pozzolana, allora occorre realizzare una cassaforma a doppia parete, avendo cura di collegare saldamente le due pareti. L'intercapedine interna viene riempita con alghe e argilla ben pressate, si ancora la cassaforma al fondo e la si vuota dell'acqua utilizzando pompe a vite o a ruote ad acqua e si procede quindi utilizzando normale sabbia al posto della pozzolana.

⁵ Sulle centine si veda CAIROLI GIULIANI 1997, pp. 98-104.

⁶ Sulle volte nell'edilizia dell'antichità si veda ivi, pp. 88-98.

⁷ Cfr. in questo volume il capitolo “Il Ponte di Augusto a Narni” di Maria Laura Rossi.

SECONDA PARTE

Ponte Emilio a Roma

Giulia Umana

Ponte Emilio, detto Rotto, rappresenta un grande esempio di innovazione nell'ambito della costruzione dei ponti: costituisce il primo ponte lapideo di Roma. Esso garantiva infatti l'attraversamento di un fiume veemente quale era il Tevere, per la prima volta, attraverso un susseguirsi di archi e pile in muratura, dopo secoli di ponti di barche, guadi e ponti in legno.

Lo sviluppo tecnologico protagonista dell'era contemporanea certamente influenza le metodologie di ricerca concernenti tutto ciò che attinge alla storia, all'arte e alla cultura. Nel caso studio del Ponte Rotto, il rilievo digitale integrato, unito a metodi della disciplina della fotogrammetria, ha reso possibile l'elaborazione di modelli virtuali aventi precise coordinate spaziali e costituenti l'*incipit* per lo studio del manufatto (Fig. 1). Le tecnologie di cui oggi si dispone per questo tipo di ricerche costituiscono un valido supporto allo studio del caso ma, comunque, il punto di partenza deve essere rappresentato dalla profonda analisi degli avvenimenti storici, dalla ricerca iconografica e archivistica. Questo aspetto è funzionale all'approccio olistico con il quale una testimonianza storica come quella del Ponte Rotto necessita di essere studiata per la sua piena conoscenza.

Molteplici sono i fronti indagati: dall'analisi geometrico-costruttiva e degli aspetti decorativi dell'arco superstite all'individuazione di moduli e rapporti proporzionali e di possibili scenari di ricostruzione relativamente alla conformazione del ponte prima in epoca moderna, poi in quella rinascimentale e, in ultima battuta, nel periodo romano. Vale la pena sottolineare che la costruzione dei muraglioni del Tevere, iniziata a partire dalla seconda metà dell'Ottocento, ha comportato una sensibile traslazione del letto del fiume; se non si



Fig. 1. Ponte Rotto durante le riprese scanner laser (foto di Leonardo Paris).

tiene conto di questo aspetto, osservando oggi la posizione di ciò che rimane del Ponte Rotto ogni tentativo di apparente ricostruzione risulterebbe errato. Infatti, «L'arcata superstite, che si pone oggi proprio al centro del Tevere, con la costruzione dei Muraglioni d'argine non dà neppure l'idea della posizione originaria e del ritmo delle arcate che superavano anticamente il fiume»¹.

1. Cronosintesi degli avvenimenti storici

Ciò che caratterizza la storia del Ponte Emilio sono i numerosi eventi di parziale distruzione e successivi rifacimenti avvenuti nel corso dei secoli, motivo per il quale il ponte fu denominato “rotto”. Come narra Tito Livio², tra il 181 a.C. e il 179 a.C. i censori M. Emilio Lepido e M. Fulvio Nobiliore gettarono nel Tevere i piloni in pietra come robusto sostegno di un impalcato ligneo probabilmente trascinato via, poco dopo, da un'inondazione del fiume³. Nel 142 a.C. i censori Scipione Africano e L. Mummio completarono la costruzione dell'opera avveniristica realizzando volte lapidee.

Un ponte interamente in muratura sorgeva così subito a valle dell'Isola Tiberina e, verosimilmente, in un preciso punto rappresentato dall'unione di due importanti assi viari: la via *Aurelia Vetus*, oggi via della Lungaretta, di cui il ponte sembrava essere il normale proseguimento verso l'area del Foro Boario, e la via *Campana Portuensis*, che partiva dal Mar Tirreno. Ponte Emilio sostituiva l'esile ligneo

Ponte Sublicio e, come è possibile ancora oggi riscontrare da ciò che rimane, mostrava una carreggiata molto ampia per l'epoca, a testimonianza dell'intenso traffico commerciale che doveva sostenere per favorire gli scambi tra il mondo latino e quello etrusco, stanziati sulle rive opposte del Tevere. Si ritiene possibile l'ipotesi di un intervento di restauro, o di un completo rifacimento, operato da Augusto intorno al 12 a.C., sebbene ciò non sia documentato nelle *Res Gestae*.

I fatti avvenuti sino all'epoca medievale non sono stati dettagliatamente documentati. Sappiamo che nel corso dei secoli il Ponte Emilio fu abbellito negli elementi decorativi e più volte restaurato, soprattutto in seguito agli eventi di piena che si facevano sempre più violenti e numerosi. Molteplici furono gli appellativi assunti, tra i quali: *Pons Lapideus* - ponte lapideo, ovvero in pietra, *Pons Maior* - Ponte Maggiore, per via delle sue grandi dimensioni, *Pons Senatorum* - Ponte Senatorio, forse per un restauro eseguito dai senatori, *Pons Sanctae Mariae* - Ponte di Santa Maria.

Il XVI secolo fu, per il Ponte Emilio, denso di devastanti avvenimenti. Nel 1548 due archi e un pilone verso la sponda destra del fiume (lato Trastevere) erano danneggiati, tanto che Paolo III commissionò a Michelangelo i lavori di ripristino di dette parti. Egli acquistò materiali da costruzione, legno e travertino, e iniziò, probabilmente, a intervenire sulla fondazione. Poco dopo però, sia perché Michelangelo era ritenuto troppo anziano per continuare a dirigere i lavori (aveva 73 anni), sia perché a Paolo III seguì Giulio III, l'incarico fu affidato, nel 1551, a Giovanni Lippi detto Nanni di Baccio Bigio. Si dice che Mastro Nanni, che concluse i lavori in una manciata di mesi, abbia indebolito notevolmente il ponte asportando materiali per poterli rivendere; questo massiccio indebolimento fu subito notato da Michelangelo che, durante una passeggiata a cavallo sul ponte insieme a Vasari, esclamò: «Giorgio, questo ponte ci triema sotto; sollecitiamo il cavalcare, che non rovini in mentre ci sian su»⁴. Ed infatti la piena del 1557 distrusse proprio le stesse arcate e il pilone dove, appena un lustro prima, era intervenuto Mastro Nanni.

Non molto tempo dopo fu deciso il restauro del ponte, affidando l'opera a Matteo Bartolani da Città di Castello, il quale concluse i lavori nel 1575, in occasione del Giubileo. L'architetto realizzò le volte mancanti in mattoni, rivestì il ponte in travertino, sagomò la pila con uno sperone tagliacque gradonato e aggiunse alcuni elementi decorativi, come i dragoni e gli stemmi del papa Gregorio

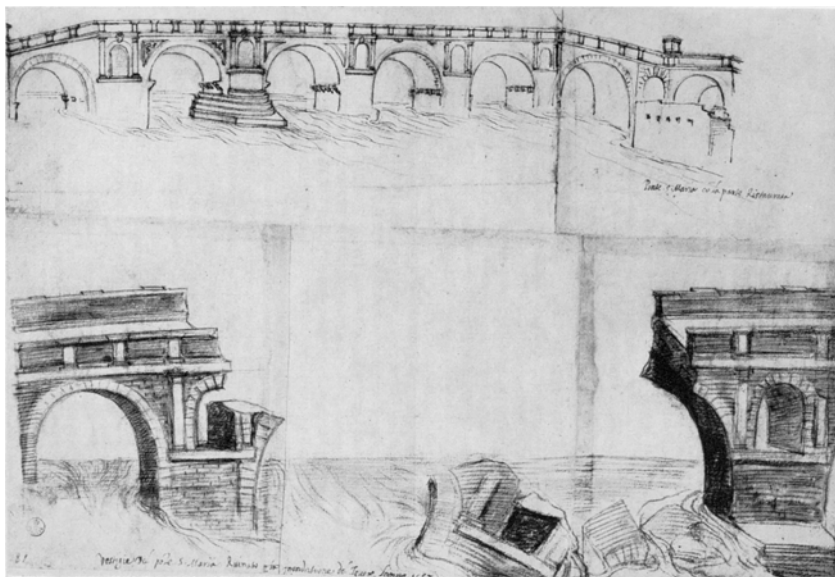


Fig. 2. Il crollo del Ponte Emilio nel 1557 e il successivo restauro di Matteo da Castello (Giovanni Antonio Dosio, disegno del Ponte Emilio, 1580 circa; su gentile concessione di Bruno Leoni, dal sito <<http://www.isolatiberina>>).



Fig. 3. Il crollo del Ponte Emilio del 1598. Carlo Fontana, “Prospetto delli tre archi restati in piedi del Ponte S. Maria anticamente Senatorio”, immagine tratta dall’opera di G. C. Vespignani *Discorso di Monsignor Gio: Carlo Vespignani, sopra la facile riuscita di restaurare il Ponte Senatorio, hoggi detto Ponte Rotto*, 1962. Su concessione del MIBACT. Biblioteca Casanatense).

XIII (nato Ugo Boncompagni) che aveva voluto il restauro. Gli esiti del crollo del 1557 e il successivo restauro sono raffigurati nel disegno di Giovanni Antonio Dosio (Fig. 2), che mostra come, prima dell’intervento di Matteo da Castello, il ponte fosse privo di rivestimenti nei muri di testa e nei parapetti.

Ponte Emilio ebbe anche la funzione di ponte-acquedotto, quando, nel 1596, Sisto V vi fece passare un ramo dell’acquedotto Felice per addurre acqua all’area di Trastevere⁵.

L’anno 1598 segnò la definitiva rottura del ponte: una delle inondazioni più devastanti per Roma danneggiò gravemente il ponte, ma non negli elementi in cui, un ventennio prima, era intervenuto



Fig. 4. Ponte Rotto con il prolungamento in ferro esistente prima della costruzione degli argini del Tevere (Tommaso Cuccioni, post 1852 - ante 1865. Immagine conservata presso il Museo di Roma, Archivio Fotografico; copyright Roma, Sovrintendenza Capitolina ai Beni Culturali, Museo di Roma).

Matteo da Castello, bensì nelle parti opposte (Fig. 3). Allineandosi con le ipotesi secondo le quali il ponte fosse costituito da sei archi e cinque pile⁶, possiamo affermare che, in quell'anno, a crollare nel Tevere furono i primi tre archi, contando dalla riva sinistra, e i piloni ivi compresi.

Da qui il ponte fu soprannominato Rotto, e lontana era ogni idea di eventuali interventi di ripristino. Il progetto di Carlo Fontana del 1692, che prevedeva la costruzione di due arcate (una con dimensione circa doppia dell'altra), fu scartato. Per circa due secoli e mezzo Ponte Emilio fu impiegato per motivi distanti dalla funzione originaria di collegamento: prima divenne un'area di mercato in cui stendere le pelli e poi, quando fu edificata un'abitazione sulla testata di innesto alla sponda destra che impediva l'accesso al selciato, il ponte fu adibito a cortile privato della costruzione stessa, con tanto di giardino pensile.

Nel XIX secolo l'entusiasmo favorito dallo sviluppo industriale e dall'avvento delle nuove tecnologie condusse alla decisione di intervenire nuovamente su Ponte Rotto. Nel 1853 un nuovo progetto di Pietro Lanciani (Fig. 4) prevedeva di collegare le tre arcate superstiti alla sponda del Palatino attraverso un ponte sospeso in ferro lungo oltre 62 metri. Piloni in ferro furono innestati sull'ultimo arco⁷ (quello ancora oggi visibile) e su una nuova spalla realizzata in mattoni con angolari lapidei sulla riva sinistra; da questi, funi sorreggevano la passerella metallica sostenuta da travi reticolari a sezione curvilinea. Anche quest'ultima soluzione, unica nel suo genere rap-

presentando uno splendido esempio di fusione tra tecniche e stili fra loro notevolmente lontani, non fu quella definitiva. Il progetto dell'ingegner Canevari per la sistemazione del Tevere prevedeva la costruzione dei muraglioni d'argine e del nuovo Ponte Palatino, realizzato in adiacenza al Ponte Emilio, che fu chiuso nel 1884. Il ponte in ferro fu rimosso e le prime due arcate delle tre rimaste, di cui la prima probabilmente antica e la seconda appartenente al restauro di Matteo da Castello, furono brutalmente demolite.

L'arcata che oggi osserviamo al centro del fiume, risalente anch'essa al restauro di Bartolani, fu salvata grazie all'opposizione della Commissione Archeologica. Lo stesso accadde al vicino Ponte Cestio, anch'esso di epoca romana, che fu demolito e ricostruito nell'ambito dello stesso progetto per il fiume. Quegli anni, segnati da un clima di profonde trasformazioni urbanistiche, furono evidentemente devastanti non solo per il Ponte Emilio ma anche per molti altri manufatti di Roma, mostrando poca sensibilità verso la conservazione del patrimonio storico-culturale. Molti si interrogarono a questo punto su quali siano le cause che hanno determinato, nel corso della storia, i diversi crolli del Ponte Emilio. Diversi autori sostengono che il ponte sorgeva in una posizione sfortunata, ovvero in punto di curva del fiume Tevere dove quest'ultimo, sdoppiato nei due rami in corrispondenza dell'Isola Tiberina, comportando una riduzione della sezione utile al deflusso delle acque, tornava ad avere un'unica portata. Bisogna però ricordare le grandi conoscenze della civiltà romana nell'ambito dell'ingegneria idraulica. Infatti era stato studiato un preciso ritmo nella successione delle arcate, con archi e pile più grandi al centro, dove la corrente assumeva maggiori velocità, e più piccoli ai lati. Gli eventi di piena seguiti a vaste inondazioni possono essere uno dei fattori di danneggiamento del ponte; questi eventi sono, almeno in parte, da ricondurre al fitto sistema di mulini⁸ che da tempo circondavano l'isola, sfruttando la velocità delle acque in quel punto. I mulini stessi costituivano un impedimento allo scorrimento idrico e quando il fiume straripava tutti gli elementi di cui erano composti, tra i quali grandi mole in pietra, catene e baracche, si frantumavano proprio contro il primo ostacolo che incontravano, ovvero il Ponte Emilio⁹. Anche l'avanzamento progressivo degli edifici, che ha condotto all'interramento degli archi di piena del Ponte Fabricio e alla riduzione della sezione del ramo sinistro del fiume, non ha certamente favorito l'integrità del manufatto.

Le risposte sono dunque da cercarsi nell'insieme di diversi fattori. È necessario però ricordare che l'Emilio, come primo ponte lapideo di Roma, rappresenta un'esperienza, ovvero una sperimentazione di una tecnica tutta nuova e, come tale, da migliorare per poi essere applicata nei ponti che successivamente sarebbero stati realizzati.

2. Il rilievo digitale integrato per lo studio dell'arcata superstite

Osservando Ponte Rotto dall'Isola Tiberina, esso mostra oggi un'unica integra arcata (la terza a partire dalla sponda destra) appartenente al restauro del 1573-1575, una piccola porzione di arco alla sua destra, risalente allo stesso restauro, e una porzione maggiore alla sua sinistra, risalente, probabilmente, all'epoca romana.

L'analisi dettagliata di quello che si presenta oggi dinanzi ai nostri occhi risulta fondamentale per la lettura critica dell'immagine e per avanzare ipotesi di ricostruzione storica del ponte. Informazioni caratterizzate da un elevato grado di precisione sono state ottenute in seguito alla campagna di indagine in situ effettuata con l'impiego dello strumento laser scanner¹⁰ che effettuando rotazioni orizzontali e verticali scansiona l'ambiente circostante grazie al puntatore laser restituendone coordinate spaziali. Tutti i punti in questo modo ottenuti danno origine alla cosiddetta *points cloud*, o nuvola di punti, che rappresenta a tutti gli effetti un modello tridimensionale del manufatto dal quale trarre informazioni.

Le fasi del processo di rilevazione 3D sono state quattro.

Nella prima fase, relativa alla strumentazione, sono stati impostati i parametri di progetto in funzione del sito e del tipo di manufatto da rilevare.

La seconda fase è stata quella della scansione e acquisizione del dato, che ha permesso di ottenere la nuvola di punti rappresentativa del Ponte Emilio. Questa fase necessita generalmente di elevata accuratezza poiché influenza notevolmente il risultato finale. È in questo momento che viene redatto il cosiddetto progetto di presa, che consiste nello scegliere in modo opportuno tutti i punti in cui stazionare, tenendo conto degli elementi di interferenza interni, ovvero le caratteristiche del ponte (eventuali elementi in aggetto, zone d'ombra) e degli elementi di interferenza esterni, dovuti alle caratteristiche ambientali e urbane del sito. In questo



Fig. 5. Nuvola di punti planimetrica con rappresentazione dei punti di stazione (elaborazione di Giulia Umana).

caso quest'ultimo aspetto ha notevolmente condizionato la scelta delle stazioni, poiché esisteva un ostacolo, il fiume, che impediva l'avvicinamento al Ponte Emilio. Per questo motivo non si è fatto ricorso ai *targets*, necessari per effettuare successivamente la collazione delle scansioni. Sono stati dunque individuati 7 punti di stazione (Fig. 5): 2 sulla punta dell'Isola Tiberina, 2 sulla riva sinistra, 2 sul Ponte Palatino e 1 sulla riva destra. Le scansioni totali sono state 15 poiché, nelle varie stazioni, sono state effettuate sia scansioni generali, a media risoluzione (circa 28 milioni di punti per inquadrare il contesto ambientale), sia scansioni di dettaglio, ad alta risoluzione (circa 31 milioni di punti per inquadrare solo il Ponte Emilio).

La terza fase del processo di rilevazione 3D è consistita nell'elaborazione del dato in ingresso ottenuto grazie allo strumento. In questa fase è stata effettuata la registrazione delle varie scansioni: se prima queste erano dotate, ciascuna, di un proprio sistema di riferimento rispetto allo strumento, con questa operazione esse vengono riunite all'interno di un unico sistema di riferimento globale. Come già introdotto, a causa della difficoltà nell'uso di appositi *target*, questo passaggio non è stato effettuato in modo automatico dal software, ma in maniera manuale, rototraslando ogni scansione rispetto a una scansione "home" prescelta. La nuvola di punti così ottenuta



Fig. 6. Fotografia del Ponte Emilio sulla sinistra e nuvola di punti in prospettiva sulla destra, si noti l'elevata risoluzione che quest'ultima mostra (elaborazione di Giulia Umana).

costituisce un modello tridimensionale che può essere visualizzato, gestito e interrogato su appositi software¹¹ dai quali è possibile l'esportazione nelle varie rappresentazioni geometriche (Fig. 6).

La quarta e ultima fase è stata la restituzione del dato, ovvero la costruzione del modello tridimensionale dell'arcata e la sua successiva texturizzazione e renderizzazione¹². La modellazione è stata implementata a partire da sezioni orizzontali e verticali della nuvola di punti. Maggiore è il numero di sezioni considerato, maggiore sarà l'accuratezza del risultato finale, determinando un modello più prossimo alla realtà: in questo caso sono state effettuate circa 80 sezioni.

In primo luogo si è cercato di determinare il diametro dell'arco principale generante la volta. A tal fine, attraverso il metodo della circonferenza passante per tre punti, è stata determinata quella che meglio interpolasse la nuvola di punti, risultata avere diametro pari a 16,80 m (Fig. 7, in celeste). Tuttavia questo diametro non coincide con l'imposta dell'arco (Fig. 8, in celeste). Risulta indispensabile, d'altra parte, fare opportune considerazioni preliminari per la giusta determinazione del modello dell'arcata.

In primo luogo è necessario considerare il sistema metrico adeguato per l'epoca di costruzione: il palmo (22,34 cm) per gli elementi risalenti all'epoca rinascimentale, ovvero l'arco principale e l'arco divelto alla sua destra, e il piede romano (29,65 cm) per le parti originarie, verosimilmente l'arco divelto sulla sinistra¹³. Bisogna poi considerare il reale piano d'imposta dell'arco e possibili meccanismi di dissesto avvenuti. Oltre a queste considerazioni sono state fissate alla base dello studio due ipotesi. La prima che il Ponte Emilio, prima dell'ultimo crollo cinquecentesco ma anche in origine, fosse costituito da ben sei archi e cinque pile¹⁴. La seconda considera che in epoca romana, come precedentemente accennato, esisteva la consuetudine di realizzare archi più grandi al centro e archi più piccoli

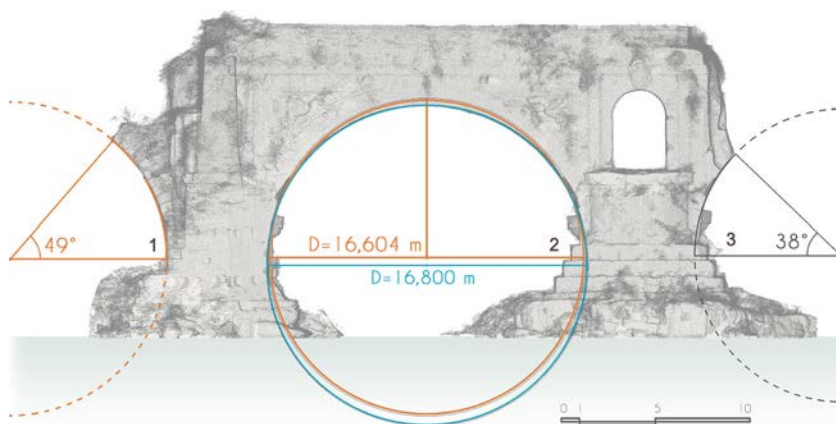


Fig. 7. Determinazione del diametro delle arcate. 1: arco antico; 2 e 3: archi rinascimentali (elaborazione di Giulia Umana).

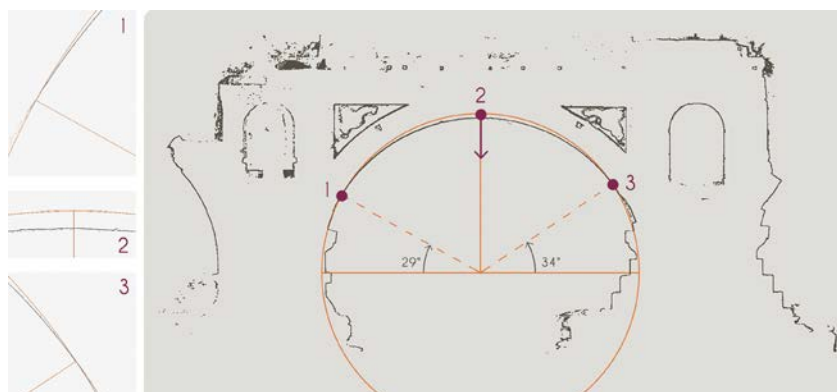


Fig. 8. Analisi dei cedimenti. 1 e 3: inversione del profilo dell'arco; 2: abbassamento del concio di chiave (elaborazione di Giulia Umana).

ai lati. Di conseguenza le arcate del Ponte Emilio avrebbero seguito un ritmo A-B-C-C-B-A, con C maggiore di B e di A e B maggiore di A. Se è vero inoltre che questo aspetto dimensionale, dipendente da motivi idraulici legati alla velocità della corrente, sia stato mantenuto nel corso dei secoli nei vari restauri, l'arcata integra rinascimentale e quella romana semidistrutta alla sua sinistra avrebbero la stessa ampiezza.

Dall'interpolazione dei punti della nuvola, l'arco divelto romano risulta avere un diametro pari a 16,60 m (corrispondente esattamente a 56 piedi romani) e uno sviluppo attuale di 49°. Lo stesso arco (Fig. 7, in arancione) risulta interpolare anche i punti dell'arco integro rinascimentale, se posizioniamo il diametro sulla sua imposta e

se ammettiamo piccoli stati deformativi presenti. L'arco adiacente, rinascimentale e sicuramente più piccolo dei primi due, è presente per uno sviluppo di 38° .

L'entità dei cedimenti è misurabile dal discostamento che esiste tra l'arco adottato e la *points cloud*. Questo discostamento avviene in punti ben precisi: in corrispondenza del concio di chiave, che mostra un abbassamento di circa 17 cm, e delle reni dell'arco, identificate a 29° e 34° , dove il profilo dell'arco risulta invertito. Infatti in corrispondenza di detti angoli la nuvola di punti mostra una variazione di curvatura: nella zona compresa tra 0° e 29° e in quella opposta compresa tra 0° e 34° i punti della nuvola si dispongono esternamente all'arco determinato (Fig. 8) mentre al di sopra di tali zone essi si dispongono internamente, facendo pensare a uno spanciamiento avvenuto, fino ad arrivare al discostamento massimo localizzato in chiave. Non sono presenti fessure apparenti in queste parti. Questi meccanismi possono essere indotti, oltre che dal carico rappresentato dalla volta stessa e dagli elementi che vi gravano, da fenomeni di rotazione o traslazione dei piedritti, ma anche dal riassetamento conseguente all'operazione di disarmo della centina, specialmente se non eseguito accuratamente.

Analizzati gli aspetti sopra citati, si è proceduto con la modellazione del ponte. Il modello 3D ottenuto è di tipo misto, ovvero integrato tra modello matematico e modello numerico. Il modello matematico descrive l'oggetto attraverso equazioni matematiche rappresentate dalle NURBS, mentre il modello numerico considera superfici mesh ottenute attraverso una triangolazione dei punti ed è stato impiegato per tutti quegli elementi che risultavano difficilmente modellabili, ovvero gli elementi di decoro del ponte e le parti monche. Completato il modello del Ponte Emilio, ne sono stati analizzati gli elementi costitutivi e costruttivi, riportati in figura 9.

Un altro interessante aspetto è quello dell'analisi delle armille degli archi. Tutte e tre risultano costituite da conci radiali con archivolto di tipo semplice, privo di modanature. Tuttavia se tale archivolto mostra, nelle due arcate rinascimentali, un andamento liscio in cui si alternano, in maniera più o meno regolare, conci posti di taglio e di testa in *opus quadratum*, l'archivolto antico risulta essere nettamente differente. Questo è costituito, infatti, da conci posti unicamente di taglio, molti dei quali sono di tipo dentato in estradosso.

Secondo Lorenzo Quilici¹⁵ l'arco dentato trova impiego proprio dall'età augustea e, come si nota dai disegni di Carlo Fontana (Fig. 3),

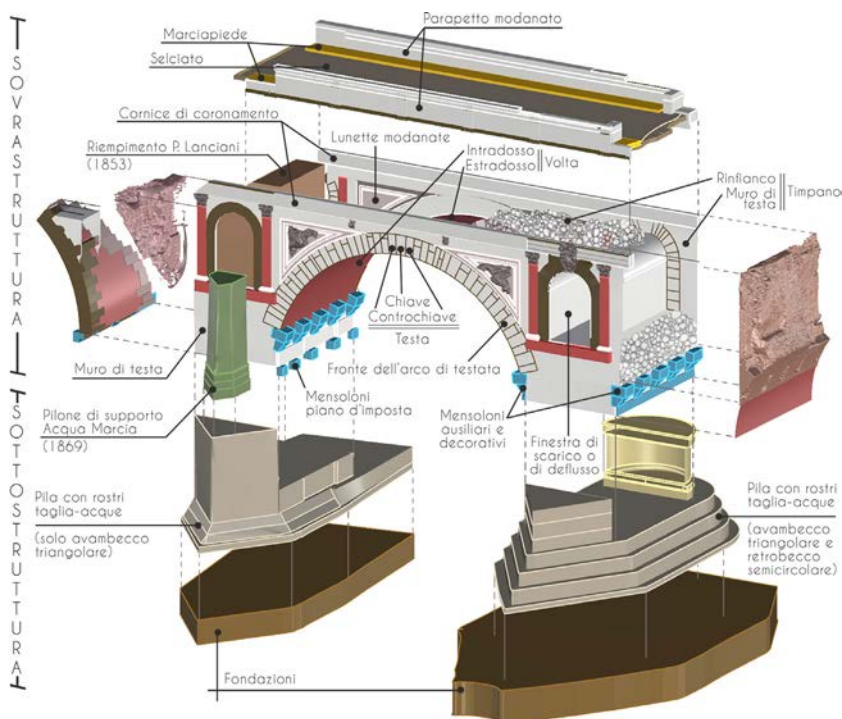


Fig. 9. Esploso assometrico del Ponte Emilio (elaborazione di Giulia Umana).

un archetto simile era situato sulla testata di sinistra, vicino la quale Augusto aveva eretto un arco. Questi aspetti conducono a pensare a un effettivo intervento dell'Imperatore.

Il primo arco a partire dalla testata trasteverina, anch'esso antico, demolito alla fine dell'Ottocento e osservabile nelle fotografie storiche, risulta avere un diverso aspetto nella conformazione dell'armilla rispetto all'arco divelto a sinistra di quello rimasto integro. È possibile dunque che tale arco fosse quello originario del ponte e che Augusto fosse intervenuto solo sulle parti prossime alla riva opposta, ovvero quella di sinistra.

L'arcata superstite è costituita da conci radiali in travertino aventi lunghezza pari a 1,15 m e altezza variabile da 0,25 m a 0,60 m (i conci più frequenti mostrano un'altezza pari a circa $0,40 \div 0,45$ m). Il peso medio di tali conci è compreso tra 1.400 kg e 1.500 kg, per un peso stimato dell'archivolto compreso tra le 65 t e le 75 t, essendo costituito da 46 file di blocchi. La carreggiata del ponte mostra un'ampiezza pari a 8,42 m misurata internamente e pari a 9,10 m se si considera lo spessore dei parapetti modanati.

L'analisi della nuvola di punti ha permesso la valutazione di eventuali rapporti proporzionali esistenti, secondo i quali era consuetudine l'edificazione di grandi manufatti come il Ponte Emilio¹⁶. La pila di sinistra, ovvero quella su cui si innesta il resto dell'arco antico, risulta avere uno spessore pari a 5,60 m o 5,63 m, la qual misura equivale a 19 piedi romani. Se associamo tale valore a un modulo base, l'arcata superstite risulta avere ampiezza pari a circa tre volte il suddetto modulo, mentre gli archetti di deflusso delle acque, utili in caso di eventi di piena, mostrano diametro pari a circa metà modulo.

Il modello misto elaborato è stato poi restituito ottenendo delle viste renderizzate (Figg. 10, 11) che mostrano una fotografia dello stato attuale del Ponte Emilio¹⁷.

3. Metodi di ricostruzione dell'immagine

Se lo studio sinora illustrato si è posto come obiettivo primario quello della conoscenza e comprensione di ciò che osserviamo oggi recandoci sul posto, lo stesso studio ha rappresentato, in secondo luogo, una solida base per poter elaborare delle ipotesi ricostruttive. In particolare si è cercato di determinare quale fosse la conformazione del ponte nel secolo XIX, quando fu installato il ponte sospeso di Lanciani, e, in ultima battuta, l'aspetto originario.

Si è tornati di conseguenza alla fase di acquisizione dei dati, necessari per determinare il modello della passerella metallica realizzata nel 1853 e quello delle due arcate presenti in quegli anni, demolite alla fine dell'Ottocento. Queste arcate si sviluppavano dalla testata destra del fiume fino all'arco oggi osservabile, ossia il numero tre.

In questa fase il dato di partenza non è più rappresentato, ovviamente, dalla nuvola di punti, ma dall'integrazione tra processo fotogrammetrico per le due arcate demolite e lettura dei disegni esecutivi di Lanciani¹⁸ per il ponte sospeso di collegamento alla sponda sinistra. Attraverso la fotogrammetria è possibile ottenere, a partire da fotografie, informazioni metriche di oggetti. In particolare per il caso in esame è stata utilizzata un'immagine d'epoca (Fig. 12), reperita presso l'Archivio Storico Capitolino di Roma¹⁹, che mostra lo stato del ponte nella seconda metà dell'Ottocento. Il fotogramma, per poter essere interrogato in termini dimensionali, è stato sottoposto al raddrizzamento fotografico di tipo geometrico, avendo fornito migliori risultati rispetto a quello analitico. Così, individuando sulla



Fig. 10. Ponte Emilio, viste renderizzate. Dall'alto a sinistra: dettaglio del retrobecco semicircolare; vista generale da monte; vista generale da valle; fotopiano del muro di testa di monte (elaborazioni di Giulia Umana).

fotografia delle direzioni orizzontali e verticali e un fattore di scala in X e Y, l'immagine è stata raddrizzata, costituendo la base per la modellazione delle due arcate scomparse.

Dunque dalla unione di dati aventi differenti origini è stato possibile implementare un modello tridimensionale dello stato ottocentesco, anch'esso, come quello precedentemente illustrato per l'arcata superstite, di tipo integrato.

Dalle analisi effettuate attraverso il metodo descritto è stato riscontrato (Fig. 13) che, successivamente alle due arcate aventi diametro determinato a partire dal rilievo digitale integrato e pari a 16,60 m²⁰, vi fosse un arco minore, il secondo, avente diametro pari a 15,45 m²¹ e ancora un arco più piccolo, il primo da Trastevere, di diametro pari a 13,20 m. Quest'ultimo arco mostrava ancora le strutture antiche e si presentava spoglio rispetto a quelli successivi, privo di rivestimenti e decorazioni e con muri di testa in mattoni, come testimoniato dalle fotografie ottocentesche. Ciascuna delle tre pile allora esistenti era dotata di speroni taglia-acqua. La prima doveva avere uno spessore di 4,75 m (che equivale a 16 piedi romani), la seconda di 6,26 m e la terza, misurata con la nuvola di punti, di 5,60 m o 5,63 m. Si avrebbe dunque una prima conferma sul ritmo



Fig. 11. Ponte Emilio, vista da monte renderizzata (2016; elaborazione di Giulia Umana).



Fig. 12. Il Ponte Emilio nel 1878 con le prime due arcate, demolite pochi anni dopo, e il ponte in ferro di Lanciani, in seguito rimosso con l'apertura del vicino Ponte Palatino (immagine tratta dall'Album XXI S.P.Q.R. Il Tevere. Tronco Urbano. Stato anteriore ai lavori di difesa. Sponda destra. Vedute del Tevere in Roma prima della sua sistemazione". Su concessione dell'Archivio Storico Capitolino, Roma).

delle arcate ipotizzato inizialmente. Interessante è inoltre la valutazione del profondo mutamento dell'area dell'Isola Tiberina rispetto allo stato ottocentesco, avvenuto in seguito alla costruzione dei muraglioni e del lungotevere (Fig. 14) che hanno variato nettamente la conformazione del paesaggio fluviale: infatti la testata di innesto verso Trastevere cadrebbe oggi all'interno del fiume, mentre quella opposta terminerebbe nella sezione stradale del lungotevere.

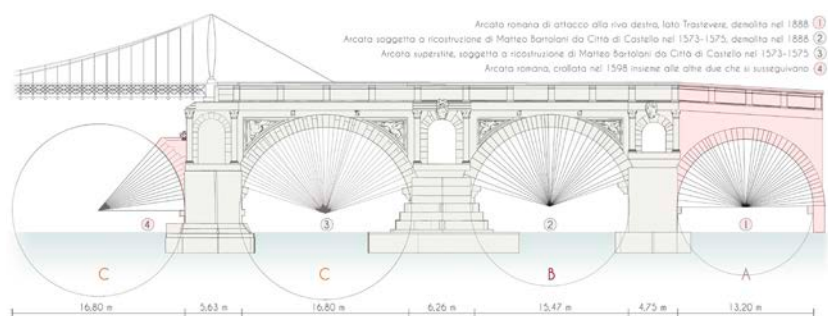


Fig. 13. Prospetto da monte del Ponte Emilio come si mostrava nel 1853 (elaborazione di Giulia Umana).

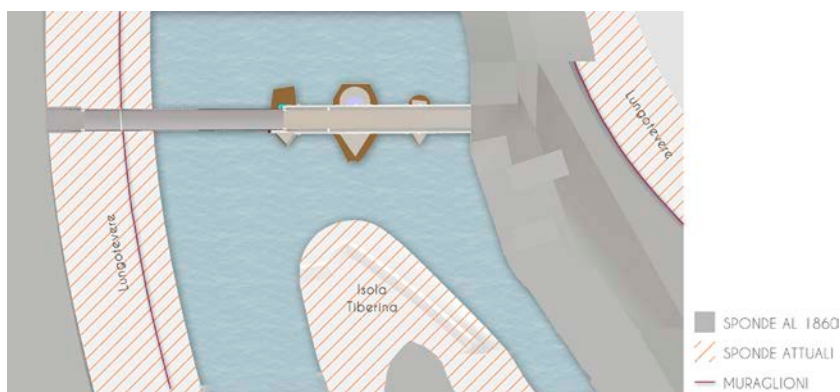


Fig. 14. Planimetria del Ponte Emilio collocato nel contesto ambientale riferito al 1853 (elaborazione di Giulia Umana).

Tutti i dati così ottenuti sono stati successivamente restituiti, ottenendo le viste renderizzate riportate nelle figure 15 e 16.

Tutti gli studi effettuati, riportati nel presente contributo negli aspetti più rilevanti, costituiscono un valido metodo di conoscenza e di analisi di un bene del patrimonio storico per la divulgazione dell'informazione. L'approccio di tipo integrato e olistico, fondamentale ogni qualvolta si abbia a che fare con una testimonianza del passato, specialmente se caratterizzata da un complesso quadro storico come quello del Ponte Rotto, ha permesso sinora lo studio dell'arcata superstitine e la ricostruzione dello stato ottocentesco. Se partendo da quest'ultima conformazione rimuoviamo il ponte sospeso moderno, rimangono le tre arcate come apparivano fin dal 1598, quando la piena distrusse le ulteriori tre di raccordo con la riva sinistra. La ricerca si è conclusa giungendo alle origini del ponte, cercando di ricostruirne l'immagine antica.

A questo punto il dato di partenza è rappresentato dal modello dell'arcata superstite, determinato a partire dalla nuvola di punti ottenuta con il rilievo digitale integrato, e dal modello delle prime due arcate lato Trastevere, determinato con la fotogrammetria.

Sappiamo che sulla pila di destra dell'arcata integra del Ponte Emilio, ossia la numero due delle possibili cinque originarie, era intervenuto Matteo da Castello in seguito alla piena del 1557, irrobustendola rispetto agli altri piloni. Pertanto la misura della stessa attraverso la nuvola di punti o attraverso il raddrizzamento fotogrammetrico non fornisce informazioni utili alla determinazione delle dimensioni antiche della suddetta pila. È stato ipotizzato uno spessore antico uguale, per ragioni di adesione ai caratteri di simmetria riscontrabili nel ritmo degli archi e delle pile nell'ambito della realizzazione dei ponti romani, a quello della pila numero tre, pari a 5,60 m o 5,63 m (19 piedi romani, dato proveniente dalla nuvola di punti). Dai dati provenienti dal fotoraddrizzamento, l'arco originario di testata, ossia il numero uno, doveva misurare 13,20 m, valore approssimato a 45 piedi (13,34 m), mentre la pila adiacente (che probabilmente conservava all'incirca lo spessore antico) mostrava un'ampiezza di 4,75 m, ossia 16 piedi. Sono noti a questo punto i diametri della prima e della terza arcata (pari rispettivamente, a 45 piedi e 56 piedi), nonché lo spessore delle pile numero uno (16 piedi), numero due (19 piedi) e numero tre (19 piedi). Il diametro del secondo arco è stato conseguentemente determinato, essendo rappresentato dalla distanza che intercorre tra la prima e la seconda pila, ossia 15,12 m, vale a dire 51 piedi. Avremmo dunque, partendo da Trastevere, un arco in rampa di 45 piedi, uno successivo di 51 piedi e ancora quello superstite di 56 piedi.

Queste valutazioni si allineano con il ritmo degli archi ipotizzato (A-B-C-C-B-A) per cui, considerando la pila numero tre come asse di simmetria dell'intero sistema, lo schema adottato è stato ripetuto per la parte che si conclude verso il Foro Boario. Il ponte, dunque, avrebbe mostrato anticamente due archi centrali di 56 piedi, due archi laterali di 51 piedi e due archi terminali di innesto alle sponde di 45 piedi. La somma di cinque pile e sei arcate condurrebbe a una misura totale del ponte, escludendo le spalle, pari a 393 piedi (116,52 m, 79 passi doppi).

Molto più incerta risulta la determinazione del diametro degli archetti di piena che probabilmente traforavano le spalle nonché la valutazione della lunghezza di queste ultime. Dai disegni osservabili



Fig. 15. Il ponte Emilio come appariva tra il 1853 e il 1888, particolare della passerella metallica di Lanciani (elaborazione di Giulia Umana).



Fig. 16. Il ponte Emilio come appariva tra il 1853 e il 1888, vista generale (elaborazione di Giulia Umana).

in letteratura, tra cui quello di Fontana del 1692 (Fig. 3), apprendiamo che sicuramente in fase rinascimentale esisteva un archetto di deflusso nella spalla sinistra caratterizzato da conci dentati probabilmente augustei. Quest'ultimo mostrerebbe un diametro pari a 12 piedi (3,56 m), ottenuto scalando adeguatamente il disegno relativo al rilievo dello stesso Fontana. La spalla entro cui era collocato il suddetto archetto poteva avere dimensioni proporzionali a quest'ultimo (circa il doppio). Successivamente è stata avanzata l'ipotesi che, originariamente, un arco simile o uguale fosse presente anche nella spalla destra, completando la simmetria dell'opera e consentendo

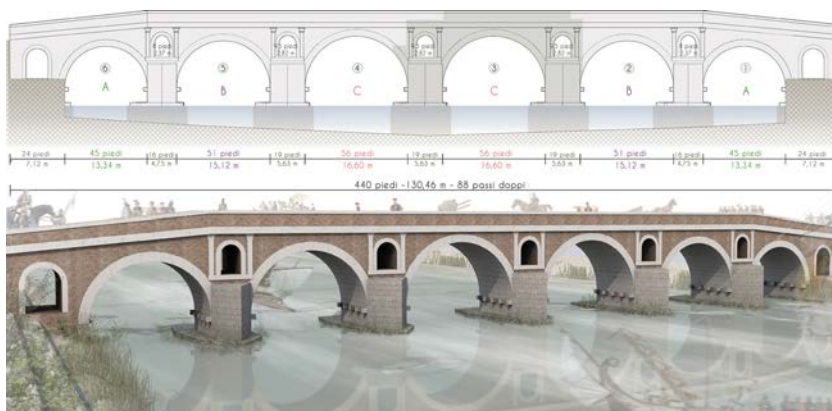


Fig. 17. Il ponte Emilio come appariva in epoca antica. Prospetto e vista generale renderizzata (elaborazione di Giulia Umana).

maggiore superficie di sfogo per le acque. I tre archi di piena centrali risultano avere un diametro pari a circa 2,80 m, corrispondente a 9 piedi e mezzo (ossia la metà dei piloni sottostanti), mentre le due arcate di piena opposte, più prossime alle testate, risultano avere un diametro pari a 8 piedi (2,37 m, ancora una volta pari alla metà dei piloni sottostanti). Il ponte romano avrebbe dunque mostrato una lunghezza totale pari a 441 piedi (130,76 m), approssimabile a 440 piedi (130,46 m, 88 passi romani), come illustrato in figura 17.

La metodologia di studio adottata per l'implementazione delle ipotesi ricostruttive del Ponte Emilio può essere intesa come un sistema, rappresentato dal modello integrato, che racchiude al suo interno dei sottosistemi, ossia gli elementi che compongono il modello integrato stesso. L'unità base minima è rappresentata dai modelli matematico e numerico la cui unione ha generato il modello tridimensionale della nuvola di punti rappresentativa del ponte nel suo stato odierno. Quest'ultima ha costituito l'elemento fondamentale per ogni analisi successivamente sviluppata, fino alla determinazione dell'ipotesi relativa alla caratterizzazione del ponte originario.

Le moderne tecniche di rilievo di cui oggi si dispone costituiscono dunque un valore di rilevante importanza nella lettura e nella comprensione del patrimonio storico, culturale e artistico sul quale il territorio italiano si fonda. Esse rappresentano pertanto un'occasione per rispondere a interrogativi rimasti ancora in parte (e talvolta del tutto) privi di risposte, permettendo di approfondire la storia profondamente stratificata che caratterizza il nostro Paese.

¹ QUILICI 2015.

² *Ab Urbe Condita*, XL, 51.

³ Al momento si ritiene valida anche l'ipotesi che il ponte sia stato edificato già nel 241 a.C., ad opera della famiglia degli *Aemilii Lepidi*.

⁴ D'ONOFRIO 1970.

⁵ Anche in epoca moderna il ponte ebbe tale funzione, quando, nel 1869, venne installata una condotta dell'Acqua Marcia. La condotta era sorretta dal pilone, ancora oggi visibile, posizionato sullo sperone di sinistra.

⁶ Tornerò ampiamente su questo tema.

⁷ Scaricavano il loro peso sull'archetto di piena che Lanciani riempi con mattoni ancora oggi visibili.

⁸ Cfr. le fonti iconografiche, quali ad esempio: *Codex Escorialensis*, 1495 circa; Lievin Cruyl, 1665 circa; Bernardo Gambarini e Andrea Chiesa, 1744; fotografie dell'Ottocento.

⁹ Maria Margarita Segarra Lagunes ha curato un interessante approfondimento sul tema dei mulini del Tevere (SEGARRA LAGUNES 2004).

¹⁰ Per il rilievo è stato utilizzato il laser scanner CAM2 della Faro, modello Focus X 130.

¹¹ La registrazione delle scansioni, o collazione, è stata effettuata sul software Scene; successivamente, sul software CloudCompare, sono state eseguite tutte le necessarie operazioni sulla *points cloud*.

¹² Per la modellazione è stato utilizzato il software Rhinoceros, mentre per il processo di *rendering* è stato utilizzato il software Cinema4D.

¹³ I differenti materiali e le diverse tecniche costruttive che si notano nella porzione di arco e di volta di sinistra rispetto a quelli osservabili nell'arcata integra e nella porzione alla sua destra (osservando il ponte da monte), conducono a dividere temporalmente in due fasi ciò che rimane del Ponte Emilio. Se queste ultime appartengono sicuramente al restauro del 1573-1575, come ampiamente documentato, nel primo caso è probabile invece che siamo di fronte ai resti del ponte romano. Questo aspetto verrà approfondito successivamente.

¹⁴ Fra gli autori che sostengono questa teoria si ricorda GALLIAZZO 1994, CASCAVILLA 2005 e QUILICI 2015.

¹⁵ QUILICI 2015.

¹⁶ Nella ricerca degli aspetti legati alla proporzionalità è necessario tenere conto di possibili incertezze di misura determinate dalla presenza di rilevanti elementi di interferenza esterni nel giorno del rilievo del Ponte Rotto (fitta vegetazione).

¹⁷ Si noti la vicinanza attuale, ma non originale, del ponte con l'Isola Tiberina.

¹⁸ Reperiti presso l'Archivio di Stato di Roma.

¹⁹ Archivio Storico Capitolino di Roma, Segnatura Archivio Fotografico, 490. Album XXI "S.P.Q.R. Il Tevere. Tronco urbano. Stato anteriore ai lavori di difesa. Sponda destra. Vedute del Tevere in Roma prima della sua sistemazione" conservato presso l'Archivio Storico Capitolino.

²⁰ Si tratta dell'arco antico divelto, ossia il quarto dei possibili sei originari a partire dalla riva trasteverina, e dell'arcata integra rinascimentale, dunque la terza.

²¹ Questa arcata risale, insieme alla terza, al restauro del 1573-1575.

Ponte Fabricio a Roma

Carlo Inglese, Daniele Maiorino

1. Evoluzione storica

Il Ponte Fabricio, ritenuto dalla letteratura il più antico di Roma, a distanza di oltre duemila anni dalla sua costruzione è l'unico sul Tevere a essere conservato quasi integralmente. È probabile che il ponte, costruito in pietra nel 62 a.C., abbia sostituito un manufatto più antico in legno in quanto dalle fonti storiche si apprende che fin dal 192 a.C. l'Isola Tiberina era collegata alla riva sinistra¹ (Fig. 1). L'isola di Esculapio, infatti, data la sua particolare posizione in mezzo al fiume rappresentò il primo luogo di approdo e di attraversamento. Per tali ragioni, è ovvio pensare che i primi ponti lignei sul Tevere (simili a semplici passerelle di collegamento) vennero realizzati in prossimità di questa zona dove, inoltre, si svilupparono le prime civiltà che diedero origine alla città di Roma.

Dalle fonti bibliografiche si apprende che i primi ponti in legno realizzati per consentire il passaggio tra le due sponde erano due, gli attuali Fabricio e Cestio. Quello che collegava alla riva destra (etrusca) pochi anni dopo la sua costruzione, per evitare possibili invasioni provenienti da Trastevere, venne demolito causando nuovamente la separazione tra le due sponde. Per favorire ulteriori punti di attraversamento, quindi, venne costruito un nuovo ponte in legno, il Sublicio, posizionato circa 200 metri più a valle dell'Isola Tiberina, sotto il colle l'Aventino, considerato (erroneamente) da sempre il ponte più antico². Il Fabricio in legno continuò comunque a offrire la funzione di collegamento con l'Isola Tiberina fino al 62 a.C., anno in cui *L. Fabricius*, (*curator viarum*)³ lo trasformò in un solido ponte in pietra⁴. Le iscrizioni commemorative scolpite sulle fronti del ponte, infatti, sono la testimonianza dell'avvenimento e delle principali trasformazioni che il ponte ha subito nel corso dei secoli. Sulle ghiere

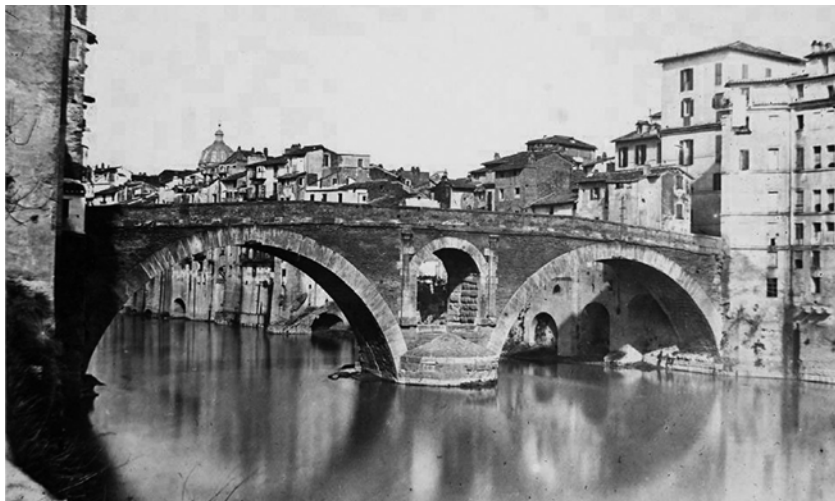


Fig. 1. Veduta del Ponte Fabricio nel 1864-1866, prima della costruzione dei muraglioni.

in travertino delle due arcate, su entrambi i prospetti, si legge: *L(u-cius) Fabricius G(aii) f(ilius) curator viarum / faciundum coeravit*. Lo stesso L. Fabricio volle che la stessa formula fosse riportata anche sull'archivolto della piccola arcata di deflusso presente sulla pila centrale, con una piccola variazione: *Idemque / probavit (a monte)* e *Eidemque / probaveit (a valle)* (Fig. 2).

La conformazione attuale del ponte, come detto, è sostanzialmente quella originaria fanno eccezione alcuni inserimenti, migliorie o restauri del rivestimento e delle spallette che non hanno compromesso la morfologia. Si cita ad esempio la sostituzione del paramento originale in travertino a favore di una cortina in laterizio, avvenuta in assenza di indizi cronologici certi, attribuito al pontificato di Eugenio IV (1431-1447) durante il quale venne eseguito il restauro di entrambi i ponti dell'Isola Tiberina e la nuova pavimentazione con lastre in travertino⁵.

Tra il V e il VI secolo il manufatto venne chiamato con altri appellativi: *Lapideus* a ragione del materiale impiegato o *Antonino*. Anche durante il Medioevo, accanto al *pons Fabricius* o *Fabricii*, nelle fonti letterarie comparirono spesso ulteriori denominazioni: *pons Fabiani* (evidente alterazione di *Fabricii*), *pons Tarpeius*, probabilmente per la sua vicinanza alla rocca Tarpea in Campidoglio⁶ o *pons Iudaeorum*, *pons Iudaei*, *pons de Iudeis* (ponte degli Ebrei) perché prossimo alla Sinagoga e al quartiere ebreo (Fig. 3).



Fig. 2. Iscrizioni scolpite sulle arcate del Ponte Fabricio (dall'alto verso il basso: arcata sinistra a valle; fornice a valle; arcata sinPstra a monte; fornice a monte); incisione di Giovanni Battista Piranesi, *Le Antichità Romane*, Tomo IV, tav. XVIII.

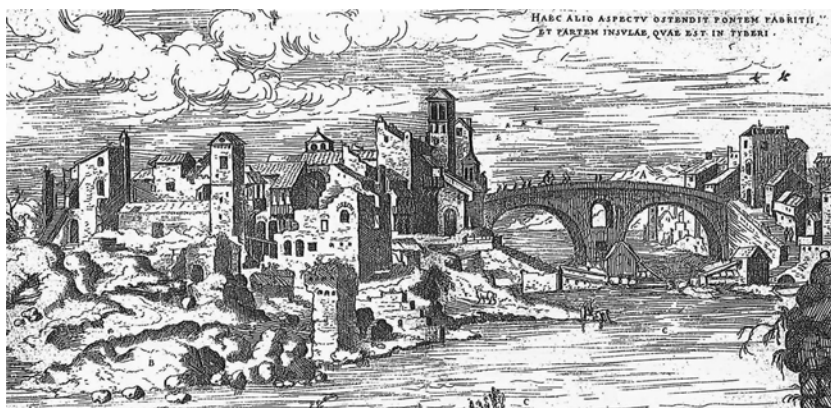


Fig. 3. L'Isola Tiberina e Ponte Quattro Capi, indicato nel testo (in alto a destra) come "Pontem Fabritii", incisione di Giovanni Battista Pittoni, 1561.

A partire dal XIII secolo vennero utilizzate entrambe le denominazioni (*Fabricii* in *ponte Iudaeorum*) fino all'inizio del Cinquecento, periodo in cui il ponte assunse un nuovo titolo: *pons IIII capita* (ponte Quattro Capi)⁷. Tra le numerose letture esplicative di tale toponomastica molte sono legate alla presenza di sculture quadrierme in marmo bianco sui parapetti del ponte. Fra Giocondo, ad esempio, rappresenta la parte centrale del parapetto con due modanature ri-

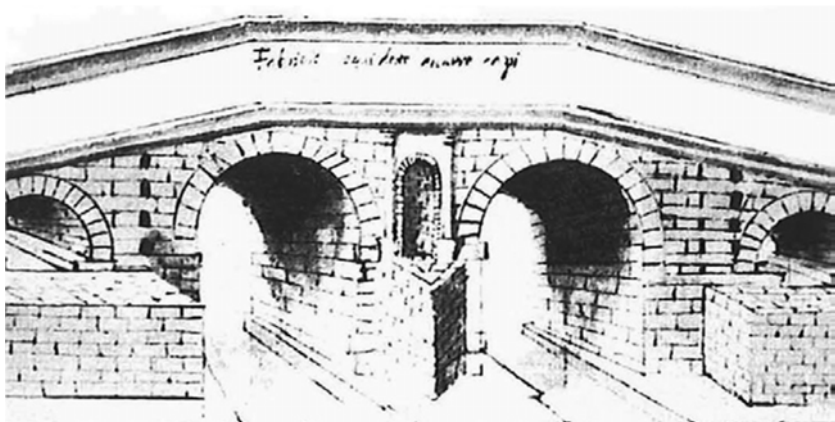


Fig. 4. Ponte Quattro Capi nello schizzo di Fra Giocondo, 1514 (Ermitage, San Pietroburgo, Album B, fogl. 55 v.; da RAMIERI 2003, p. 157).

portanti la scritta «Fabricio oggi detto Quattro Capi» (Fig. 4). Sembrerebbe, quindi, che le quattro erme quadrifronti scolpite in marmo bianco di età romana non fossero collocate sul ponte fin dall'epoca antica ma che furono inserite nel tardo Quattrocento su iniziativa di un maestro delle strade e subito dopo rimosse. Esse infatti non appaiono mai nelle piante e nelle vedute d'epoca cinque-sei-settecentesche; se fossero state in loco, infatti, è molto probabile che sarebbero state riprodotte da Tempesta (1593) e da Falda (1667).

I lavori compiuti da papa Paolo V (1605-1621) vennero descritti in un'apposita epigrafe che fu affissa sull'estremità sinistra della facciata della chiesa di S. Francesco a Ripa⁸ e sulla quale si leggeva: *expedito utroque Fabritii pontis aditu / et scalis ad Tyberis alveum deductis / civium peregrinorum nautarum / commodi consulerit* (avendo facilitato entrambi gli accessi del ponte Fabricio e fatto discendere le scale sino all'alveo del Tevere, ha provveduto alla comodità dei cittadini, dei pellegrini e dei barcaioli). Anche gli ulteriori lavori svolti sul Ponte Fabricio ad opera di papa Innocenzo XI⁹ (1676-1689) nel 1679 vennero riportati su un'epigrafe commemorativa ancora oggi visibile sul parapetto destro del ponte verso l'Isola: *Innocentius XI Pont(ifex) Max(imus) / duos uno in ponte Fabricium ac Cestium / senio labentes onere laborantes / in pristinum decus ac publicum commodum / firmiore latere ac duriore vestigio / fultos stratosque restituit / anno MDCLXXIX / Pont(ificatus) sui III* (Innocenzo XI Pontefice Massimo, il Fabricio e il Cestio che formano un unico ponte, vacillanti per vecchiezza ed affaticati dal peso, al pristino decoro e a pubblica comodità con più salde



Fig. 5. Spalla sinistra del Ponte Fabricio in cui è visibile il fornice arcuato, 1885-1886 (in alto); Ponte Fabricio a monte durante la costruzione dei muraglioni e dei lungotevere (in basso) (da D'ONOFRIO 1980, pp. 102-103).

spallette e più solida pavimentazione entrambi rafforzati e lastricati (restauro l'anno 1679, terzo del suo pontificato).

Un'importante modifica, tuttavia, fu quella apportata durante la realizzazione dei muraglioni relativi ai lungotevere. Fortunatamente fu scongiurato il progetto Canevari che prevedeva il prosciugamento del ramo sinistro del Tevere e la soppressione dell'Isola Tiberina. La commissione istituita per risolvere la questione Tevere nel 1872 si pronunciò a favore del mantenimento dell'Isola¹⁰, ciò nonostante alcune trasformazioni furono inevitabili tra cui la chiusura dell'archetto sinistro del manufatto (inglobato nei muraglioni) a favore della costruzione del collettore dietro la spalla sinistra¹¹ (Fig. 5). A ciò si aggiunga anche che a seguito della ricostruzione del limitrofo Ponte Cestio, durante la quale venne ampliato il ramo destro, il braccio sinistro del Tevere rimase completamente



Fig. 6. In alto: vista dell'Isola Tiberina, estremità est, con il ramo destro del fiume insabbiato, 1899 (foto Berthaud; riproduzione su gentile concessione di Bruno Leoni, dal sito <<http://www.isolatiberina.it>>). In basso: interrimento del Tevere a Ponte Fabricio (da RAMIERI 2003).

interrato a causa del minore scorrimento delle acque (Fig. 6). Per porre rimedio a tale inconveniente si operò, infatti, la chiusura dei nuovi archi laterali del Ponte Cestio mediante barriere artificiali e la realizzazione di banchine lungo gli argini per evitare urti violenti contro i muraglioni.

2. Operazioni di acquisizione

Il rilievo del Ponte Fabricio è stato l'occasione per impiegare e verificare alcune metodologie di acquisizione massiva e di restituzione ormai consolidate; la peculiarità è rappresentata dalla particolare fisionomia e topografia del ponte. La preventiva fase di progettazione delle fasi di acquisizione infatti si è dovuta confrontare con la conformazione propria del ponte, dalla impossibilità di effettuare riprese con scanner laser o fotografiche in corrispondenza del pilone centrale o, dell'intradosso delle volte degli arconi per la presenza del fiume.



Fig. 7. Nuvola di punti, vista planimetrica, punti di stazionamento (elaborazione di Daniele Maiorino).

Nel caso particolare del Fabricio, programmando attentamente le condizioni al contesto, considerate le ridotte dimensioni delle arcate, si è deciso di operare con un rilievo scanner laser¹², effettuando 16 scansioni distribuite 7 sul passaggio pedonale, 2 sull'arcata lato Isola Tiberina (una fronte a monte e una fronte a valle), completata da 1 sotto la stessa arcata; 4 sull'arcata lato lungotevere de' Cenci (due fronte a monte e due fronte a valle), 1 di collegamento con il lungotevere stesso e 1 sotto l'arcata (Fig. 7).

Questa distribuzione di scansioni ci ha consentito una copertura pressoché integrale del manufatto, superando le difficoltà intrinseche dovute alla presenza del fiume. Naturalmente la ridotta lunghezza del ponte ci ha consentito di poter operare dalle due sponde del Tevere riuscendo a coprire, con ciascuna scansione, oltre la metà della mezzzeria del ponte stesso, acquisendo un dato completo e a risoluzione intera¹³. Le stazioni infatti sono state posizionate, per l'acquisizione del pilone centrale, sulle banchine laterali, a distanze variabili di circa 20 m ortogonalmente al ponte, il che garantiva una distanza di circa 35m quale distanza inclinata massima, mantenendo l'inclinazione dei raggi proiettanti uscenti dallo scanner di circa 40°. Questa inclinazione, considerando il prospetto piano del fronte del ponte, era sufficiente per mantenere una risoluzione costante anche nei punti più distanti dallo scanner stesso. Il risultato di queste operazioni di acquisizione è stato un modello numerico (una nuvola di punti) (Figg. 8-9) denso con una buona risoluzione corredato, come è noto, anche da un efficace dato colore (le fotografie dello scanner stesso).



Fig. 8. Nuvola di punti, prospetto a monte (elaborazione di Daniele Maiorino).



Fig. 9. Nuvola di punti, prospetto a valle (elaborazione di Daniele Maiorino).



Fig. 10. Prospetto attuale a valle. Fotoraddrizzamento. (elaborazione di Daniele Maiorino).



Fig. 11. Prospetto attuale a valle. Fotoraddrizzamento e misurazione delle superfici rettificate (elaborazione di Daniele Maiorino).

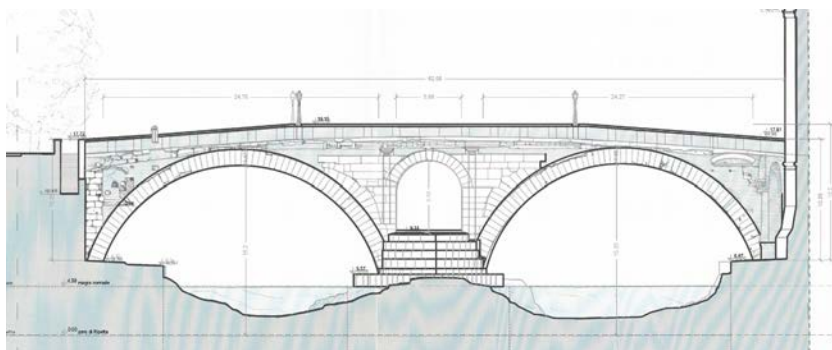
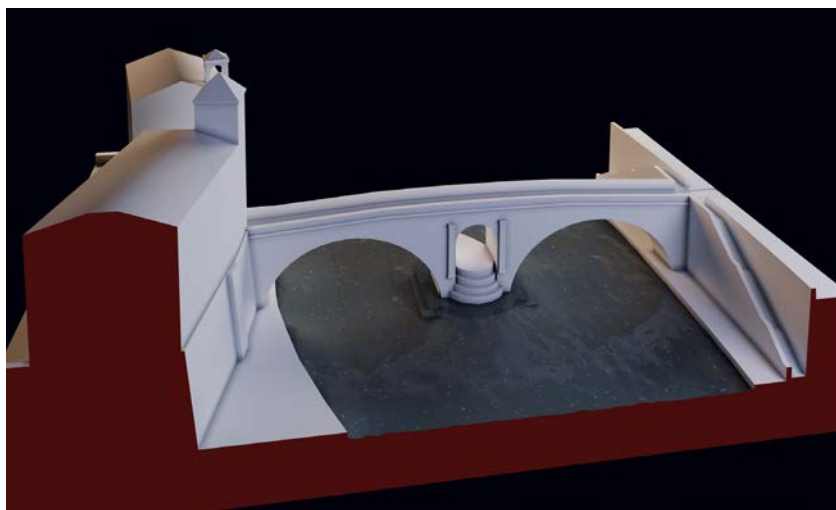


Fig. 12. Prospetto attuale a Monte. Confronto tra rilievo da nuvola di punti e fotoraddrizzamento. Lettura ed interpretazione dei dati: analisi metrica, geometrica e proporzionale (elaborazione di Daniele Maiorino).

Dal modello matematico si è deciso di estrarre dei modelli 2D geometrici e architettonici, descrittivi dello stato attuale del ponte sia dal punto di vista delle principali entità geometriche semplici, una astrazione geometrica quindi, che dal punto di vista delle caratterizzazioni materiche e cromatiche delle superfici.

Queste operazioni di acquisizione con 3D scanner laser sono state integrate con operazioni di fotoraddrizzamento di ciascun fronte¹⁴. Il fotoraddrizzamento (Fig. 10) è stato effettuato grazie alle misurazioni effettuate in situ, messe in relazione con i dati metrici derivanti dalla scansione laser; per ottenere un buon risultato si è dovuto effettuare la calibrazione della macchina fotografica e la correzione automatica delle distorsioni ottiche, operazione gestita attraverso il software. Il raddrizzamento della fotografia si ottiene identificando le linee di fuga prodotte dalla distorsione prospettica della fotografia; in questo modo il software consente di recuperare l'ortogonalità dello scatto, i giusti rapporti dei profili e i corretti piani prospettici di lavoro.

Il fotopiano ottenuto, misurabile con le reali dimensioni esclusivamente sul piano di quadro identificato e definito in fase iniziale (Fig. 11), è stato confrontato con la restituzione grafica della nuvola di punti; da qui è stato possibile verificare che nelle dimensioni di massimo ingombro del "ponte", il fotopiano risulta essere in linea con la rappresentazione, mentre le arcate riportano una leggera distorsione probabilmente dovuta al loro oggetto rispetto il piano raddrizzato; tutto ciò che si trova davanti e dietro il piano non sarà quindi misurabile. Il tutto ha consentito di caratterizzare in maniera molto più dettagliata i modelli architettonici (Fig. 12).



Figg. 13, 14, 15. Viste del modello numerico 3D renderizzato (elaborazioni di Roberto Barni).

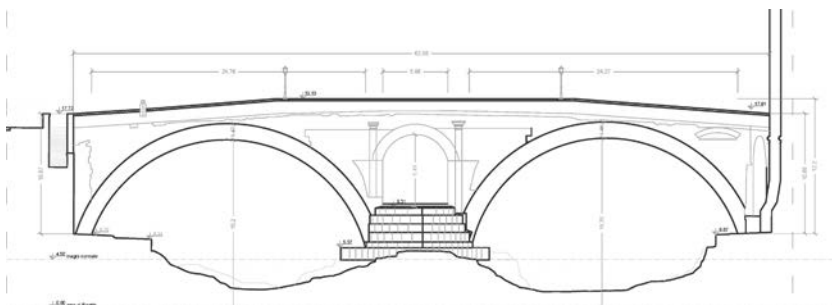


Fig. 16. Prospetto attuale a monte (elaborazione di Daniele Maiorino).

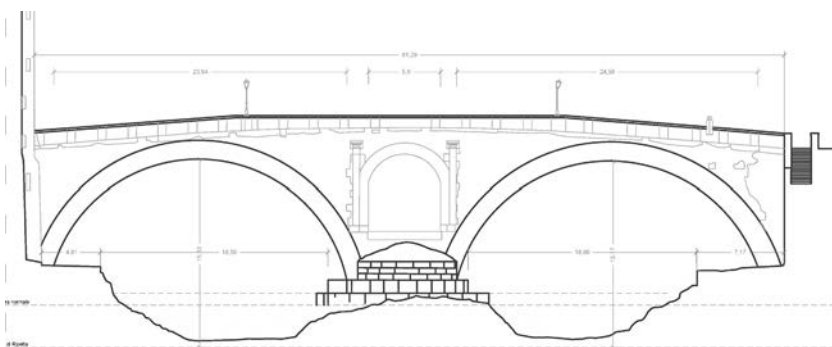


Fig. 17. Prospetto attuale a valle (elaborazione di Daniele Maiorino).

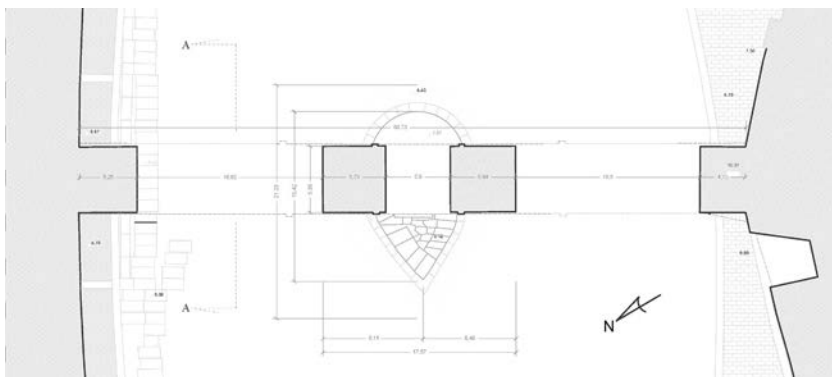


Fig. 18. Pianta quotata (elaborazione di Daniele Maiorino).

3. Operazioni di modellazione 3D

Dal modello numerico per punti, la nuvola di punti acquisita con 3D scanner laser, si è realizzato un modello numerico per superfici mesh, quindi è stata effettuata una modellazione detta poligonale, che si differenzia da quella NURBS per l'algoritmo che sta alla base del processo di creazione del modello.

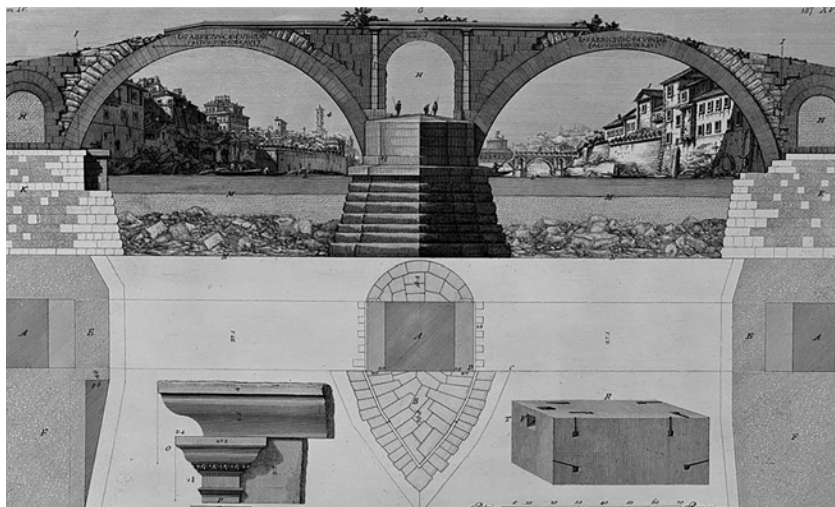


Fig. 19. Prospetto a monte originario, planimetria e dettagli costruttivi (capitello, cornice, conci), incisione di Giovanni Battista Piranesi (*Le Antichità Romane*, 1784, Tomo IV, tav. XVIII).

Il modello così ottenuto è, già di per sé, indubbiamente utile per delle valutazioni percettive e di inserimento volumetrico all'interno dell'ambiente urbano in cui il ponte è immerso (Figg. 13, 14, 15). Dal modello numerico infine sono stati realizzati dei modelli 2D, piante, prospetti e sezioni del Ponte Fabricio.

4. Modelli 2D e analisi geometrico-proporzionali

Sono state realizzate, quindi, una serie di elaborazioni, i modelli 2D appunto, descrittive della struttura, quali due piante a diverse quote, una ad altezza dei piloni, una sul piano di calpestio del passaggio pedonale, due prospetti dei fronti, a monte e a valle, nelle accezioni geometrica e architettonica. I modelli 2D estratti dal modello numerico hanno consentito di interrogare il manufatto, interpretare alcuni dati oggettivi da esso estratti ed effettuare alcune considerazioni di carattere geometrico proporzionale e tecnico costruttivo (Figg. 16, 17, 18).

Strutturalmente il ponte presenta due grandi arcate laterali e un fornice più piccolo nella pila centrale atto a favorire lo smaltimento delle acque.

Dal punto di vista dimensionale, considerando i dati oggettivi estratti dai modelli, il ponte ha una larghezza massima di circa 6,30 m (misurata all'esterno dei parapetti) e una lunghezza totale di 62,97 m (misurata a filo con i parapetti). Le due arcate, a sesto leggermente ribassato,

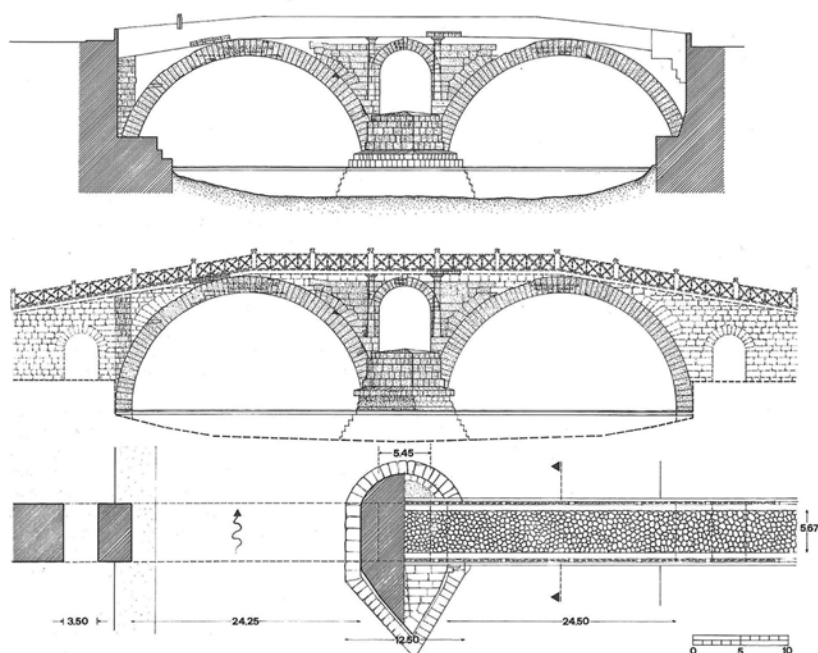


Fig. 20. Prospetto attuale a monte (in alto), ricostruzione del prospetto originario a monte (al centro) e pianta attuale con integrazione degli elementi scomparsi (spalle e arcatelle laterali) (in basso), elaborato grafico (da GALLIAZZO 1995, p. 23).

risultano sostanzialmente uguali con luce di 25,93 m, lato lungotevere de' Cenci, e 24,97 m lato Isola Tiberina, e presentano archi di testata in travertino, con archivolti a corona semicircolare. I cunei (molto stretti e lunghi) sono generalmente ammorsati a dente; a monte, in particolare, si può notare che alcuni conci sopra le reni sono disposti a ventaglio, il che fa pensare alla possibile presenza di un secondo anello di cunei, sovrapposto al principale. Il fornace centrale presenta una larghezza di 5,92 m, con archivolti a corona semicircolare contornato da due esili lesene in travertino con fusto piatto e capitello tuscanico a sostegno della cornice di coronamento. Le spalle del ponte originariamente erano costituite da pietra sperone e blocchi in tufo dell'Aniene, forate da archi minori a tutto sesto (con luce di 3,50 m e soglia di appoggio dei piedritti a ben 2,50 m sul pelo di magra), non più visibili oggi poiché inglobati dai moderni muraglioni di arginatura¹⁵ (Fig. 19). La pila centrale è larga 12,50 m e lunga 20 m, incorniciata da due lesene e sorretta da una platea tufacea. A monte essa è protetta da un possente avambecco triangolare asimmetrico sul quale è sovrapposto un elemento triangolare (cappello) e una chiusura semi-piramidale che raggiunge la soglia del fornace centrale; a valle, inve-

ce, la pila è completata da un retrobecco arrotondato, semicircolare, realizzato anch'esso con elementi in pietra ma privo di chiusura superiore¹⁶.

Il paramento esterno, attualmente caratterizzato sostanzialmente da laterizio, originariamente era costituito da blocchi di travertino (materiale solitamente utilizzato durante la bassa Repubblica¹⁷), in parte ben visibili sul timpano a monte, in prossimità della pila centrale (Fig. 20).

Dal punto di vista della tecnica costruttiva e dei materiali impiegati, la pila e i rinfianchi del ponte sono costituiti interamente da blocchi di peperino e tufo dell'Aniene misto con quello di Monteverde, mentre le spalle sono caratterizzate da pietra sperone e blocchi di tufo dell'Aniene. Tutte le strutture voltate e gli intradossi delle arcate (tranne quelle di testata) sono realizzate in pietra sperone mentre gli altri elementi quali pile, rostri, muri di testa dei timpani, cornice di coronamento e archi di testata delle arcate sono in travertino. La tecnica di posa utilizzata per la disposizione dei conci è tipica dell'*opus quadratum*¹⁸ poiché probabilmente caratterizzato da un allettamento di calce (per migliorare l'aderenza tra i giunti) dato che non esistono testimonianze certe sulla presenza e l'uso di perni o grappe metalliche¹⁹.

Assumendo come quota di riferimento 0.00 quella convenzionale del Tevere in corrispondenza di Ripetta, si evince una quota del punto più alto della balaustra in mezzzeria di +18,92 m (che si riduce a +14,50 m considerando la quota di magra normale), mentre il pilone centrale ha una quota di +9,31 m. Le due arcate hanno una quota di +15,21 m quella lato lungotevere de' Cenci e +15,35 m quella lato Isola Tiberina (rispettivamente +10,80 m e +10,95 m riferita alla quota di magra), misurate in mezzzeria al cervello della volta. Il fornice minore del pilone centrale ha una quota di +15,68 m (+11,28 m sul piano di magra).

Un'altra analisi condotta sui modelli 2D ottenuti dal modello numerico è stata quella geometrico proporzionale, al fine di valutare le figure geometriche che sottendono alla costruzione del ponte e alle regole, anche proporzionali, a esse correlate. Basandoci, quindi, sui modelli 2D come piante e prospetti, dal punto di vista geometrico il ponte è costituito da due circonferenze simili (diametro 25,93 m, lato lungotevere de' Cenci; diametro 24,97 m, lato Isola Tiberina) che inviluppano le due arcate maggiori e una circonferenza minore per il fornice minore posto nel pilone centrale (diametro 5,92 m).

La prima osservazione che si evince dall'analisi geometrica è che le due circonferenze maggiori non hanno la stessa linea di imposta; i loro centri infatti hanno una differenza di quota di circa 0,60 m (Fig. 21).

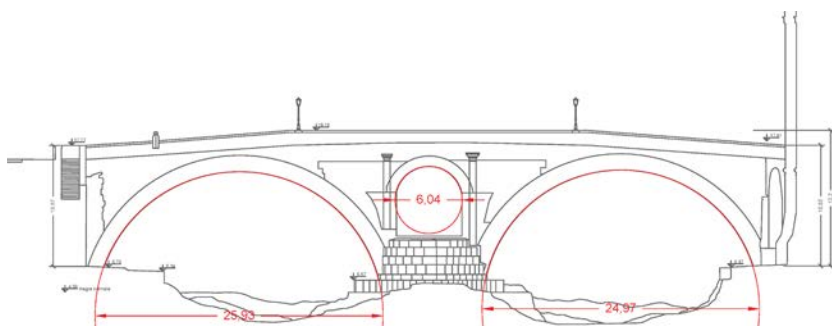


Fig. 21. *Analisi metrica con la restituzione grafica dell'ipotesi ricostruttiva della forma originaria (elaborazione di Daniele Maiorino).*

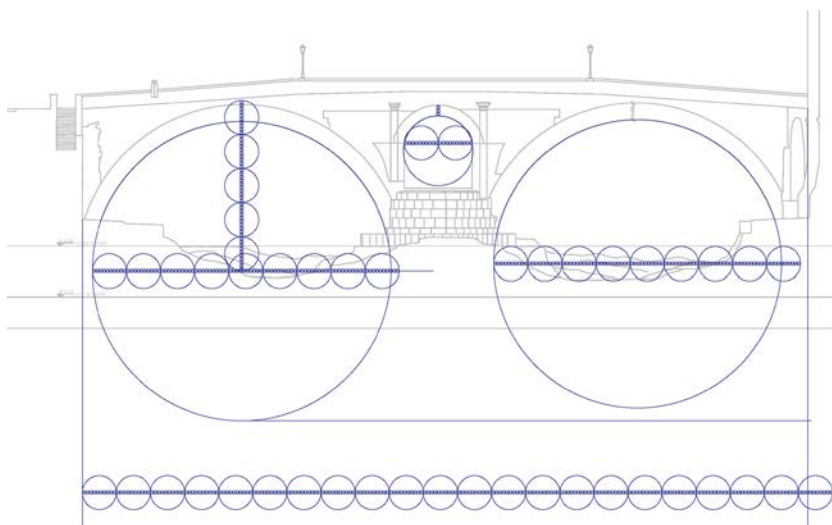


Fig. 22. *Analisi geometrico-proporzionale (elaborazione di Daniele Maiorino).*

Una seconda analisi alla quale sono stati sottoposti i modelli 2D è consistita nel prendere come modulo proporzionale il piede romano (assumendolo pari a 0,296 m) e interrogare la struttura in base a esso (Fig. 22). I dati principali estrapolati da una siffatta analisi proporzionale danno una lunghezza totale di 112,7 piedi, una larghezza di 21,28 piedi, il che ci dà un rapporto di 1/10. Le due arcate hanno un diametro rispettivamente di 88 piedi quella lato lungotevere de' Cenci e 84 piedi quella lato Isola Tiberina; la ghiera delle arcate è pari a 5 piedi (quindi i conci delle arcate sono di 1,48 m). Il fornace minore del pilone centrale è di 20 piedi esatti con ghiera di 3 piedi. La distanza dei centri, all'imposta, delle due arcate è pari a 117 piedi.

¹ L'ipotesi è stata formulata sulla base del passo di Livio in cui egli fa intendere che l'Isola Tiberina era collegata stabilmente alla terra ferma sin dal 192 a.C. (LANCIANI 1995, p. 30).

² D'ONOFRIO 1980, p. 95.

³ I *curatores viarum* solitamente si occupavano dei manufatti fuori città. Il caso del Ponte Fabricio fu un'eccezione dato che i ponti urbani talvolta erano eretti dai censori (LUGLI 1934, p. 303).

⁴ Dione Cassio, storico greco, annota la datazione e la costruzione del ponte: «ed allora fu costruito il ponte di pietra che conduce alla piccola isola in mezzo al Tevere e che si chiama Fabricio» (RAMIERI 2003, p. 141).

⁵ RAMIERI 2003, p. 144.

⁶ ROBERTO VALENTINI, GIUSEPPE ZUCCHETTI. *Codice topografico della città di Roma*, III. Roma, 1946.

⁷ Questa informazione ci giunge dall'Albertini il quale ci riferisce che, ai suoi tempi, il ponte detto di Tarpeo o Fabricio si chiamava anche «*pons IIII capitum*» (VALENTINI, ZUCCHETTI, op. cit., IV, p. 466).

⁸ Segnalata ma non trascritta da Pietro FROSINI. Come fu salvata l'Isola Tiberina. In *Strenna dei Romanisti*, 1965, p. 167, cfr. nota 2.

⁹ Sembrerebbe che i restauratori innocenziani si siano limitati ad un rafforzamento dei parapetti e a un riassetto del selciato D'ONOFRIO 1980, p. 101).

¹⁰ C. TUCCIMEI. Gli interrimenti nell'alveo sinistro dell'Isola Tiberina e proposte per rimediarvi. *Annali della Società degli Ingegneri e degli Architetti Italiani*, IX, 1894, p. 92.

¹¹ ACS, Piano Regolatore, b. 33, fasc. 165.

¹² Per le operazioni di acquisizione è stato impiegato un FARO Focus 3D.

¹³ È ormai noto che la risoluzione della scansione, è un fattore che dipende in maniera determinante dalla distanza in cui è posizionato lo strumento (il probe in alcuni scanner) ma anche, naturalmente, dalla posizione relativa dello scanner stesso rispetto all'oggetto da rilevare.

¹⁴ Per le operazioni di fotoraddrizzamento si è impiegato il software Acca FOTUS.

¹⁵ Data la presenza delle spalle e dei piccoli archi laterali il ponte antico aveva una lunghezza totale di circa 80 metri (GALLIAZZO 1995, p. 22).

¹⁶ GALLIAZZO 1995, p. 22.

¹⁷ È probabile l'ipotesi che solamente le parti centrali del ponte fossero rivestite in travertino visto che sull'estrema parte sinistra, sui prospetti, sono visibili tutt'ora i blocchi in tufo ben squadriati (D'ONOFRIO 1980, p. 96).

¹⁸ L'opera quadrata (*opus quadratum*) è una tecnica di costruzione della Roma antica che consiste nella sovrapposizione di blocchi squadriati (in genere parallelepipedi di altezza uniforme) che vengono messi in opera in filari omogenei con piani di appoggio continui. In ambito romano la tecnica venne utilizzata a partire dal VI secolo a.C. e si affinò progressivamente, con una maggiore regolarità del taglio e una disposizione più articolata dei blocchi. L'uso continuò anche dopo l'introduzione del cementizio per tutta l'età imperiale, affiancato alle altre tecniche.

¹⁹ Solo nell'incisione di Piranesi tratta da *Le Antichità Romane*, tomo IV, 1784 si fa riferimento alla presenza di apposite forature sui blocchi in pietra per l'utilizzo di grappe metalliche (GALLIAZZO 1995, p. 23).

Ponte di Augusto a Narni

Maria Laura Rossi

Il contributo illustra l'esperienza di studio, in costante evoluzione e progresso¹, condotta sul celebre Ponte di Narni lungo l'antico tracciato della via Flaminia, una delle più importanti opere di infrastruttura costruite dai Romani. Varie ipotesi sono state formulate sulla possibile conformazione del ponte, sulle dimensioni delle arcate, sulle misure e sulle proporzioni originarie. In particolare si tenta di fornire possibili risposte ad alcuni persistenti interrogativi, ripercorrendo in primo luogo i passi affrontati durante la ricerca, a partire dalle azioni di rilievo e dallo studio dei rapporti tra il ponte, il Santuario della Madonna del Ponte e il tracciato della Via Flaminia; la seconda fase di approfondimento del caso di studio ha messo in relazione gli aspetti geometrici e di misura con quelli strutturali, resi evidenti dallo stato di rudere del ponte che, nel crollo, ha esposto i suoi paramenti, il nucleo e la tecnica di fissaggio dei blocchi.

1. Il ponte di Augusto e la grotta del Santuario della Madonna del Ponte

Nel 27 a.C. Augusto fece costruire un ponte per attraversare la valle del Nera collegando due rilievi montuosi, quello del Monte Sant'Angelo, a nord verso la piana ternana, alle cui pendici troviamo oggi il santuario detto della Madonna del Ponte, e quello del Monte Maggiore, a sud, appena sotto le fortificazioni murarie dell'antica città di Narnia. Si tratta di un punto strategico poiché, oltre a permettere l'attraversamento del fiume e a collegare le due sponde, funge da filtro tra il paesaggio collinare e la valle ternana. L'assetto topografico e, quindi, il rapporto del ponte con la città e con il paesaggio dopo duemila anni è praticamente immutato.

Il ponte si presenta come un'imponente opera di ingegneria in muratura con 4 arcate, da contestualizzare nell'ambito dei lavori di restauro della via Flaminia. Questa via è ancora oggi una delle principali arterie di attraversamento dell'Italia centrale e molti tratti attualmente corrispondono all'antico percorso; tuttavia non è possibile risalire con precisione all'antico tracciato nel punto in cui sorge il ponte, poiché dalla fine dell'Ottocento fino alla Seconda Guerra Mondiale quest'area ha subito importanti modifiche a seguito della costruzione di centrali idroelettriche e di assi viari alternativi.

Nel corso dei secoli sono state formulate numerose ipotesi in merito a tale questione e, a supporto delle stesse, vi sarebbero dei ritrovamenti risalenti al XVII secolo. Un'interessante preesistenza che potrebbe essere in qualche modo collegata al tracciato della via Flaminia è quella della grotta del Santuario della Madonna del Ponte, scoperta ai primi del Settecento, con all'interno pitture di epoca medievale. Di recente intorno alla grotta è stata costruita una chiesa, scavando anche parte del Monte Sant'Angelo, su quel lato che presumibilmente conservava le tracce della via Flaminia. La difficile situazione orografica nel punto di innesto tra il ponte e il Monte Maggiore, dove negli anni Sessanta del Novecento è stata realizzata una nuova strada di accesso a Narni, non ha consentito di acquisire al momento informazioni utili per indagare in maniera approfondita l'area in cui si trovava quasi sicuramente il tracciato della via Flaminia a ridosso dell'antico nucleo di Narni. La costruzione del santuario non è l'unica opera che va a incidere sull'assetto paesaggistico; lo stesso ponte è stato modificato nel 1860 per permettere il passaggio della linea ferroviaria Roma-Terni, con la demolizione di una parte della sostruzione della spalla destra del ponte e la definitiva cesura tra la riva destra del fiume e la piana ternana, dove oggi si trova l'abitato di Narni Scalo. Inoltre, figurativamente, il nuovo varco funge da quinta arcata, alterando completamente la lettura complessiva e il ritmo compositivo a quattro archi del ponte romano (Fig. 1).

In realtà l'unica arcata superstite e intatta è la prima, a ridosso della spalla sinistra, rappresentata in un identico stato di conservazione da importanti artisti dei secoli scorsi.

Sebbene già nel VI secolo vi fossero già stati alcuni crolli parziali, seguiti da una ricostruzione che consentì nuovamente l'uso del ponte, dalla prima metà dell'XI secolo viene denominato nei documenti "ponte rotto", chiara indicazione sul suo stato di conservazio-

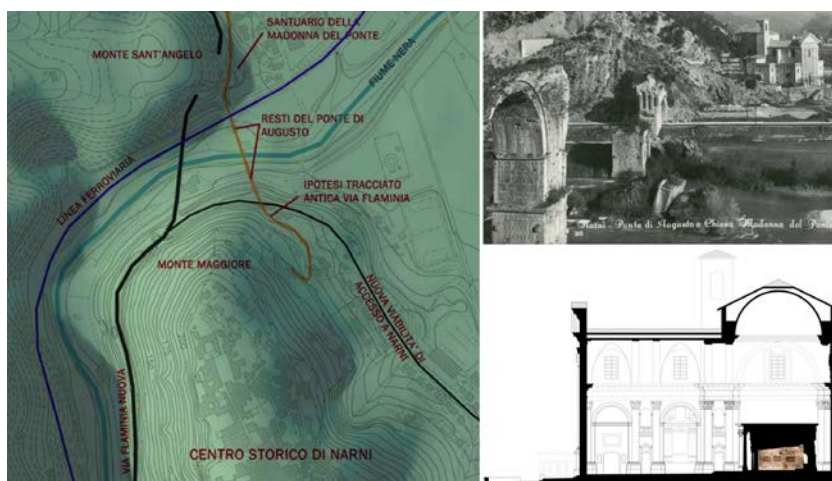


Fig. 1. A sinistra: assetto planimetrico territoriale. A destra, in alto: veduta dei ruderi del ponte e, sullo sfondo, il Santuario; in basso: vista in sezione del Santuario e della grotta con affreschi medievali (elaborazione di Maria Laura Rossi).



Fig. 2. A sinistra: vista dei resti del ponte e, a destra, schematizzazione della configurazione del ponte pre e post crollo del secondo pilone (modellazione di Wissam Wababeh).

ne. Alcuni storici² riconducono la causa del crollo del secondo, terzo e quarto arco ad una piena del fiume Nera, evento che si è ripetuto numerose volte nei secoli; Alberto Cecchi³, tuttavia, sulla base di analisi e studi condotti sul ponte, riconduce le cause del collasso a un progressivo insabbiamento delle fondamenta del secondo pilone.

Dopo il crollo della seconda e della terza arcata, il 17 luglio 1885 anche il secondo pilone che le sosteneva seguì la medesima sorte a causa della spinta delle acque del fiume, sezionandosi in tre macro blocchi che hanno perso qualsivoglia riferimento rispetto alla loro posizione originaria. Questo secondo pilone e la perdita di informazioni rispetto alla sua configurazione iniziale rappresenta la

principale causa dell'avvicinarsi di ipotesi ricostruttive per lo più contrastanti tra loro (Fig. 2).

2. Rilievo digitale integrato a supporto e verifica delle ipotesi ricostruttive

Il paesaggio in cui si innesta il Ponte di Augusto, particolarmente suggestivo sia a livello naturalistico che per le rovine stesse del ponte, ha nel corso dei secoli attratto molti artisti e studiosi e proprio per questi motivi si dispone di un consistente repertorio iconografico databile dalla seconda metà del Seicento alla fine dell'Ottocento, con immagini che documentano i luoghi e nelle quali il ponte non è un'opera di ingegneria ma è esso stesso paesaggio⁴. Tra i tanti artisti, ve ne sono alcuni che si sono concentrati principalmente sulla rappresentazione del manufatto, come se fosse esso stesso il fulcro dell'immagine e che hanno dato maggiore evidenza all'aspetto ingegneristico dell'opera, con rappresentazioni molto realistiche dal valore documentale, particolarmente utili per riuscire a comprendere tutte le modifiche che nel tempo esso ha subito (Fig. 3). Inoltre molti di questi studiosi, a causa dei crolli e dell'instabilità insita nelle opere murarie rimanenti, si videro affidare il compito di rilevare il ponte per programmarne i lavori di consolidamento. Tale patrimonio iconografico dunque non annovera soltanto rappresentazioni artistiche ma anche scientifiche che, nella maggior parte di casi, sono accompagnate da ipotesi sulla conformazione originaria.

Tra le varie ipotesi configurative quella dell'ing. Giuseppe Riccardi, del 1837, appare essere la più accurata scientificamente e metodologicamente, almeno dal punto di vista della rappresentazione, potendo confrontare pianta e alzato: si noti la differenza del piano d'imposta della grande arcata, la pendenza della strada, il disallineamento dei piloni in pianta⁵.

Il rilievo più recente di cui disponiamo, eseguito con strumentazioni innovative topografiche e fotogrammetriche, è stato curato da Alberto Cecchi nel 2003⁶, il quale risponde a molti interrogativi in maniera motivata e convincente tralasciando però alcune questioni fondamentali. Egli, come molti studiosi prima di lui, propone una diversa soluzione ricostruttiva scaturita da un'attenta lettura dei dati rilevati; sulla base di rilievi geometrici e considerazioni costruttive storiche egli ritiene che la configurazione originale fosse quella con



Fig. 3. Piccolo estratto delle fonti iconografiche relative al Ponte di Augusto: a) d) Philipp Jacob Hackert (incisore Georg Abraham), *Première, Deuxième vue des ruines du pont d'Auguste sur la Nera a Narni*, 1795, 1779; b) Peter Stephens (incisore James Forrester), *Les ponts de Narni*, 1760; c) Carlo Labruzzì, *Ponte di Narni*, datazione 1760-1800; e) L. Rumi (incisore Ambrogio Centenari), *Avanzi del Ponte di Cesare Augusto sulla Nera, presso Narni*, 1864; f) Jean-Baptiste-Camille Corot, *The Augustan Bridge at Narni*, datazione 1826-1827 (©Philippe Bousquet, <artifexinopere.com>).

4 archi con le imposte del secondo arco alla stessa altezza, così da avere un arco a tutto sesto similmente agli altri, contraddicendo le ipotesi costruttive che lo hanno preceduto nelle quali si è spesso accarezzata l'idea di un arco principale impostato su due diversi livelli di quota (Fig. 4). L'abbassamento di circa 2,9 m dei blocchi di imposta del secondo pilone, secondo Cecchi, sarebbe giustificato dall'insabbiamento della fondazione del pilone stesso avvenuto durante i duemila anni della sua storia.

Su queste premesse, e in considerazione anche del fatto che il rilievo di Cecchi poteva essere integrato da nuove acquisizioni re-

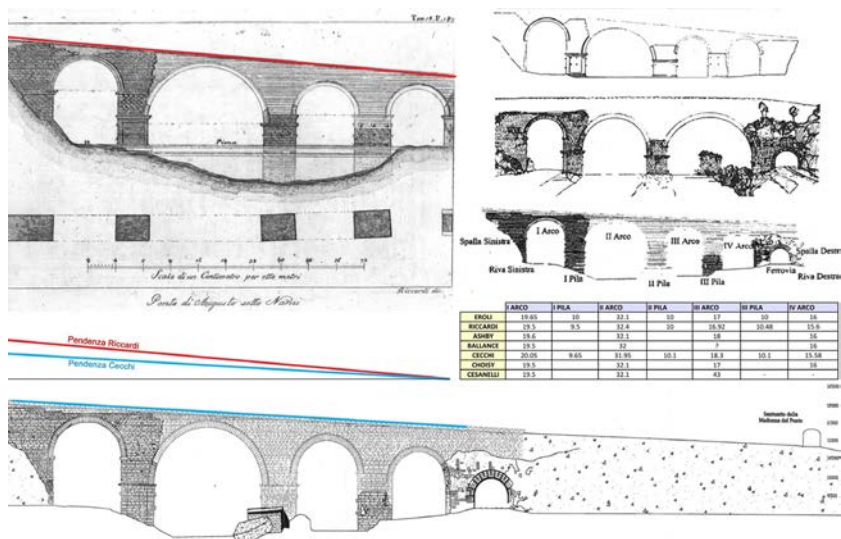


Fig. 4. Alcune ipotesi ricostruttive. Confronto tra la configurazione di Riccardi (1837), in alto a sinistra, e quella di Cecchi (2003), in basso. Sulla destra: ipotesi a quattro archi di Erolì, ricostruzione a tre archi di Cesanelli, ipotesi a 4 archi di Ashby, Fell, Ballance.

alizzate con scanner laser e fotogrammetria, il gruppo di ricerca ha ritenuto utile eseguire una nuova campagna di rilevamento digitale.

Il primo obbiettivo da perseguire nella prima fase del rilievo è stato quello di acquisire un'unica *points cloud*, integrata da valori RGB fotografici e da punti di controllo topografici⁷, che comprendesse non solo i resti del ponte da una sponda all'altra del fiume (Fig. 5), ma anche tutta l'area del Santuario della Madonna del Ponte. Ciò ha consentito di elaborare un modello che fosse in grado di mettere in relazione diretta tutta la valle del fiume Nera con i resti del ponte e l'interno della grotta.

Le stazioni di ripresa, partendo proprio da quest'ultima, hanno interessato l'interno e l'esterno del santuario fino a raggiungere la sommità della spalla destra del ponte, da cui è stato possibile effettuare una ripresa dall'alto di tutta l'area, superare i binari della ferrovia, rilevare i resti sulla riva destra del fiume e acquisire infine la grande arcata ancora integra sulla riva sinistra. Come si è detto, il secondo pilone è crollato nel 1885 durante una piena, probabilmente a causa di una combinazione di eventi: la sua particolare posizione al centro del letto del fiume, la spinta improvvisa e poderosa di una piena, la totale assenza di frangiflutti. La struttura, che nel crollare si



Fig. 5. In alto: viste delle rovine del ponte dalle due sponde del Nera. In basso: registrazione delle macronuvole: la prima arcata da un lato del fiume, le restanti strutture dall'altro (elaborazione di Maria Laura Rossi).

è frazionata in tre blocchi, risulta anche traslata dalla sua posizione originaria sotto l'effetto della pressione dell'acqua. Il terzo pilone è ben conservato, stabile nella posizione originaria e conserva perfettamente i paramenti esterni anche se privo della cornice superiore. La seconda e la terza arcata, poggianti sui piloni sopra descritti, risultano crollate nel 1053, sempre a causa di una piena del Nera. Da allora, sul ponte “rotto” di Augusto venne costruito un impalcato in legno, come dimostrano i fori di alloggiamento, per assicurare il passaggio. Fu una soluzione temporanea tanto che si preferì deviare il passaggio su un nuovo ponte, costruito nel 1217 a poca distanza.

In totale sono state realizzate 31 scansioni con una risoluzione strumentale di circa 10.000 punti sul piano equatoriale. Per la collimazione delle diverse *points cloud* nella maggior parte dei casi si è proceduto con l'apposizione di sfere a riconoscimento automatico tra scansioni contigue. In alcuni casi si è proceduto manualmente tramite riconoscimento di target di coordinate note rilevate topograficamente.

Le prime fasi di elaborazione della *points cloud* hanno consentito di fare alcune prime considerazioni: è stato possibile dedurre che la grotta del santuario non ha nulla a che vedere con il ponte, né per posizione planimetrica né per elevazione, qualunque possa essere la pendenza dello stesso. Inoltre è possibile notare che i piloni sono tutti allineati, quindi non ha valore alcuno l'ipotesi di

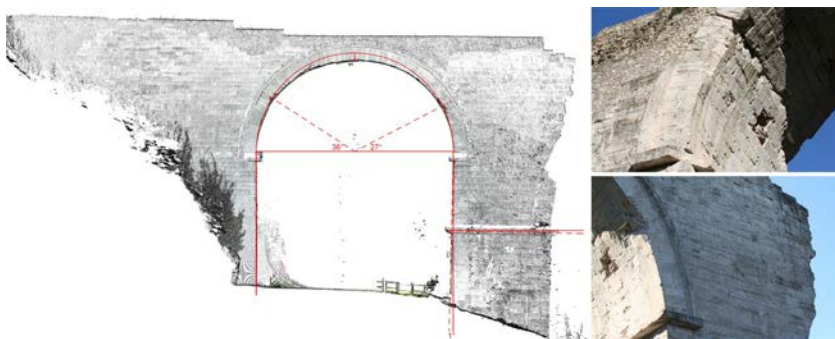


Fig. 6. Analisi delle fratture alle reni, 36° a sinistra e 27° a destra, della prima arcata, e conseguente rotazione di un grado sulla verticale in direzione dell'arcata mancante; a destra: particolari delle fratture alle reni (elaborazione di Maria Laura Rossi).



Fig. 7. In alto: point cloud. In basso: restituzione in pianta e prospetto del ponte e del Santuario della Madonna del Ponte (elaborazione di Maria Laura Rossi).

un cambio di giacitura in pianta che era stata paventata in alcune prime ricostruzioni. Il primo arco presenta delle fratture alle reni, similmente al comportamento di rottura che hanno subito gli altri due archi; tuttavia, se la seconda e la terza arcata sono crollate a causa dell'insufficiente resistenza del pilone alla pressione dell'ac-

qua, il primo pilone dovrebbe esserne stato escluso poiché si trova in una posizione rialzata rispetto al livello più alto mai registrato durante una piena. Oggi l'arco presenta un abbassamento in chiave e fratture in corrispondenza delle reni a 36° e 27° sul piano di imposta, rispettivamente lato spalla e lato pilone. Dai resti si ha nozione della curvatura della seconda arcata per circa 23° sul piano di imposta (Fig. 6). Tale piano non è più orizzontale poiché il pilone ha subito una rotazione di 1° sulla verticale. Di conseguenza è possibile affermare che l'arcata superstite presenta questo genere di fratture a causa dell'improvvisa assenza del secondo arco, il più grande nella configurazione originaria, che svolgeva un ruolo principale nel bilanciamento delle spinte. In seguito a tale crollo, il primo pilone si è inclinato in quella direzione a colmare la mancanza, estendendo e rendendo visibili gli effetti della conseguente rotazione sull'arco (Fig. 7).

La spalla destra, a nord, si presenta come la parte maggiormente degradata del ponte: mostra il nucleo, essendo quasi totalmente priva di rivestimento lapideo, rimosso in occasione del traforo ferroviario. La disposizione dei blocchi di paramento residuo appare simile a quella della parte inferiore della spalla sinistra. Tuttavia da un'analisi delle strutture rimaste risultano evidenti differenze costruttivo-tipologiche: dai resti dell'arcata che si interrompe in corrispondenza delle reni a 35° sul piano di imposta, si nota una diversa tecnica di posa in opera, probabilmente successiva alle altre, con l'alternanza di 5 anelli paralleli invece di un arco dall'intradosso costante⁸. L'arcata superstite poggia sulla spalla sinistra e sul terzo pilone. Quest'ultimo ha uno zoccolo in fondazione e non possiede rostri; presenta un paramento caratterizzato dalla regolarità della disposizione alternata per testa e per taglio dei filari, e da una accentuata smussatura della bugnatura, simile alla parte bassa della spalla; su due delle quattro facce sono presenti delle paraste negli spigoli.

3. I modelli del ponte per un'ipotesi ricostruttiva: dal modello discreto al modello parametrico

Come si è detto in precedenza, lo scopo principale del gruppo di ricerca è stato quello di verificare le diverse interpretazioni e versioni dello stesso oggetto, tramite gli attuali modelli 2D e 3D a servizio della conoscenza dell'architettura. Nel precedente paragrafo si è eviden-

ziato l'uso del modello numerico discontinuo in questo percorso di conoscenza e dalle analisi svolte è stato possibile costruire un modello matematico continuo, sintesi di interpretazioni a carattere prevalentemente geometrico. È questo dunque un modello di compromesso tra il dato numerico, una riproduzione fedele della realtà, e un modello geometrico ideale rappresentativo dell'idea progettuale.

Per risalire alla conformazione della seconda arcata, e di conseguenza dedurre l'esatto posizionamento del secondo pilone, si è proceduto con una lettura comparata tra i dati rilevati sulla prima arcata integra e le parti di arco ancora esistenti. Tenendo conto della non orizzontalità del piano di imposta, degli spancamenti dei paramenti e della curvatura dell'arco fino al punto di rottura in corrispondenza delle reni, sono stati calcolate lungo lo spessore del primo arco superstite un cospicuo numero di circonferenze passanti per terne di punti desunte dalla *points cloud*. La geometria unica risultante è la circonferenza media tra tutte quelle calcolate sulla totalità dello spessore, per il quale si è proceduto con piani verticali distanziati di 10 cm. È questo dunque un dato fondamentale che non solo genera l'arco ma fornisce contemporaneamente una soluzione di posizionamento del pilone crollato: essendo quest'ultimo il più importante fattore di incertezza, le arcate successive vengono determinate di conseguenza generando la configurazione complessiva del ponte.

Prima del crollo delle arcate, il ponte aveva un ritmo compositivo a quattro archi, ognuno con similitudini e diversità, e l'ipotesi di ricostruzione che segue è supportata non solo da ipotesi geometriche, avendo analizzato giaciture e curvature dei resti delle arcate, ma anche dal fattore "misura" delle geometrie stesse. A differenza dei precedenti studi, anziché riproporre ipotesi di soluzione metrico decimale i cui valori, come abbiamo detto, derivano da una lettura dello stato attuale che ha subito alterazioni anche molto significative nel corso dei secoli, si è cercata una soluzione che fosse in qualche modo compatibile e che avesse un riscontro in termini di unità di misura del tempo, cioè il piede romano (29,65 cm). Viene applicata tale metodologia poiché in molte opere di architettura di rilevanti dimensioni, e a maggior ragione per opere infrastrutturali antiche, si è spesso riscontrata una forte corrispondenza con i valori interi dell'unità di misura. Si è anche determinata una misura della prima arcata perfettamente compatibile con la terza. Uno stesso valore del diametro delle arcate sarebbe pienamente giustificato in un'ottica di ottimizzazione del

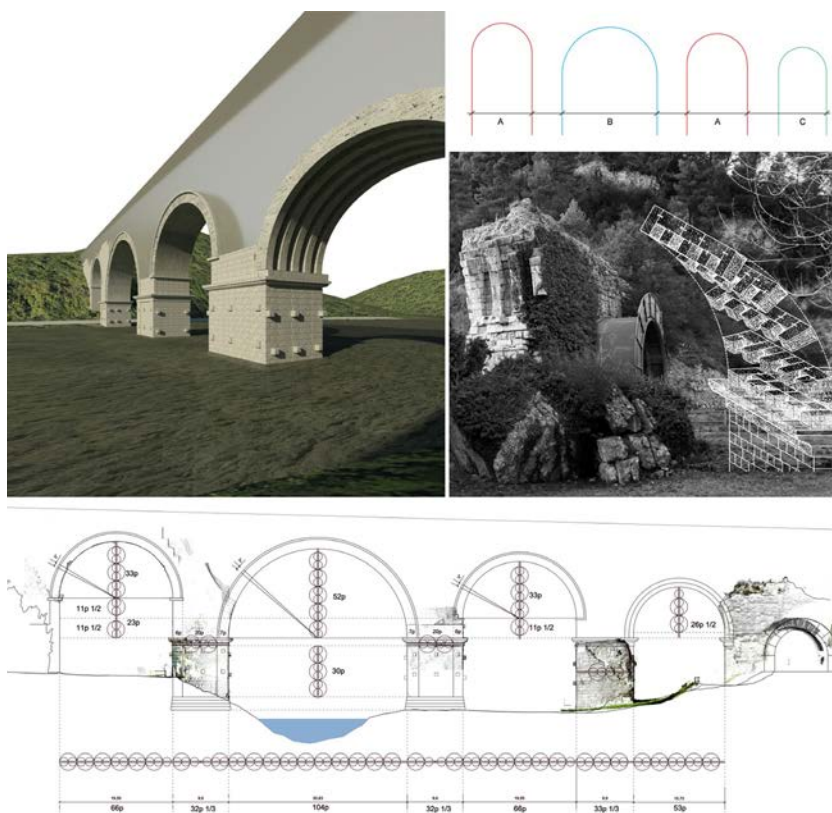


Fig. 8. In alto, a sinistra: vista del modello digitale di ricostruzione del ponte nella sua configurazione a 4 archi con la quarta arcata ad intradosso non costante; a destra: vista dell'arcata ad anelli alternati di rinforzo e ricostruzione di Galliazzo (GALLIAZZO 2004, fig. 13). In basso: ipotesi ricostruttiva sulla base della lettura proporzionale e metrologica (elaborazione di Maria Laura Rossi).

cantiere, potendo riutilizzare gran parte delle opere provvisorie di centinatura del primo arco. Si ipotizza pertanto che queste due arcate avessero un diametro di 66 piedi romani (pari a 19,57 m) e che l'arcata più grande avesse un diametro di 104 piedi (30,83 m) con una quarta arcata dal diametro di soli 53 piedi (15,71 m) (Fig. 8). Dette misure risultano perfettamente congruenti con quanto rilevato.

Lo studio delle pendenze del viadotto ha portato a una ipotesi intermedia tra quella calcolata dall'ing. Riccardi nel 1837, oggettivamente troppo ripida per il passaggio dei carri, e quella ridisegnata da Cecchi nel 2003, incompatibile sia nel raccordo verso Narni sia nel prolungamento verso la piana ternana con il posizionamento della grotta troppo in alto.

Una volta determinate forme, geometrie e misure di massima, si è cercato di approfondire anche gli aspetti di dettaglio a partire dall'apparecchiatura costruttiva. Come già detto, dalle prime indagini visive è parso subito evidente che tra i resti della prima campata e quelli della quarta vi sono delle differenze sostanziali: il primo arco a tutto sesto presenta un intradosso costante, così come, da quanto si evince dai resti e dall'apparato iconografico in nostro possesso, il secondo e il terzo. I resti della quarta arcata sono invece completamente differenti: è presente un intradosso non costante formato da 5 anelli di rinforzo, tecnica costruttiva che permette di avere la stessa valenza strutturale ma con un risparmio di materiale. Questa metodologia induce a ipotizzare che il quarto arco sia stato modificato rispetto al progetto originario o creato in un momento successivo rispetto agli altri.

Anche il terzo pilone risulta essere dissimile dagli altri, differente soprattutto se confrontato con il primo pilone che, a monte e a valle, presenta delle specchiature ed è più sottile, con una sezione che misura 9,90x7,50 m. Il terzo pilone è regolare, senza specchiature, e presenta una sezione di 9,90x8,00 m; anche questo fattore ci fa pensare a un rifacimento in un momento altro rispetto a quello della costruzione.

Singolarmente, il secondo pilone ha molti più fattori in comune con il terzo pilone che non con il primo pilone: non presenta specchiature, può essere considerato a sezione regolare di 9,90x7,50 m se non per alcuni ricorsi basamentali che gli consentono di raggiungere la sezione di 9,90x8,00 m. Questi dati sembrano supportare l'ipotesi secondo la quale il quarto arco sarebbe stato modificato nel tempo o effettivamente costruito dopo gli altri.

Pertanto si è portati a concludere che la conformazione originaria del ponte fosse a tre arcate, la prima e la terza delle medesime dimensioni e la seconda molto più grande.

Tale convincimento, estremo rispetto alle conclusioni degli studi che hanno preceduto questa ricerca, non può tuttavia basarsi solo sul confortevole ritmo compositivo A-B-A che governa le grandi masse, ma spinge a cercare ulteriori fondamenta e motivazioni che abbiano anche un riscontro funzionale nel contesto ambientale il cui il ponte è inserito. Il cedimento del secondo pilone, così come afferma Cecchi ma documentato già nel Rinascimento, unito al fatto che non è mai stata riscontrata la presenza di rostri, avvalorava l'ipotesi per la quale il fiume Nera originariamente potesse avere una sezione

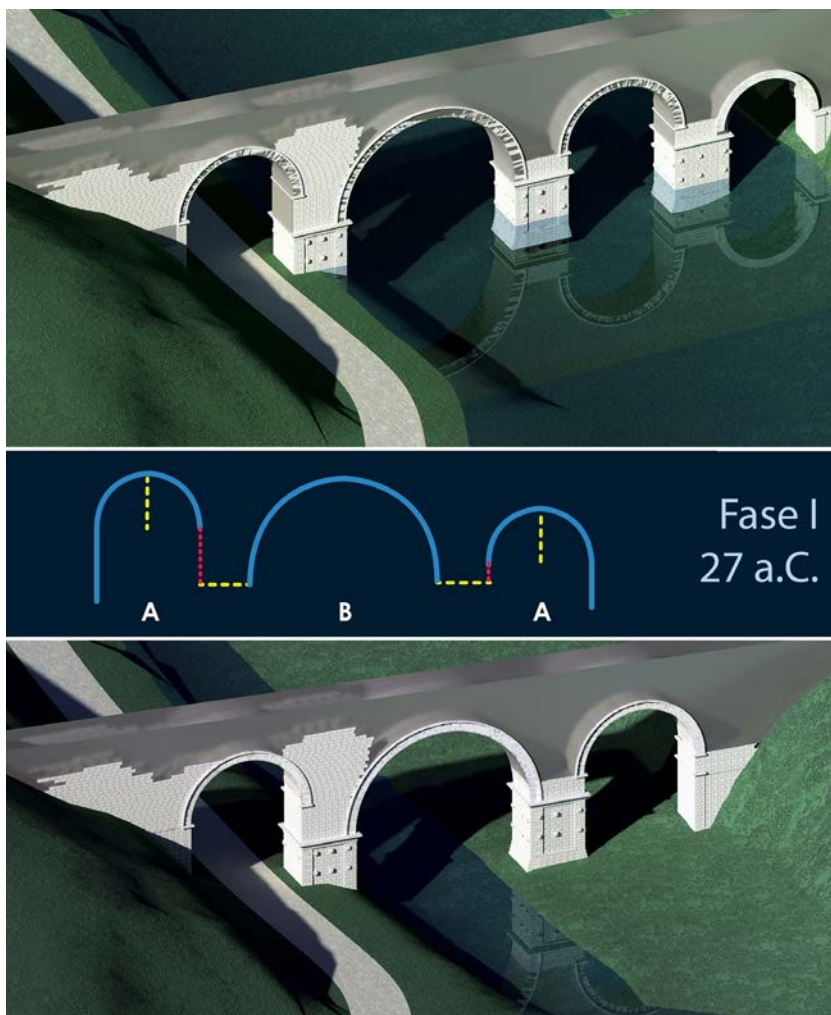


Fig. 9. Ipotesi ricostruttive: quattro arcate in presenza di un alveo del fiume più ampio, e tre arcate in presenza di una sezione più ristretta (elaborazione di Maria Laura Rossi).

fluviale molto più piccola e che interessasse solo la luce compresa tra il secondo e terzo pilone (Fig. 9).

Questo giustificerebbe l'uso di un'unica grande arcata centrale. A seguito di importanti modificazioni geologiche l'alveo del fiume potrebbe essersi allargato tanto che il secondo pilone avrebbe subito un importante abbassamento e un incessante logorio dovuto alle correnti, spesso impetuose, del fiume Nera. Nel momento in cui il nuovo alveo si fosse regolarizzato potrebbe essere sopraggiunta la possibilità di aprire una nuova arcata per garantire la continuità della

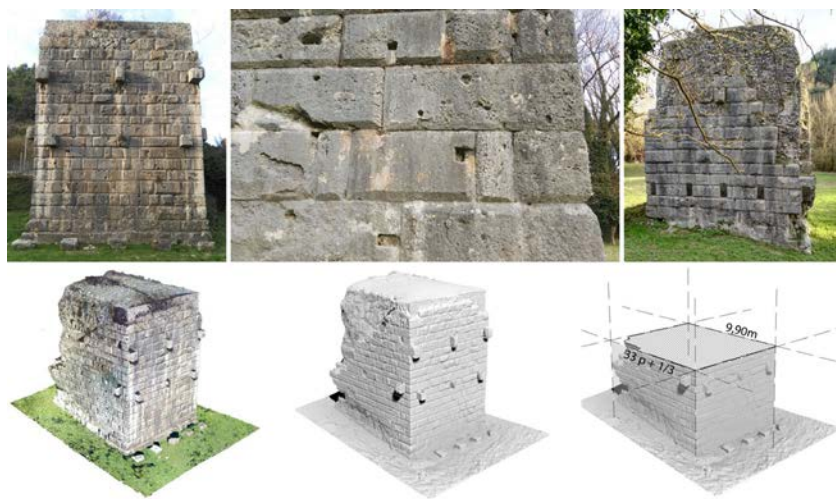


Fig. 10. Vedute del terzo pilone e dei blocchi in pietra nei quali risulta evidente la posizione incoerente dei solchi di sollevamento. In basso: gestione e analisi metrica del dato numerico di rilievo (foto di Maria Laura Rossi, elaborazioni di Wissam Wabbeh).

riva sinistra e anche per consentire un maggiore deflusso delle acque nei momenti di maggiore piena.

Tornando all'analisi di elementi attuali e concreti, grazie ai dati acquisiti con lo scanner laser è stato possibile rilevare le misure principali dei resti dei piloni ma anche i più piccoli particolari dell'apparecchiatura muraria. Lo studio dell'apparecchiatura costruttiva non si è fermato all'analisi dei paramenti ma, grazie soprattutto alla condizione del secondo pilone che si è frazionato in tre parti in seguito al crollo, è stato possibile non avere incertezze sulla struttura e sulla tecnica di fissaggio dei blocchi di pietra. Il ponte si presenta, dunque, come una robusta opera a sacco e paramento a vista in opera quadrata con conci e cunei bugnati di travertino locale; gli ammortamenti sono creati con graffe metalliche tra blocco e blocco, fino al nucleo interno cementizio formato da calce, sabbia, pietre e schegge di travertino. Esistono rigide regole nel taglio e nell'apparecchiatura dei conci: i filari sono alti ciascuno 2 piedi romani (59,3 cm) e sono disposti in maniera alternata di taglio, sempre di due moduli così da avere un blocco quadrato di 2x2 piedi romani, e di fascia, di dimensioni variabili ma sempre nell'unità di misura. È evidente che questa rigidità nell'apparecchiare i blocchi è rispettata prevalentemente nel primo pilone piuttosto che non nel terzo, di epoca successiva e eretto con blocchi di riuso (Fig. 10).

Per rappresentare al meglio il livello di conoscenza fin qui acquisito si è scelto di modellare la struttura del ponte per mezzo di un modellatore parametrico. Questa metodologia ha generato il modello in maniera molto simile alla vera e propria costruzione del ponte in cantiere, componendo blocco dopo blocco, filare dopo filare.

4. La modellazione parametrica e l'archeologia

Il processo di costruzione per via parametrica dei blocchi strutturali del Ponte di Augusto è stato impostato basandosi sulla trasformazione di elementi geometrici elementari, seguendo come unità di misura il piede romano e creando delle famiglie⁹ assoggettate alle rigide regole geometriche e di misura finora individuate.

L'analogia tra la costruzione del manufatto reale e quella del suo modello virtuale consente di trasporre le regole costruttive all'interno dell'ambiente digitale di modellazione. Il processo di costruzione dei blocchi viene ottimizzato attraverso la definizione di vincoli imposti e la possibilità di generare modifiche a cascata partendo da un'unica variazione parametrica¹⁰ (Fig. 11).

La struttura e l'applicazione di vincoli procede in maniera gerarchica, a partire dai rapporti riscontrati nelle grandi masse, per giungere a quelli che sussistono tra i vari blocchi. L'elemento preso a riferimento è il primo pilone, relativo a una prima fase di costruzione del ponte, il quale può quindi essere rappresentativo del progetto. Il principio costruttivo del pilone si evolve a partire da un volume monolitico su base regolare di 33 piedi $+1/3$ (9,90 m) per ogni lato, misurato immediatamente sotto l'imposta dell'arco e che ritroviamo in maniera costante nel terzo pilone. A questa misura fondamentale man mano si sottraggono dei volumi le cui dimensioni sono multipli di $1/3$ di piede romano. Il piano della specchiatura si trova alla distanza di $1/3$ dalla modanatura che segna il piano di imposta dell'arco, e il piano retrostante incorniciato a distanza di $2/3$ dalla specchiatura stessa. Si arriva quindi a una misura minima di 32 piedi $+1/3$ pari a 9,60 m. Infine, ci sono dei filari basamentali che aggiungono ognuno $1/3$ dello spessore del piede romano fino ad arrivare a terra. Questi dati dimostrano come i due piloni, pur partendo da una stessa dimensione, siano stati realizzati secondo principi differenti: nel primo c'è un'evoluzione dal punto di vista compositivo della forma che procede per sottrazione di volume, nel terzo la dimensione rimane costante per necessità funzionali e pratiche, essendo

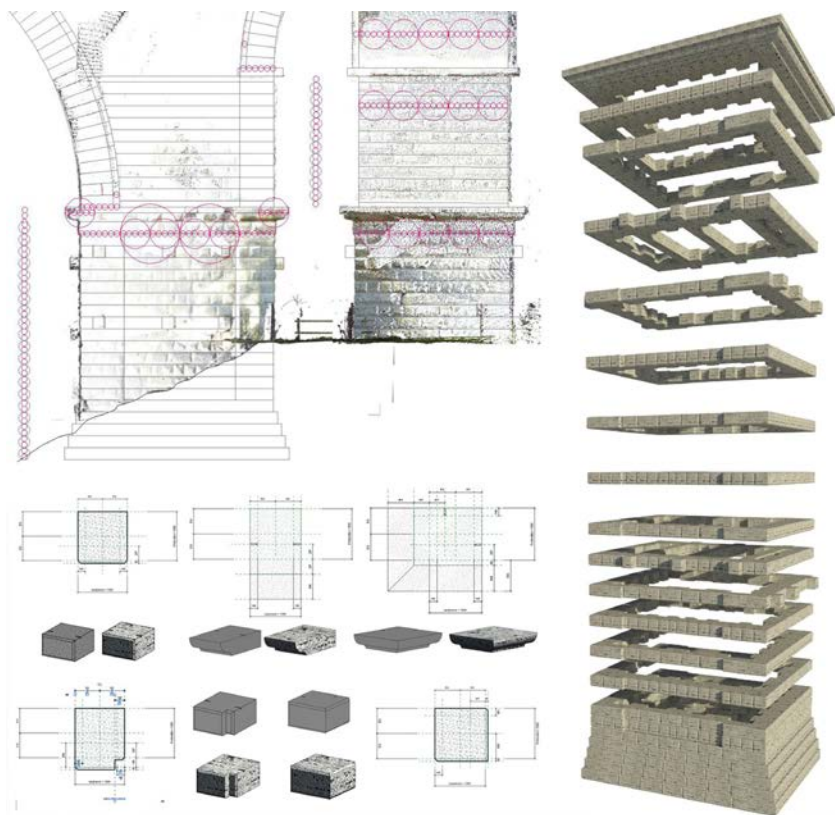


Fig. 11. In alto: proporzionamento del primo pilone tramite analisi metriche (piede romano) dei filari: vista del fronte ovest e sud (est e nord sono uguali rispettivamente). In basso: modellazione parametrica nel cantiere digitale: i conci sono blocchi elementari adattabili al sistema di regole dedotto dal rilievo. A destra: modellazione e sistema di sovrapposizione delle strutture del pilone (elaborazione di Maria Laura Rossi).

legato all'utilizzo di blocchi di riuso. Il secondo pilone presenta una zoccolatura che lo ha reso oggetto, nel corso degli anni, di numerose ipotesi interpretative. Il basamento infatti si trova a una distanza dall'imposta dell'arco che è molto più breve rispetto a quella che troviamo nel primo pilone, ed è per questo che tanti studiosi hanno negli anni ipotizzato un disallineamento delle imposte e un arco non a tutto sesto. Tuttavia l'apparecchiatura dei blocchi è simile a quella del terzo pilone che abbiamo assunto come postumo.

È noto, inoltre, che in seguito al crollo delle arcate nel 1053 è stata costruita una passerella di legno sul ponte in pietra per assicurare l'attraversamento; si è dunque ipotizzato che il secondo pilone, in seguito a un cedimento nel terreno, potesse essere stato riadat-

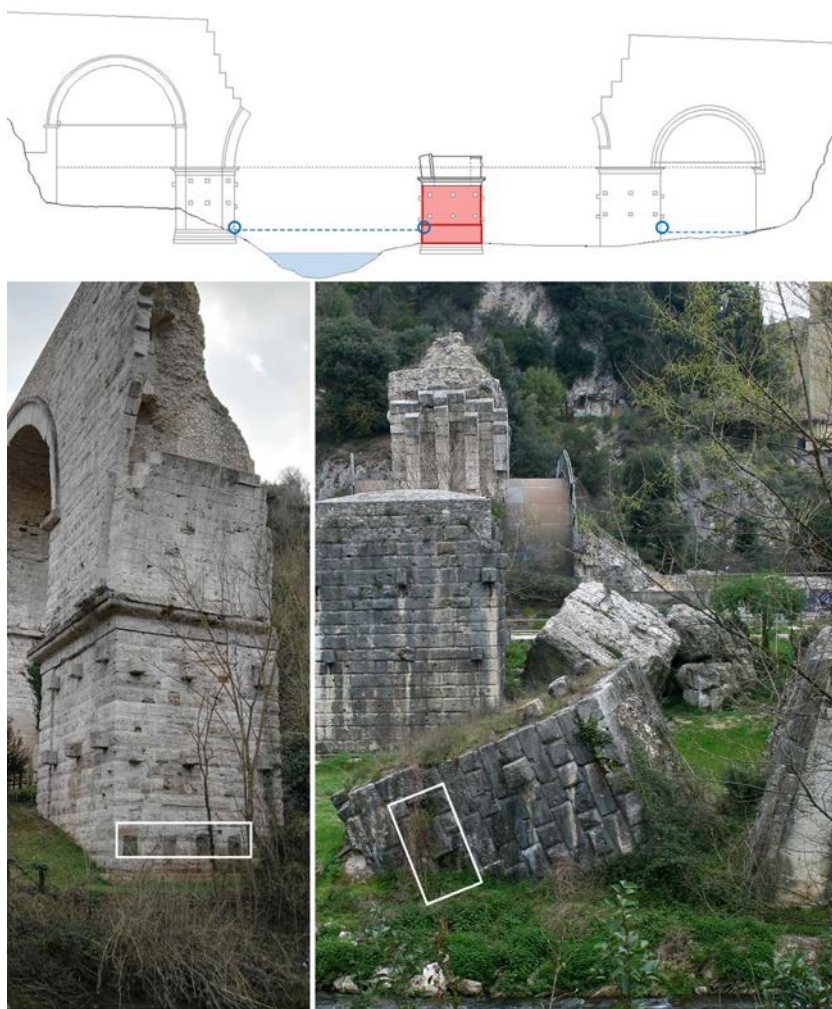


Fig. 12. L'allineamento dei fori di alloggiamento delle centine lignee evidenzia il corrispondente disallineamento delle due imposte del secondo arco. In alto: schematizzazione del posizionamento dei fori. In basso, viste del ponte; a sinistra: fori di alloggiamento sul lato destro del primo pilone; a destra: fori di alloggiamento sul lato sinistro del secondo pilone (elaborazione di Maria Laura Rossi).

tato per sorreggere le strutture temporanee di questo ponte ligneo. Nella zoccolatura sono infatti presenti dei fori di alloggiamento che malgrado risultino allineati a quelli esistenti nel primo pilone non parrebbero avere la stessa funzione: se fossero stati realizzati per sorreggere le centine di costruzione dell'arco indicherebbero la contemporaneità dei due piloni, in netta contrapposizione con le grandi differenze nell'apparecchiatura dei blocchi.

I fori di alloggiamento delle strutture lignee si trovano alla medesima quota su piloni diversi, in corrispondenza della seconda arcata (lato interno destro primo pilone - lato interno sinistro secondo pilone) e della quarta (lato interno destro terzo pilone - interno spalla Monte sant'Angelo); i fronti laterali dei piloni a sostegno della prima arcata e della terza non presentano fori. Questo utilizzo delle centine poggianti sulla struttura e non a terra avvalsa l'ipotesi del cambiamento dell'alveo del fiume nel tempo: i fori di alloggiamento sul primo pilone dovrebbero risalire alla prima fase costruttiva in cui il fiume presenta una sezione ridotta; i fori presenti sul secondo pilone sono successivi all'insabbiamento dello stesso in corrispondenza con quelli del primo pilone; infine, i fori della quarta arcata, evidentemente postuma alle altre, indicano che il livello del fiume fosse tale da non poter impostare il cantiere a terra (Fig. 12).

5. Risultati e conclusioni

In definitiva questo studio giunge a ipotizzare due conformazioni del Ponte di Augusto: la prima con sole tre arcate, dal ritmo A-B-A, e una seconda a quattro arcate, in cui la quarta presenta una luce C (diversa da A e da B) ed è esito di lavori postumi alla prima realizzazione.

In entrambe le ricostruzioni si dimostra che il primo e il terzo arco sono uguali per tecnica costruttiva e dimensioni, così da avere un vantaggio nel riutilizzo delle medesime centine in cantiere; la luce del secondo arco, il più grande e inizialmente il centrale, potrebbe trovare ragion d'essere nel dover superare un fiume con un letto di dimensioni inferiori a quelle patite dalle strutture in fase di piena. Inoltre, la distanza tra il piano di imposta degli archi minori e la propria chiave corrisponde alla larghezza dei piloni, $33 + 1/3$ piedi romani (9,90 m).

La rielaborazione degli elementi architettonici attraverso il modello parametrico consente di indagare alcune tipologie di architetture storiche per le quali risulta particolarmente evidente il processo di standardizzazione del procedimento edilizio, anche nel caso in cui queste siano in stato di rudere. Si viene a costituire così un modello parametrico comparabile con il modello reale, nel rispetto delle caratteristiche di unicità di ogni monumento storico, e del quale ne manifesta non solo l'intenzione progettuale, ma mantiene memoria anche della storia evolutiva della forma.

Questo studio dimostra che i resti di un antico ponte sono spesso testimonianze strategiche di un ambiente che può evolvere molto nel tempo. In particolare, il ponte antico che collega due rive di un fiume, oggetto difficile da rilevare per la specificità dei fattori ambientali in cui è inserito, può essere testimone sia della propria storia evolutiva ma anche di quella del proprio contesto.

Il gruppo di ricerca si è interessato nello specifico degli antichi ponti romani per individuare un percorso metodologico che potesse restituire un'omogeneità di risultati e consentire una lettura comparata di questi, tenendo conto delle diversità storiche, architettoniche, geografiche, con il fine di procedere all'analisi, alla conservazione e alla promozione del patrimonio culturale, partendo dal progetto iniziale dell'opera, dall'organizzazione del lavoro in cantiere, fino a giungere al completamento dell'opera stessa.

¹ Questo lavoro è stato presentato in alcuni convegni tra i quali: "Il terzo centenario del Santuario della Madonna del Ponte: una giornata di studio" a Narni (17 aprile 2015), a cura del Centro Studi Storici di Narni, relativo a una prima fase di analisi alla quale hanno partecipato anche Wissam Wahbeh, post-doc FHNW University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland, e Pamela Maiezza, student-phd Università degli Studi dell'Aquila, e durante la quale è stato condotto un rilievo digitale integrato del ponte e del Santuario e relativa restituzione. La seconda fase di analisi delle geometrie e delle proporzioni svolta sui modelli del ponte, bidimensionali e tridimensionali, finalizzate a definire un'ipotesi ricostruttiva, è stata presentata al convegno internazionale "APEGA2016: Dibujar, Construir, Sonar. Investigaciones en torno a la expresion grafica aplicada a la edification" presso l'Universitat Jaume I a Castellon de la Plana, Spagna (1-2-3 dicembre 2016). Un primo approccio alla modellazione parametrica come strumento di analisi per il patrimonio costruito storico è stato presentato ai convegni internazionali: "Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA2017): Digital Archaeologies, Material Worlds (past and present)", presso la Georgia State University in Atlanta, GA, USA (14-15-16 marzo 2017); "XVII EGA2018 International Conference", presso l'Universidad de Alicante, Spagna (30-31 maggio - 1 giugno 2018).

² Cfr. GALLIAZZO 1994, CECCHI 2003.

³ CECCHI 2003.

⁴ TATTOLI 2000.

⁵ TATTOLI 2000, tav. 15, p. 182.

⁶ CECCHI 2003.

⁷ PARIS 2015.

⁸ GALLIAZZO 1995, fig. 13, p. 15.

⁹ Gruppo di elementi caratterizzati da proprietà e rappresentazioni grafiche comuni.

¹⁰ TEDESCHI 2010.

Ponte romano a Rieti

Leonardo Paris

1. I resti del ponte romano

La caratteristica che rende il ponte romano di Rieti un manufatto archeologico unico nel suo genere è che i suoi resti sono completamente immersi nel fiume (Fig. 1). Oltre ai piloni – appositamente realizzati per stare nell'acqua – anche tutta la struttura di sostegno stradale è avvolta dalle limpide acque del Velino. Si è attuata quindi una sorprendente, quanto affascinante, inversione semantica nel rapporto tra ponte e fiume. Da opera strutturale progettata per superare un ostacolo naturale a manufatto archeologico che ne è parte integrante. Il fiume ha così preso definitivamente il sopravvento inglobando in sé l'artefatto.

Nella maggior parte dei casi in cui sono presenti i resti archeologici di ponti in pietra, nonostante le profonde trasformazioni indotte dal tempo, si riesce ancora oggi a percepire l'originario rapporto tra elemento naturale e artefatto strutturale. Un classico esempio è quello del Ponte Emilio a Roma¹, la cui arcata supersite, seppur isolata dal contesto, mantiene inalterata la sua imponenza strutturale nei confronti del Tevere. A Rieti, i pochi resti del ponte che affiorano in superficie, pur mantenendo nella conformazione radiale dei grandi conci in pietra la loro tensione strutturale, sembrano lottare faticosamente contro la forza incessante della corrente. L'inesorabile quanto irreversibile destino di questa opera di ingegneria è una mirabile sintesi delle tensioni che hanno da sempre contraddistinto il rapporto conflittuale tra uomo e natura. Una sfida iniziata proprio dai romani che per primi, utilizzando la tecnica lapidea, svilupparono e diffusero in tutti i territori dell'Impero una vera e propria scienza, basata su conoscenze statiche, tecniche costruttive e cultura architettonica.



Fig. 1. I resti del ponte romano di Rieti nel fiume Velino (foto di Leonardo Paris).

A Rieti, come detto, l'acqua limpida e trasparente lascia intravedere nitidamente la continuità strutturale dell'unica campata rimasta ancora perfettamente integra. Quando il livello del fiume è in condizioni di normalità, l'acqua passa al di sotto dell'arcata cosicché questa sembra svolgere ancora oggi la sua originaria funzione. La sensazione che si ha guardando i resti del ponte è che il fiume abbia progressivamente cambiato la sua conformazione, e in particolare il suo livello, determinando l'ineluttabile perdita di funzionalità della struttura. Si è portati anche a pensare che questi processi di modificazione ambientale siano secolari e che quindi la situazione attuale sia la conseguenza di un lento processo di degrado e, conseguentemente, di abbandono. Sorprende invece scoprire che il ponte romano di Rieti nel 1930 – in tempi quindi recenti se paragonati alla bimillenaria “vita” di questo ponte – era perfettamente funzionante (Fig. 2). Ci si chiede allora come sia stato possibile in così pochi anni giungere alla condizione attuale.

La funzione di attraversamento del fiume Velino è oggi assolta da un nuovo ponte che rappresenta una delle principali vie di accesso al centro storico di Rieti. Il nuovo ponte, perfettamente allineamento con la via Salaria (la principale arteria di collegamento da e per Roma), ha una quota di attraversamento molto più alta rispetto al ponte romano e anche una diversa direzione. In realtà l'attuale ponte nuovo non è quello originario ma è conseguente alla ricostruzione post bellica di un precedente ponte fatto costruire dal podestà Mario Marcucci durante il regime fascista alla fine del 1933 (Fig. 3) e distrutto poco dopo dai bombardamenti.



Fig. 2. Il ponte romano di Rieti in una immagine dei primi anni Venti del secolo scorso, prima della costruzione del nuovo ponte (immagine tratta da <<http://creativivi.blogspot.com/2016/02>>).



Fig. 3. Il nuovo ponte realizzato durante il regime fascista alla fine del 1933 (immagine tratta da <<http://creativivi.blogspot.com/2016/02>>).

La costruzione del ponte nuovo sarebbe dovuta avvenire smontando e rimontando altrove l'antico ponte romano, ma un sussulto d'orgoglio dell'allora sovrintendenza ai monumenti medievali e moderni del Lazio interruppe i lavori di smontaggio (Fig. 4). Si tratta dell'infelice conclusione di un lungo dibattito che ha interessato la Capitale sabina per molti decenni e che doveva rispondere in primo luogo a un serio problema funzionale di deflusso delle acque del Velino che, nel 1923, aveva causato una devastante alluvione. Un



Fig. 4. Il ponte di Rieti durante le fasi smontaggio (immagine tratta da <http://creaetvivi.blogspot.com/2016/02>).

dibattito in cui ha giocato un ruolo determinante il regime fascista la cui forte spinta propagandistica è ben sintetizzata in una lettera del prof. Giuseppe Colarieti Tosti: «Quell'ingombrante rudere dell'antico ponte sul Velino secondo me dovrebbe essere senz'altro demolito e dar posto ad un nuovo ponte da intitolarsi a Benito Mussolini. Rieti deve riconoscenza illimitata e duratura al nostro Duce Benito Mussolini, quale migliore documento si può erigere dai sabini al costruttore dell'Italia nuovissima ed al ripristinatore della provincia reatina, se non un magnifico ponte sul Velino dove egli passò quando venne in Rieti romanamente e paternamente benevolo?»².

2. Studi e ricerche

La particolarità e il forte valore simbolico di questi resti archeologici (per i reatini e non solo) hanno rappresentato lo spunto per intraprendere, a partire dal 2013, delle attività di ricerca basate su un rilievo accurato mai eseguito prima, sebbene le attività di smontaggio degli anni Trenta del secolo scorso ne avrebbero consigliato l'esecuzione già allora.

L'utilizzazione congiunta di tecniche di scansione laser 3D e di fotogrammetria sono risultate le più idonee tenuto conto anche delle particolari condizioni di inaccessibilità. I resti del ponte non sono direttamente raggiungibili perché circondati dal fiume; con il livello



Fig. 5. Vista renderizzata della nuvola di punti acquisita tramite scanner laser terrestre (TLS). Rilievo di Leonardo Paris.



Fig. 6. Sezione longitudinale della nuvola di punti con individuazione delle quote del vecchio e nuovo ponte ed il livello di piena del 1923 (elaborazione di Leonardo Paris).

del fiume nella norma le sponde del Velino sono oggi facilmente accessibili e questo ha consentito di riprendere i resti del ponte da posizione ravvicinata. Il rilievo ha riguardato tutto lo snodo urbano del nuovo ponte e della parte iniziale di via Roma (il tratto urbano della via Salaria) (Fig. 5). La sezione lungo la direzione del ponte consente di comprendere meglio la profonda modificazione altimetrica indotta con la costruzione del nuovo ponte in relazione all'antico tracciato viario di ingresso alla città e al livello di piena del 1923 (Fig. 6). Gli studi sul ponte romano di Rieti rappresentano un tassello di quel fitto mosaico di ricerche e ritrovamenti susseguitisi nell'arco del XX secolo per cercare di far luce sul possibile assetto urbano reatino, così come venne a configurarsi dopo la conquista romana (290 a.C.). I dati di cui si dispone oggi sono il frutto di sporadici rinvenimenti in occasione di saggi e lavori di pubblica utilità.

Dal III al I secolo a.C., *Reate* fu costituita come *praefectura*, diventando autonomo *municipium* in età augustea. Questo nuovo status



Fig. 7. Una immagine storica del ponte con la torre della Dogana, prima della sua demolizione (<<http://creaetrivi.blogspot.com/2015/08/>>).

amministrativo ha coinciso con la realizzazione di importanti interventi di urbanizzazione fra i quali, appunto, il ponte sul fiume Velino. Costruito con blocchi di travertino cavernoso legati da malta, il ponte aveva tre arcate, una grande centrale e due laterali più piccole, ed era collegato in asse con un viadotto, formato in origine da due muraglioni costruiti secondo le tecniche in uso in età repubblicana in *opus quadratum*, di grandi conci di pietra intervallati da vaste arcate a tutto sesto, aperte per consentire il transito e il deflusso delle acque in caso di inondazioni.

Nonostante la continua pressione delle acque del Velino e le inondazioni che hanno da sempre caratterizzato la zona, non si hanno notizie di crolli ma solo di piccoli e circostanziati cedimenti, cosicché si deve ritenere che la struttura al 1930 fosse ancora quella originaria. Il ponte fu integrato a partire dal medioevo da un cassero (la cosiddetta torre della dogana) realizzato sulla riva sinistra (a sud) insieme a un prolungamento poggiato su due piccole arcate che dovevano consentire un maggiore deflusso delle acque nelle fasi di piena. Si ha notizia anche di un secondo cassero costruito sulla parte

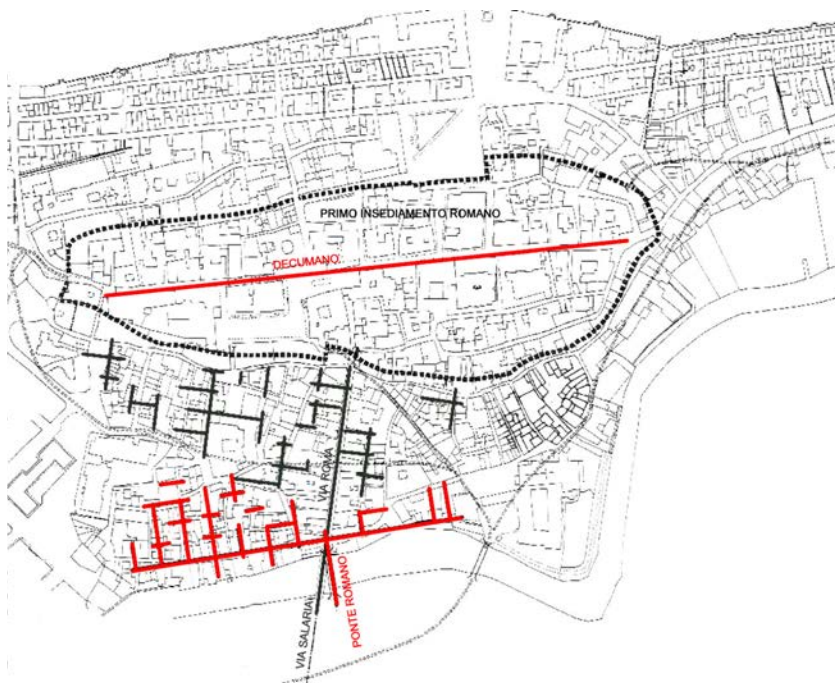


Fig. 8. Analisi degli allineamenti riferibili all'insediamento di epoca romana (elaborazione di Leonardo Paris).

destra, funzionante tra il 1312 e il 1377, anno in cui venne distrutto e mai più ricostruito. La torre della dogana (Fig. 7), demolita nel 1883, rappresentava anche un punto di snodo tra due diversi allineamenti, quello del ponte romano e quello del suo prolungamento a sud verso la piana antistante.

La direzione del ponte romano è un altro tema di approfondimento da parte degli studiosi perché non coincidente con la via Salaria e con l'attuale via Roma (cioè con il tratto urbano della Salaria corrispondente, secondo il classico schema di centuriazione romana, al *cardo maximum*). Questo disallineamento (Fig. 8) potrebbe avere due motivazioni, una di tipo tecnico-costruttivo, l'altra di tipo urbanistico. Nel primo caso la costruzione del ponte avrebbe tenuto conto delle condizioni orografiche dell'alveo del fiume (vicinanza delle due sponde opposte, andamento delle correnti, profondità, ecc.). Nel secondo caso invece si sarebbe rispettato un allineamento riferito a una diversa struttura urbana del primo periodo di fondazione dell'insediamento (l'asse del ponte, per esempio, risulta essere pressoché ortogonale alla direzione del decumano)³.

Della nuova conformazione del ponte con l'aggiunta del cassero e delle due arcate a sud si hanno alcune rappresentazioni risalenti già al XVII secolo. In queste immagini il ponte è parte di un più ampio e articolato sistema idraulico che ha caratterizzato per secoli la città di Rieti e che, solo in tempi recenti, ha assunto la configurazione attuale. Nel suo tratto urbano, per esempio, il Velino si sdoppiava in due tronchi più piccoli, costeggiando una grande isola e ricongiungendosi proprio in corrispondenza del ponte romano. Lo sviluppo urbano della città ha progressivamente modificato lo stato dei luoghi con l'innalzamento dell'alveo e la totale scomparsa dell'isola. Si è determinata così una sostanziale alterazione delle forze idrauliche in corrispondenza del ponte, con alcuni cedimenti localizzati in corrispondenza del cassero. Ciò nonostante il ponte ha continuato imperterrito a resistere e ad assolvere alla sua funzione almeno fino a quando la stessa comunità reatina ha cominciato a maturare l'idea di una sua demolizione.

Le principali immagini storiche che documentano la conformazione del ponte e del suo intorno risalgono, come detto, al XVII secolo, periodo in cui vengono approntati alcuni studi per cercare di risolvere i problemi idraulici che cominciavano a causare seri problemi alla comunità locale. «Nel XVII secolo il progressivo interrimento di uno dei due canali indirizzava la maggior parte delle acque verso l'arco sinistro del ponte la cui luce si era parzialmente ostruita a causa della massiccia quantità di detriti depositati dal fiume, amalgamata dal forte potere incrostante di queste acque. Le fonti documentarie testimoniano come questo inconveniente non si verificasse prima del '600 quando le acque, in assenza di interrimenti ed ostacoli vari, si dividevano proporzionalmente nei due canali formati dall'isola, per poi riunirsi prima del ponte che attraversava prevalentemente tramite la sua luce principale»⁴.

All'architetto Francesco Sforzini si deve un interessante disegno del ponte e del suo intorno risalente al 1688 (Fig. 9)⁵, una rappresentazione planimetrica con alcuni elementi significativi in vista assonometrica secondo una iconografia ibrida tipica della fine del Seicento. Anzi, a dire il vero, osservando il ponte, più che una rappresentazione assonometrica si tratta di una vista pseudo prospettica, quasi frontale centrata sull'arco principale, con un punto di vista molto basso all'altezza del piano stradale. Sono visibili i due casseri e il prolungamento a sud con le due nuove arcate. Anche la vegetazio-

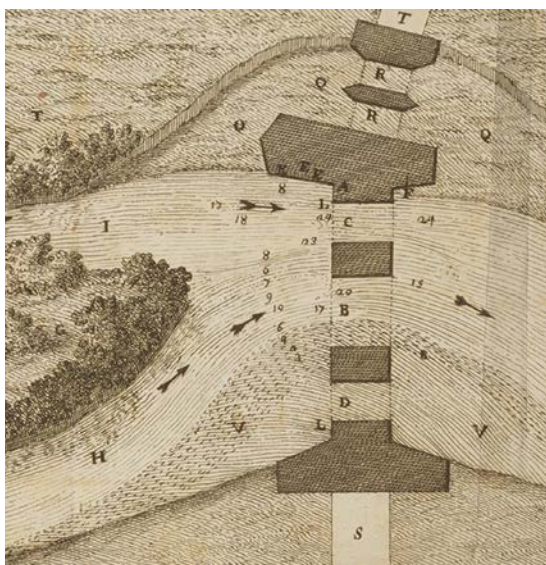


Fig. 9 (a sinistra). Pianta realizzata da Francesco Sforzini, 1688 (Archivio di Stato di Roma, 125 - 9/1).

Fig. 10 (a destra). Disegno di Virginio Bracci, 1772, particolare (Archivio di Stato di Roma, Fondo della Congregazione delle Acque, 226).

ne è rappresentata in vista quasi frontale. Interessante è l'immagine del fiume e delle sue acque in cui l'autore ha voluto evidenziare, utilizzando le diverse tonalità di colore celeste, il flusso delle correnti, che costituiva il principale oggetto di indagine, in aggiunta alla individuazione delle diverse proprietà private che si affacciavano sulla banchina destra (a sinistra nell'immagine) i cui proprietari erano ritenuti in parte responsabili dei continui versamenti di terreno nell'alveo. La parte emersa del ponte romano, a tre arcate con quella centrale più grande e le due laterali più piccole, viene rappresentata a partire dal piano di imposta della volta a tutto sesto. Questo sta a significare, come descritto dallo stesso autore, che già in quel periodo l'alveo del fiume aveva subito un significativo riempimento con conseguente innalzamento del livello delle acque.

Un'altra immagine ancor più significativa è quella realizzata dall'architetto Virginio Bracci nel 1772 nella quale il ponte è rappresentato in pianta, all'altezza dei piloni, mentre l'isola e le sponde sono rappresentate in vista pseudo assonometrica, utilizzando quindi una stessa tecnica ibrida (Fig. 10). Anche in questa rappresentazione, come in quella di Sforzini, si nota come la parte nord del

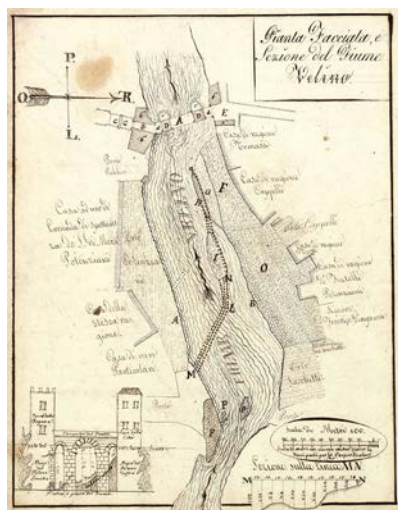
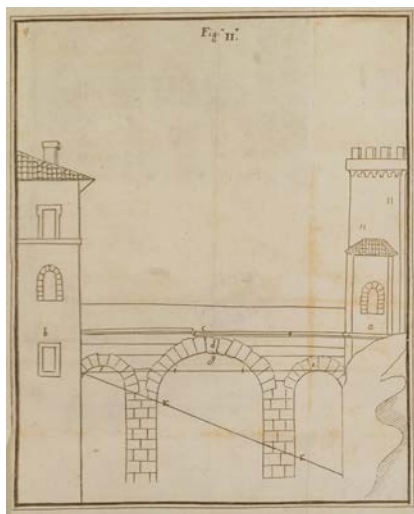


Fig. 11 (a sinistra). Disegno di Francesco Maria Gaudio, 1772 (Archivio di Stato di Roma, Fondo della Congregazione delle Acque, 226).

Fig. 12 (a destra). Pianta disegnata da Luigi Fedeli, 1821 (Archivio Comunale di Rieti, Lavori pubblici, 446).

ponete non è di fatto attraversata dalle acque le cui correnti si concentrano invece prevalentemente sulla parte opposta. Interessante osservare anche i cambiamenti dei punti di vista in cui però il ponte rappresenta sempre l'allineamento principale, orizzontale nord-sud nella pianta di Sforzini, verticale sud-nord in quella di Bracci. Questo disegno è allegato a un documento conservato nell'Archivio di Stato di Roma⁶, che è corredato anche di un secondo allegato⁷, una tavola redatta da Francesco Maria Gaudio raffigurante il prospetto con le tre arcate del ponte tra la torretta della dogana a sud e alcuni fabbricati nella parte nord (Fig. 11). I due disegni pur facenti parte dello stesso documento contengono informazioni discordanti per quanto riguarda misure e proporzioni.

Un altro disegno di particolare interesse è quello che l'ingegner Luigi Fedeli elaborò nel 1821⁸ a corredo dei suoi studi idraulici relativi a un progetto di sistemazione dell'intero tratto urbano del Velino per ovviare ai dissesti statici del ponte e alle possibili inondazioni (Fig. 12). Nello stesso foglio, oltre alla pianta del fiume e del ponte, vi è anche un dettaglio del prospetto con le tre arcate, simile al disegno di Gaudio ma diverso in molti dettagli.

I disegni di Bracci e di Fedeli sono elaborati tecnici e quindi in qualche modo precisi almeno per quanto riguarda la conforma-



Fig. 13. Mappa di Rieti redatta da Angelo Pasta, 1820, estratto della zona del ponte romano (Archivio di Stato di Rieti; immagine tratta da <<https://www.formatrieti.it/la-pianta-del-catasto-gregoriano>>).

zione del ponte. Un'analisi comparata evidenzia invece notevoli discrepanze soprattutto sulla dimensione e conformazione delle arcate e dei piloni. Queste discrepanze fanno perciò supporre che al momento della loro elaborazione la struttura del ponte fosse per la maggior parte immersa e quindi non visibile. Permangono pertanto, ancora oggi, dei dubbi sulla configurazione originaria del ponte.

L'analisi geometrica oggetto del successivo paragrafo, basata sul rilievo digitale del 2013, intende fornire un contributo alla discussione e proporre una possibile ipotesi.

3. Analisi geometrica e ipotesi di configurazione originaria

Non è facile sovrapporre allo stato attuale la configurazione del ponte del 1930 che come detto era costituito da un tratto principale originario a tre arcate, uno snodo a sud con cambio di direzione, un cassero (la torretta della dogana) con una pianta non regolare, e un ulteriore piccolo ponte a due arcate.

Gli unici documenti da cui ricavare informazioni sono il già citato disegno di Fedeli del 1821 e una mappa di Rieti redatta l'anno

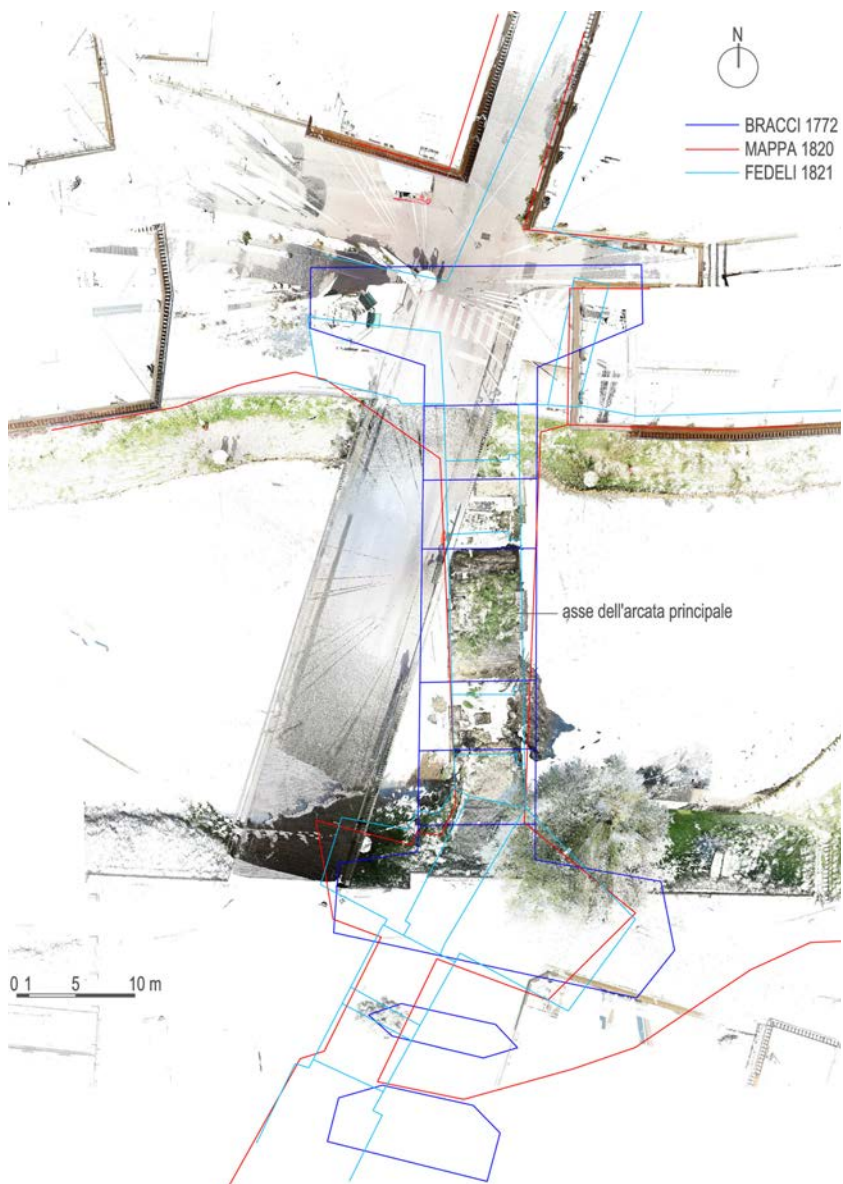


Fig. 14. Ortofoto della nuvola di punti e sovrapposizione delle diverse configurazioni planimetriche del ponte ricavate dai disegni di Bracci, Fedeli e Pasta (elaborazione di Leonardo Paris).

precedente (Fig. 13), entrambi disegni a una scala urbana. Gli elementi noti riguardano l'abitato e la direzione di via Roma, tutti gli altri riferimenti topografici limitrofi sono oggi scomparsi. Basandosi sui pochi elementi noti e prendendo come elemento di riferimento

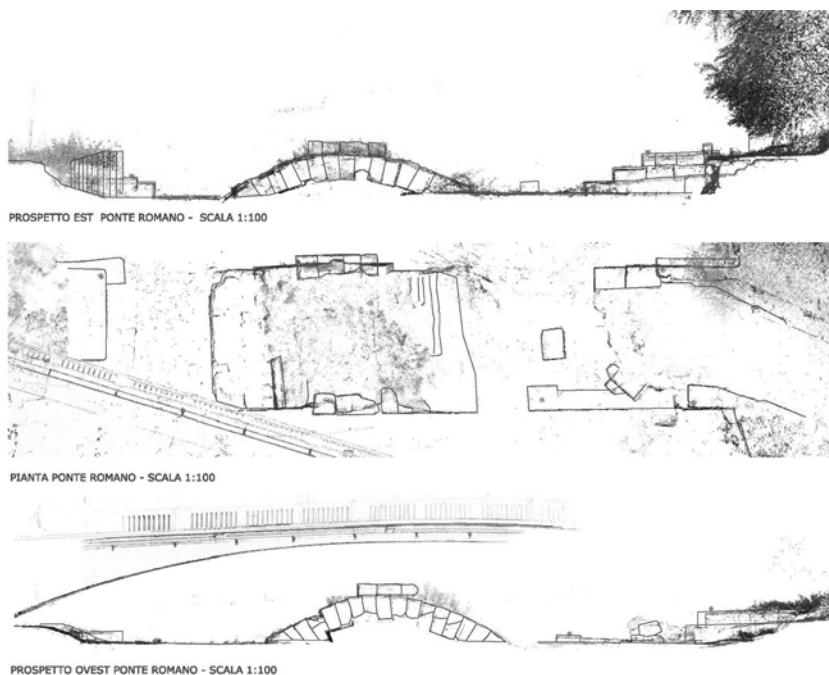


Fig. 15. Rilievo dei resti del ponte romano (elaborazione di Leonardo Paris).

comune l'asse del ponte originario si possono osservare le differenze tra il disegno di Bracci, la mappa e il disegno di Fedeli (Fig. 14) sovrapposti alla vista ortografica della nuvola di punti.

Volendo fare una ipotesi ricostruttiva del ponte originario l'unico dato certo è che si tratta di una struttura a tre arcate: una grande centrale e due laterali più piccole. La loro conformazione dipende da alcuni fattori di progetto che sono la lunghezza (generalmente calcolata come distanza tra le due spalle più esterne), la suddivisione dei pieni (piloni) e dei vuoti (arcate). L'altro elemento formale riguarda la geometria dell'arco che generalmente è a tutto sesto ma che in casi particolari può essere anche di tipo ribassato (policentrico).

L'uso dell'arco ribassato si riferisce quasi sempre ad arcate di grandi dimensioni ed è utilizzato quando si vuole ridurre la differenza tra il piano di imposta dell'arco e il piano di attraversamento del ponte. L'unica informazione utile rilevabile oggi riguarda la parte sommitale dell'arcata principale della quale è visibile una porzione di circa 60 gradi con i suoi conci radiali (Fig. 15). Anche se appaiono evidenti dissesti, spostamenti ed erosioni dei conci lapidei, si può determinare con buona approssimazione l'asse e il raggio dell'arco



Fig. 16. Ipotesi di possibili configurazioni delle tre arcate del ponte originario (elaborazione di Leonardo Paris).

referito alla parte visibile pari a circa 7,5 m corrispondente a circa 25 piedi (utilizzando la misura del piede romano pari a 29,64 cm). Per quanto riguarda tutte le altre informazioni il disegno preso come riferimento è quello di Fedeli, ma solo in pianta perché il disegno di prospetto non risulta avere la stessa affidabilità⁹.

La misura dell'arcata principale sul disegno di Fedeli (13,65 m.) risulterebbe incompatibile con un arco a tutto sesto (15 m) per cui si può ritenere plausibile una soluzione ad arco ribassato, mentre le arcate minori, data la loro ridotta dimensione, sono quasi sicuramente archi a tutto sesto. Lo schema geometrico presuppone anche che tutti e tre gli archi abbiano lo stesso piano d'imposta (Fig. 16). Una soluzione alternativa basata su una grande arcata centrale a tutto sesto presuppone una riduzione dello spessore dei piloni e due differenti piani di imposta. Le due soluzioni proposte si basano su ipotesi di proporzionamento in cui è stata utilizzata l'unità di misura del tempo, cioè il piede romano. Questo perché si ritiene che nella

costruzione di queste opere di ingegneria l'uso di misure intere costituisce un presupposto necessario per il controllo della fase realizzativa e per il taglio dei conci di pietra che venivano necessariamente realizzati fuori opera e poi montati in cantiere.

4. Conclusioni

Lo studio ha inteso fornire un contributo alla conoscenza e alla valorizzazione di un suggestivo quanto misterioso bene culturale, dal forte valore simbolico per tutta la comunità reatina. I resti dell'antico ponte romano nelle acque del fiume Velino rappresentano una testimonianza tangibile del legame di questa città alla cultura romana. Il contributo, basandosi sulle ricerche storiche fino ad oggi pubblicate, ha riguardato un'accurata analisi dei documenti d'archivio integrata dalle informazioni scaturite dal rilievo digitale che mai come in questo caso si è rivelato particolarmente efficace in relazione alle oggettive difficoltà di acquisizione diretta. Si ritiene che le ipotesi sulla conformazione del ponte originario, basate più su considerazioni strettamente tecnico-progettuali che su informazioni metriche di dettaglio (essendo gran parte della struttura sommersa nell'alveo del fiume), possano rappresentare un punto di partenza per l'implementazione di nuove forme di comunicazione e valorizzazione del patrimonio culturale anche grazie all'uso integrato di tecnologie digitali di realtà virtuale.

¹ Per un'analisi dettagliata si rimanda al capitolo di questo volume "Ponte Emilio a Roma" di Giulia Umana.

² LORENZETTI 2013, p. 93.

³ La prima motivazione, a mio giudizio, è meno plausibile viste le notevoli conoscenze ingegneristiche dei romani nella costruzione di ponti di dimensioni ben maggiori.

⁴ LORENZETTI 2013, p. 80.

⁵ Archivio di Stato di Roma, 125 – 9/1.

⁶ Riflessioni idrostatiche sul ponte di Rieti, e sul fiume Velino, Roma 1772, tav. I. Archivio di Stato di Roma, Fondo della Congregazione delle Acque, 226.

⁷ *Ibid.*, tav. II (Archivio di Stato di Roma, Fondo della Congregazione delle Acque, 226).

⁸ Archivio di Stato di Rieti, Lavori pubblici, 446.

⁹ Non c'è esatta corrispondenza con le misure in pianta e inoltre le arcate risultano disegnate in modo molto grossolano. L'unica informazione rilevante riguarda il livello del pelo dell'acqua che copre interamente l'arcata nord e quasi completamente l'arcata sud.

Ponte romano ad Alcántara in Spagna

Carlo Inglese, Antonio Pizzzo, Roberto Barni

1. Introduzione storica

Il ponte di Alcántara, situato nella omonima cittadina spagnola nella provincia di Cáceres, in Estremadura, attraversa il Tago in un punto in cui il letto del fiume è molto ripido ma abbastanza ridotto, ed è costituito da sei arcate disuguali; presso uno degli accessi si trova un tempietto commemorativo e nel centro del ponte un arco onorario (Figg. 1, 2). Su quest'ultimo è presente un'iscrizione che indica come il ponte sia stato costruito in onore all'imperatore romano Traiano, nato in *Hispania*. L'iscrizione recita: «Imp(eratori) • Caesari • divi • Nervae • f(ilio) • Nervae / Traiano • Aug(usto) • Germ(ánico) • Dacico • pontif(ici) max(imo) / trib(unicia) • potes(tate) • VIII • imp(eratori) • V • co(n)s(uli) • V • p(atri) • p(atriciae)».

La storia del ponte di Alcántara costruito tra il 104-106 d.C. è, come per la maggior parte dei ponti romani, una storia di trasformazioni strutturali tipiche di una infrastruttura pubblica soggetta a continue sollecitazioni antropiche e medio-ambientali.

Il ponte rappresenta uno dei simboli del passato romano della penisola Iberica e uno dei segni più tangibili del processo di romanizzazione delle province occidentali del mondo romano. L'importanza del ponte e il suo stato di conservazione hanno generato, nel corso dei secoli, numerosi studi basati sugli aspetti ingegneristici e storico-artistici di questa costruzione.

Il ponte di Alcántara ha avuto nei secoli diversi restauri e trasformazioni che hanno integrato nella struttura una ampia serie di eventi storici (Fig. 3). Tra le prime attività di distruzione del ponte è nota, da una notizia degli inizi del XIII secolo, la distruzione del primo arco del ponte verso la sponda destra del fiume e un successivo intervento di recupero della zona con il re Alfonso IX¹. Purtroppo



Fig. 1. Ponte di Alcántara, veduta generale prospetto sud-ovest (foto di Carlo Inglese, 2015).



Fig. 2. Arco onorario nel centro del ponte di Alcántara (foto di Carlo Inglese, 2015).

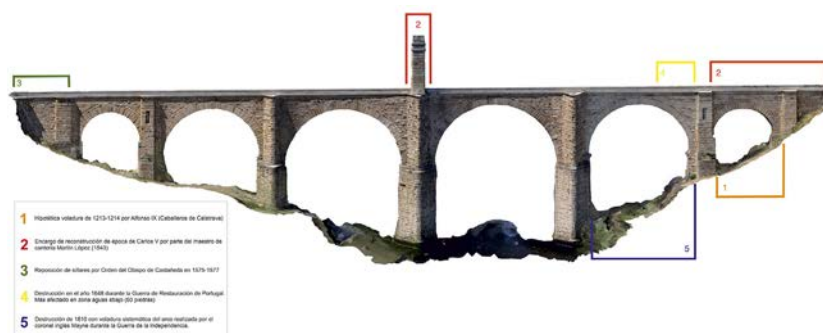


Fig. 3. Fotogrammetria del ponte di Alcántara con le zone interessate da trasformazioni e restauri del monumento (Pizzo 2016, 5, fig. 3).

questa prima trasformazione del ponte è estremamente difficile da riconoscere nei paramenti attuali della struttura a causa di altri numerosi restauri eseguiti in epoche successive. Non sappiamo, quindi, quali furono in sostanza i danni strutturali causati al ponte e la reazione statica del resto della struttura alla mancanza di uno degli archi.

Da alcuni riferimenti presenti in fonti arabe si evince il ruolo del ponte nel quadro di una fortezza situata sulla sponda sinistra del fiume Tago². Nel XV secolo il ponte di Alcántara è interessato da importantissime manovre militari da parte del re Alfonso V di Portogallo che all'idea di distruggere il ponte preferisce ritirarsi e attaccare la Spagna da tutt'altra direzione³.

I primi studi di carattere storico risalgono al XVI secolo e producono visioni storiche generali basate sulla lettura delle iscrizioni conservate. Uno degli studi degni di nota di questo periodo è, senza dubbio, quello di Barrantes de Maldonado, databile intorno al 1550, che fa riferimento per la prima volta a questioni di carattere costruttivo e tecnico, annotazioni originali per l'epoca. Da queste indicazioni possiamo ricostruire, per esempio, i primi interventi di restauro che hanno lasciato traccia esclusivamente nelle fonti documentali tra i quali la ricostruzione dell'arco centrale crollato e fatto ricostruire da Carlo V, il restauro di alcuni conci degli archi e le integrazioni effettuate nei paramenti murari.

La documentazione recuperata negli archivi militari ha permesso di ricostruire altri interventi di manutenzione tra i secoli XVI e XVII, soprattutto nel secondo arco della sponda destra durante la "Guerra de Restauración de Portugal"⁴ che fu riparato quasi un secolo



Fig. 4. Vista generale del ponte di Alcántara con indicazione del pilastro in cui si conserva la prima fase costruttiva del monumento (da Pizzo 2016, 8, fig. 5).



Fig. 5. Dettaglio costruttivo della prima fase del ponte di Alcántara rispetto alla costruzione traianea (da Pizzo 2016, 12, fig. 12).

dopo. Anche in questo caso l'intervento di restauro non è visibile sui paramenti del ponte a causa del grande intervento conservativo effettuato nel XIX secolo. Questa ultima opera di restauro diretta da Alejandro Millán⁵ ha ripristinato definitivamente i danni strutturali del ponte e risulta perfettamente riconoscibile ancora oggi.

La difficoltà nel riconoscimento delle trasformazioni strutturali e storiche citate si rispecchia nello studio condotto recentemente che, malgrado le difficoltà, è riuscito a decifrare i principali interventi storici che hanno segnato la vita del ponte. Lo studio ha effettuato un'analisi architettonica e stratigrafica del ponte di Alcántara che ha permesso di elaborare una periodizzazione delle principali epoche di trasformazione delle strutture con una significativa scoperta in uno dei pilastri del monumento⁶.

Allo stato attuale della conservazione e sulla base di una lettura stratigrafica dei paramenti abbiamo potuto riconoscere cinque diverse fasi di interventi che caratterizzano la storia costruttiva del ponte.

La prima fase costruttiva (Fig. 4) rappresenta una novità nella storia degli studi sulla infrastruttura, trattandosi della costruzione di un primo ponte probabilmente non finito per problemi topografici e costruttivi, ma inglobato in parte nell'opera della fase traianea⁷. L'ipotesi che abbiamo sviluppato nell'articolo citato del 2016 (Fig. 5) si basa sulla contestualizzazione storica di questo primo tentativo di costruzione del ponte di Alcántara. La zona in questione, infatti, già in epoca tardorepubblicana è interessata dalla presenza romana per lo sfruttamento di varie risorse minerali nella zona tra cui il conosciuto oro del Tago; il luogo dove è stato costruito il ponte rappresenta uno dei passaggi obbligati delle differenti vie di comunicazione esistenti già in epoca repubblicana. Non è quindi da escludere che in un momento storico in cui si realizzano una serie di infrastrutture per dotare la regione di fluide vie di comunicazione verso le miniere dell'attuale Portogallo si sia tentata la costruzione di un primo ponte con soluzioni architettoniche rivelatesi poi non valide per la complicata situazione topografica di questa zona del fiume.

Nella seconda fase edilizia del ponte si realizzano le sei arcate che formano la struttura attuale, con archi a tutto sesto con dimensioni simmetriche e un arco centrale probabilmente già esistente in epoca romana ma ricostruito, come abbiamo già indicato, da Carlo V. La costruzione traianea è completamente realizzata in opera quadrata di granito a vista con superfici bugnate in modo irregolare. I grandi pilastri del ponte poggiano direttamente sul livello geologico che è stato leggermente scavato e modificato per la preparazione delle aree di cantiere relative alle fondazioni. I pilastri, di pianta rettangolare, presentano larghezze variabili e crescenti verso il centro in rapporto con le dimensioni delle arcate. I tre pilastri centrali possiedono inol-

tre frangiflutti per facilitare il passaggio delle acque con un impatto ridotto durante le frequenti piene del Tago. Gli archi a tutto sesto sono realizzati con un doppio ordine di conci che rappresenta un *unicum* nell'edilizia dei ponti del resto della provincia Lusitania.

La terza fase documentabile sulle superfici del ponte interessa in modo molto marginale l'aspetto e la statica del ponte, visto che si tratta di interventi di ridotte dimensioni che servono alla reintegrazione di conci crollati o elementi in granito del paramento.

La quarta fase, invece, è una delle più importanti e monumentali eseguite sul ponte di Alcántara. Realizzata dall'ingegnere Alejandro Millán e portata a compimento nel 1860, è un intervento molto complesso con investimenti economici notevoli e un progetto di grande rilievo e precisione. Questo restauro recupera l'immagine del ponte dopo le varie epoche di attacchi, distruzioni e abbandono, creando la nuova estetica attuale del monumento che elimina il profilo leggermente rialzato del centro della struttura e ricostruendo completamente l'arco centrale e pilastri che lo sostengono.

L'ultimo intervento relativo alla quinta fase visibile attualmente è stato finanziato dalla Junta de Extremadura e ha interessato il riempimento dei giunti fra i blocchi di granito in opera quadrata con malta a base di sabbia e calce con l'obiettivo di evitare infiltrazioni di acqua all'interno della struttura.

2. Operazioni di acquisizione

Il rilievo del ponte di Alcántara ha presentato notevoli difficoltà dal punto di vista logistico-operativo, che hanno riguardato le dimensioni elevate del manufatto, la presenza dell'acqua e il paramento murario di rivestimento in pietra di ardesia locale molto ben lavorata per la quale si necessitava di una buona qualità del dato acquisito per la successiva lettura storico archeologica.

In particolare le sponde del fiume si presentano molto ripide soprattutto sul versante nord-ovest ove in meno di 50 m si ha un dislivello di quota di circa 30 m. Inoltre le grandi dimensioni del ponte – circa 191 m di lunghezza per un'altezza del piano viario dalla quota dell'acqua di circa 37 m – hanno necessitato di una serie di acquisizioni con 3D laser scanner⁸ propedeuticamente studiate e valutate in uno specifico progetto di presa.

Sono state effettuate 25 scansioni, in precedenza studiate in fase di progetto, in grado di suddividere il ponte in parti ben calibrate in



Fig. 6. Ponte di Alcántara, modello numerico, nuvola di punti. Prospetto nord-est (elaborazione di Carlo Inglese).



Fig. 7. Ponte di Alcántara. Modello numerico, nuvola di punti. Particolare prospetto nord-est (elaborazione di Carlo Inglese).



Fig. 8. Ponte di Alcántara. Modello numerico, nuvola di punti con valori di riflettanza. Particolare prospetto nord-est (elaborazione di Carlo Inglese).

relazione alla distanza di presa dello strumento (circa 70 m) mantenendo la risoluzione prefissata e facilmente riconoscibili in fase di registrazione.

Il modello numerico così ottenuto, registrato nel programma dedicato, è stato successivamente verificato in un altro software di gestione delle nuvole di punti⁹ con una nuova registrazione delle singole nuvole al fine di analizzare la differenza ed eventuali errori o imprecisioni (Figg. 6, 7, 8). Dal modello numerico così ottenuto è stato possibile ottenere diversi modelli geometrici del ponte, in particolare i prospetti a monte e a valle del fiume (con orientamento nord-est e sud-est), e una planimetria, modelli privi di caratterizzazione cromatica e materica delle superfici utile alla comprensione delle caratteristiche geometrico proporzionali. Da questi elaborati sono stati infine tratti dei modelli architettonici, mantenendo tutte le caratteristiche e le caratterizzazioni materiche delle superfici.

3. Modellazione poligonale

Per realizzare il modello del ponte di Alcántara si è optato per un tipo di modellazione poligonale, elaborata attraverso il software Modo¹⁰. Di una geometria poligonale è possibile selezionare punti, bordi e poligoni e applicare agli elementi selezionati una serie di comandi assimilabili a quelli utilizzati per realizzare modelli bidimensionali.

Partendo dal rilievo bidimensionale importato nel software di modellazione, si generano le prime superfici semplici andando a estrarre le geometrie fondamentali che caratterizzano l'architettura. Così come in un vero cantiere, si è proceduto realizzando il primo pilone, elemento poi copiato come istanza di base per essere modificato opportunamente secondo le sue dimensioni veritiere. In seguito, a partire da porzioni di cilindri, sono state realizzate le volte che caratterizzano le arcate dei ponti, successivamente ottimizzate per collegare e saldare i punti della *mesh* a quelli dei piloni (Fig. 9). L'ultimo elemento da modellare è il camminamento, con la sua pendenza e la strada a schiena d'asino, nonché le modanature che caratterizzano il parapetto del ponte. Queste ultime possono essere realizzate grazie alla funzione Bevel, la quale prevede un'estrusione attraverso dei profili appositamente disegnati, che poi vengono applicati a tutte le facce selezionate della *mesh*. Tale *tool* permette di ricreare facilmente le numerose cornici e le profilature dell'architettura romana presenti nel ponte di Alcántara.

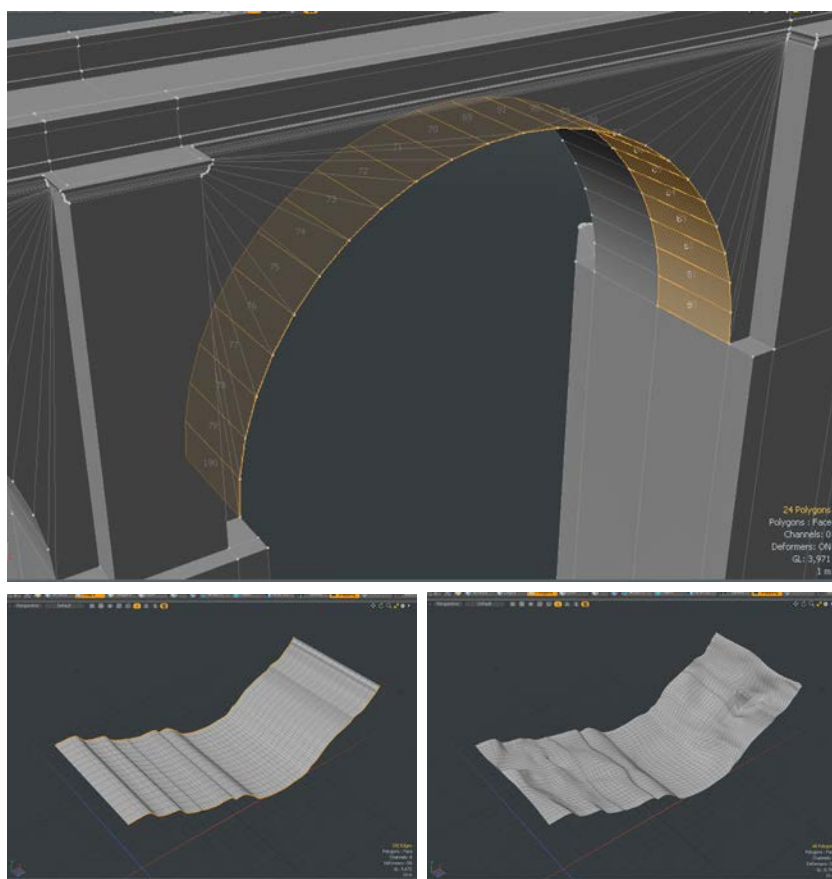


Fig. 9. Ponte di Alcántara, modello numerico, superfici mesh. Ottimizzazione dei punti dell'arcata. Estrusione semplice del profilo del terreno con suddivisione in poligoni. Operazione di modifica sul terreno (strumenti dello Sculpt; elaborazione di Roberto Barni).

Diverso il discorso per quel che concerne la modellazione di elementi naturali organici quali il terreno e l'acqua. Nel caso del terreno si estrude la linea di sezione realizzata in Cad per generare una prima superficie, che dovrà essere ulteriormente suddivisa per creare una rete più fitta di poligoni (Fig. 9). Con un selettore a pennello è possibile simulare le irregolarità del terreno, utilizzando comandi quali Push, Clay, Smooth, Carve e Scar (Fig. 9). In questo caso è l'operatore a gestire il processo di creazione del modello del terreno, in quanto vincolato a sezioni precedentemente rilevate.

Nel caso dell'acqua, invece, non è necessaria una rispondenza perfetta all'oggetto rilevato ed è quindi possibile fare riferimento a mappe procedurali parametriche in bianco e nero¹¹ che simulano

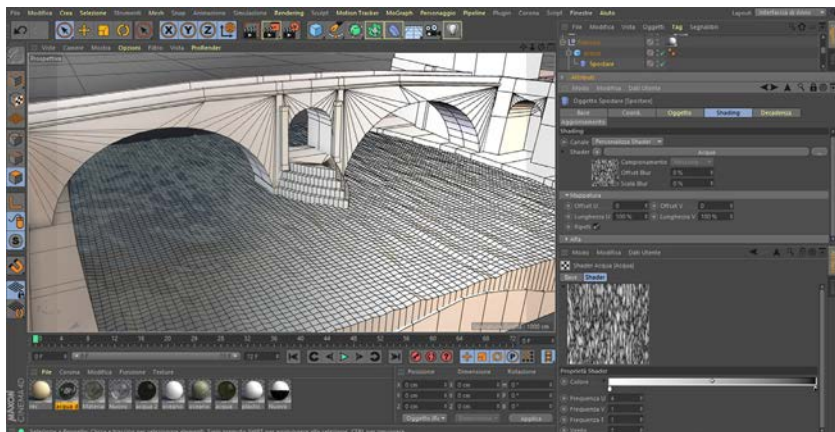


Fig. 10. Ponte di Alcántara, modello numerico, superficie mesh. Applicazione della mappa procedurale dell'acqua alla mesh (software Cinema 4D; elaborazione di Roberto Barni).

le increspature dell'acqua (Fig. 10). Per avere un'increspatura con un livello di dettaglio sufficiente vanno aumentate le suddivisioni del piano o della superficie in uso. Per raggiungere un buon livello di realismo, inoltre, è sufficiente replicare due caratteristiche fisiche fondamentali dell'acqua: la riflessione e la rifrazione. Ogni materiale trasparente ha un effetto diverso sulla velocità del raggio di luce che lo attraversa, e l'effetto può essere tradotto in un coefficiente detto IOR (*Index of Refraction*). Questo valore – che nel caso dell'acqua corrisponde a 1,333 – inserito nel campo IOR permette di replicare molto fedelmente la rifrazione che l'acqua avrebbe nella realtà.

Come si è visto, i processi che coinvolgono la realizzazione di un'immagine 3D non si esauriscono con la modellazione dell'oggetto, ma implicano altri essenziali passaggi, quali l'*UV mapping*, il *texturing*, il *lighting* e il *rendering*.

Passaggio fondamentale per poi arrivare all'immagine finale è la mappatura, o *UV mapping*: geometrie complesse – come le modanature del ponte di Alcántara – devono essere sviluppate su un piano tramite l'*unwrapping*. A questo punto ogni vertice dell'oggetto tridimensionale disporrà di un set di coordinate bidimensionali condiviso con l'immagine, che potrà essere quindi associata alle sue facce, risultando visibile nello spazio 3D. Le coordinate UV fanno, quindi, da ponte tra lo spazio bidimensionale delle immagini (*texture*) e quello tridimensionale della *mesh*. Per controllare la qualità dell'*UV mapping* creata, è buona norma usare una texture di controllo detta

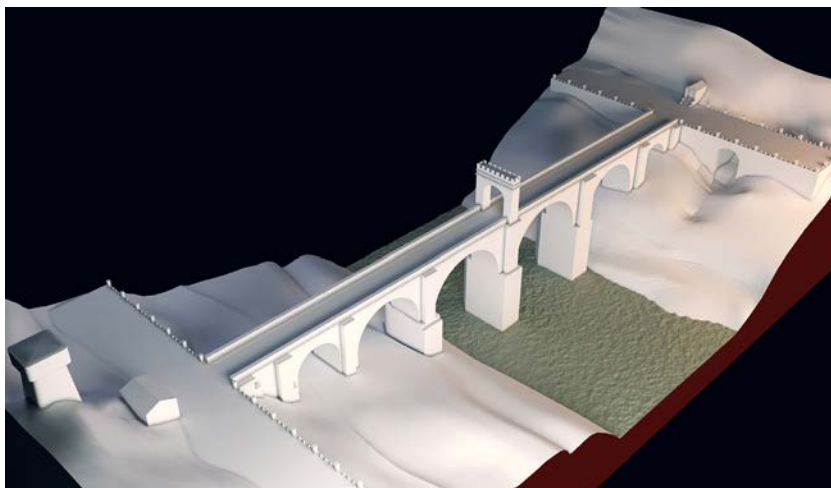


Fig. 11. Ponte di Alcántara, modello renderizzato (elaborazione di Roberto Barni).



Fig. 12. Ponte di Alcántara, modello renderizzato (elaborazione di Roberto Barni).

Checker, che permette di verificare – attraverso un'immagine raster formata da una griglia a maglia quadrata di numeri e colori – se la proiezione dell'*unwrapping* è corretta.

Una volta concluso l'*unwrapping*, si può procedere con il *texturing*, che permette di proiettare una o più *texture* – precedentemente realizzate con programmi di fotoritocco, quali Adobe Photoshop – sulla

superficie di un modello 3D, utilizzando le coordinate UV¹². Essa rende il modello più dettagliato e realistico.

Per concludere il *workflow* l'ultimo passaggio è il *rendering*¹³, processo attraverso il quale si genera dalla scena 3D un'immagine 2D. Il bilanciamento delle luci, la resa dei materiali e il taglio fotografico della scena incidono molto sulla buona riuscita di un *render* realistico.

La finalizzazione di un *render* non deve necessariamente puntare al realismo: nel caso del ponte di Alcántara era indispensabile comunicare le volumetrie e le geometrie alla base della sua creazione, nonché il rapporto instaurato da questo con il contesto. Per fare ciò si è puntato all'astrazione del materiale, utilizzando una *texture* bianca per l'architettura esistente e per il terreno (Figg. 11,12); solo l'acqua è stata resa realisticamente secondo i procedimenti precedentemente descritti.

4. Lettura e interpretazione dei dati: analisi metrica, geometrica e proporzionale

Una prima interpretazione dei modelli bidimensionali così ottenuti ha dato l'opportunità di leggere e rappresentare alcune caratteristiche orografiche del terreno, come ad esempio le curve di livello delle ripide sponde del Tago, in pianta e sezione, che consentono una prima interpretazione sul posizionamento in quel sito del ponte.

Fermo restando motivazioni di natura viaria, quindi commerciale, sociale e geografica, un aspetto sicuramente interessante, tratto dagli elaborati bidimensionali, è la dimensione del letto del Tago in questo punto particolarmente ridotta (circa 64 m) che offriva quindi la possibilità di superarlo agevolmente in termini di distanza. Diversamente alla ridotta larghezza del letto del fiume non corrispondeva un agevole declivio delle sponde che, come detto, in questo punto si presentano invece molto ripide e scoscese, costringendo gli esecutori a un'opera ingegneristica molto ardua per il periodo (I sec. d.C.). E infatti la struttura realizzata è basata su sei arcate di dimensioni differenti con due arcate maggiori al centro del fiume, due medie e due minori ai lati a contatto con le strade secondo una logica costruttiva notevolmente diffusa in questo tipo di strutture. I piloni di imposta delle arcate sono realizzati a quote differenti, ciò chiaramente per accompagnare il declinare ripido delle sponde consentendo di mantenere il piano viario superiore a una unica quota, senza dover ricorrere a conformazioni "a schiena d'asino".

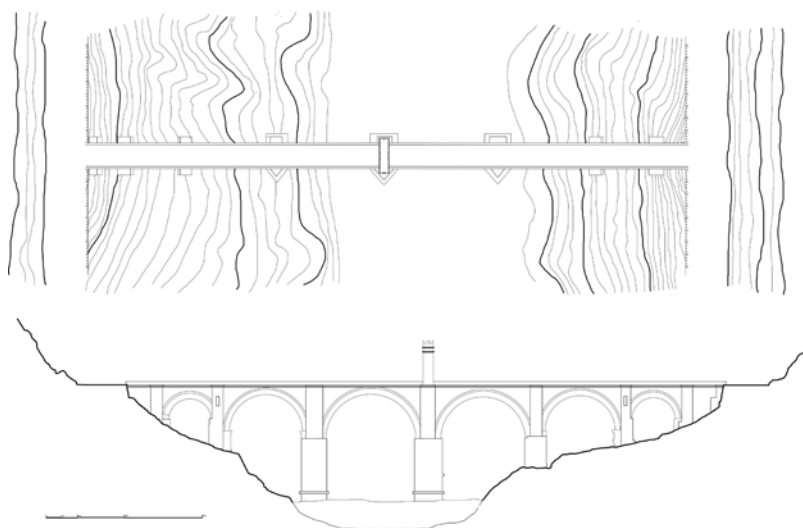


Fig. 13. Ponte di Alcántara, modelli geometrico 2D. Pianta e prospetto sud-ovest (elaborazione di Carlo Inglese).

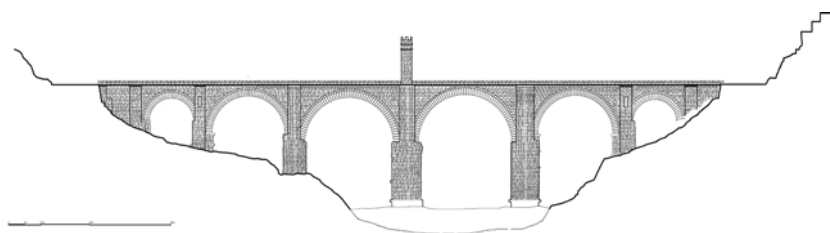


Fig. 14. Ponte di Alcántara, modello architettonico 2D. Prospetto nord-est (elaborazione di Carlo Inglese).

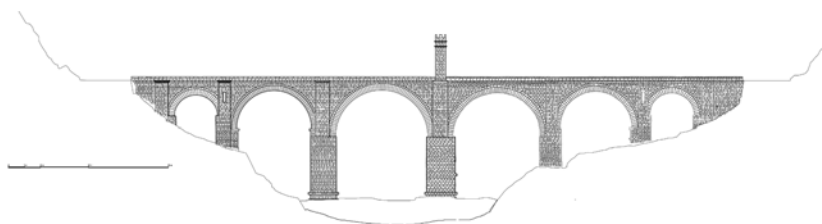


Fig. 15. Ponte di Alcántara, modello architettonico 2D. Prospetto sud-ovest (elaborazione di Carlo Inglese).

Dal punto di vista tecnico-costruttivo il ponte è realizzato con blocchi di pietra squadrata, bugnata, di roccia granitica, con filari costituiti da blocchi di diverse dimensioni (da una lunghezza minima di circa 0,40 m a una massima di 1,60 m, mentre invece le

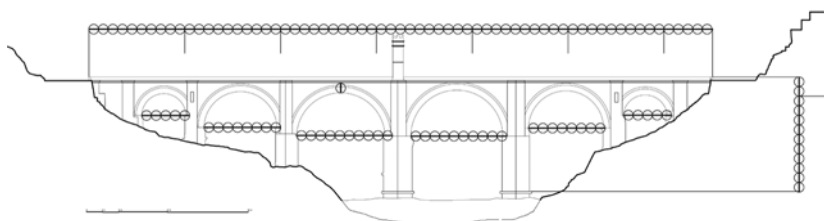


Fig. 16. Ponte di Alcántara, analisi proporzionale. Prospetto nord-est (elaborazione di Carlo Inglese).

ghiere degli archi hanno lunghezza di circa 1,85 m). La finitura dei blocchi è, come detto, bugnata con differenti lavorazioni, essendo presente sia la lavorazione rustica che liscia. Le arcate presentano una doppia ghiera, la maggiore inferiore con conci disposti “a coltello” sormontata da una seconda con blocchi di testa. La lavorazione della superficie dei blocchi è liscia con un leggero ribassamento perimetrale, per la ghiera maggiore, e lasciata a bugna rustica, sempre con ribassamento, per quella minore. I piloni di imposta degli archi, formati da una base parallelepipedica maggiore sulla quale si addossa un robusto pilastro che sale fino alla balaustra, coronato da una modanatura che ricorda un capitello tuscanico (echino e abaco). I due piloni centrali sono impostati direttamente nell'alveo del fiume, gli altri cinque su una piattaforma naturale, degradante verso il letto del fiume, in ardesia; a monte presentano la caratteristica conformazione a rostro per opporre minore resistenza alla corrente delle acque, mentre a valle si presentano a forma parallelepipedica.

I modelli 2D estratti dal modello numerico hanno consentito di interrogare il manufatto, interpretare alcuni dati oggettivi da esso estratti, ed effettuare alcune considerazioni di carattere geometrico proporzionale e tecnico costruttivo (Figg. 13, 14, 15).

Strutturalmente il ponte presenta sei arcate due centrali maggiori, due medie e due laterali minori.

Dal punto di vista dimensionale, considerando i dati oggettivi estratti dai modelli, il ponte ha una larghezza massima di circa 8,20 m (misurata all'esterno dei parapetti), con una sede viaria di 6,88 m e una lunghezza totale di 191,40 m (misurata a filo esterno dei parapetti). Le sei arcate, a tutto sesto, risultano a due a due sostanzialmente uguali con luce rispettivamente di circa 27,30 m e circa 28,40 m le due centrali maggiori, circa 22,50 m e circa 23,20 m le due intermedie, e di circa 13,60 m e circa 13,50 m le due minori laterali.

Naturalmente le imposte delle sei arcate sono diverse tra loro infatti, assumendo come quota 0,00 di riferimento quella convenzionale del Tago, si avrà che l'imposta delle arcate maggiori è, assumendo come orientamento il prospetto a valle, +20,00 m quella di sinistra, +19,80 m quella di destra, l'imposta delle arcate intermedie è +22,50 m quella di sinistra e +22,28 m quella di destra, l'imposta delle arcate minori è +26,14 m e +26,10 m.

Un'altra analisi condotta sui modelli 2D ottenuti dal modello numerico è stata quella geometrico proporzionale al fine di valutare le figure geometriche che sottendono alla costruzione del ponte e alle regole, anche proporzionali, a esse correlate (Fig. 16).

Basandoci, quindi, sui modelli 2D come piante e prospetti, dal punto di vista geometrico il ponte è costituito, come detto, da due circonferenze che inviluppano le due arcate maggiori centrali simili (diametro 27,27 m, quella di sinistra, diametro 28,37 m quella di destra), due circonferenze medie per i due fornicci intermedi (diametro 22,50 m, quella di sinistra, diametro 23,17 m quella di destra) e due circonferenze che inviluppano le due arcate minori laterali (diametro 13,63 m, quella di sinistra, diametro 13,50 m quella di destra).

Una seconda analisi alla quale sono stati sottoposti i modelli 2D è stata quella di utilizzare come modulo proporzionale il piede romano (assumendolo pari a 0,296 m) e interrogare la struttura in base ad esso.

I dati principali estrapolati da una siffatta analisi proporzionale danno una lunghezza totale di 641 piedi, una larghezza di 28,00 piedi (calcolato all'esterno del parapetto), il che ci dà un rapporto di 1/23.

Le sei arcate hanno un diametro rispettivamente di 92 piedi quella di sinistra e 96 quella di destra per le due maggiori; 76 piedi quella di sinistra e 78 piedi quella di destra per le due intermedie; 46 piedi quella di sinistra e 45 piedi quella di destra per le due minori. L'altezza totale della ghiera delle arcate è pari a circa 8 piedi, di cui 6 piedi per la ghiera minore (quindi i conci delle arcate sono alti circa 1,77 m).

Da questi dati estratti dalle analisi metrica, geometrica e proporzionale si può dedurre che, probabilmente, le arcate furono edificate con piccole differenze di quota, con diversi diametri, proprio per riassorbire le diverse asperità delle sponde in quel punto particolarmente ripide. Le modeste variazioni dimensionali contribuiscono a risolvere i problemi tecnico-costruttivi esistenti pur mantenendo

una figura molto proporzionata le cui variazioni sono difficilmente percepibili a occhio nudo¹⁴.

¹ RODRÍGUEZ PULGAR 1992, p. 65.

² GILOTTE 2006.

³ LIZ 1988, p. 36.

⁴ CRUZ 2002-2003, pp. 90-91.

⁵ RODRÍGUEZ PULGAR 1992, pp. 83-141.

⁶ PIZZO 2016.

⁷ I dettagli della scoperta, i dati e l'analisi di questa fase in PIZZO 2016

⁸ È stato impiegato uno scanner 3D Faro CAM2 Focus 70.

⁹ Si fa riferimento al software proprietario Scene 5.4.2 e al software di Autodesk ReCup pro.

¹⁰ Modo è un software professionale di modellazione poligonale sviluppato dalla Luxology, attualmente conosciuta come Foundry e operante nel campo della computer grafica. Al momento il suo core operativo è costituito da modellazione, *painting*, *rendering*, *sculpting*, *animation*. Incorpora inoltre un motore di *rendering* GI (*global illumination*) che permette di ottenere immagini di alto livello. Per avere un quadro completo delle caratteristiche di Modo si veda <<https://www.foundry.com/products/modo>>.

¹¹ Le mappe procedurali (*noise*, *cellular*, *turbulence*, etc.) non sono delle semplici immagini bidimensionali, in quanto definite da una funzione algebrica parametrizzata su uno spazio tridimensionale. Il vantaggio rispetto alle bitmap – immagini bidimensionali raster utilizzate per texturizzare un elemento – risiede nel fatto che permettono di variare alcuni parametri a seconda delle necessità, ottenendo di volta in volta mappe diverse.

¹² Il nome UV è equivalente a quello degli assi X e Y: viene impiegato per non dare adito a fraintendimenti tra i due ambiti.

¹³ In questo caso il *rendering* è stato realizzato con l'engine Corona Renderer per Cinema 4D.

¹⁴ Per la redazione di questo capitolo, oltre ai testi già menzionati, ci si è avvalsi anche della consultazione e studio delle seguenti pubblicazioni: CAMPANELLA 1928; BONATZ, LEONHARDT 1956; GAZZOLA 1963; GIOVANNONI 1969; LIZ 1988; MARTA 1989; RODRÍGUEZ PULGAR 1992; BROWN 1993, p. 25; O'CONNOR 1993, pp. 109-111; GALLIAZZO 1994, pp. 353-358; MALIZIA 1995; CAIROLI GIULIANI 1997; MALIZIA 1997; GRAF 2002, pp. 20-21; FERNÁNDEZ CASADO 2005, pp. 369-396; GILOTTE 2006, pp. 211-231; PIZZO 2016.

Bibliografia generale

ALVINO, Lezzi 2014: GIOVANNA ALVINO, FRANCESCA LEZZI. Reate/Rieti. Archeologia Urbana. 27-29 marzo 2012). Roma: Quasar Edizioni, 2014, pp. 145-150.

ALIPERTA, GIRA 2015: ANDREA ALIPERTA, CARLO GIRA. The Church of Meryemana in Göreme, Cappadocia. New life in prototyping and augmented reality. In *Proceedings of the 19th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies* (Vienna, Austria, 3-5 novembre 2014). Vienna: Museen der Stadt Wien - Stadtarchäologie, 2015, pp. 1-16.

AMADEI 1948: EMMA AMADEI. *I ponti di Roma*. Roma: Fratelli Palombi Editori, 1948.

BERTOLESI, MILANI, LOPANE, ACITO 2017: ELISA BERTOLESI, GABRIELE MILANI, FULVIO DOMENICO LOPANE, MAURIZIO ACITO. Augustus Bridge in Narni (Italy): Seismic Vulnerability Assessment of the Sill Standing Part, Possible Causes of Collapse, and Importance of the Roman concrete Infill in the Seismic-Resistant Behavior. *International Journal of Architectural Heritage*, 2007, vol. 11, n. 5, pp. 717-746. DOI: 10.1080/15583058.2017.1300712.

BETOCCHI 1900: ALESSANDRO BETOCCHI. *L'Isola Tiberina e i lavori del Tevere*. Roma: Tipo-litografia del Genio Civile, 1900.

BEVILACQUA, FAGIOLO 2012: MARIO BEVILACQUA, MARCELLO FAGIOLO (a cura di). *Piante di Roma dal Rinascimento ai Catasti*. Roma: Artemide 2012.

BIANCHINI 2001: CARLO BIANCHINI. Modelli discreti e modelli continui nel rilievo e rappresentazione informatizzata dell'architettura. *Disegnare. Idee Immagini*, 22, 2001, pp. 51-60.

BIANCHINI ET AL. 2016A: CARLO BIANCHINI, CARLO INGLESE, ALFONSO IPPOLITO. The role of BIM (Building Information Modeling) for representation and managing of built and historic artifacts. *DisegnareCon*, 9, 16, 2016, pp. 10.1-10.9.

BIANCHINI ET AL. 2016B: CARLO BIANCHINI, CARLO INGLESE, ALFONSO IPPOLITO. *I teatri antichi del Mediterraneo come esperienza di rilievo integrato. The Ancient Theatres of the Mediterranean as integrated survey experience*. Roma: Sapienza Università Editrice, 2016.

BIFOLCO, RONCA 2018: STEFANO BIFOLCO, FABRIZIO RONCA. *Cartografia rara italiana: XVI secolo. L'Italia e i suoi territori*. Catalogo ragionato delle carte a stampa. Roma: Antiquarius Edizioni, 2018.

BONATZ, LEONHARDT 1956: BONATZ PAUL, LEONHARDT FRITZ. 1956. *Brücken*. Königstein im Taunus (Germany): Karl Robert Langewiesche Verlag, 1956.

BORGHINI, CARLANI 2011: STEFANO BORGHINI, RAFFAELE CARLANI. La restituzione virtuale dell'architettura antica come strumento di ricerca e comunicazione dei beni culturali: ricerca estetica e gestione delle fonti. In ELENA IPPOLITI, ALESSANDRA MESCHINI (a cura di). *Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale*. *DisegnareCon*, 4, 8, 2011, pp. 71-79.

BROWN 1993: DAVID J. BROWN. *Bridges*. New York: Macmillan Publishing Company, 1993.

CAIROLI GIULIANI 1997: FULVIO GIULIANI CAIROLI. *L'edilizia nell'antichità*. Roma: NIS, 1997.

CAIROLI GIULIANI 2018: FULVIO GIULIANI CAIROLI. *L'edilizia nell'antichità*. Roma: Carocci editore, 2018.

CAMPANELLA 1928: GIUSEPPE CAMPANELLA. *Ponti in muratura*. Milano: Vallardi, 1928.

CALABI, CONFORTI 2002: DONATELLA CALABI, CLAUDIA CONFORTI. *I ponti delle capitali d'Europa. Dal Corno d'oro alla Senna*. Milano: Electa Editore, 2002.

CAMERIERI, DE SANTIS 2009: PAOLO CAMERIERI, ANDREA DE SANTIS. La Via Curia. In FILIPPO COARELLI, ANDREA DE SANTIS (a cura di). *Reate e l'Ager Reatinus. Vespasiano e la Sabina: dalle origini all'impero*. Collana DIVUS VESPASIANUS, il Bimillenario dei Flavi. Roma: Edizioni Quasar, 2009. pp. 59-61.

CAMPANELLA 1928: GIUSEPPE. CAMPANELLA. *Ponti in muratura*. Milano: Vallardi, 1928.

CARANDINI 2012: ANDREA CARANDINI. *Atlante di Roma antica: biografia e ritratti della città*. Vol. I: Testi e immagini. Vol. II: Tavole e indici. Milano: Electa Editore, 2012.

CARBONI 2007: LUCA CARBONI. *I ponti di Roma*. Roma: Aracne, 2007.

CASCAVILLA 2005: RAFFAELE CASCAVILLA. *Una mutevole permanenza: Ponte Rotto a Roma*. *Palladio*, 36, 2005, pp. 53-66.

CATELLI ISOLA, BELTRAME QUATTROCCHI 1975: MARIA CATELLI ISOLA, ENRICHETTA BELTRAME QUATTROCCHI. *I ponti di Roma dalle Collezioni del Gabinetto Nazionale delle Stampe*. Catalogo di mostra. Roma: De Luca editore: 1975.

CECCHI 2003: ALBERTO CECCHI. Il Ponte di Augusto a Narni: metodi informativi per il rilievo delle rovine, la ricostruzione virtuale, la modellazione solida con il metodo degli elementi finiti. *Quaderni di Leonardo*, n. 2/2003.

COZZA 1907: LUIGI COZZA. *La riattivazione del ramo del Tevere a sinistra dell'Isola di S. Bartolomeo e le riparazioni dei danni arrecati ai Muraglioni dalla piena del 2 dicembre 1900*. Roma: Stabilimento tipo-litografico del Genio Civile, 1907.

CORSI, RAGIONIERI 2018: STEFANO CORSI, PINA RAGIONIERI (a cura di). *Speculum Romanae Magnificentiae, Roma nell'incisione del Cinquecento*. Catalogo di mostra (Firenze, Casa Buonarroti, 6 giugno-26 agosto 2018).

CRUZ 2002-2003: MARIA CRUZ VILLALÓN. EL PUENTE DE ALCÁNTARA EN LOS SIGLOS XVII Y XVIII. NOTICIAS SOBRE SU ESTADO Y PLANTEAMIENTO DE RESTAURACIÓN. *NORBA-ARTE*, VOL. XXII-XXIII, 2002-2003, pp. 89-99.

D'AMELIO, LO BRUTTO 2009: SALVATORE D'AMELIO, MAURO LO BRUTTO. Analisi e comparazione di modelli di superficie di reperti archeologici realizzati tramite laser scanner e fotogrammetria. In *Atti della XIII Conferenza Nazionale ASITA* (Bari 1-4 dicembre 2009). Bari 2009, pp. 841-846.

D'ONOFRIO 1970: CESARE D'ONOFRIO. *Il Tevere e Roma*. Roma: Ugo Bozzi Editore, 1970.

D'ONOFRIO 1980: CESARE D'ONOFRIO. *Il Tevere. L'Isola tiberina, le inondazioni, i molini, i porti, le rive, i muraglioni, i ponti di Roma*. Roma: Romana Società Editrice, 1980.

DE BENEDETTIS, CAIAZZA 2011: GIANFRANCO DE BENEDETTIS, DOMENICO CAIAZZA (a cura di). *La provincia Samnii e la viabilità romana. Cervo al Volturno (IS)*: Volturnia Edizioni, 2011.

DE FELICE 2016: GIULIANO DE FELICE. The New Trend of 3D Archaeology is... Going 2D!. In *Proceedings of the 43rd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* (Siena, 3 aprile 2015). Siena: Università di Siena 1240, 2016, pp. 363-368.

DEMETRESCU 2011: EMANUEL DEMETRESCU. Modellazione 3d, visualizzazione scientifica e realtà virtuale. In *Archeologia virtuale, la metodologia prima del software*. Atti del Seminario di Archeologia Virtuale (Roma, 5-6 aprile 2011). Roma: Edizioni Espera, 2011, pp. 149-155.

DI ROCCO 2009: GABRIELLA DI ROCCO. *Castelli e borghi murati della contea di Molise (secoli X-XIV)*, collana: Quaderni di archeologia medievale, Editore: All'Insegna del Giglio, 2009.

DURÁN FUENTES 2005: MANUEL DURÁN FUENTES. *La construcción de puentes romanos en Hispania*. Santiago de Compostela: Xunta De Galicia 2005.

EMPLER TOMMASO. 2017. *ICT per il Cultural Heritage. Rappresentare, Comunicare, Divulgare*. Roma: dei, 2017.

FERDANI, FORLANI, PALOMBINI, PIETRONI, RUFA 2016. DANIELE FERDANI, MASSIMILIANO FORLANI, AUGUSTO PALOMBINI, EVA PIETRONI, CLAUDIO RUFA. Lucus Feroniae and Tiber Valley Virtual Museum: from Documentation and 3d reconstruction, up to a novel approach in storytelling, combining Virtual Reality, theatrical and cinematographic rules, gesture-based interaction and augmented perception of the archaeological context. In *Proceedings of the 43rd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* (Siena, 3 aprile 2015). Siena: Università di Siena 1240, 2016, pp. 51-57.

FERNÁNDEZ CASADO 2005: CARLOS FERNANDEZ CASADO. *La arquitectura del ingeniero*. 2nd edition, Colegio de Ingenieros de Caminos. Madrid: Canales y Puertos, 2005 (spec. pp. 369-396).

FERNÁNDEZ CASADO 2008: CARLOS FERNANDEZ CASADO. *Historia del puente en Hispania: Los puentes romanos*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2008.

FORNASIERO 2012: PAOLA FORNASIERO. *Itinerari nella Roma pittoresca di Ettore Roesler Franz – Journey into picturesque Rome of Ettore Roesler Franz*. Roma: Palombi Editore - Zetema Progetto Cultura, 2012.

FRUTAZ 1962. AMATO PIETRO FRUTAZ. *Le piante di Roma*. Vol. I e II. Roma: Istituto Studi Romani, 1962.

GALLIAZZO 1994: VITTORIO GALLIAZZO. *I ponti romani. Catalogo generale*, Bd. 2. Treviso: Edizioni Canova, 1994.

GALLIAZZO 1995: VITTORIO GALLIAZZO. *I ponti romani*. 2 voll. Treviso: Canova Editore, 1995.

GALLIAZZO 2004: VITTORIO GALLIAZZO. I ponti romani. In Raúl Alba, Isaac Moreno Gallo, Ricardo Gabriel Rodríguez (eds). *Elementos de ingeniería romana. Congreso europeo "Las Obras Publicas romana"* (Tarragona 3-6 novembre 2004). Madrid: Coloquio de Ingenieros Técnicos de Obras Publicas, 2004, pp. 9-23.

GAZZOLA 1963: PIERO GAZZOLA. *Ponti romani: contributo ad un indice sistematico con studio critico bibliografico*. Firenze: Leo S. Olschki, 1963.

GAZZOLA, BASCIÀ 2002: LUIGI GAZZOLA, LUCIANA BASCIÀ. *La testata etrusca di Ponte Emilio in Trastevere. Rilievo murario, documentazione d'archivio e processo di formazione del tessuto*. Roma: Officina Edizioni, 2002.

GIOVANNONI 1969: GUSTAVO GIOVANNONI. *La tecnica della costruzione presso i romani*. Roma: Bardi, 1969.

GILOTTE 2006: SOPHIE GILOTTE. Al-Mu'tadd y el puente de Alcántara (Cáceres). *Mélanges de la Casa de Velázquez* n 36-2, 2006, pp. 211-231.

GIRALDI 2008: ALESSANDRO GIRALDI. *Ponti di Roma*. Roma: GimaFoto, 2008.

GRAF 2002: BERNHARD GRAF. *Bridges that Changed the World*. Munich: Prestel, 2002.

JANNATTONI 1988: LIVIO JANNATTONI. *Roma sparita negli acquerelli di Ettore Roesler Franz*. Roma: Newton Compton Editori, 1988.

LANCIANI 1826: PIETRO LANCIANI. *Del ponte Senatorio ora Ponte Rotto. Osservazioni, e parere dell'architetto Pietro Lanciani romano*. Roma, 1826.

LANCIANI 1893-1901: RODOLFO LANCIANI. *Forma Urbis Romae*. Roma: Edizioni Quasar, 1893-1901.

LANCIANI. 1995: RODOLFO LANCIANI. *Rovine e scavi di Roma antica*, Roma, 1995.

LAPAIINE, USERY 2016: MILJENKO LAPAIINE, E. LYNN USERY. Map projection aspects. *International Journal of Cartography*, 2, 2016 - Issue 1, pp. 38-58.

LEONI 2008. BRUNO LEONI. *Il Ponte Emilio. Dal Pons Aemilius al Ponte Rotto, la storia del più antico ponte in muratura di Roma*. www.ilmiolibro.it, 2008.

LEONI 2015: BRUNO LEONI. *Roma sparita. La capitale com'era e com'è. 120 anni dopo gli acquerelli di Ettore Roesler Franz*. Roma: Edizioni Intra Moenia, 2015.

LIZ 1988: JESÚS LIZ GUIRAL, J. *El puente de Alcántara. Historia y Arqueología*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1988.

LORENZETTI 2013: ROBERTO LORENZETTI. Rieti e il Velino. L'evoluzione di un lungo rapporto. In CARLO CELLAMARE (a cura di). *La Città e il fiume*. Gorizia: EdicomEdizioni, 2013, pp. 75-94.

LUGLI 1934: GIUSEPPE LUGLI. *I monumenti antichi di Roma e suburbio*, II. Roma: G. Bardi, 1934.

LUGLI 1939: GIUSEPPE LUGLI. *Acque urbane in Roma Antica. Fonti - Sorgenti - Acque - Strutture*. A cura di M. E. GARCIA BARRACCO. Roma: Scienze e lettere, 2009.

LUGLI 1957: GIUSEPPE LUGLI. *La tecnica edilizia romana con particolare riguardo a Roma e Lazio*, I. Roma: G. Bardi, 1957.

MACERA 2016: MARCELLA MACERA. *I ponti dell'Isola Tiberina, Documentazione, rappresentazione e comunicazione di un patrimonio architettonico urbano*. Tesi di Dottorato di Ricerca. Ciclo XXVIII, I sessione 2016. Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura. Dottorato di Ricerca in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo - Settore Disciplinare ICAR 17.

MALIZIA 1994: GIULIANO MALIZIA. *I Ponti di Roma antichi e moderni, esistenti e scomparsi*. Roma: Tascabili economici Newton, 1994.

MALIZIA 1995: GIULIANO MALIZIA. *I ponti di Roma antichi e moderni, esistenti e scomparsi*. Roma: Newton Compton, 1995.

MALIZIA 1997: GIULIANO MALIZIA. *I ponti di Roma*, Roma: Newton Compton, 1997.

MARSIC, MEDL, FLANAGAN 2000: IVAN MARSIC, ATTILA MEDL, JAMES FLANAGAN. *Natural communication with information systems*. Piscataway: Rutgers Univ., 2000.

MARTA 1989: ROBERTO MARTA. *Tecnica costruttiva romana*. Roma: Edizioni Kappa, 1989.

MESCHINI 2011: ALESSANDRA MESCHINI. Tecnologie digitali e comunicazione dei beni culturali. Stato dell'arte e prospettive di sviluppo. In ELENA IPPOLITI, ALESSANDRA MESCHINI (a cura di). *Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale*. DisegnareCon, 4, 8, 2011, pp. 14-24.

MICHELI 1995: GIUSEPPE MICHELI. *L'Isola Tiberina e i Fatebenefratelli: la storia dell'insula inter duos pontes*. Milano: CENS, 1995.

MIGLIARI 2008: RICCARDO MIGLIARI. *Prospettiva dinamica interattiva. La tecnologia dei videogiochi per l'esplorazione dei modelli 3d di architettura*. Roma: Edizioni Kappa, 2008.

MORELLI 1980: GIORGIO MORELLI. *Il Tevere e i suoi ponti*. Roma: Edizioni Kappa, 1980.

NIBBY 1942: ANTONIO NIBBY. *Tivoli e le sue vicinanze*, Sezione della R. Deputazione Romana di Storia Patria Valle D'este, 1942-XX.

NORMAN 1998: DONALD A. NORMAN. *The design of everyday things*. Cambridge: MIT PRESS, 1998.

NORMAN 1999: DONALD A. NORMAN. *The invisible computer*. Cambridge: MIT PRESS, 1999.

O'CONNOR 1993: COLIN O'CONNOR. *Roman Bridges*. Cambridge University Press, 1993 (spec. pp. 109-111).

ORLANDI 2008: SILVIA ORLANDI. Le iscrizioni del ponte Fabricio viste da vicino. In *Epigrafia 2006*. Atti della XIV Rencontre sur l'épigraphie in onore di Silvio Panciera, con altri contributi di colleghi, allievi e collaboratori. A cura di Maria Letizia Caldelli, Gian Luca Gregori, Silvia Orlandi.. Roma: Edizioni Quasar, 2008, pp. 177-186.

PANZA 2012: PIERLUIGI PANZA. *Piranesi architetto. Immaginazione, materia, memoria*. Milano: Guerini, 2012 (II edizione);

PARIS 2010: LEONARDO PARIS. Quantità e qualità nell'utilizzo dello scanner laser 3D per il rilievo dell'architettura. In *New lines of research in Building Engineering*. APEGA 2010. X Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la Edificación (Alicante, 2, 3, 4 dicembre 2010). Alicante: editorial Marfil: 2010, vol. 1, pp. 279-289.

PARIS 2014: LEONARDO PARIS. Ponti antichi tra passato e futuro: il ponte romano a Rieti. In PAOLO BELARDI ET AL. (a cura di). *Idee per la rappresentazione 6. Impronte*. Roma: Artegrafica, 2014, pp. 281-291.

PARIS 2015: LEONARDO PARIS. Shape and Geometry in the Integrated Digital Survey. In STEFANO BRUSPAORCI (ed.). *Handbook of research on emerging Digital tools for architectural Surveying, Modeling and representation*. IGI Global 2015, pp. 214-238.

PARIS ET AL. 2012: LEONARDO PARIS, DANIELA LIBERATORE, WISSAM WAHBEH. Digital Representation of Archeological Sites. Recent Excavation at Alba Fucens. In CARMINE GAMBARDELLA (ed).

Less More Architecture Design Landscape. Napoli: La Scuola di Pitagora 2012, pp. 295-304.

PARIS ET AL. 2017: LEONARDO PARIS, MICHELE CALVANO, CARLA NARDINOCCHI. Web spherical panorama for cultural heritage 3D modeling. In MARCO CECCARELLI, MICHELA CIGOLA, GIUSEPPE RECINTO (eds.). *New activities for cultural heritage*. Cham: Springer, 2017, pp.182-189.

PARIS, INGLESE, WAHBEH 2014: LEONARDO PARIS, CARLO INGLESE, WISSAM WAHBEH. Modelli digitali per la conoscenza delle stratificazioni urbane nel centro storico di Narni. In PAOLO GIANDEBIAGGI, CHIARA VERNIZZI (a cura di). *Italian survey & International experience*. Roma: Gangemi Editore, 2015, pp. 439-448.

PASQUALI PASSERI 1983: GIUSEPPE PASQUALI, ALBERTO PASSERI. *La nave di pietra: storia, architettura e archeologia dell'Isola Tiberina*. Milano: Electa, 1983.

PESCARIN, FANINI, LUCCI BALDASSARRI, FERDANI, CALORI 2011: SOFIA PESCARIN, BRUNO FANINI, GUIDO LUCCI BALDASSARRI, DANIELE FERDANI, LUIGI CALORI. Archeologia virtuale, realismo, interattività e performance: dalla ricostruzione alla fruizione on line. In ELENA IPPOLITI, ALESSANDRA MESCHINI (a cura di). *Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale*. DisegnareCon, 4, 8, 2011, pp. 62-70.

PIZZO 2016: ANTONIO PIZZO. El puente romano de Alcántara: nueva documentación arqueológica y evidencias constructivas previas. *Arqueología de la Arquitectura* 13, 2016, pp. 1-22. DOI: <<http://dx.doi.org/10.3989/arqarqt.2016.i13>>.

PUPILLO 1998: MARCO PUPILLO. *S. Bartolomeo all'Isola Tiberina: mille anni di storia e di arte*. Milano: A. Guerini, 1998.

QUILICI, QUILICI GIGLI 1995: LORENZO QUILICI, STEFANIA QUILICI GIGLI. *Opere di assetto territoriale ed urban*. Collana Atlante tematico di topografia antica. Roma: L'Erma di Bretschneider 1995.

QUILICI, QUILICI GIGLI 2015: LORENZO QUILICI, STEFANIA QUILICI GIGLI. *Atlante tematico di topografia antica. Roma, strade e infrastrutture, città e monumenti*. ATTA 25 - 0215. Roma: L'Erma di Bretschneider, 2015.

RAMIERI 2003: ANNAMARIA RAMIERI. *I Ponti di Roma*. Roma: Editore Colombo, 2003.

RICHIELLO 2001: MARIA RICHIELLO. *S. Bartolomeo all'Isola: storia e restauro*. Roma: Bonsignori, 2001 (stampa 2002).

RODRÍGUEZ PULGAR 1992: MA DEL CARMEN RODRÍGUEZ PULGA. *El puente romano de Alcantara: reconstrucción en el siglo XIX*. Salamanca 1992.

RUSSO, GUIDI 2011: MICHELE RUSSO, GABRIELE GUIDI. La modellazione digitale reality-based ed interpretativa per la valorizzazione del patrimonio culturale. In *La ricerca nel disegno di design*. Atti della giornata di studio (20 ottobre 2010). Santangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2010, pp. 202-211

SAFFER 2006: DAN SAFFER. *Designing for Interaction: Creating Smart Applications and Clever Devices*. San Francisco: Peachpit Press, 2006.

SALADINO, SOMMA 1993: LAURA SALADINO, MARIA CARLA SOMMA. Elementi per una topografia di Rieti in età tardoantica ed altomedievale. *Mélanges de l'École française de Rome. Moyen-Âge*, tome 105, 1, 1993, pp. 23-122.

SEGARRA LAGUNES 2004: MARIA MARGARITA SEGARRA LAGUNES. *Il Tevere e Roma. Storia di una simbiosi*. Roma: Gangemi Editore, 2004.

TAGLIAFERRI, VARRIALE 2007: ALBERTO TAGLIAFERRI, VALERIO VARRIALE. *I ponti di Roma*. Roma: Newton Compton, 2007.

TATTOLI, TATTOLI 2000: MICHELE TATTOLI, PAOLO TATTOLI. *Narni, un ponte nella storia degli antichi viaggiatori, raccolta di incisioni (1676/1927)*. Narni: Citta di Narni, 2000.

TEDESCHI 2010: ARTURO TEDESCHI. *Architettura parametrica. Introduzione a Grasshopper*. Potenza: Edizioni Le Penseur, 2010 (II edizione). 208 p. ISBN 978-88-95315-08-9.

TOSTO 2010. DOMENICO TOSTO. Piattaforma multimediale e interattiva, per la conoscenza e la salvaguardia del patrimonio Ambientale ed Architettonico in area Mediterranea con particolare riferimento alla regione del Maghreb. In CRISTIANA BARTOLOMEI (a cura di). *La comunicazione dei beni culturali*. DisegnareCon, 3, 6, 2010, pp. 105-110.

VECCHIETTI 2004: ERIKA VECCHIETTI. *La viabilità di Forlimpopoli nell'antichità. I ponti*, in «Forlimpopoli. Documenti e Studi» XV, 2004.

VESPIGNANI 1692: CARLO VESPIGNANI. *Discorso di monsignor Gio: Carlo Vespignani sopra la facile riuscita di restaurare il Ponte Senatorio, hoggi detto Ponte Rotto*. Roma, 1692.

Autori

Roberto Barni

Dottore in Architettura, laureato con lode con la tesi “Rilievo integrato, modellazione e valorizzazione del duomo di Orvieto”. Ha realizzato numerosi rilievi sull’architettura storica, spesso finalizzati alla ricostruzione tridimensionale di *facies* ormai perdute. Riserva particolare attenzione alla sperimentazione delle nuove tecnologie informatiche, tanto sotto il profilo metodologico, quanto sotto quello operativo. Ha pubblicato diversi articoli ed elaborazioni grafiche nell’ambito della rappresentazione del patrimonio culturale. Dal 2019 collabora con il Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell’Architettura dell’Università Sapienza di Roma.

Adriana Caldarone

Architetto, PhD in Storia Disegno e Restauro dell’Architettura. La sua attività di ricerca spazia nell’ambito del settore disciplinare del Disegno e della Rappresentazione e si specializza nelle tematiche relative al settore del patrimonio edilizio costruito connesse con i processi HBIM. Si interessa inoltre all’ambito della comunicazione dei Beni Culturali, in particolare concentrandosi su studi visuali attraverso approcci multimediali.

Tommaso Empler

Architetto, PhD, ricercatore della Sapienza Università di Roma. Sono temi di ricerca: le forme di rappresentazione evolute per mezzo dell’elaboratore elettronico sia in ambito progettuale che di rilievo, con particolare sviluppo nel settore degli applicativi Open Source; lo studio dei sistemi di comunicazione legati alla percezione visiva ed extra visiva; lo sviluppo ed utilizzo delle ICT (Information Communication Technologies) legato al settore del *Cultural Heritage*; la ricerca nel settore del BIM ed HBIM. È autore e co-autore di numerosi saggi e monografie riferite ai propri settori di ricerca scientifica.

Monica Filippa

Archeologa, esperta nella ricerca, valorizzazione e tutela dei Beni Culturali, ha realizzato studi sul paesaggio e la topografia antichi per la ricostruzione dell'assetto storico-topografico e alla valutazione del Rischio Archeologico nell'ambito della progettazione di opere pubbliche. Dal 2009 è in attività presso il Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura, Sapienza Università di Roma come coordinatore editoriale per la rivista scientifica internazionale *Disegnare. Idee Immagini*.

Carlo Inglese

Architetto, PhD, professore associato della Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura. Si occupa delle discipline della rappresentazione e rilievo in ambito architettonico e archeologico, attraverso l'applicazione delle nuove tecnologie informatiche al rilievo integrato complesso. Fa parte del Collegio del dottorato del DSDRA e insegna discipline inerenti la Scienza della Rappresentazione in diversi Master universitari. Ha realizzato numerose campagne di rilievo nazionali ed internazionali ed è autore di pubblicazioni inerenti il *Cultural Heritage*.

Daniele Maiorino

Architetto, laureato con lode in Gestione del Processo Edilizio, si occupa di ricerca e studio di sistemi e processi B.I.M. correlati al mondo dell'edilizia e del design. È esperto in gestione e valorizzazione dei patrimoni immobiliari e urbani, *asset, property, facility e energy management*. Riserva particolare interesse e attenzione ai temi inerenti il rilievo e il disegno, approfondendo i concetti della geometria descrittiva. Ha partecipato a diverse pubblicazioni effettuando elaborazioni grafiche e rilievi su beni architettonici e monumentali. Dal 2015 collabora con la Sapienza Università di Roma.

Leonardo Paris

Architetto, PhD, professore della Sapienza Università di Roma. La sua attività di ricerca è incentrata sulla Geometria Descrittiva e sullo studio della forma e della geometria nell'architettura, nell'ingegneria e nel design. Si occupa da anni di rilievo digitale integrato, con l'utilizzo delle tecnologie digitali di 3D *shape acquisition* e della modellazione tridimensionale. Ha curato numerosi rilievi nell'ambito dei Beni Culturali, in diversi siti archeologici e complessi chiesastici, al Quirinale, a Palazzo Barberini, a Palazzo Spada, a Palazzo Farnese di Caprarola, in Vaticano.

Francesca Pierdominici

Architetto, PhD, professore a contratto presso gli atenei Sapienza Università di Roma, Università degli Studi della Tuscia e Università

degli Studi di Cassino. Svolge attività di ricerca sullo studio della forma e della geometria applicata all'architettura, sui Sistemi di In-formazione Geografica GIS *open source* per la conoscenza e la docu-mentazione dei beni storico ambientali.

Antonio Pizzo

Direttore della Escuela Española de Historia y Arqueología-CSIC en Roma, archeologo specialista in archeologia della costruzione romana, archeologia dell'architettura e metodologia della ricerca archeologica. Ha realizzato studi sull'organizzazione e la gestione dei cantieri di epoca romana, aspetti produttivi e tecnologici legati all'edilizia e tecniche costruttive. Tra le varie pubblicazioni è coeditore della Serie Arqueología de la Construcción.

Paola Quattrini

Architetto, professore associato alla Sapienza Università di Roma. Si occupa delle discipline del rilievo e della rappresentazione in ambito architettonico e urbano. La sua attività di ricerca è orientata verso la genesi e le modificazioni della forma nell'architettura, all'interno della disamina delle proporzioni e del loro legame con le regole della matematica. Sull'argomento è autore di numerose pubblicazioni.

Maria Laura Rossi

Dottore in Ingegneria edile - Architettura, PhD in Storia Disegno e Restauro dell'Architettura. L'attività di ricerca interessa le metodologie integrate di rilevamento per la conoscenza e la documentazione dei beni culturali, con particolare attenzione alla interoperabilità tra modelli discreti e modelli continui parametrici in ambito HBIM.

Giulia Umana

Ingegnere, laureata con lode in Ingegneria delle Costruzioni Edili e dei Sistemi Ambientali presso l'Università di Roma "Sapienza" - polo di Rieti, con la tesi "Arte e tecnica nei ponti antichi lapidei. Il Ponte Rotto all'Isola Tiberina". Svolge attività professionale nei settori edile e urbanistico e nell'ambito della tutela e conservazione dei Beni storico-artistici. Si interessa inoltre di modellazione 3D e *rendering*.

COLLANA MATERIALI E DOCUMENTI

Per informazioni sui precedenti volumi in collana, consultare il sito:
www.editricesapienza.it

40. Progettare nei territori delle storture
Sperimentazioni e progetti per aree fragili
Daniela De Leo
41. Le sinistre italiane e il conflitto arabo-israelo-palestinese
1948-1973
Claudio Brillanti
42. Basilea 3 e shock sistemici
a cura di Nicola Boccella e Azzurra Rinaldi
43. La responsabilità dell'ente da reato nel sistema generale degli illeciti e
delle sanzioni
anche in una comparazione con i sistemi sudamericani
In memoria di Giuliano Vassalli
a cura di Antonio Fiorella, Alfredo Gaito, Anna Salvina Valenzano
44. Abu Tbeirah Excavations I. Area 1
Last Phase and Building A – Phase 1
edited by Licia Romano and Franco D'Agostino
45. ANCRiSST 2019 Procedia
14th International Workshop on Advanced Smart Materials
and Smart Structures Technology
edited by Vincenzo Gattulli, Oreste Bursi, Daniele Zonta
46. L'Europa della crisi
a cura di Maria Cristina Marchetti
47. Geometria e progetto
Ipotesi di riuso per il palazzo Vernazza a Castri
Alessandra Capanna, Giampiero Mele
48. Politica e azione pubblica nell'epoca della depoliticizzazione
Attori, pratiche e istituzioni
a cura di Ernesto d'Albergo e Giulio Moini
49. CNDSS 2018
Atti della III Conferenza Nazionale delle Dottorande e dei Dottorandi in
Scienze Sociali
13-14 Settembre 2018
*a cura di Giovanni Brancato, Gabriella D'Ambrosio, Erika De Marchis,
Edoardo Esposto, Cecilia Ficcadenti, Raffaella Gallo, Francesca Grivet Talocia,
Melissa Stolfi, Marta Tedesco, Andrea Vaccaro*

50. Spazi e tempi della fede
Spunti per una geopolitica delle religioni
a cura di Alessandro Guerra e Matteo Marconi
51. Gertrude Stein *in T/tempo*
Declinazioni temporali nell'opera steiniana
Marina Morbiducci
52. Regione Lazio. Un nuovo turismo per il Litorale Nord
Manuale per promuovere la trasposizione del sapere
Massimo Castellano e Armando Montanari
53. Psycho-pedagogical research in a Double-degree programme
edited by Guido Benvenuto and Maria Serena Veggetti
54. DiAP nel mondo | DiAP in the world
International Vision | Visioni internazionali
edited by Orazio Carpenzano, Roberto A. Cherubini, Anna Irene Del Monaco
55. Latium Region. A new tourism for the Litorale Nord area
Guide to promote the transfer of knowledge
Massimo Castellano and Armando Montanari
56. Il nuovo mondo rivoluzionario
Per una storia delle società politiche in Italia durante il Triennio (1796-1799)
Alessandro Guerra
57. Studi sull'architettura del Duomo di Orvieto
a cura di Piero Cimbolli Spagnesi
58. Arte e tecnica dei ponti romani in pietra
a cura di Carlo Inglese e Leonardo Paris

I Romani furono maestri nell'edificazione dei ponti in pietra a partire soprattutto dall'età augustea. Il nostro territorio è costellato da numerose presenze archeologiche riconducibili a ponti lapidei romani, alcuni dei quali ancora funzionanti, nonostante le modificazioni susseguitesì nei secoli; tra questi il ponte augusteo di Narni rappresenta ancora oggi una delle opere di ingegneria più imponenti. Numerosi esempi si trovano anche nelle Province dell'Impero, segni tangibili di un approccio culturale fondato anche sulla diffusione dell'arte e della tecnica delle costruzioni.

Il volume raccoglie gli esiti di una ricerca finalizzata alla definizione di un quadro metodologico per l'implementazione di una piattaforma informativa multidisciplinare e multiscalare condivisa. I cinque casi di studio – i ponti Emilio e Fabricio a Roma e di Augusto a Narni, i ponti romani di Rieti e di Alcántara (Spagna) – si basano su un'attività di rilievo digitale e di ricerca storico-documentale e soprattutto di analisi critica e di approfondimento tecnico-costruttivo sulle caratteristiche principali del progetto, della sua realizzazione e della sua trasformazione nel corso di ben due millenni di storia.

Il volume diventa così l'occasione per intraprendere un affascinante viaggio nel tempo, per immergersi con l'immaginazione nel pieno di un periodo, quello dell'Impero Romano, sempre affascinante, coinvolgente e a volte misterioso.

Carlo Inglese, architetto, PhD, professore associato della Sapienza Università di Roma. Si occupa delle discipline della rappresentazione e rilievo in ambito architettonico e archeologico, attraverso l'applicazione delle nuove tecnologie informatiche al rilievo integrato complesso. Ha realizzato numerose campagne di rilievo ed è autore di pubblicazioni inerenti il *Cultural Heritage*.

Leonardo Paris, architetto, PhD, professore associato della Sapienza Università di Roma. La sua attività di ricerca è incentrata sullo studio della forma e della geometria nell'architettura, nell'ingegneria e nel design. Si occupa da anni di rilievo digitale integrato e modellazione tridimensionale. Ha curato numerosi rilievi nell'ambito dei Beni Culturali.

ISBN 978-88-9377-150-4



9 788893 771504

