

Articoli

Metodologia di Rilievo Fotogrammetrico Speditivo per la Modellazione BIM ed Analisi Strutturale FEM di monumenti e fabbricati storici.

Il caso studio: l'Arco d'Augusto di Rimini

Photogrammetric Surveying Methods for BIM Modeling and FEM Structural Analysis of monuments and historical buildings. The case study: the Arch of Augustus in Rimini

Maurizio Serpieri¹, Rosario Alessandro Longo², Antonio Zanutta³ ■

Sommario

Il presente lavoro propone la ricerca di procedure semi-automatiche che consentano di rilevare degli oggetti di forma generica utilizzando il maggior numero di informazioni geometriche ottenibili da una nuvola densa di punti generata tramite rilievo fotogrammetrico (o *TLS*), ricavando un modello geometrico 3D importabile in ambiente BIM e FEM.

La struttura studiata nel dettaglio è l'Arco di Augusto di Rimini, per la quale sono state eseguite due tipi di analisi strutturali: una statica lineare a seguito del peso proprio ed una dinamica modale.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli dedotti tramite altri approcci, quali il *Cloud2Fem* ed altri metodi fotogrammetrici non convenzionali già adottati in precedenza (*FEM 2D*); constatando che vi è una forte compatibilità dei risultati ottenuti con i vari criteri, sia dal punto di vista degli spostamenti calcolati, (0.1-0.2 mm di discordanza), tensioni normali verticali ed orizzontali agenti sulla struttura (1-1.3 kg/cm² di discrepanza), sia per quanto riguarda le forme e periodi modali dei primi modi di vibrare (in quanto le differenze aumentano all'aumentare del grado della forma modale).

Il confronto delle forme e frequenze proprie naturali dei modi di vibrare dei modelli FEM 3D con i modelli FEM 2D semplificati dell'arco hanno evidenziato differenze percentuali maggiori dovute sia alla differente semplificazione geometrica dei modelli ,sia dall'assenza della muratura limitrofa che funge da contrafforte nei modelli 2D.

Infine si sono confrontate le tensioni normali verticali ed orizzontali ricavate in output dai modelli ottenuti con la *Procedura CSF, Metodologia BIM, Procedura Cloud2Fem e Procedura FEM 2D*, ottenendo differenze inferiori a 1.3 kg/cm² per le tensioni normali verticali e quasi nulle per quelle orizzontali; tale evidenza convalida i risultati ottenuti.

Parole chiave: Fotogrammetria, FEM, BIM, CSF, Midas.

Abstract

This article deals with investigating semi-automatic procedures that detect objects with generic shape using as much information as possible from a dense point cloud generated by a photogrammetric survey (or TLS), creating a 3D model that can be imported into the BIM and FEM environment.

The structure that has been studied is the Arch of Augustus in Rimini, for which two types of structural analysis have been performed: a linear static analysis and a modal analysis.

The obtained results have been compared with those of other methods such as Cloud2Fem and others unconventional photogrammetric methods previously adopted (FEM 2D); it has been observed that there is a strong compatibility between the various methods in terms of calculated displacements (0.1-0.2 mm of difference), vertical and horizontal normal stresses acting on the structure (1-1.3 kg/cm² of difference) and modal shape and periods of the initial natural modes of vibration (for which the differences increase with the grade mode).

¹ Ingegnere Civile Libero Professionista – Progettista Strutturista, Studio “Serpieri Structural Engineering” – www.ingmaurizioserpieri.it - ✉ ing.maurizio.serpieri@gmail.com

² Ingegnere Civile Libero Professionista – Progettista Strutturista - ✉ rosario.alessandro.longo@gmail.com

³ Prof. Associato Università degli Studi di Bologna – Facoltà di Ingegneria – DICAM – Dip. di Ing. Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali - ✉ antonio.zanutta@unibo.it

The comparison of the natural frequencies between the 3D FEM model and the 2D FEM model of the arch has seen bigger differences due to both the different geometry of the model and the absence of the neighboring brick wall that acts as a buttress on 2D models.

Finally, the normal vertical and horizontal stresses deducted in output from the models obtained with the CSF Procedure, BIM Methodology, Cloud2Fem Procedure and 2D FEM Procedure has been compared between them, obtaining differences lower than 1.3 kg/cm² for the normal vertical tensions and almost nil for the horizontal ones ; this evidence validates the results obtained.

Keywords: Photogrammetry, FEM, BIM, CSF, Midas.

1. Introduzione

Il comportamento strutturale sismico e statico di un manufatto al giorno d'oggi viene simulato al computer attraverso la generazione di modelli numerici agli elementi finiti che sono in grado di determinare lo stato tensionale/deformativo per ogni condizione di carico ed in ogni punto della struttura con elevata precisione.

Il notevole sviluppo delle tecniche di rilievo avvenuto negli ultimi anni ha reso possibile la creazione di modelli geometrici topografici rilevati con elevata densità di punti, ottenuti in tempi brevi e con costi limitati, quindi accessibili alla maggior parte dei professionisti ed operatori del settore.

Fra le tecniche largamente utilizzate si ricorda la scansione laser e fotogrammetria, in particolare nella sua più moderna variante definita "scansione fotogrammetrica".

Entrambi i metodi di rilievo forniscono in output, a seguito del post-processing ed editing dei dati, elaborati grafici sia in forma vettoriale che raster (es. ortofoto) la cui densità e risoluzione sono funzione del grado di precisione degli strumenti, tecniche di presa utilizzate, n. e punti di presa impiegati, punti di controllo e vincolo, occlusioni prospettiche, ridondanza dei dati, punti rilevati e distanza di presa.

Mentre le tecniche di rilievo seguono delle procedure ormai consolidate, non risulta invece così immediato l'impiego diretto delle informazioni geometriche acquisite tramite la fotogrammetria allo scopo della generazione di modelli strutturali agli elementi finiti per l'analisi sismica e statica degli edifici rilevati.

I principali limiti sono legati alla gestione dell'enorme mole di dati acquisiti ed alla difficoltà di generazione, discretizzazione e semplificazione della mesh, superfici e volumi in modo automatico senza commettere errori.

Il presente lavoro propone la ricerca di procedure semi-automatiche che consentano di rilevare degli oggetti di forma generica utilizzando il maggior numero di informazioni geometriche ottenibili da una nuvola densa di punti generata tramite rilievo fotogrammetrico (o *TLS*), ricavando un modello geometrico 3D importabile in ambiente BIM e FEM.

Nei rilievi tradizionali si scelgono punti caratteristici della struttura andando a prendere delle misure puntuali come quote, posizioni spaziali, spessori di elementi strutturali o altezze; giunti in studio inizia quindi la fase di restituzione grafica, collegando tra loro i punti battuti e andando quindi a supporre che tra di essi vi sia una rigida continuità lineare.

Se questa ipotesi può essere sufficientemente giustificata per strutture di recente edificazione, caratterizzate da particolare regolarità, potrebbe non esserlo nel caso di edifici storici in cui spostamenti, piccoli cedimenti o opere di ripristino avvenute nel corso degli anni hanno portato a geometrie sensibilmente irregolari degli edifici stessi.

Un metodo alternativo per riportare la struttura in un modello geometrico tridimensionale è quello di utilizzare strumenti come il laser scanning che, sfruttando i principi dell'ottica, sono in grado di ricreare una nuvola di punti dalla quale si possono generare superfici tridimensionali e, tramite semplificazione e schematizzazione dei punti rilevati, anche modelli BIM; tuttavia l'elevato costo di questi strumenti spesso ne limita l'utilizzo.

La scansione laser non è però l'unico processo in grado di ottenere una nuvola di punti tridimensionali in un sistema di riferimento locale, infatti la crescente potenza di calcolo di cui oggi dispone ogni computer "domestico" unita all'elevatissimo sviluppo tecnologico ottenuto in ambito fotografico hanno favorito l'impiego della fotogrammetria digitale, con la quale, grazie ad algoritmi di correlazione automatica di punti omologhi, si è in grado di restituire oggetti o porzioni di territorio con elevate precisioni.

Questa procedura di rilievo può essere utilizzata anche in diversi contesti critici, si pensi ad esempio di dover rilevare nel minor tempo possibile il maggior numero di edifici danneggiati a seguito di un evento sismico, per redigere una prima stima dei danni o per ricostruire in sicurezza una zona fisicamente non raggiungibile. In questi casi è possibile installare una fotocamera su un drone andando a sorvolare a diverse quote e con diverse angolazioni la zona interessata, in modo da ottenere un numero sufficiente di foto utili per costruire un modello geometrico tridimensionale degli oggetti rilevati, importabile in un software FEM con una procedura in cui le azioni dell'operatore sono ridotte al minimo, velocizzando i tempi di restituzione grafica.

Gli operatori matematici utilizzati per costruire la nuvola di punti sono chiamati *detectors*, essi hanno il compito di individuare i punti di interesse, cioè i punti omologhi che compaiono su due o più immagini.

Per ottenere tale risultato è necessario che vi sia una ridondanza di immagini, un'opportuna geometria di presa che minimizzi le distorsioni, le occlusioni prospettiche e si possieda almeno l'80% di ricoprimento per ogni fotogramma con il successivo concatenato.

1.1 Introduzione al Building Information Modeling - BIM

Il Building Information Modeling (acronimo: BIM, in italiano: Modello d'Informazioni di un Edificio) indica un metodo per l'ottimizzazione della pianificazione, realizzazione e gestione di costruzioni tramite l'aiuto di un apposito software. Tramite esso tutti i dati di una costruzione possono essere raccolti, combinati e collegati digitalmente; permettendo la visualizzazione, interrogazione ed esplorazione in ambiente 3D del modello geometrico/informativo tridimensionale.

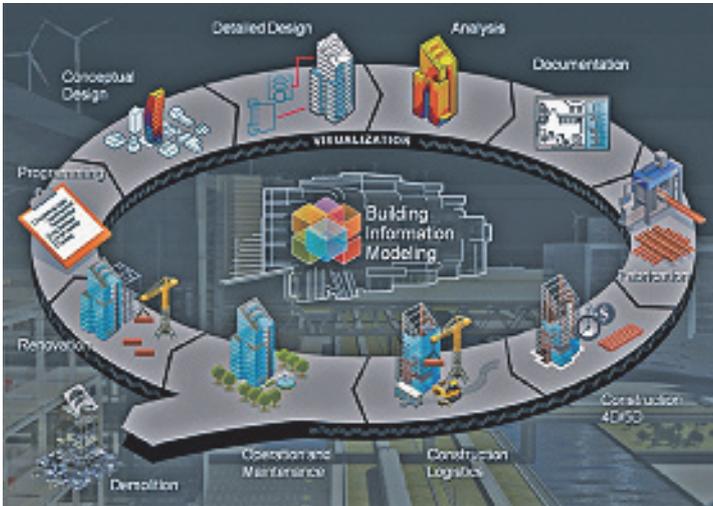


Figura 1
Schematizzazione del
Processo BIM.



Tramite una progettazione BIM oriented ci si indirizza verso l'utilizzo di strumenti innovativi, software e processi BIM di progettazione digitale integrata. Tali procedure di progettazione e gestione del lavoro sono applicate a tutte le categorie di opere presenti nel progetto (edile architettonico e strutturale, impiantistico elettrico e meccanico, sicurezza, protezione al fuoco, cronoprogrammazione delle varie fasi di progettazione, direzione lavori, cantiere e successiva manutenzione, gestione dei costi e tempi di costruzione e manutenzione). Tali differenti e multidisciplinari categorie di opere, fasi di lavorazione ed elaborati in output sono gestiti e condivisi con tutti gli utenti coinvolti nel processo di costruzione (investitori, proprietari, clienti, progettisti, costruttori, imprese, installatori, gestori, manutentori, ecc..) in maniera semplice e fluida attraverso un unico modello digitale integrato.

Si può quindi definire BIM in senso lato il processo di sviluppo, crescita e analisi di modelli multi-dimensionali virtuali generati in digitale per mezzo di programmi su computer.

Il ruolo del BIM nell'industria delle costruzioni (attraverso i suoi già citati utenti) è di sostenere la comunicazione, cooperazione, simulazione e il miglioramento ottimale di un progetto lungo il ciclo completo di vita dell'opera costruita.

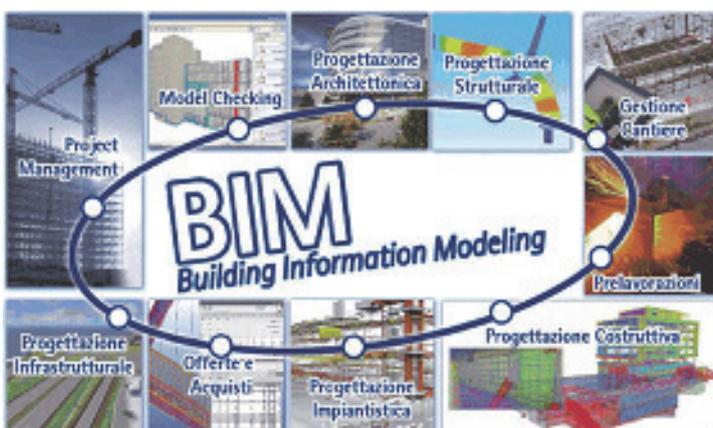


Figura 2
Schematizzazione del
Processo BIM.



Il termine BIM indica quindi in senso più generalizzato la rappresentazione digitale/virtuale di un modello di dati diversi di un edificio relazionati fra loro con le diverse discipline che lo definiscono.

I dati contenuti nel modello digitale integrato BIM sono numerosi, in quanto definiscono tutte le informazioni riguardanti le varie discipline (architettura, struttura, impianti, sicurezza, antincendio, programmazione lavori, costruzione, gestione-manutenzione) per ogni specifico componente di una costruzione.

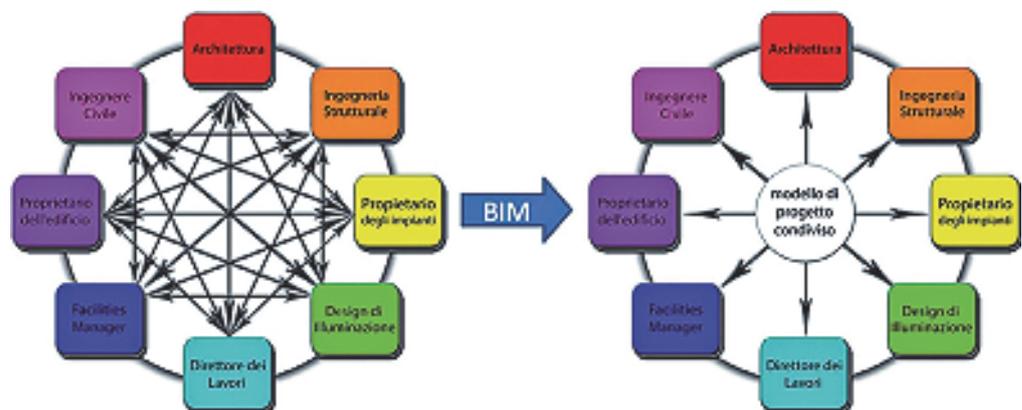
In questo senso, un modello tridimensionale della sola geometria di un edificio utilizzata per le simulazioni grafiche (rendering) non può essere considerato un modello BIM, il modello BIM deve contenere le diverse informazioni riguardanti l'edificio e/o le sue parti. Le informazioni raccolte nel modello BIM riguardano principalmente la localizzazione geografica, la geometria, le proprietà e caratteristiche tecniche/meccaniche dei materiali/componenti/sistemi ed elementi tecnici, le geometrie e caratteristiche tecniche dei sistemi impiantistici meccanici ed elettrici, le geometrie e caratteristiche tecniche dei sistemi di protezione al fuoco, la cronoprogrammazione dei lavori, fasi di esecuzione, cantiere e direzione lavori, le operazioni di manutenzione, gestione dei costi, tempi di costruzione e le operazioni di smaltimento a fine ciclo di vita del fabbricato.

La progettazione integrata degli edifici è generalmente svolta con le metodologie e procedure BIM in conformità con la direttiva europea 2014/24/EU ed il nuovo codice appalti D.Lgs 50/2016 coordinato con correttivo appalti (D.Lgs 56/2017) e aggiornato alla legge di Stabilità 2018 (legge 205/2017).

Il software BIM Authoring utilizzato nel presente articolo è Autodesk Revit, interfacciato con l'uso dei software di calcolo FEM Midas Gen e Straus7; tutti software accettati, validati e riconosciuti dall'ente BuildingSmart International che certifica l'interoperabilità dei software attraverso la norma ISO 16739:2013.

La progettazione, esportazione e condivisione dei file digitali di tipo BIM fra i vari software avviene tramite procedure e file di interscambio standard definiti dal BuildingSmart International ed EU BIM Task Group, in particolare nella definizione degli standard IFC (IFC2x3 Coordination View (Version 2.0) - IFC2x3 Structural Analysis View - IFC2x3 Basic FM HandOver View).

Figura 3
Interoperabilità BIM – Scambio di dati/info con il metodo tradizionale (a sinistra) e con il processo BIM (a destra), tramite il processo BIM è possibile interconnettere fra loro tutte le discipline senza errori e perdita di informazioni, in quanto vi è un unico modello digitale 3D condiviso contenente tutte le informazioni.



2. Il caso studio

Nel presente lavoro è riportata in dettaglio la *Procedura* denominata *CSF* (acronimo di *Cloud Solid FEM*) e la *Metodologia BIM* (sperimentate da Rosario Alessandro Longo durante la propria Tesi di Laurea presso il DICAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna) che hanno consentito l'importazione nel software FEM Midas NFX di una mesh geometrica ottenuta da un rilievo fotogrammetrico digitale effettuato con una camera amatoriale.

Midas NFX possiede al suo interno un meshatore 3D agli elementi finiti molto robusto che è stato in grado di creare il volume del modello numerico tridimensionale FEM in modo agevole ed in tempi rapidi, anche con geometrie molto irregolari.

La *Procedura CSF* è stata dapprima testata su un rilievo di un oggetto di piccole dimensioni (fontanella di un giardino pubblico), successivamente è stata validata andando a realizzare un modello FEM dell'Arco di Augusto di Rimini e confrontando i risultati ottenuti con quelli di altre procedure utilizzate per studiare la medesima struttura.

I risultati ottenuti nel presente lavoro sono stati inoltre confrontati con quelli ottenuti da Maurizio Serpieri (Serpieri, 2005, *Procedura FEM 2D*) e Marco Succi (Succi, 2017, *Procedura Cloud2Fem*) nell'ambito delle loro tesi di laurea: entrambi hanno studiato la medesima struttura ma con approcci differenti.

Serpieri M. (2005), dopo una dettagliata analisi storica del monumento con informazioni sulle origini e restauri che hanno interessato il manufatto, ha eseguito un rilievo fotogrammetrico digitale non convenzionale realizzato con fotocamera amatoriale, cordella metrica, filo a piombo, target adesivi ed il software Photomodeler Pro 5 per l'elaborazione e la restituzione dei dati rilevati, ottenendo in output dal processo di restituzione fotogrammetrica un file vettoriale 3D costituito da decine di migliaia di linee e punti rilevati con informazione metrica spaziale a precisione centimetrica.

Insieme al file vettoriale 3D e la sua rappresentazione in proiezione ortogonale e sezioni ha ottenuto anche le ortofoto dei quattro prospetti dell'arco.

Partendo da tale base di dati metrici ottenuti ha in seguito svolto delle analisi strutturali su modelli mono e bidimensionali semplificati della struttura ottenuti utilizzando il software FEM Straus7, attraverso il quale ha valutato il comportamento della struttura sia in campo statico lineare, a causa del proprio peso, che in campo dinamico modale.



Figura 4
 Restituzione Fotogrammetrica
 - Nuvola di punti sparsi della
 fontanella con individuazione
 punti di presa.

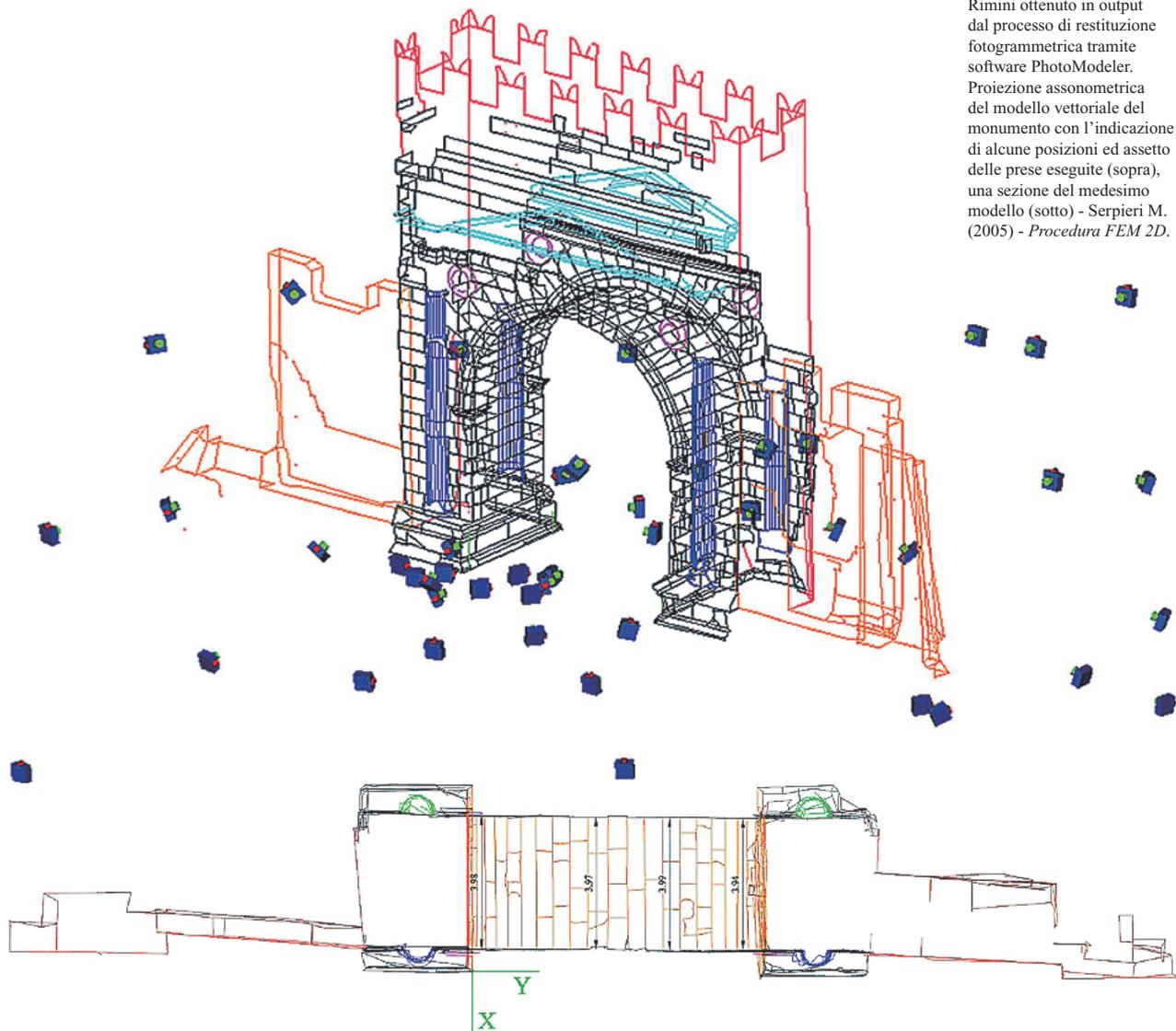


Figura 5
 Modello Vettoriale
 dell'Arco d'Augusto di
 Rimini ottenuto in output
 dal processo di restituzione
 fotogrammetrica tramite
 software PhotoModeler.
 Proiezione assonometrica
 del modello vettoriale del
 monumento con l'indicazione
 di alcune posizioni ed assetto
 delle prese eseguite (sopra),
 una sezione del medesimo
 modello (sotto) - Serpieni M.
 (2005) - *Procedura FEM 2D*.

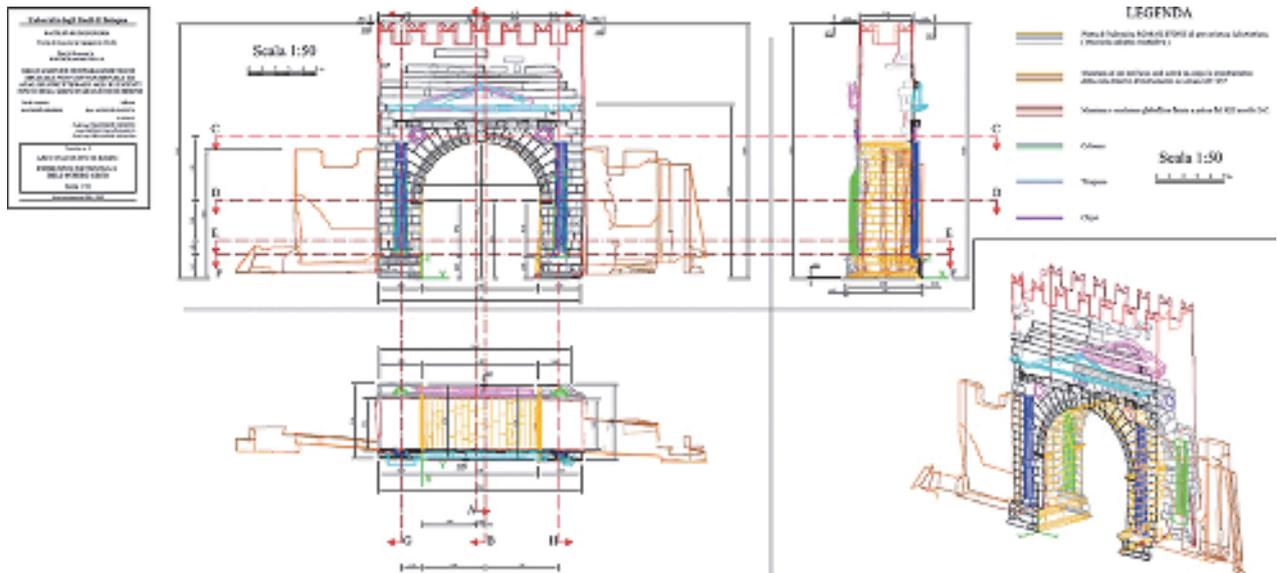


Figura 6 - Modello Vettoriale dell'Arco d'Augusto di Rimini ottenuto in output dal processo di restituzione fotogrammetrica. Proiezioni ortogonali ed assometriche del modello vettoriale del monumento. Software PhotoModeler - Serpieri M. (2005) - *Procedura FEM 2D*.

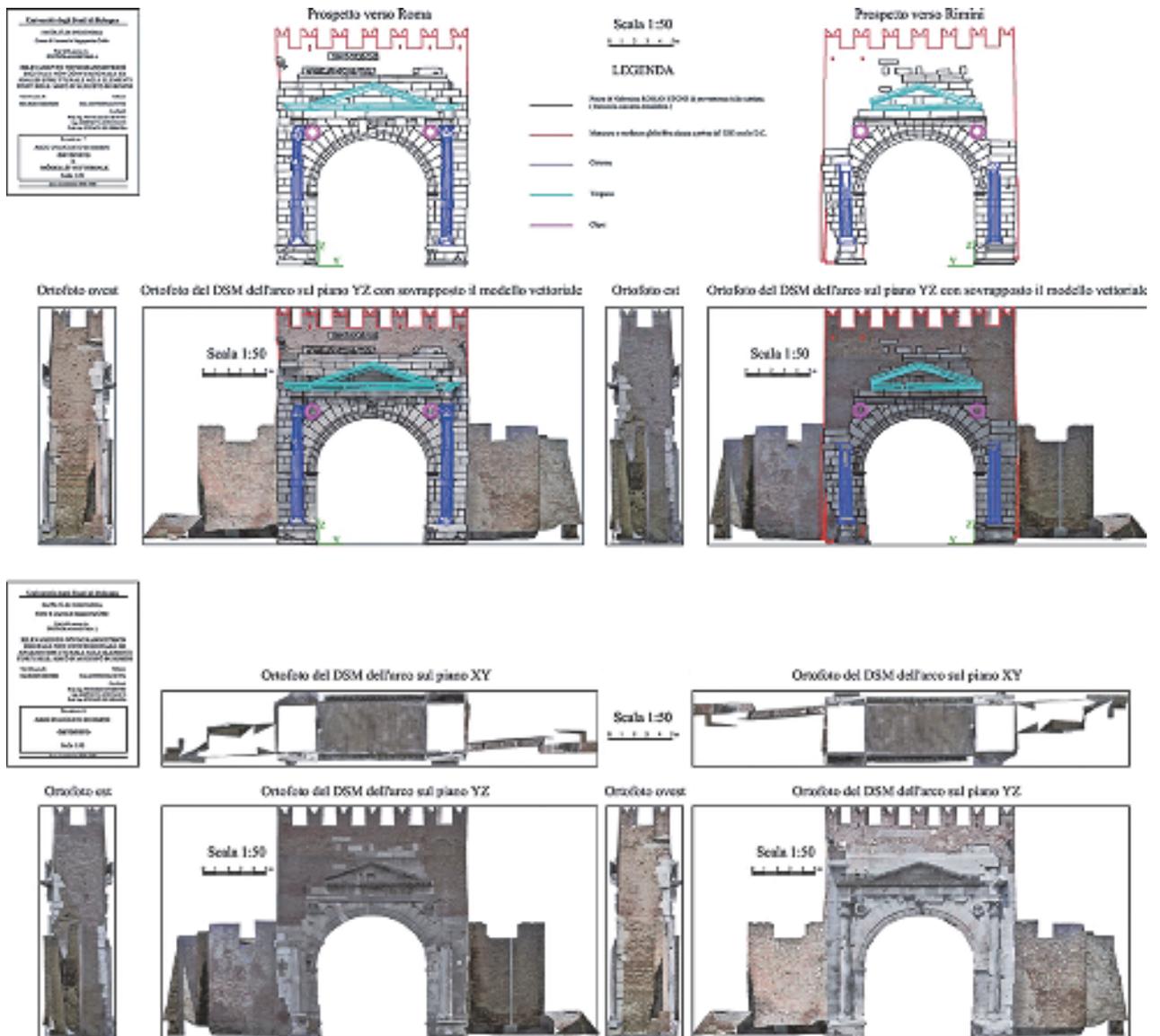


Figura 7 - Modello Vettoriale con sovrapposizione Ortofoto dell'Arco d'Augusto di Rimini ottenuto in output dal processo di restituzione fotogrammetrica. Proiezioni ortogonali del modello vettoriale e raster del monumento. Software PhotoModeler - Serpieri M. (2005) - *Procedura FEM 2D*.

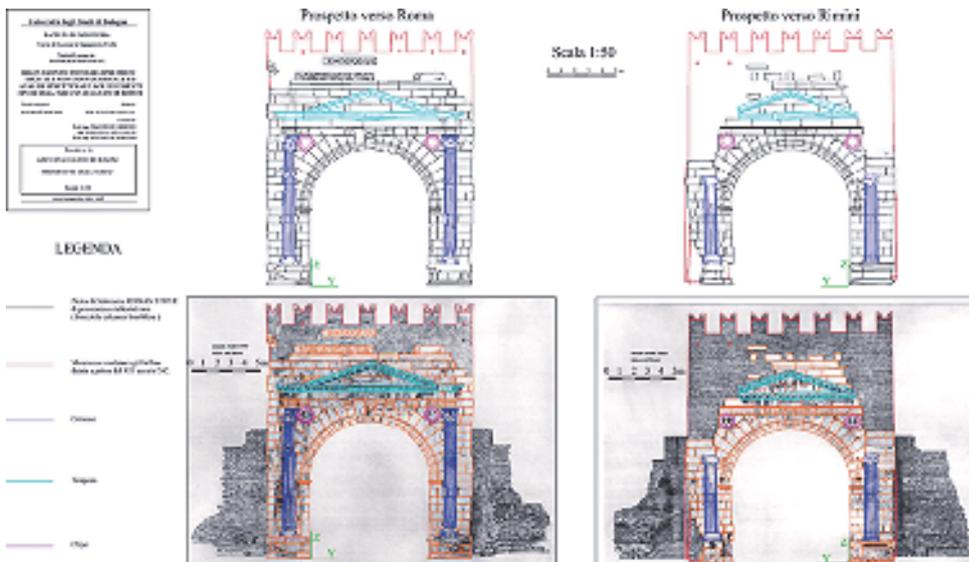


Figura 8
Modello Vettoriale, con sovrapposizione rilievo storico di Roberto Angelini del 1982, dell'Arco d'Augusto di Rimini ottenuto in output dal processo di restituzione fotogrammetrica. Software PhotoModeler - Serpieri M. (2005) - Procedura FEM 2D.

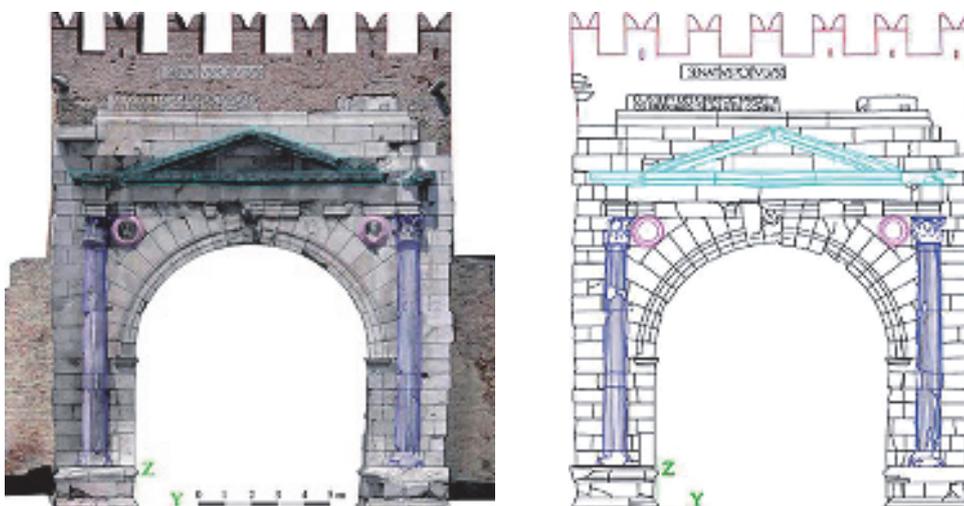


Figura 9
Prospetto frontale Vettoriale con sovrapposizione Ortofoto del fronte sud dell'Arco d'Augusto di Rimini ottenuto in output dal processo di restituzione fotogrammetrica (a sinistra), Prospetto Vettoriale (a destra) Software PhotoModeler - Serpieri M. (2005) - Procedura FEM 2D.



Figura 9
Vista Prospettica da un punto di ripresa con sovrapposizione Modello Vettoriale e posizione/assetto di vari punti di presa del fronte sud dell'Arco d'Augusto di Rimini ottenuto in output dal processo di restituzione fotogrammetrica (a sinistra), Vista Prospettica da un punto di ripresa del Modello Vettoriale con posizione/assetto di vari punti di presa (a destra). Software PhotoModeler - Serpieri M. (2005) - Procedura FEM 2D.

Diversamente Succi M. (2017) ha studiato il comportamento strutturale statico e dinamico dell'Arco di Augusto di Rimini partendo da una nuvola di punti 3D, creando il modello tridimensionale della struttura con la procedura ideata e realizzata dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna (DICAM), *Procedura* denominata *Cloud2Fem* (Bitelli, et al., 2016), (Castellazzi, D'Altri, Bittelli, Selvaggi, & Lambertini, 2015), (Castellazzi, et al., 2016), (Castellazzi, D'Altri, de Miranda, & Ubertini, 2017).

Figura 11

Vista Prospettica da un punto di ripresa con sovrapposizione Modello Vettoriale e posizione/tag dei punti omologhi rilevati del fronte sud dell'Arco d'Augusto di Rimini ottenuto in output dal processo di restituzione fotogrammetrica. Software PhotoModeler - Serpieri M. (2005) - *Procedura FEM 2D*.



Tale metodologia permette di generare un modello composto da pixel tridimensionali detti *voxel* grazie alla composizione di *slices* orizzontali e verticali.

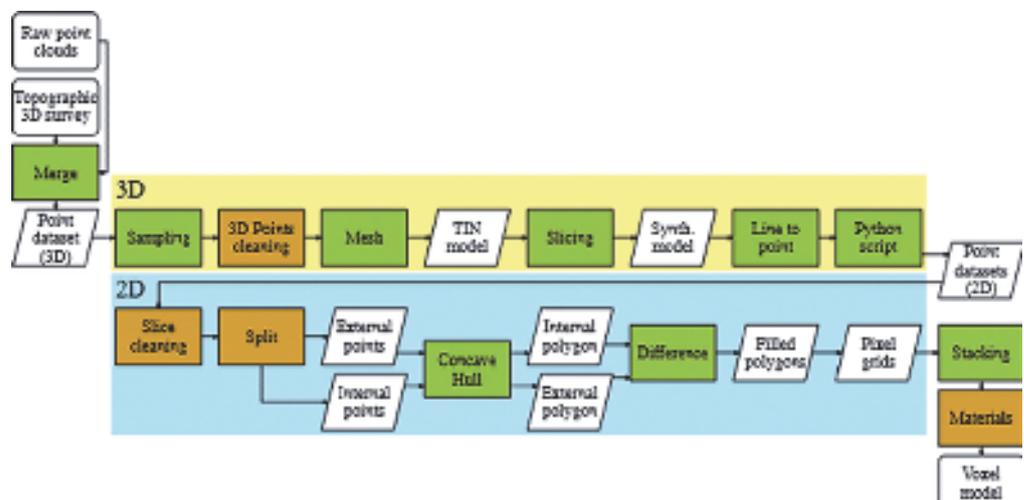
La fase di *slicing* consiste nel suddividere la nuvola di punti in sezioni piane consecutive Δz caratterizzate da una coordinata progressiva lungo la direzione z ; successivamente tutti i punti appartenenti all'intervallo Δz sono proiettati sul piano medio della sezione. È possibile operare indipendentemente su ogni slice usando software dedicati per la gestione di dati georeferenziati (ad esempio software GIS).

Le sezioni sono realizzate a passo regolare, al diminuire del quale aumenta il dettaglio della geometria ma anche l'onere computazionale. Il risultato è una successione di *layers* che contengono dati bidimensionali (x,y) e una costante z che sono impilati generando i *voxel*. Si ottiene quindi una geometria tridimensionale che è convertita automaticamente in un modello a elementi finiti con elementi esaedrici a otto nodi.

Nella Figura 12 si riporta diagramma di flusso della *procedura Cloud2Fem* mentre nella Figura 13 alcuni esempi di *slice* orizzontali ottenute con il software *Q-Gis* usate per la costruzione del modello FEM.

Figura 12

Flowchart della Procedura Cloud2FEM di Succi M. (2017) - Le caselle in verde indicano le procedure automatiche, quelle gialle le procedure semi-automatiche (Castellazzi, D'Altri, Bittelli, Selvaggi, & Lambertini, 2015).



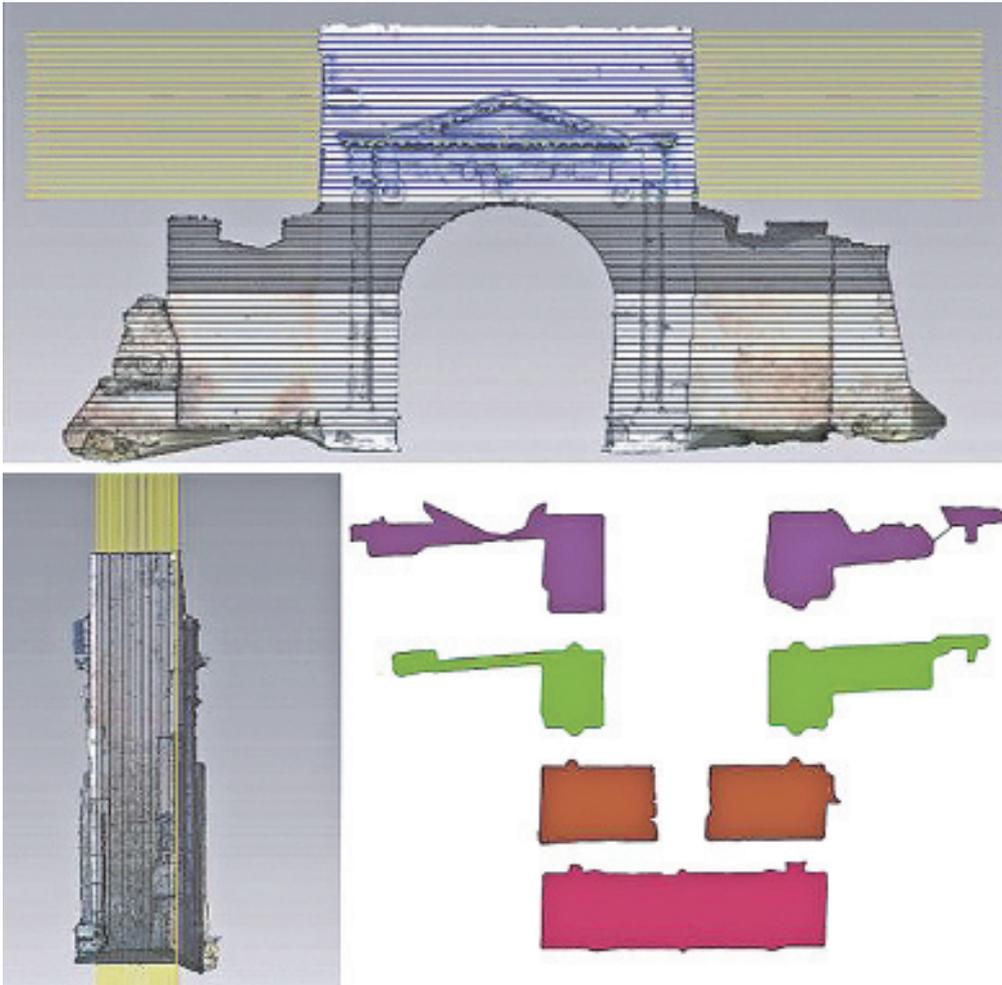


Figura 13
Costruzione del modello numerico-strutturale FEM mediante la Procedura Cloud2FEM di Succi M. (2017) - Esempi di slices orizzontali (in alto), verticali (in basso a sinistra) e alcune slices orizzontali ottenute con il software Q-Gis utilizzate per la costruzione del modello FEM.

Il primo passo per la realizzazione di un modello tridimensionale con la *Procedura CSF* e *Metodologia BIM* è stato quello di importare sul software di Image Matching Autodesk ReCap le immagini scattate da molteplici angolature, grazie al quale è stato possibile creare la nuvola di punti dalla quale si è ottenuta una mesh geometrica molto dettagliata e fitta della struttura (in alternativa è possibile utilizzare altri software simili, quali Agisoft PhotoScan o PhotoModeler Scanner).

All'interno di ReCap è stato possibile specificare ed identificare manualmente alcuni punti omologhi sui singoli fotogrammi per agevolare l'elaborazione su server remoto, permettendo a chiunque di sfruttare questa tecnologia, anche a chi non possiede un computer di ultima generazione in grado di assolvere l'elevata onerosità computazionale dell'immagine matching.

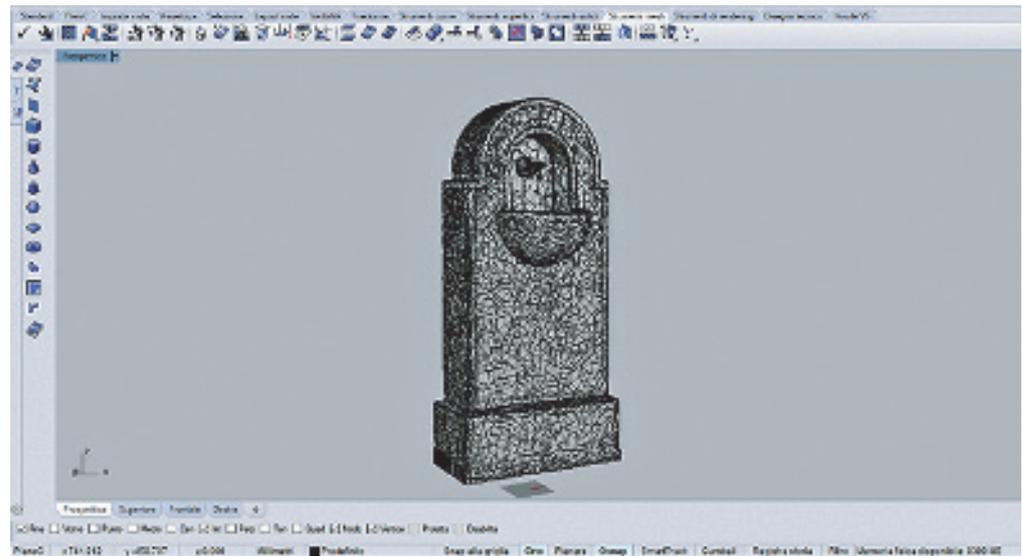
Al termine di questa prima fase di restituzione fotogrammetrica si riscontra che nelle zone di occlusione prospettica (ad esempio al di sotto della quota del terreno) la mesh geometrica risulta aperta, quindi non adatta per essere importata in un software FEM (Midas NFX) per la successiva fase di analisi strutturale dell'oggetto.

Mediante il software Autodesk ReMake si è proceduto alla chiusura di queste zone attraverso l'interpolazione fra punti vincolati, creando superfici di chiusura piane (o curvilinee se necessarie) con anche l'eliminazione di alcuni *outliers* generati dal software durante la fase di restituzione automatica.

Dal suddetto processo di restituzione fotogrammetrica si è ottenuta una mesh geometrica molto fitta e dettagliata dell'oggetto, che, come già anticipato, risulta troppo pesante per essere importata direttamente in un software FEM (Midas NFX), è stato pertanto necessario ridurla utilizzando gli strumenti mesh del software *Rhinoceros* di modellazione 3D, grazie al quale si è eseguita una riduzione del 98%, che, nonostante possa sembrare un drastico taglio ha comunque permesso di ottenere un grado di precisione e dettaglio molto elevato del rilievo, decisamente superiore a quello ottenibile con un rilievo tradizionale, consentendo di avere un vertice rilevato di coordinate x,y,z , note ogni 2-5 cm su tutta l'estensione dell'oggetto.

Il software *Rhinoceros* possiede dei tools con i quali è stato possibile verificare che la mesh geometrica risultante ottenuta dopo la riduzione fosse definibile chiusa, tale condizione di chiusura è fondamentale affinché nelle successive fasi si possa definire un volume solido del modello geometrico ottenuto, infatti il problema tipico che si verifica a seguito della decimazione della

Figura 14
Digital Surface Model,
riduzione della Mesh
geometrica del 98% mediante
software Rhinoceros.



mesh geometrica è l'autointersezione di alcune facce: l'algoritmo di riduzione, in base a determinati criteri, decide di eliminare un certo numero di punti della nuvola densa e successivamente rigenera la mesh geometrica, purtroppo durante questa delicata fase può capitare che una faccia della mesh geometrica ne attraversi un'altra (compenetrazione), questo impedisce a Midas NFX di creare una mesh FEM continua agli elementi finiti ostacolando le successive modellazioni numeriche. In questi casi è necessario cancellare manualmente le facce autointersecanti creando un "foro" nella mesh geometrica, che successivamente sarà possibile regolarizzare tramite funzioni di smoothing.

Giunti a questo punto è stato necessario convertire la mesh geometrica bidimensionale in una polisuperficie (NURBS) in modo da poterla salvare nel formato ACIS (.sat) che può essere agevolmente importata in Midas NFX con il comando dal menu "Geometry->Import".

Dopo aver importato correttamente in Midas NFX il modello geometrico ottenuto è stato necessario suddividerlo in più porzioni in base alla posizione occupata dai singoli materiali con diverse caratteristiche meccaniche-reologiche.

Per giungere a tale scopo sono stati definiti dei piani in prossimità dei cambi di materiale, sfruttando l'estrusione di linee precedentemente disegnate con il software Rhinoceros.

Il comando "Divide Solid" è risultato particolarmente utile in quanto ha la grande potenzialità, oltre di dividere gli elementi, di chiudere automaticamente la sezione ottenendo quindi due volumi chiusi distinti, nei quali sarà possibile costruire una mesh FEM di elementi finiti di tridimensionali.

Figura 15
Restituzione fotogrammetrica
a nuvola sparsa dell'arco
d'Augusto di Rimini (112635
punti) Software Agisoft
PhotoScan, Autodesk ReCap -
Procedura CSF





Figura 16
Restituzione fotogrammetrica a nuvola densa dell'arco d'Augusto di Rimini (49865009 punti) Software Agisoft PhotoScan, Autodesk ReCap - *Procedura CSF e BIM.*



Figura 17
Modello DSM (Digital Surface Model) a superficie Mesh dell'arco d'Augusto di Rimini (7141707 facce, 3575887 punti) - Software Agisoft PhotoScan, Autodesk ReCap - *Procedura CSF e BIM.*



Figura 18
Confronto fra nuvola densa di punti (a sinistra) e modello DSM a superficie mesh (a destra) Software Agisoft PhotoScan, Autodesk ReCap - *Procedura CSF e BIM.*

Figura 19

Suddivisione in vari materiali dell'arco d'Augusto di Rimini nell'ambiente Midas NFX in base al cambio di materiale - Procedura CSF e BIM.

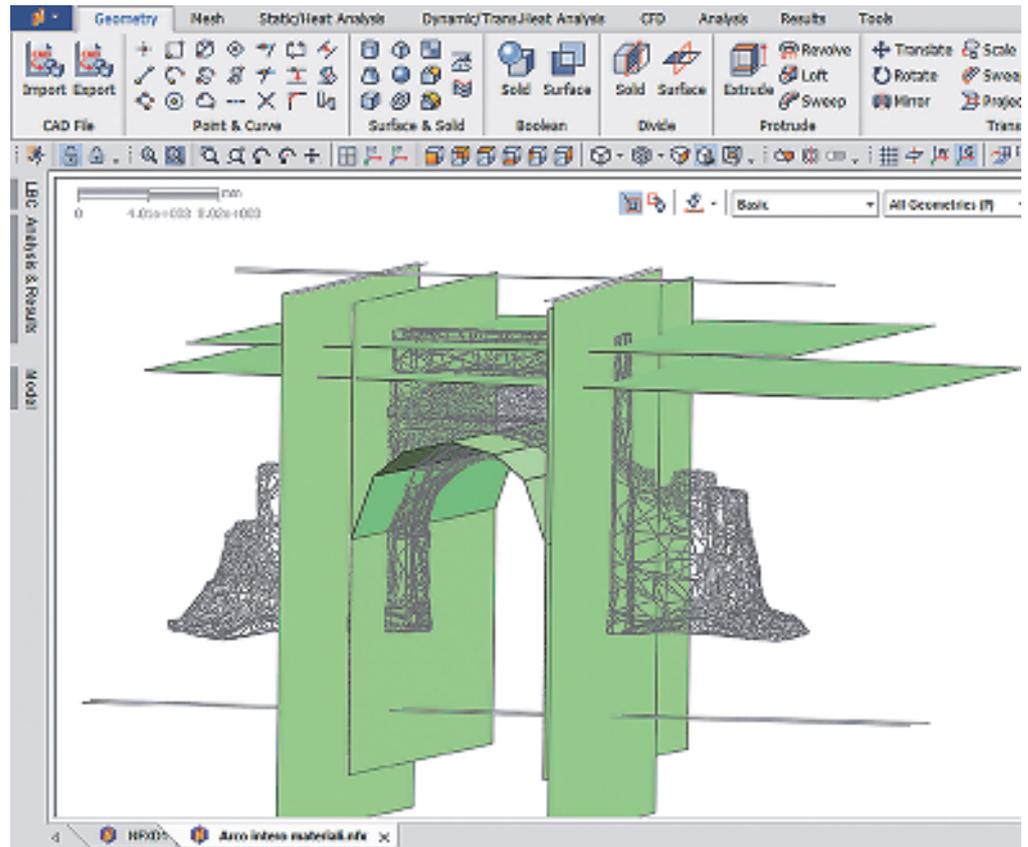
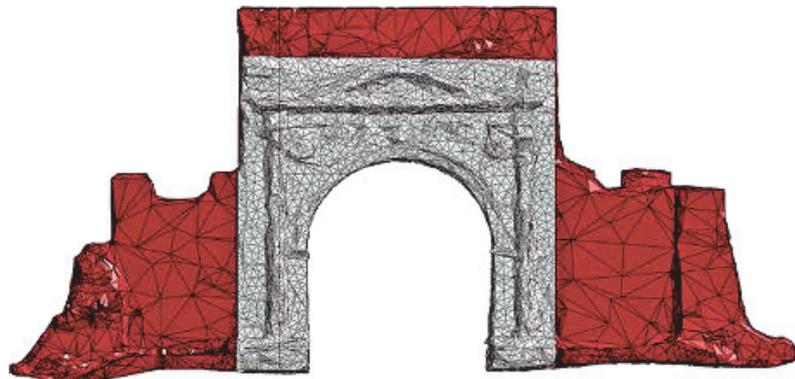


Figura 20

Suddivisione in vari materiali dell'arco d'Augusto di Rimini nell'ambiente Midas NFX del modello ottenuto con la *Procedura CSF* a seguito dalla restituzione fotogrammetrica svolta con software ReCap, rielaborato in ReMake e Rhinoceros - Modello con Mesh ridotta del 98% - (in bianco: pietra naturale squadrata di Nabresina, in rosso: muratura a sacco).



I piani di sezione così definiti hanno permesso la suddivisione della struttura in differenti zone, consentendo di attribuire ai vari volumi differenti caratteristiche reologiche dei materiali, allo stesso tempo però hanno anche separato zone dello stesso materiale che sono state quindi riunite con l'opzione "Fuse" del comando "Booleand Solid".

Sfortunatamente non si è potuta impiegare una superficie curvilinea per intersecare e tagliare il corpo centrale della struttura, si è quindi approssimata la porzione interna dell'arco (costituita da pietra naturale squadrata di Nabresina - Roman Stone) con una polilinea estrusa lungo lo spessore/profondità del monumento per generare il piano.

Per la definizione della geometria interna e caratteristiche meccaniche dei materiali presenti si è fatto riferimento a quanto riportato nella tesi *Rilevamento fotogrammetrico digitale non convenzionale ed analisi strutturale agli elementi finiti dell'arco d'Augusto di Rimini* di Maurizio Serpieri (2005), assumendo un innesto della pietra bianca di Nabresina all'interno dell'arco pari a 170 cm, considerando quindi la restante parte interna dell'arco costituita da muratura a sacco.

Definiti ed assegnati i materiali è stato possibile generare automaticamente la mesh FEM tridimensionale interna al modello numerico della struttura attraverso il comando "Auto-Solid" di Midas NFX.

Riducendo la dimensione degli elementi finiti che costituiscono il modello numerico FEM si incrementa il numero degli stessi, ciò permette di aumentare il grado di dettaglio della modellazione, ma di conseguenza anche il tempo di elaborazione. Generalmente è consigliabile non discostarsi dai valori di default suggeriti da Midas NFX, ciò per evitare di raggiungere il numero massimo di elementi gestibili dal software e pc, in funzione del tipo di licenza e capacità di calcolo.

In seguito sono state definite ed applicate le condizioni di vincolamento esterno ed interno della struttura, assegnando vincoli di incastro ai nodi/elementi sotto i piedritti e muratura laterale alla base dell'arco (definendo così i vincoli a terra), e vincoli interni di congruenza per connettere fra loro le diverse parti della struttura costituita da materiali differenti attraverso il comando "Auto Contact" di Midas NFX.

Per maggiore chiarezza si sintetizzano ora i passaggi significativi della "Procedura CSF" appena descritta, la quale consente l'importazione in un software FEM della mesh geometrica ottenuta tramite rilievo fotogrammetrico digitale (fotoscansione) ed a seguire la creazione del relativo modello numerico FEM ed analisi strutturale.

Tale procedura si sviluppa nei seguenti step:

1) Input

- Foto;
- Rilievo Topografico;
- Vincoli metrici (misure vincolate, verticalità, georeferenziazione);
- Laserscan (TLS).

2) Modello Geometrico 3D

- Nuvola Punti 3D: creazione con software Image Matching (Autodesk ReCap, Agisoft PhotoScan, PhotoModeler);
- Meshatura Geometrica: creazione DSM (Digital Surface Model) a superfici Mesh e/o Nurbs con software di interpolazione (ReCap, Rhinoceros, Agisoft PhotoScan, PhotoModeler, Rapidform, MeshLab).

3) Mesh Editing

- Verifica, correzione/aggiustamento mesh geometrica (Autodesk ReCap/ReMake, Rhinoceros);
- Chiusura fori (ReCap/ReMake, Rhinoceros);
- Pulizia outliers, editing, fixing, fitting e smoothing mesh (ReCap/ReMake, Rhinoceros);
- Riduzione (defitting) mesh geometrica (Rhinoceros);
- Export nel formato ACIS (.sat) o IGES, STL, OBJ, PLY, STEP.

4) Modello Numerico FEM

- Import modello geometrico 3D da formato ACIS (.sat) o IGES, STL, OBJ, PLY, STEP;
- Meshatura Strutturale FEM: creazione volumi chiusi ad elementi finiti solidi (brick) con software FEM (Midas, SAP2000, Straus7);
- Assegnazione Materiali, Carichi/Azioni, Vincoli interni/esterni, taglio ed unione oggetti con medesime proprietà (Midas, SAP2000, Straus7).

5) Analisi Strutturale FEM

- Analisi Modale (Midas, SAP2000, Straus7);
- Analisi e Verifica dello stato deformativo/tensionale per carichi statici e sismici (Midas, SAP2000, Straus7);
- Valutazione Vulnerabilità Sismica (Midas, SAP2000, Straus7);
- Studio Quadro Fessurativo (Midas, SAP2000, Straus7);
- Altre analisi non-lineari (Midas, SAP2000, Straus7).

Qui di seguito si riporta una sintesi grafica mediante schemi a diagrammi di flusso della *Procedura CSF* utilizzata.

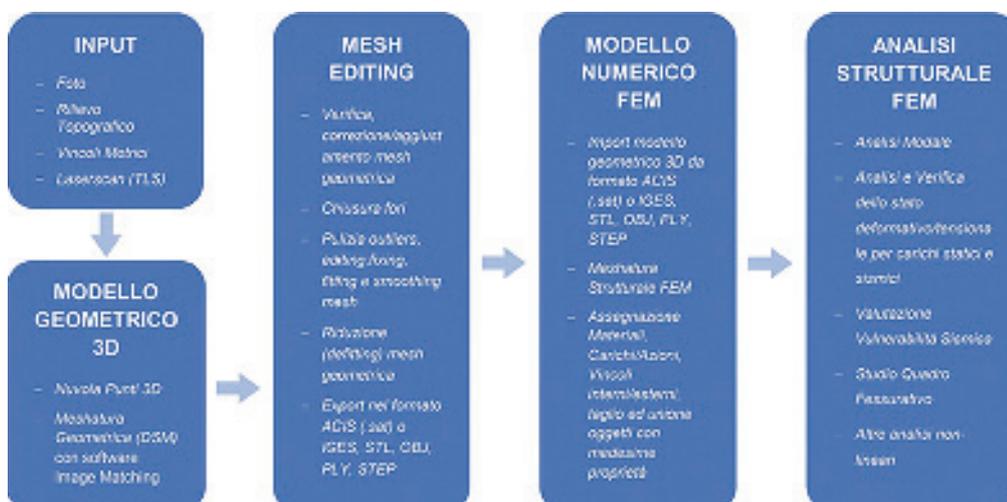


Figura 21
Flusso di lavoro per la
Procedura CSF

Parallelamente alla *Procedura CSF* è stata sviluppata anche un'altra metodologia, denominata **Metodologia BIM**, che permette di ottenere un modello geometrico tridimensionale dell'oggetto (partendo dalla medesima nuvola di punti 3D iniziale) tramite l'uso di un software di BIM Authoring, ed a seguire la creazione del relativo modello numerico FEM ed analisi strutturale. Tale metodologia si sviluppa nei seguenti step:

1) Input

- Foto;
- Rilievo Topografico;
- Vincoli metrici (misure vincolate, verticalità, georeferenziazione);
- Laserscan (TLS).

2) Modello Geometrico BIM

- Nuvola Punti 3D: creazione con software Image Matching (Autodesk ReCap, Agisoft PhotoScan, PhotoModeler);
- Modello BIM: costruzione con oggetti disponibili nella libreria del software di BIM Authoring (Autodesk Revit, Allplan, Tekla), sfruttando i punti della nuvola rilevata come caposaldi, ricalcando l'andamento della stessa e semplificando notevolmente le irregolarità geometriche realmente presenti;
- Export nel formato ACIS (.sat) o IGES, STL, OBJ, PLY, STEP.

3) Modello Numerico FEM

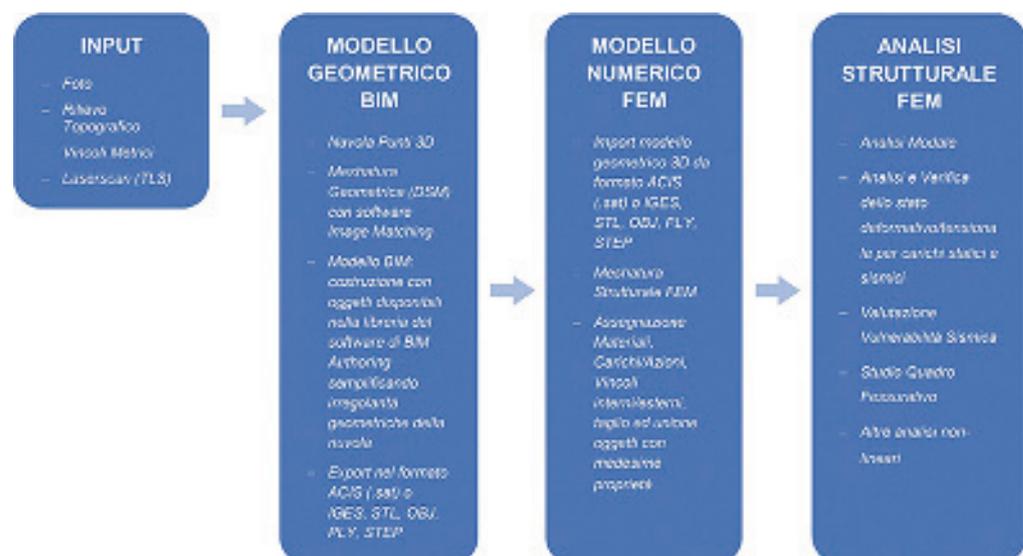
- Import modello geometrico 3D da formato ACIS (.sat) o IGES, STL, OBJ, PLY, STEP;
- Meshatura Strutturale FEM: creazione volumi chiusi ad elementi finiti solidi (brick) con software FEM (Midas, SAP2000, Straus7);
- Assegnazione Materiali, Carichi/Azioni, Vincoli interni/esterni, taglio ed unione oggetti con medesime proprietà (Midas, SAP2000, Straus7).

4) Analisi Strutturale FEM

- Analisi Modale (Midas, SAP2000, Straus7);
- Analisi e Verifica dello stato deformativo/tensionale per carichi statici e sismici (Midas, SAP2000, Straus7);
- Valutazione Vulnerabilità Sismica (Midas, SAP2000, Straus7);
- Studio Quadro Fessurativo (Midas, SAP2000, Straus7);
- Altre analisi non-lineari (Midas, SAP2000, Straus7).

Qui di seguito si riporta una sintesi grafica mediante schemi a diagrammi di flusso della *Metodologia BIM* utilizzata.

Figura 22
Flusso di lavoro per la
Metodologia BIM.



Se da un lato con la *Metodologia BIM* si apporta un certo grado di approssimazione al modello geometrico, dall'altro si sono potuti comparare i risultati delle analisi FEM ed i costi/benefici da essa ricavati con la *Metodologia CSF*; ottenendo una buona rispondenza e congruenza dei risultati numerici evidenziati in output dai due differenti approcci.

Qui di seguito si riporta il modello numerico strutturale FEM ottenuto con i diversi approcci e metodologie, i differenti colori

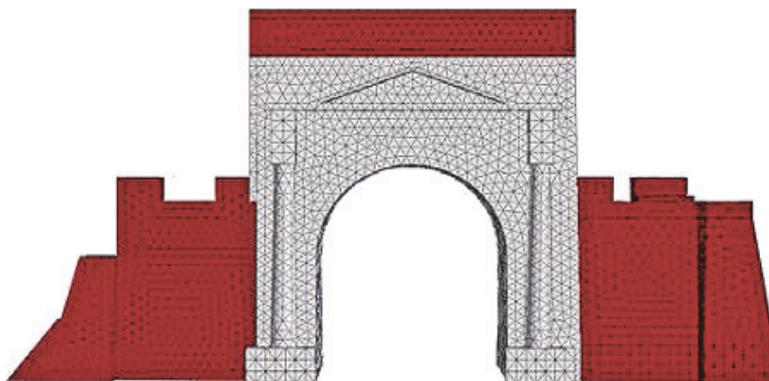


Figura 23
Suddivisione in vari materiali dell'arco d'Augusto di Rimini nell'ambiente Midas NFX per il modello ottenuto con la Metodologia BIM mediante il software Revit - (in bianco: pietra naturale squadrata di Nabresina, in rosso: muratura a sacco).

rappresentano i diversi materiali: al rosso corrisponde la muratura a sacco, al bianco la pietra naturale squadrata di Nabresina (Roman Stone)

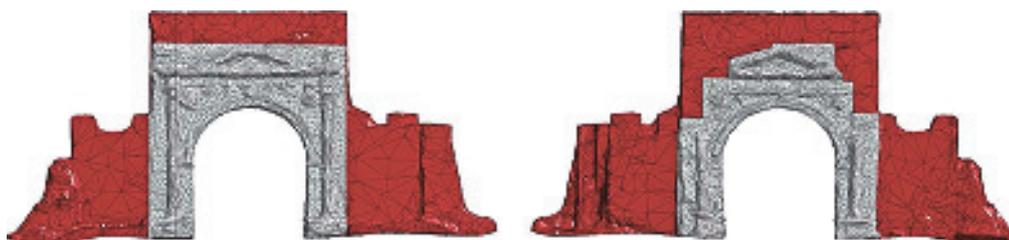


Figura 24
Modello numerico-strutturale dell'Arco d'Augusto in ambiente Midas NFX ottenuto con la Procedura CSF - (in bianco: pietra naturale squadrata di Nabresina, in rosso: muratura a sacco).

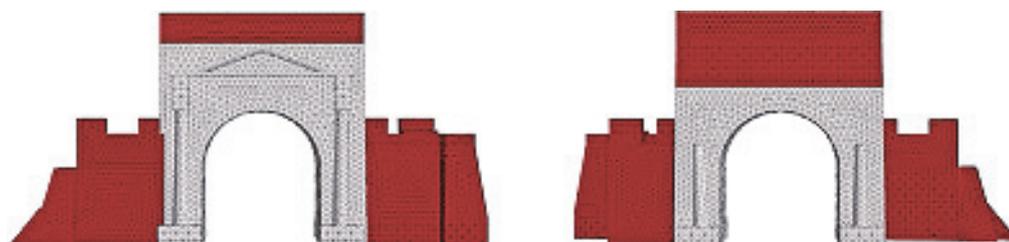


Figura 25
Modello numerico-strutturale dell'Arco d'Augusto in ambiente Midas NFX ottenuto con la Metodologia BIM e software Revit - (in bianco: pietra naturale squadrata di Nabresina, in rosso: muratura a sacco).

3. Confronto dei risultati ottenuti

Ottenuto il modello geometrico-strutturale 3D ed assegnate le caratteristiche dei materiali ai vari elementi è stato necessario definire la tipologia di vincolamento esterno della struttura, si è quindi assegnato il vincolo d'incastro su tutti i nodi di base dell'arco e muratura adiacente.

Sul modello numerico FEM dell'Arco d'Augusto così ottenuto tramite la Procedura CSF e Metodologia BIM sono state svolte due differenti tipologie di analisi strutturali (analisi modale, analisi statica lineare a seguito del peso proprio) mirate ad analizzarne lo stato tensionale/deformativo, da confrontarsi poi con quello ottenuto mediante altri procedimenti di analisi già indagati in precedenti lavori (Procedura Cloud2Fem, Procedura FEM 2D).

Dal confronto dei risultati ottenuti nel presente lavoro (modellazione FEM tridimensionale ad elementi brick da nuvola di punti rilevati con fotoscansione) con quelli ricavati mediante differenti semplificate tipologie di modellazione bidimensionale ad elementi plate/shell e monodimensionale ad elementi beam dell'arco si è riscontrata un'elevata congruenza in termini di comportamento strutturale globale e valore dei risultati.

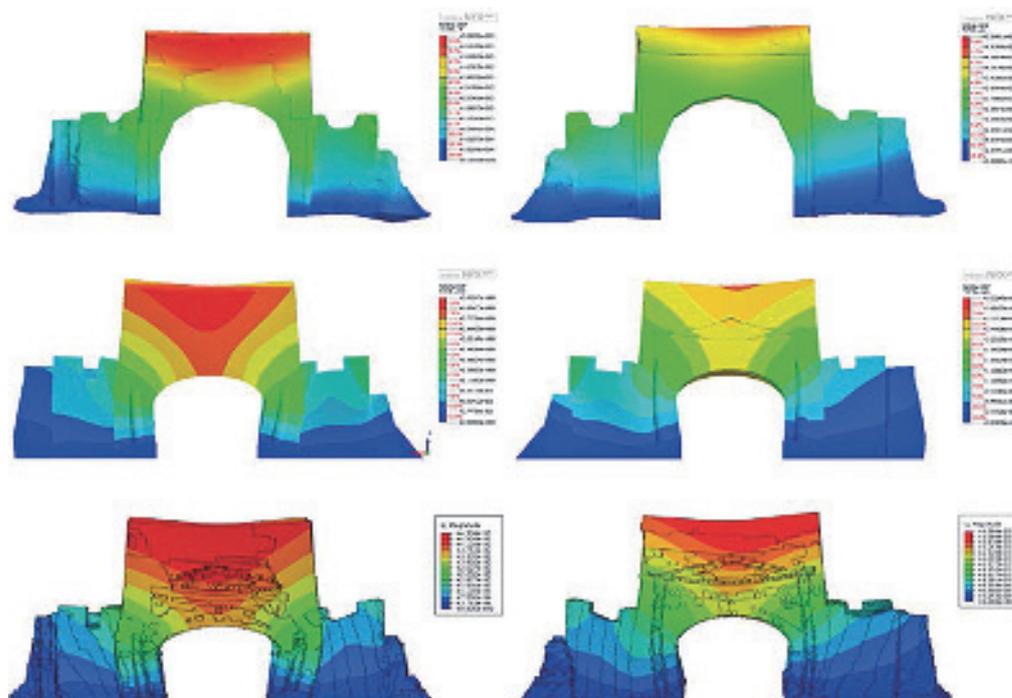
Le differenze ed approssimazioni geometriche, generate dalle differenti tipologie di modellazione numerica adottate, producono diversa massa sismica agente, posizione del baricentro di massa e rigidezza che influenzano l'analisi strutturale;

tuttavia si ritiene che i risultati numerici ottenuti dalla presente modellazione tridimensionale ad elementi brick da nuvola di punti possano rappresentare al meglio la reale geometria della struttura, e di conseguenza la sua massa sismica e baricentro, ottenendo quindi risultati più attendibili.

Lo stato tensionale/deformativo ottenuto dai due modelli *CSF* e *BIM* (oltre ad essere molto simili fra loro) è molto simile a quello del modello *Cloud2FEM* ottenuto da Succi; difatti è possibile constatare un abbassamento della chiave di volta di circa 3.9 mm (ottenuti con la *Procedura CSF*) e di circa 3 mm (ottenuti con la *Metodologia BIM*) a fronte dei 3.7 mm ottenuti da Succi con la *Procedura Cloud2FEM*.

A maggior dettaglio e spiegazione di quanto appena constatato si mettono a confronto in Figura 26 le mappe di deformazione per le *Procedure CSF* (in alto), *BIM* (al centro) e *Cloud2FEM* (in basso).

Figura 26
Stato deformativo a causa del peso proprio dell'Arco d'Augusto di Rimini - Confronto tra gli spostamenti ottenuti attraverso la *Procedura CSF* di Longo A. (2017) (in alto), *Metodologia BIM* di Longo A. (2017) (al centro) e *Cloud2FEM* di Succi M. (2017) (in basso).



Altro risultato ottenuto a riscontro della validità dei modelli numerici-strutturali realizzati con le procedure presentate si evince dal confronto con il modello *FEM 2D* realizzato in ambiente Straus7 da Serpieri M. (2005) nella sua tesi.

Nell'approccio semplificato utilizzato da Serpieri M. (2005) - *Procedura FEM 2D* è stato studiato solamente il corpo centrale del monumento utilizzando elementi strutturali *FEM Plate 2D*, separando l'arco interno (costituito dalla Pietra di Nabresina - Roman Stone) dal resto della struttura (costituita da muratura a sacco), considerando quindi la muratura esterna ed il riempimento come un unico oggetto di materiale omogeneo (si veda Figura 27).

Nonostante le notevoli differenze geometriche tra modelli numerici-strutturali *FEM 2D* di Serpieri M. (2005) e quelli tridimensionali ottenuti mediante le descritte *Procedure CSF* e *Metodologia BIM* di Longo A. (2017) e *Procedura Cloud2Fem* di Succi M. (2017) i risultati ottenuti sono fra loro decisamente compatibili. Difatti lo spostamento totale del concio centrale dell'arco (chiave di volta) per il modello *FEM 2D* di Serpieri M. è compreso tra i 2.7 e i 2.8 mm (si veda Figura 27); a fronte dei suddetti 3.9 e 3 mm per i due (*CSF* e *BIM*) diversi modelli 3D di Longo A. (si veda Figura 26), e 3.7 mm per il modello 3D *Cloud2Fem* di Succi M. (si veda Figura 26 e Tabella 1)

Tabella 1 - Confronto degli spostamenti verticali in chiave di volta ottenuti con i vari metodi in condizione statica

Spont.	Procedura CSF (Longo A., 2017)	Metodologia BIM (Longo A., 2017)	Procedura Cloud2FEM (Succi M., 2017)	Procedura FEM 2D (Serpieri M., 2005)
Δz (mm)	3.9	3.0	3.7	2.7



Figura 27
Modello numerico-strutturale bidimensionale in ambiente *Straus7* dell'Arco d'Augusto di Rimini ottenuto con la *Procedura FEM 2D* di Serpieri M. (2005) (a sinistra), Stato deformativo a causa del peso proprio dell'arco (a destra).

In seguito (per validare ulteriormente i modelli numerici di calcolo ottenuti) è stata eseguita un'analisi modale comparativa fra i vari metodi, anche in tal caso si nota che le minori differenze si riscontrano (come ci si aspetta) tra le procedure che sfruttano la nuvola di punti 3D per generare il modello geometrico-strutturale di partenza.

Osservando i risultati ottenuti dall'analisi modale dei vari modelli si riscontra una buona corrispondenza sul primo modo di vibrare (in termini di deformata modale e periodo) fra tutti i modelli numerico-strutturali FEM ottenuti con le varie procedure, tale considerazione è sempre meno veritiera man mano che si confrontano le forme e periodi modali superiori.

Per le procedure che conducono a modelli numerico-strutturali FEM tridimensionali (*CSF*, *BIM* e *Cloud2FEM*) le differenze fra i risultati ottenuti per i modi superiori sono comunque ridotte, diversa è invece la situazione per il caso in cui si adottano semplificazioni con modelli geometrici bidimensionali (Serpieri M., 2005), senza considerare la presenza della muratura a sacco disposta sui fianchi dell'arco che funge da contrafforte.

In questi casi le differenze sono di maggior rilievo, dovute principalmente all'assenza nel modello numerico FEM bidimensionale realizzato da Serpieri M. (2005) della muratura a sacco disposta ai lati del monumento, che comporta una minore massa agente e soprattutto minore rigidità della struttura lungo la direzione longitudinale x.

Tale carenza di rigidità lungo x influisce debolmente sul primo modo di vibrare, in quanto esso è di tipo flessionale/traslazionale lungo la direzione trasversale y, in cui la muratura a sacco delle pareti di contrafforte non riportate nella modellazione bidimensionale hanno minore influenza.

Risulta quindi naturale che al crescere del grado della forma modale le differenze fra i modelli e procedure siano sempre più evidenti, difatti i modi superiori prendono in considerazione meccanismi e fenomeni locali che sono differenti per i vari modelli strutturali FEM e procedure utilizzate. Ciò avviene perché ogni modello ottenuto ha il suo grado di raffinatezza (semplificazione) geometrica, per cui è possibile che in un caso si noti la vibrazione superiore di un elemento di dettaglio, mentre nell'altro modello semplificato tale dettaglio potrebbe essere del tutto inesistente, in quanto eliminato per semplificazione geometrica. In Figura 28 e Figura 29 sono riportati gli spostamenti del primo e del quarto modo di vibrare per il modello ottenuto con la *Procedura CSF* (a sinistra) e *Metodologia BIM* (a destra), a seguire la relativa Tabella 2 riassuntiva dei periodi modali (il secondo modo è stato trascurato in quanto meccanismo locale).

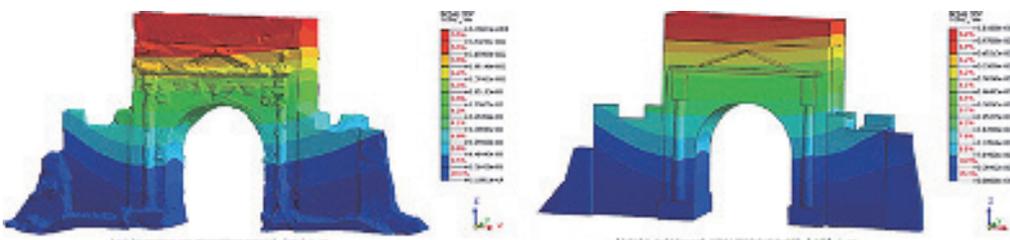


Figura 28
Deformata associata al primo modo di vibrare (dir y) - Confronto tra gli spostamenti ottenuti con la *Procedura CSF* di Longo A. (2017) (sinistra) e *Metodologia BIM* di Longo A. (2017) (destra).

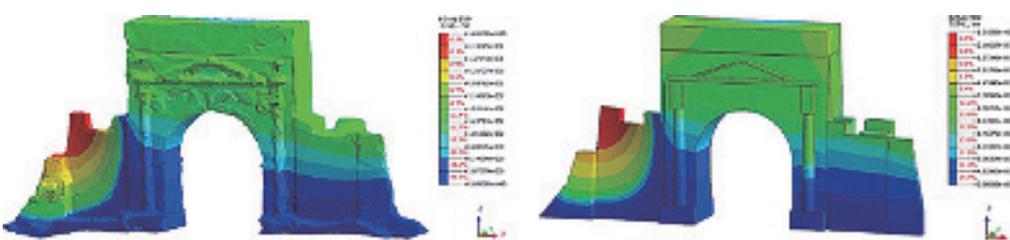


Figura 29
Deformata associata al quarto modo di vibrare - Confronto tra gli spostamenti ottenuti con la *Procedura CSF* di Longo A. (2017) (sinistra) e *Metodologia BIM* di Longo A. (2017) (destra).

Tabella 2 - Confronto dei modi di vibrare ottenuti con i vari metodi

Modo	Procedura CSF (Longo A., 2017)	Metodologia BIM (Longo A., 2017)	Procedura Cloud2FEM (Succi M., 2017)	Procedura FEM 2D (Serpieri M., 2005)
1	1.86 H ζ	2.00 H ζ	1.90 H ζ	2.74 H ζ
3	5.09 H ζ	5.10 H ζ	5.18 H ζ	8.19 H ζ
4	5.25 H ζ	5.31 H ζ	5.28 H ζ	8.82 H ζ
5	8.89 H ζ	6.57 H ζ	9.08 H ζ	10.20 H ζ

Giunti a tali buoni risultati e considerazioni sull'analisi modale il passo successivo è stato confrontare l'andamento dello stato tensionale causato dal peso proprio dell'arco fra modelli strutturali ottenuti con le *Procedure CSF* e *BIM* con quello ottenuto dal modello *FEM* di Serpieri M. (2005).

Come già illustrato in precedenza il modello strutturale *FEM* ottenuto da Serpieri è bidimensionale, si è quindi ritenuto opportuno sezionare lungo l'asse trasversale medio i modelli tridimensionali ottenuti con le procedure *CSF* e *BIM* per avere risultati confrontabili.

Come elemento di confronto, ritenuto fondamentale per la stabilità e sicurezza dell'arco, si è presa in considerazione la zona inerente alla chiave di volta dell'arco, dove è stato possibile osservare che nel modello *FEM 2D* ottenuto da Serpieri M. (2005) vi è una tensione orizzontale $\sigma_{xx,FEM\ 2D} = 3.13\text{ kg/cm}^2$, a fronte dei $\sigma_{xx,CSF} = 2.02\text{ kg/cm}^2$ del modello ottenuto con la *Procedura CSF* e $\sigma_{xx,BIM} = 1.85\text{ kg/cm}^2$ del modello ottenuto con la *Metodologia BIM*.

Per quanto riguarda l'andamento delle tensioni orizzontali e verticali sull'intera struttura (comandate principalmente dalla differenza di elasticità fra i due materiali, dal rispettivo coefficiente di poisson e dal peso proprio) si è osservata una certa variabilità dei valori fra le varie modellazioni e procedure, anche se nella maggior parte di essi sono dell'ordine di 0.1-1.0 kg/cm², pertanto anche in questo caso di confronto tensionale si trova un riscontro positivo fra i vari modelli.

In Figura 30, Figura 31, Figura 35 sono riportati gli andamenti delle tensioni orizzontali e verticali per i modelli *FEM 2D* di Serpieri e *CSF* e *BIM* di Longo.

Figura 30
Tensioni orizzontali (a sinistra) e verticali (a destra) per il modello numerico ottenuto con la *Procedura FEM 2D* di Serpieri M. (2005).

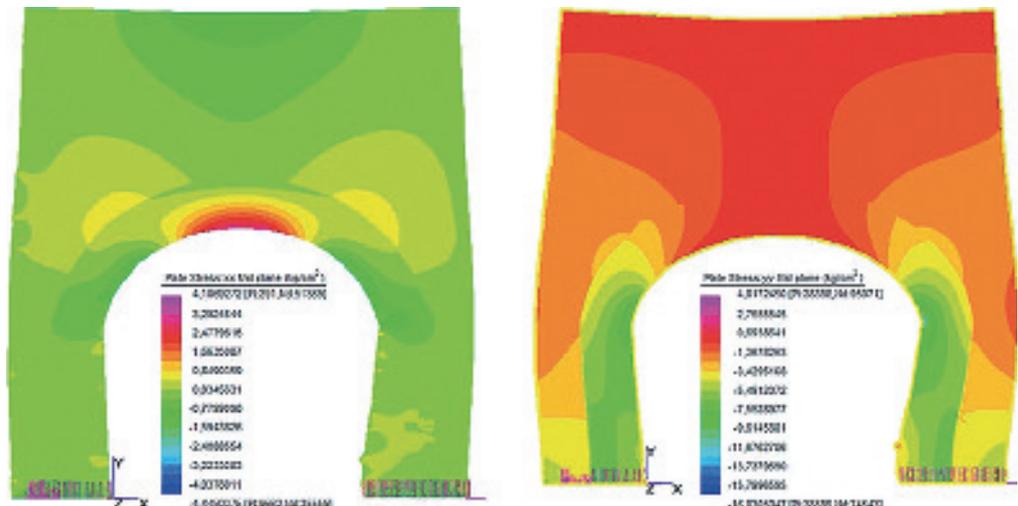
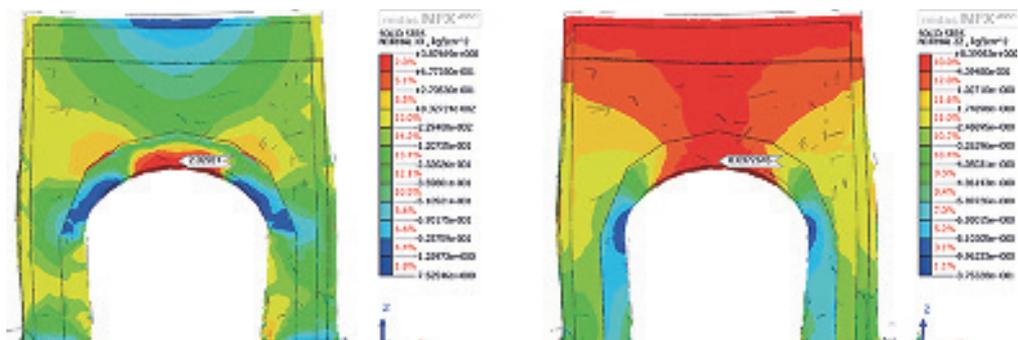


Figura 31
Tensioni orizzontali (a sinistra) e verticali (a destra) per il modello numerico FEM ottenuto con la *Procedura CSF* di Longo A. (2017).



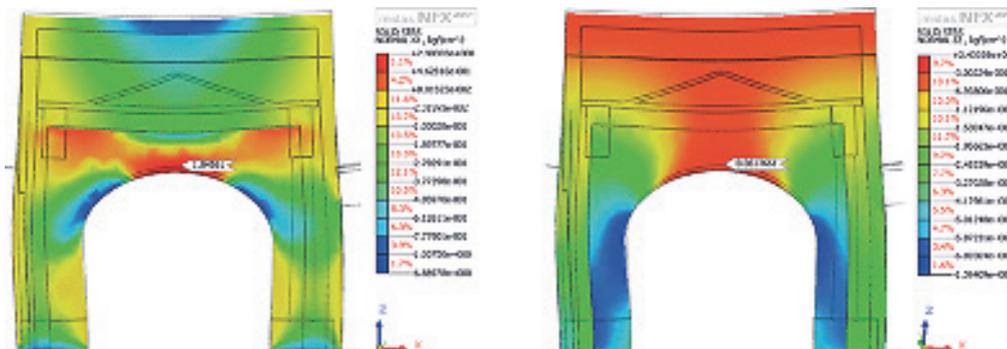


Figura 32
Tensioni orizzontali (a sinistra) e verticali (a destra) per il modello numerico FEM ottenuto con la Metodologia BIM di Longo A. (2017).

4. Conclusioni

Nel presente lavoro si è mostrata l'efficacia di una procedura in grado di importare in ambiente FEM un modello geometrico tridimensionale realizzato a partire da una nuvola di punti generata da un rilievo fotogrammetrico (*Procedura CSF*), tale metodologia è stata confrontata con una seconda procedura (*Metodologia BIM*) che permette di realizzare un modello tridimensionale realizzato direttamente in ambiente BIM partendo dalla medesima nuvola di punti rilevata inizialmente.

Le procedure sono state validate confrontando i risultati ottenuti (in termini di accuratezza del rilievo ed analisi strutturale) con quelli presenti in letteratura sulla medesima struttura, in particolare si è fatto riferimento ai lavori di tesi svolti da Marco Succi (Succi, 2017, *Procedura Cloud2Fem*) e Maurizio Serpieri (Serpieri, 2005, *Procedura FEM 2D*).

Sui modelli numerici FEM dell'Arco d'Augusto così ottenuti sono state svolte due differenti tipologie di analisi strutturali (analisi modale ed analisi statica lineare a seguito del peso proprio) mirate ad analizzarne lo stato tensionale/deformativo.

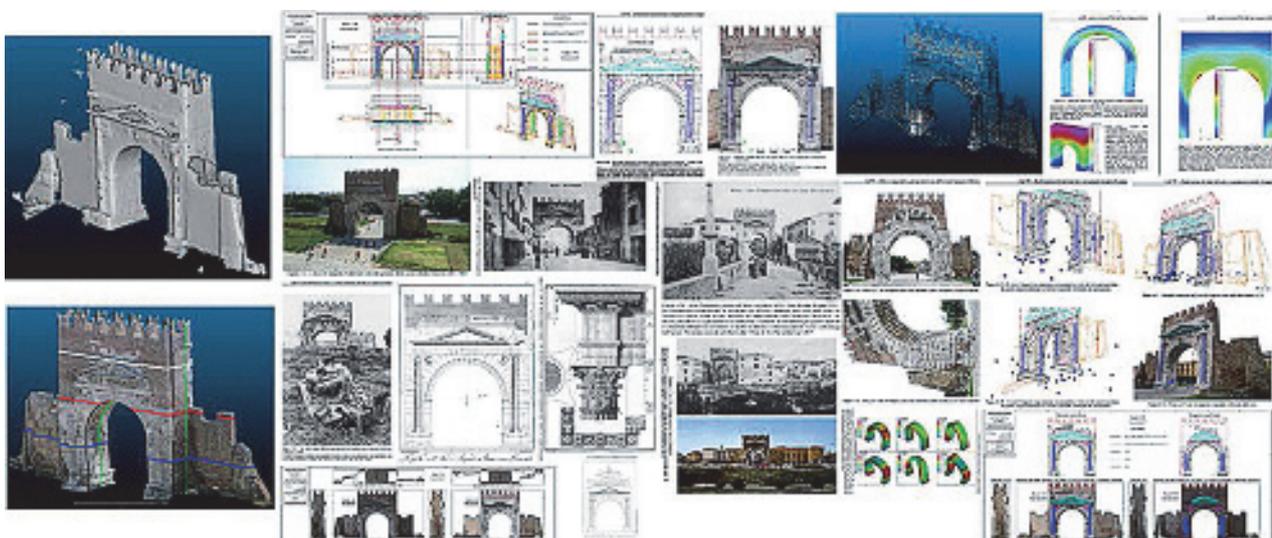
Dal confronto dei risultati ottenuti nel presente lavoro (modellazione FEM tridimensionale ad elementi brick da nuvola di punti ottenuta con fotoscansione, *Metodologia CSF*, *Procedura BIM*) con quelli ricavati mediante differenti semplificate tipologie di modellazione bidimensionale ad elementi plate/shell e monodimensionale ad elementi beam dell'arco (Serpieri, 2005, *Procedura FEM 2D*) si è riscontrata un'elevata congruenza in termini di comportamento strutturale globale e valore dei risultati; in particolare si riscontra una differenza di 0.2 mm di spostamento per le analisi statiche lineari a seguito del peso proprio fra i *Modelli CSF* (Longo, 2017), *BIM* (Longo, 2017) e *Cloud2Fem* (Succi, 2017).

Anche nelle analisi modali si sono raggiunti ottimi risultati, difatti le differenze percentuali delle frequenze naturali tra il *Metodo CSF* (Longo, 2017) e *Cloud2Fem* (Succi, 2017) sono comprese tra lo 0.5% e il 5.0%, circa lo stesso avviene fra il *Metodo CSF* e *Procedura BIM*.

Infine si è svolto un confronto tra le tensioni normali dei *Modelli CSF* e *BIM* (differenze quasi nulle fra i due modelli) con quelle ottenute dal *Modello FEM 2D* (Serpieri, 2005).

In entrambi i casi si nota una differenza delle σ_{xx} orizzontali di circa 1.00-1.50 kg/cm², e σ_{zz} verticali quasi nulle.

Si può quindi concludere che le procedure adottate sono efficaci e presentano il grande vantaggio di ottenere modelli più accurati rispetto alle metodologie tradizionali, difatti utilizzano un numero di informazioni geometriche estremamente



maggiore e trovano applicabilità sia nel rilievo di strutture semplici (consentendo un notevole risparmio in termini di tempo), che nel caso di strutture fortemente irregolari come gli edifici e i monumenti storici, i quali sono tradizionalmente rilevati e modellati con forti approssimazioni.

La modellazione strutturale dalla nuvola di punti permette inoltre lo studio della stabilità e conservazione di opere d'arte, come ad esempio le statue, che fino ad ora erano difficilmente rappresentabili in software FEM.

Dato l'alto livello di dettaglio ottenibile dalla nuvola di punti si ritiene plausibile utilizzare queste procedure e metodologie anche in campo diagnostico strutturale. Confrontando più superfici dell'oggetto, ricavate da cloud restituite in tempi differenti, si può monitorare l'evolversi di fessurazioni, cedimenti e spostamenti dell'intera struttura più agevolmente, velocemente e distribuita rispetto ai tradizionali metodi attuali che prevedono un monitoraggio puntuale a mezzo di strumenti applicati direttamente sull'oggetto (quali estensimetri, capisaldi di riferimento e misure di distanze relative).

Analogamente per i terreni è possibile rilevare e monitorare frane e pendii in ambiente FEM attraverso i software Midas GTS NX, Flac 3D, Plaxis 3D ed altri software similari.

Tramite la "fotoscansione" è quindi possibile monitorare in maniera continua, distribuita ed economica l'evolversi della sicurezza sismico-statica dei fabbricati, monumenti, statue e pendii "a distanza", senza intaccare in alcun modo l'oggetto di analisi con gli strumenti di misura.

Lo studio della vulnerabilità sismica di monumenti ed edifici storici è sempre di grande interesse, la possibilità di disporre di un metodo, anche approssimato, per ottenere un'analisi FEM economica e celere può rivelarsi molto utile in seguito ad eventi sismici ove si richiede di valutare la sicurezza di edifici strategici e luoghi sensibili in poco tempo. È così possibile stilare velocemente una classifica degli edifici secondo il loro grado di vulnerabilità ed importanza, in modo da ottimizzare gli stanziamenti di fondi economici per migliorare la capacità di resistenza sismica degli stessi. In modo analogo si può realizzare una mappa di vulnerabilità sismica dei monumenti, edifici storici, fontane, statue, ponti, pendii, etc. distribuiti sul territorio, con particolare interesse per le statue attualmente difficilmente analizzabili con modelli FEM.

Le procedure espone si possono adottare anche nello studio di strutture a telaio in acciaio a vista, in modo da estrapolare informazioni riguardo la posizione e dimensione dei profili impiegati, realizzando un file vettoriale dal quale ottenere gli assi del telaio, eseguendo quindi analisi statiche e dinamiche anche in caso di assenza di progetti e misure, riuscendo così a contenere i costi, che in alternativa sarebbero molto elevati.

Anche in campo medico si possono ottenere interessanti risultati per quanto riguarda l'ottimizzazione nella realizzazione di protesi; partendo da una TAC 3D delle ossa ed andando a studiare/prevedere gli stati tensionali sulla protesi e corpo (che differiscono caso per caso per ogni individuo, in quanto determinati da variabili quali il peso, la struttura fisica, la postura etc.) si potrebbero realizzare impianti più leggeri, robusti, rigidi e performanti tramite le funzioni numeriche di ottimizzazione strutturale della forma.

5. Appendice: Rilievi Storici

Si riportano qui di seguito i principali rilievi storici degni di nota eseguiti sull'Arco d'Augusto di Rimini.

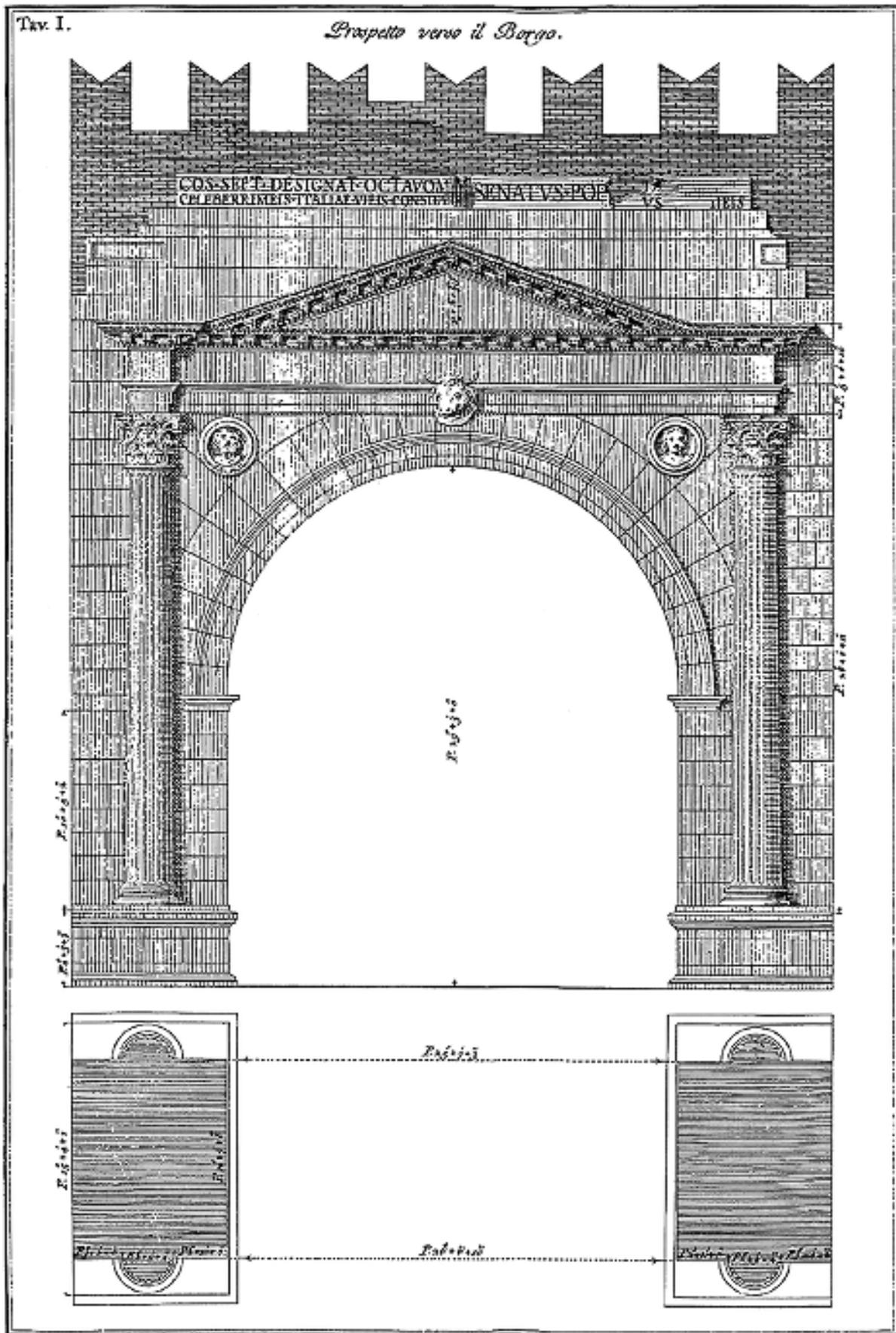
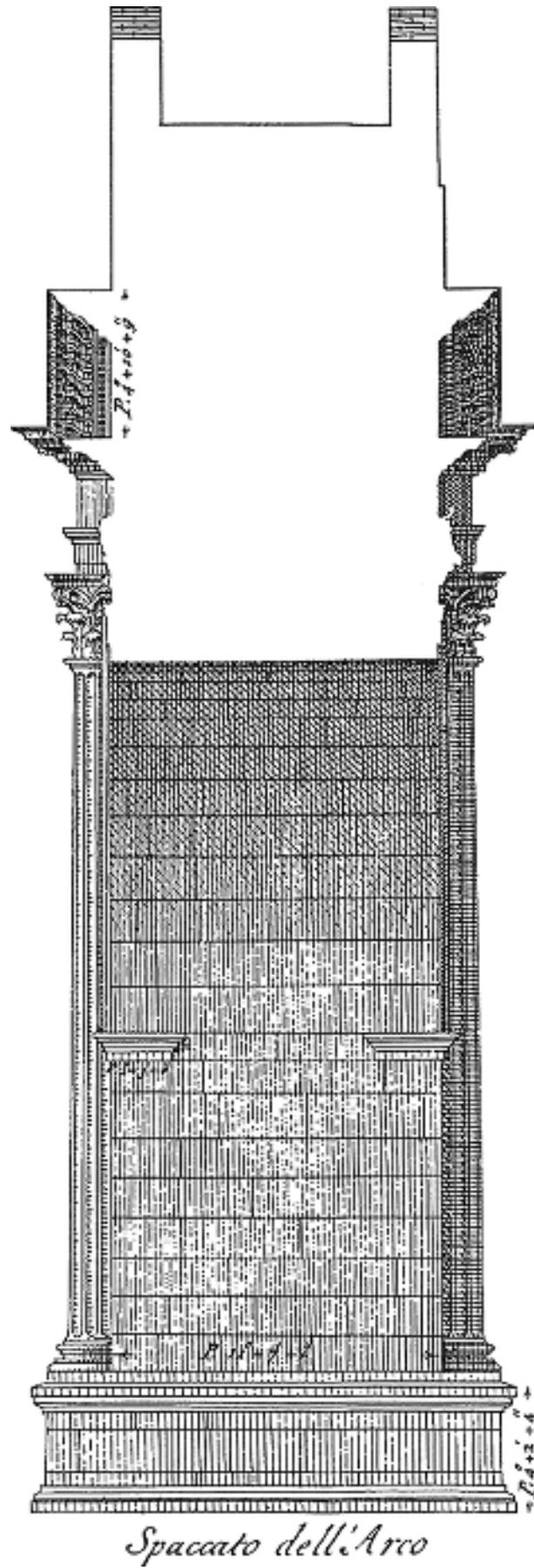
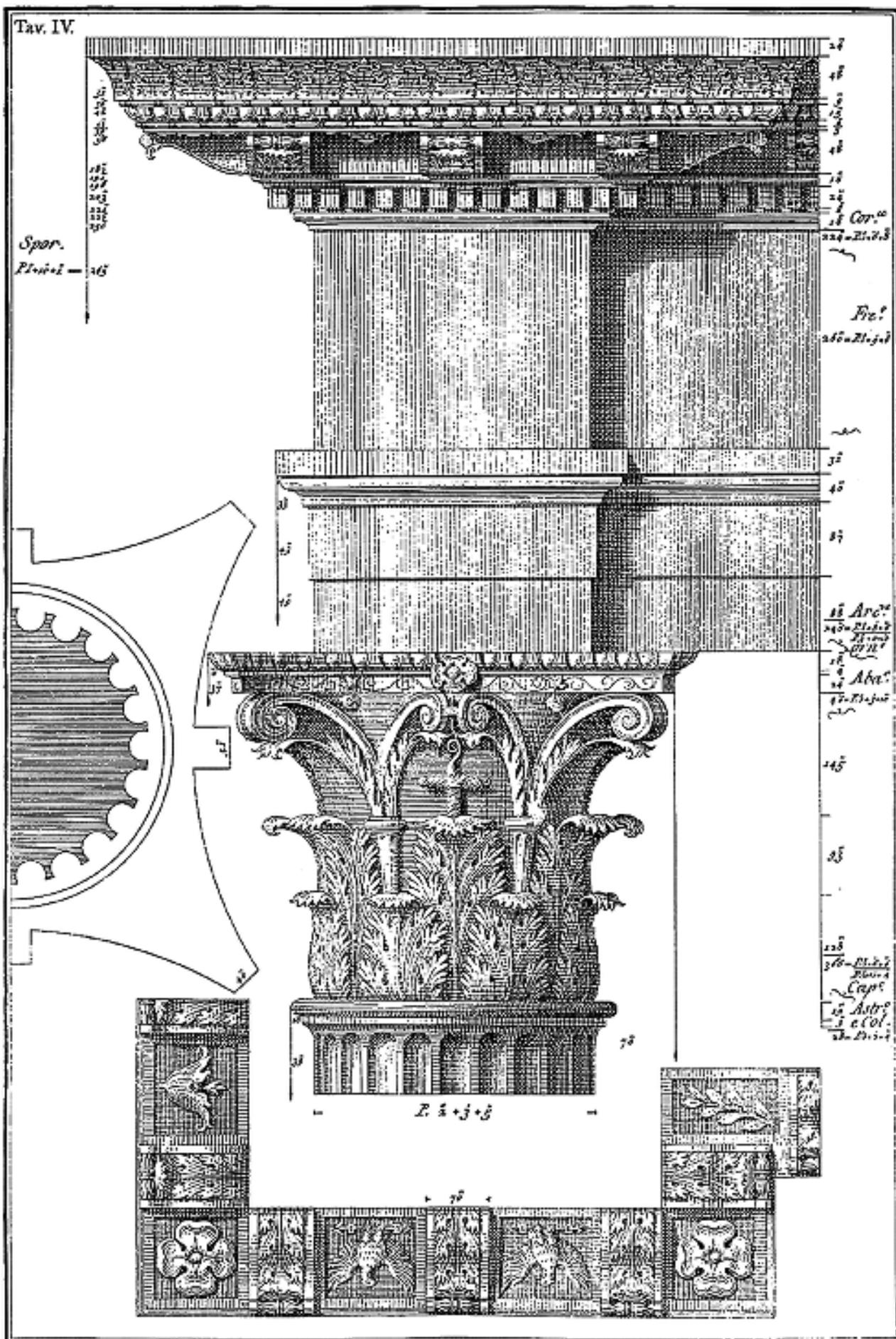


Figura 33 - Rilievo dell'arco d'Augusto di Rimini eseguito da Tommaso Temanza nel 1741 - Prospetto Verso Roma.

Figura 34
Rilievo dell'arco d'Augusto
di Rimini eseguito da
Tommaso Temanza nel 1741
– Sez. Verticale.





5.2 Rilievo di Maurizio Brighenti – 1825

Figura 36
Rilievo dell'arco d'Augusto di Rimini eseguito da Maurizio Brighenti nel 1825 - Prospetto Verso Roma.

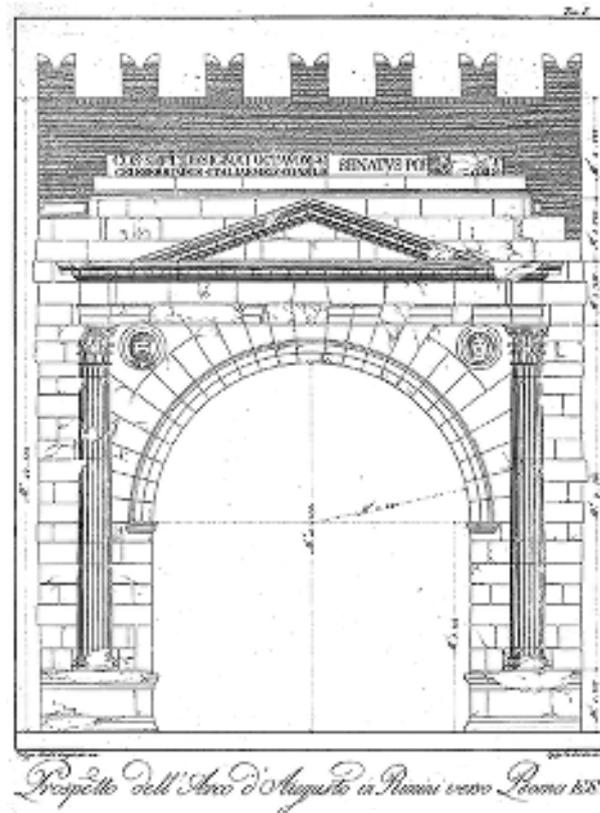
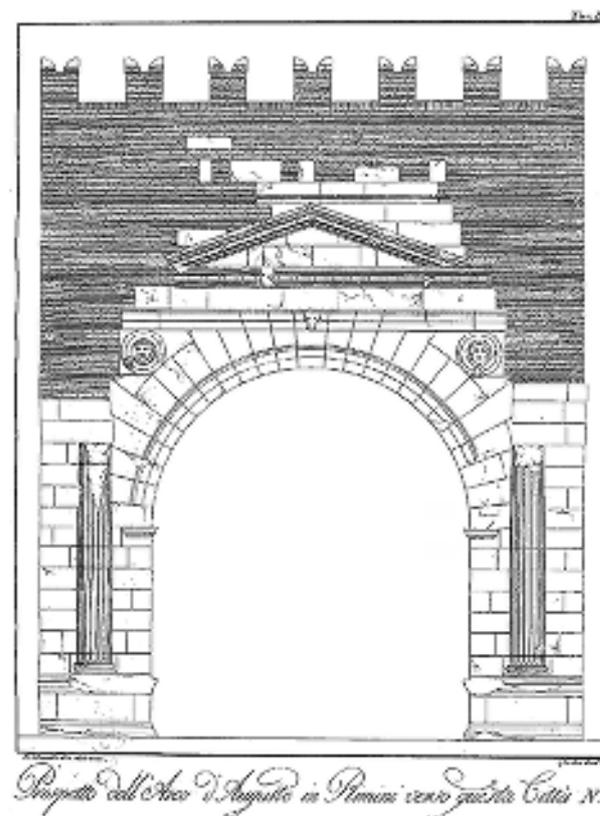


Figura 37
Rilievo dell'arco d'Augusto di Rimini eseguito da Maurizio Brighenti nel 1825 - Prospetto Verso Rimini.



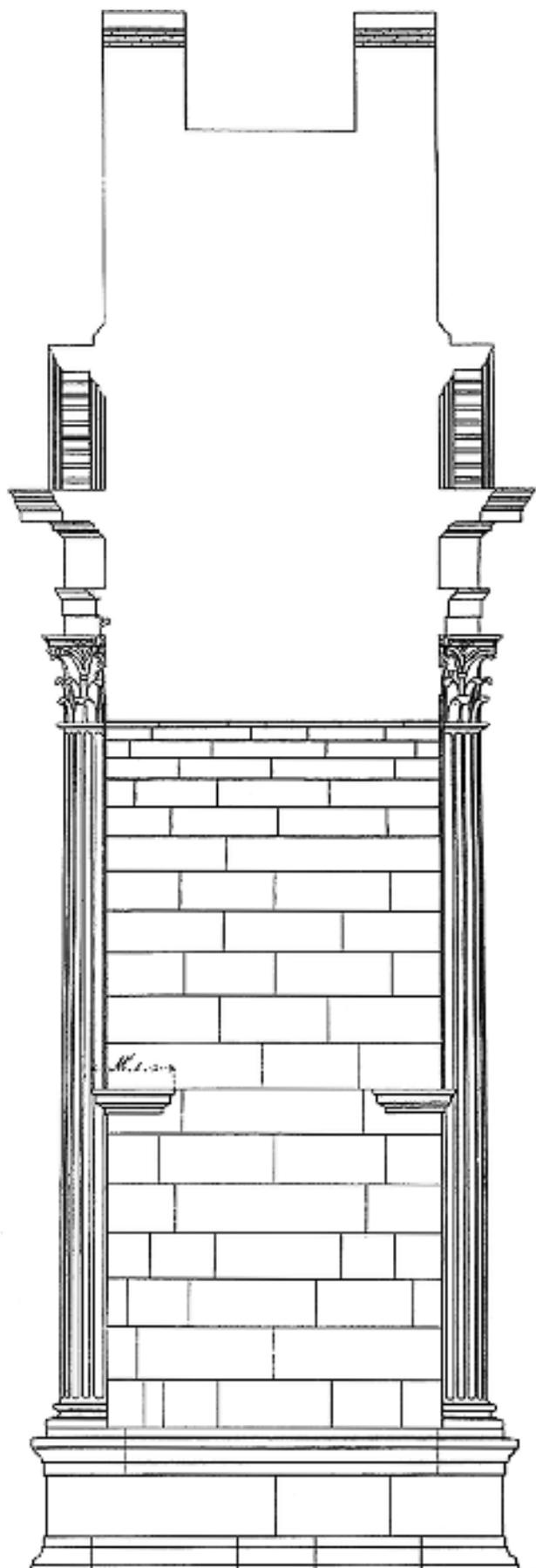


Figura 38
Rilievo dell'arco d'Augusto
di Rimini eseguito da
Maurizio Brighenti nel 1825
– Sez. Verticale.

5.3 Rilievo di Traiano Finamore - 1938

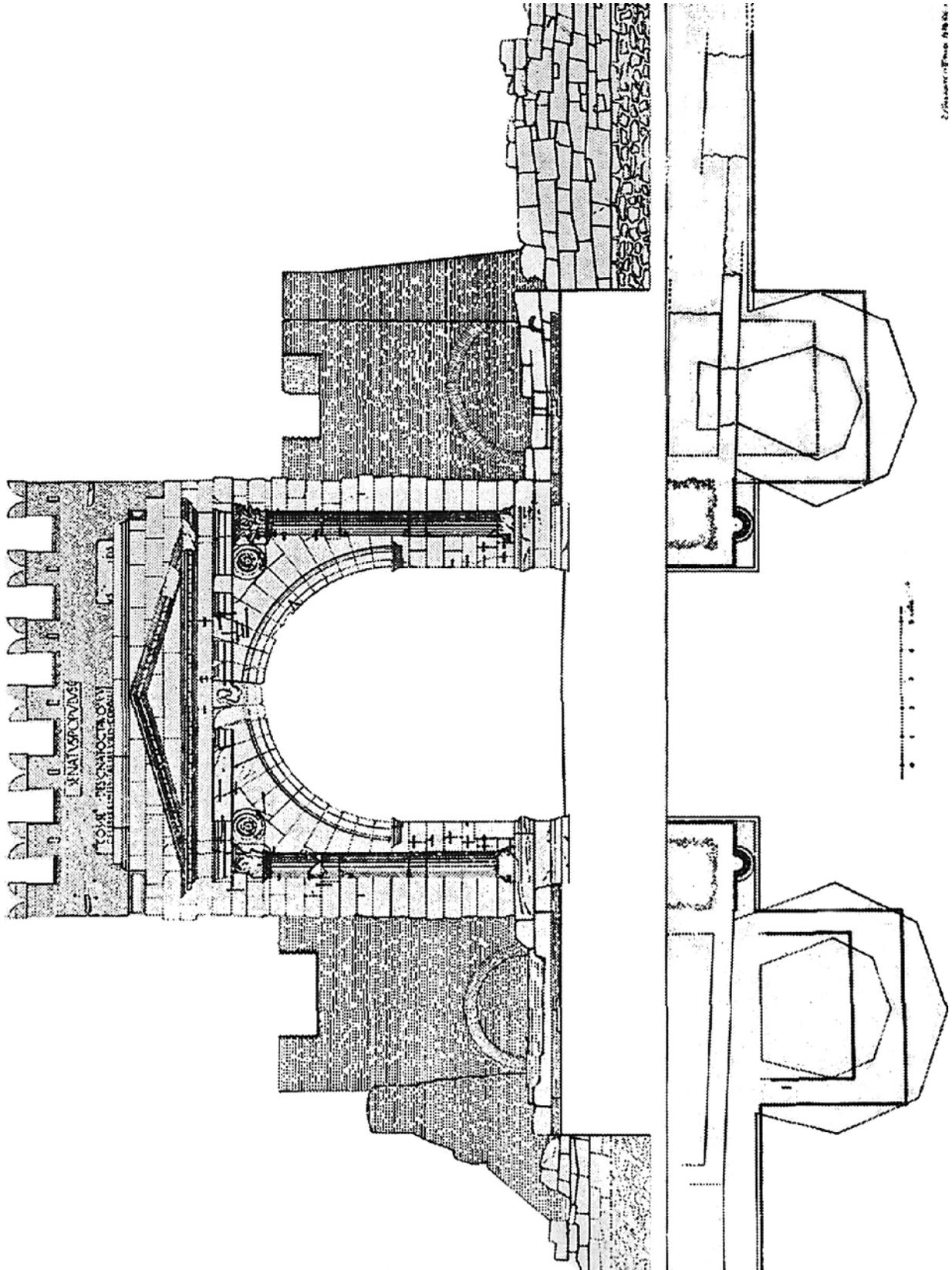


Figura 39 - Rilievo dell'arco d'Augusto di Rimini eseguito da Traiano Finamore nel 1938 - Prospetto Verso Roma.

5.4 Rilievo di Guido Achille Mansuelli - 1942

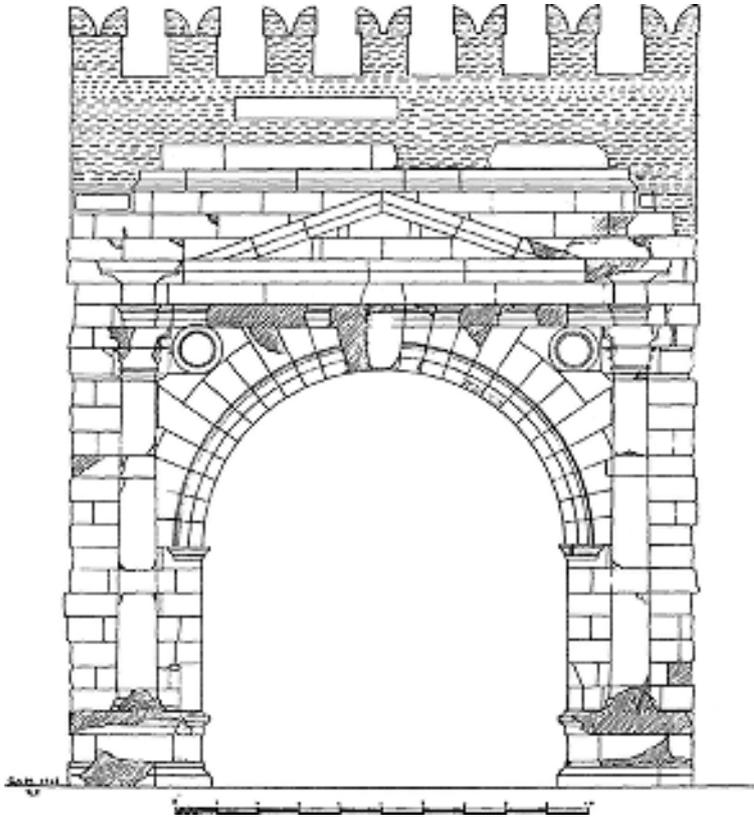


Figura 40
Rilievo dell'arco d'Augusto di Rimini eseguito da Achille Mansuelli nel 1942 - Prospetto Verso Roma.

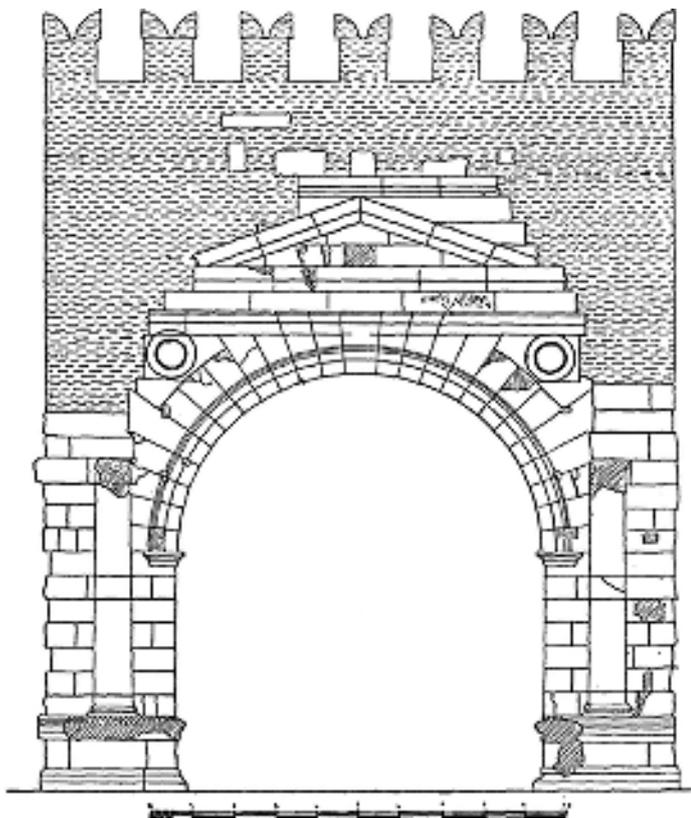
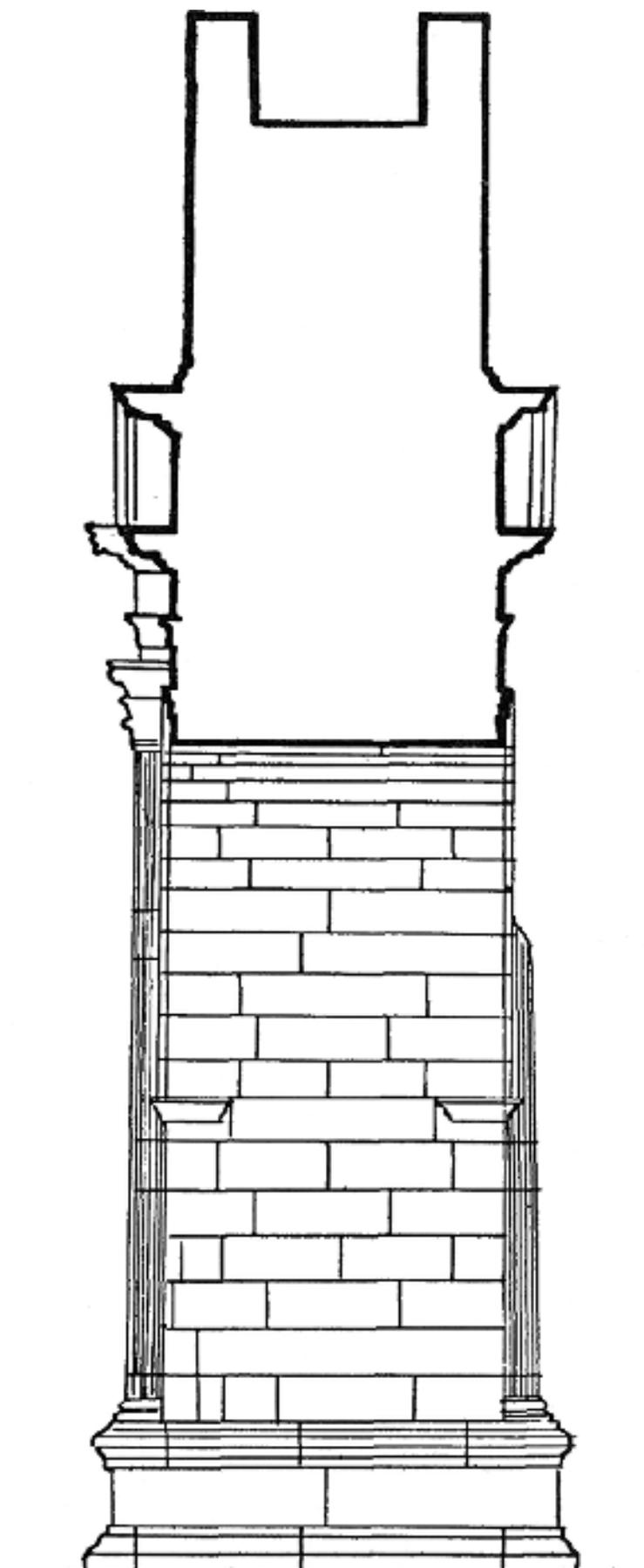


Figura 41
Rilievo dell'arco d'Augusto di Rimini eseguito da Achille Mansuelli nel 1942 - Prospetto Verso Rimini.

Figura 42
Rilievo dell'arco d'Augusto
di Rimini eseguito da Achille
Mansuelli nel 1942
– Sezione Verticale.



5.5 Rilievo di Roberto Angelini - 1982

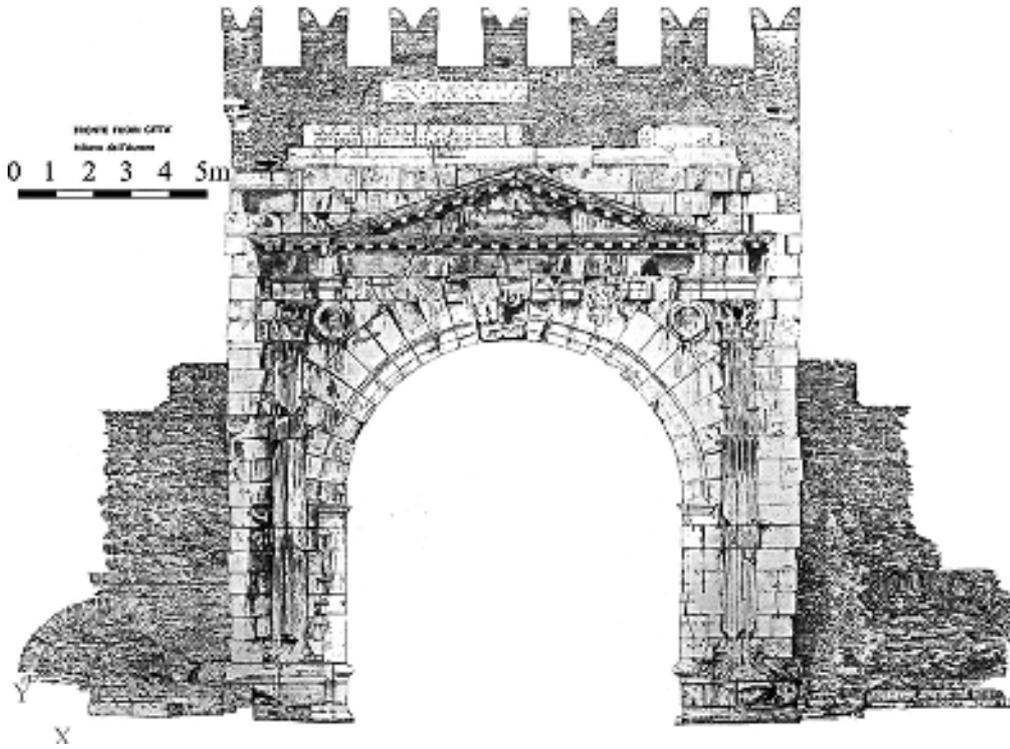


Figura 43
Rilievo dell'arco d'Augusto di Rimini eseguito da Roberto Angelini nel 1982 - Prospetto Verso Roma.

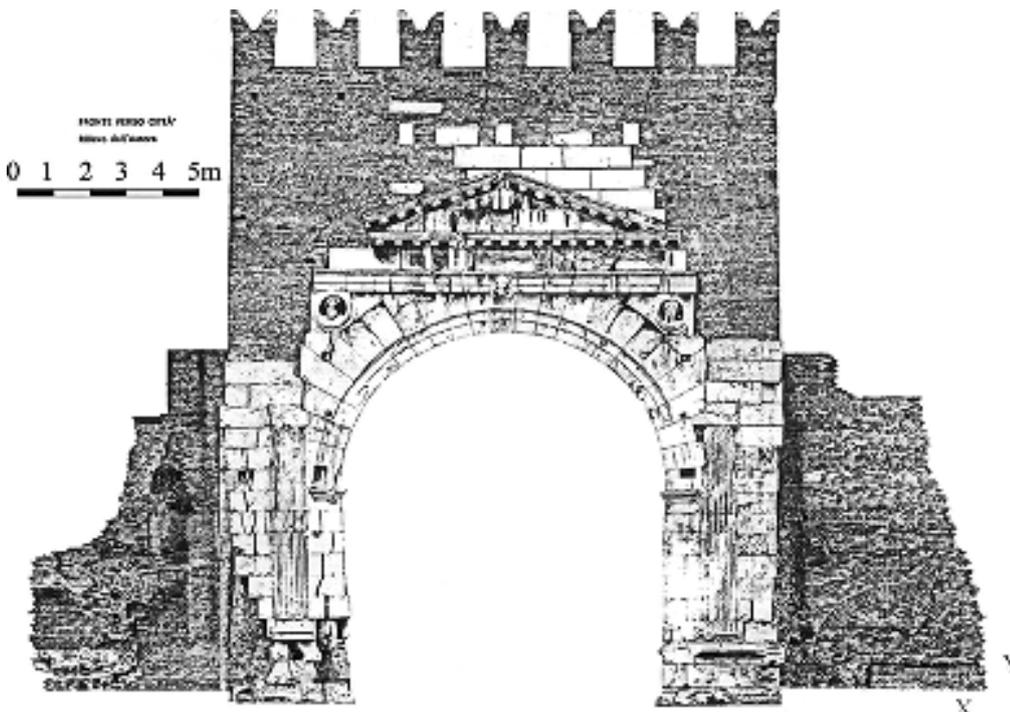


Figura 44
Rilievo dell'arco d'Augusto di Rimini eseguito da Roberto Angelini nel 1982 - Prospetto Verso Rimini.

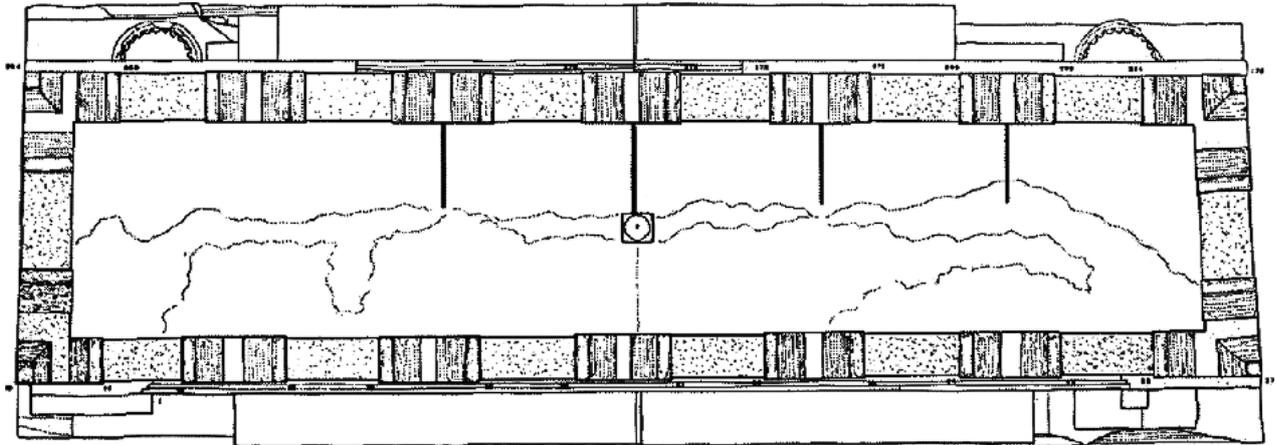


Figura 45 - Rilievo dell'arco d'Augusto di Rimini eseguito da Roberto Angelini nel 1982 - Sez. quota attico.

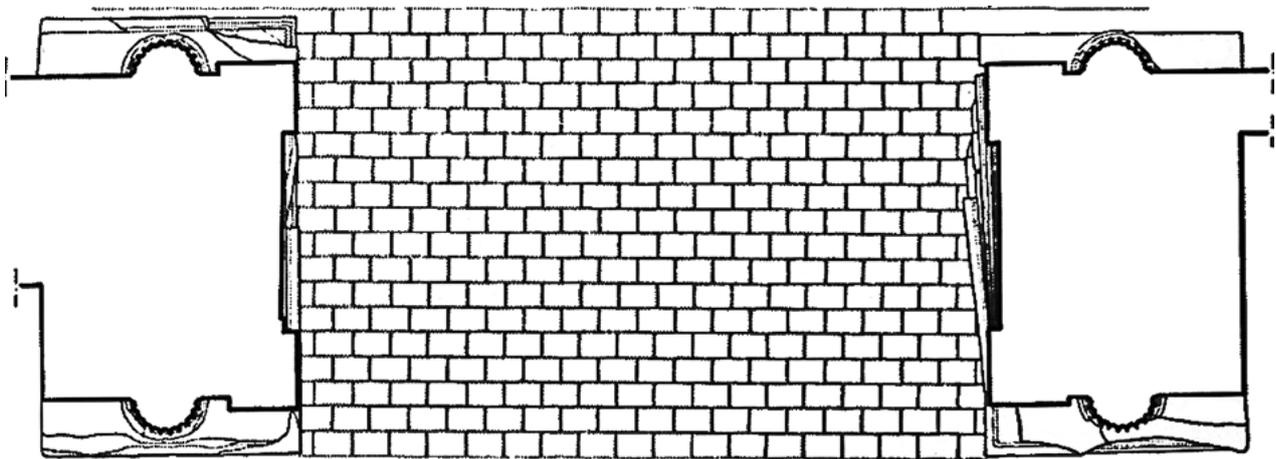


Figura 46 - Rilievo dell'arco d'Augusto di Rimini eseguito da Roberto Angelini nel 1982 - Sez. quota basamento

Bibliografia

- Serpieri M., Longo R.A., Zanutta A. (2018) - Metodologie a confronto per la Modellazione ed Analisi Strutturale dell'Arco d'Augusto di Rimini - Rivista Digital Modeling/Structural Modeling, n. 20, CSPFea, pag. 21-35 - <http://www.cspfea.net/structural-modeling-magazine/> - <https://go.gl/ARXTH7>.
- Castellazzi G., D'Altri A.M., De Miranda S., Chiozzi A., Tralli A. (2018) - Numerical insights on the seismic behavior of a non-isolated historical masonry tower, «Bulletin Of Earthquake Engineering», 2018, 16, pp. 933 - 961.
- Castellazzi G., D'Altri A.M., De Miranda S., Ubertini F. (2017) - An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings, «Engineering Structures», 2017, 132, pp. 229 - 248.
- Longo R.A. (2017) - Dalla generazione di modelli 3D densi mediante TLS e fotogrammetria alla modellazione BIM - Tesi di Laurea specialistica in Ingegneria Civile, Università degli studi di Bologna, A.A. 2015/2016 - <http://amslaurea.unibo.it/13284/>
- Bitelli G., Castellazzi G., D'Altri A.M., De Miranda S., Lambertini A., Selvaggi I. (2016) - Automate voxel model from point clouds for structural analysis of cultural heritage, in: Proceedings of the XXIII ISPRS Congress, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, XLI-B5, pp. 191 - 197 (atti di: XXIII ISPRS Congress, Prague, 12-19 July 2016).
- Castellazzi G., D'Altri A.M., De Miranda S., Ubertini F., Bitelli G., Lambertini A., Selvaggi I., Tralli A. (2016) - A mesh generation method for historical monumental buildings: An innovative approach, in: ECCOMAS Congress 2016 - Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, National Technical University of Athens, 2016, 1, pp. 409 - 416 (atti di: 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS Congress 2016, grc, 2016).
- Succi M. (2017) - Un approccio speditivo per il rilievo, la modellazione numerica e l'analisi strutturale di edifici monumentali - Tesi di Laurea specialistica in Ingegneria Civile, Università degli studi di Bologna, A.A. 2016/2017 - <https://amslaurea.unibo.it/12607/>
- Calarota A. (2015) - Il rilievo fotogrammetrico dell'arco d'Augusto di Rimini mediante camere amatoriali e software low-cost - Tesi di Laurea triennale in Ingegneria Civile, Università degli studi di Bologna, A.A. 2014/2015.

- Castellazzi G., D'Altri A.M., Bitelli G., Selvaggi I., Lambertini A. (2015) - From laser scanning to finite element analysis of complex buildings by using a semi-automatic procedure, «Sensors», 2015, 15, pp. 18360 - 18380.
- Ferracuti B., Savoia M., Pinho R., Serpieri M. (2008) - Seismic Analysis of Irregular RC Structures by 3D Force/Torque Pushover Method, in: Valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti in cemento armato, MILANO, Cosenza E., Manfredi G., Monti G., 2008, pp. 315 - 322 (atti di: Valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti in cemento armato, Roma, 29-30 Maggio 2008) (atti di convegno-relazione).
- Savoia M., Ferracuti B., Pinho R., Serpieri M. (2008) - Force/Torque Pushover Method for plan irregular structures, in: Non Linear Static Methods for Design/Assessment of 3D Structures, s.l, Bento R., Pinho R., 2008, pp. 1 - 16 (atti di: Non Linear Static Methods for Design/Assessment of 3D Structures, Lisbon - Portugal, 5-6 May 2008) (atti di convegno-relazione).
- Serpieri M. (2008) - Analisi di pushover 3D per strutture in c.a. - Tesi di Laurea specialistica in Ingegneria Civile, Università degli studi di Bologna, A.A. 2006/2007 - <http://amslaurea.unibo.it/111/>
- Serpieri M. (2005) - Rilevamento fotogrammetrico digitale non convenzionale ed analisi strutturale agli elementi finiti dell'arco d'Augusto di Rimini - Tesi di Laurea triennale in Ingegneria Civile, Università degli studi di Bologna, A.A. 2004/2005 - <http://amslaurea.unibo.it/7394/>

Gli Autori

Maurizio Serpieri

Nasce a Rimini nel 1983.

Il 14/12/2005 si Laurea con Lode in Ingegneria Civile presso la Facoltà di Ingegneria di Bologna con argomento di tesi: *Fotogrammetria digitale non convenzionale ed analisi strutturale agli elementi finiti dell'arco d'Augusto di Rimini* (<http://amslaurea.unibo.it/7394/>); tesi che vinse il primo premio Dr. Aldo Gaspari su una rosa di oltre duecento candidati per i suoi contenuti storici e scientifici ed ebbe diversi seguiti nell'ambito della ricerca scientifica con pubblicazioni su alcuni siti web tematici (Prog-Res), atti di convegni, riviste tecniche/ingegneristiche (Digital/Structural Modeling) e sul portale web del Comune di Rimini.

Tale lavoro di ricerca fece da varco apripista, spianando la strada ad una nuova serie di tesi sperimentali con l'impiego di tecniche innovative di rilievo fotogrammetrico ed analisi FEM seguite direttamente da Serpieri come correlatore in collaborazione con il dipartimento DICAM della facoltà di Ingegneria di Bologna nell'ambito strutturale e fotogrammetrico insieme al relatore Prof. Antonio Zanutta ed altri Prof. del dipartimento di Scienza delle Costruzioni, come il Prof. Ing. Stefano De Miranda e Prof. Ing. Francesco Ubertini.

Il 20/03/2008 si Laurea nuovamente con Lode in Ingegneria Civile Magistrale ad Indirizzo Strutture presso la Facoltà di Ingegneria di Bologna con argomento di tesi *Pushover 3D per strutture in c.a.* (<http://amslaurea.unibo.it/111/>) che portò anch'essa a svariati successi, fra cui quattro pubblicazioni su atti di convegni internazionali e siti web tematici (Reluis, Anidis, ISI - Ingegneria Sismica Italiana, Workshop a Lisbona) insieme al Prof. Ing. Marco Savoia (ordinario del Dipartimento di Tecnica delle Costruzioni della Facoltà di Ingegneria di Bologna - UniBO) e al Prof. Ing. Rui Pinho (associato del Dipartimento di Tecnica delle Costruzioni della Facoltà di Ingegneria di Pavia UniPV, nonché direttore scientifico del prestigioso centro di ricerca europeo sulla sismica Eucentre).

Nel Marzo 2008, appena laureato, intraprende una collaborazione di ricerca con il Prof. Ing. Marco Savoia presso il Dipartimento di Tecnica delle Costruzioni della Facoltà di Ingegneria di Bologna - DICAM (www.dicam.unibo.it), lavorando alla pubblicazione di articoli specifici in merito al nascente metodo di analisi sismica *Pushover 3D*, nonché come correlatore di tesi per i laureandi impegnati nel proseguimento di tale ambito di ricerca.

All'inizio del 2009 entra a far parte, in qualità di collaboratore progettista strutturista, della società di Ingegneria ed Architettura Polistudio AES di Riccione (www.polistudio.net); società di circa 80 persone con la quale partecipa alle più svariate tipologie di lavori pubblici e privati, nonché alla progettazione di grandi opere distribuite su tutto il territorio nazionale ed internazionale con anche il ruolo di collaborazione alla D.L. (nuovi edifici in c.a., acciaio, legno ed edifici esistenti in c.a. e muratura da migliorare ed adeguare sismicamente sono i principali campi di applicazione).

Nei sette anni di collaborazione con Polistudio AES apprende la gestione della commessa e collaboratori, partecipa a centinaia di progetti di ogni tipo, dimensione e complessità, specializzandosi con il tempo nel campo degli interventi di miglioramento/adequamento sismico e protezione sismica passiva ed attiva degli edifici esistenti in c.a., muratura e acciaio mediante rinforzi con FRP, isolamento sismico, smorzamento sismico viscoso ed isteretico tramite damper, torri dissipative, incamiciatura/calastrellatura pilastri, placcaggio setti e pareti murarie applicati su edifici ospedalieri, scolastici, residenziali ed alberghieri della Romagna ed Aquilani/Emiliani colpiti dai rispettivi sismi; mettendo in pratica sin dal 2009, su diversi ospedali romagnoli oggetto di valutazione di vulnerabilità sismica ed altri edifici colpiti dal Sisma Aquilano, il metodo sperimentale di Pushover 3D appreso durante il periodo di ricerca e tesi.

Dal 2009 al 2011 tiene, contemporaneamente al lavoro diurno, alcune lezioni serali di Tecnica delle Costruzioni e Topografia presso il Cepu di Rimini per studenti universitari e delle scuole superiori per geometri.

Nel gennaio 2016 decide di cambiare tipologia di lavoro e piazza, trasferendosi a Milano per lavorare insieme alla ditta di rivendita software e assistenza tecnica Harpaceas - The BIM Specialist (www.harpaceas.it) di 35 persone, intraprendendo una breve ma intensa esperienza da responsabile commerciale del settore calcolo strutturale dell'azienda, in particolare sui software Midas e ModeSt.

Nel maggio 2016 entra a far parte, in qualità di collaboratore progettista strutturista e D.L., dello I/O studio di ingegneria Sarti Engineering di Rimini-Roma-Dubai (www.studiosarti.it) di circa 12 persone con il quale partecipa a diverse tipologie di lavori pubblici e privati per la realizzazione (e/o miglioramento/adequamento sismico) di ospedali, scuole, edifici industriali, progettazione di grandi ed ardite opere in acciaio con notevoli sbalzi e luci, strutture in c.a.p. pre e post-teso, solai alleggeriti post-tesi e complesse coperture in acciaio di grande luce a forma libera sul territorio nazionale ed internazionale (UAE, Dubai, Cina, Russia, Europa).

In tale periodo affina la propria conoscenza nell'ambito della progettazione di strutture metalliche, migliorando le competenze acquisite su strutture in legno, vetro, muratura e c.a.; incrementando ulteriormente la propria specializzazione nel campo della valutazione di vulnerabilità sismica, riabilitazione strutturale e miglioramento/adequamento sismico di strutture in c.a. e muratura con tecniche innovative quali smorzatori viscosi ed isteretici, isolamento sismico e placcaggi con FRP applicate sui principali ospedali del territorio toscano (Careggi di Firenze, Le Scotte di Siena).

Fra i lavori più complessi, arditi e importanti svolti insieme a Sarti Engineering vi sono le strutture free form di copertura in acciaio e vetro a grande luce realizzate per l'Arch. Massimiliano Fuksas in Cina ed il padiglione DEWA per Expo 2020 di Dubai.

Ad oggi svolge la libera professione collaborando con studio Sarti Engineering in qualità di progettista e D.L. strutturale specializzato nel campo della riabilitazione strutturale, miglioramento/adequamento sismico con tecnologie innovative, progettazione di coperture a forma libera di grande luce in acciaio/vetro e progettazione di strutture in legno.

Rosario Alessandro Longo

Dopo aver conseguito la laurea triennale in Ingegneria Civile con indirizzo *Infrastrutture viarie e trasporti* discutendo la tesi *Studio di sistemi di trasporto innovativi per il collegamento fra Stazione Centrale e Aeroporto di Bologna* prosegue la sua formazione nell'ateneo bolognese seguendo il corso Costruzioni per l'edilizia discutendo il 14 marzo 2017 la tesi *Dalla generazione di modelli 3D densi mediante TLS e fotogrammetria alla modellazione BIM*.

Attualmente esercita la libera professione collaborando con alcuni studi bolognesi dove si occupa di progettazione strutturale e linee vita.

Antonio Zanutta

Nasce a Bologna nel 1967, si laurea in Scienze Geologiche a Bologna il 17/03/1994 con il punteggio di 110/110.

Dal 29/12/2011 è Professore Associato per il settore scientifico disciplinare ICAR/06 Topografia e Cartografia presso l'Università di Bologna.

Dal 1999 nell'ambito delle Attività di Ricerca del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA) partecipa a progetti di Geodesia e Glaciologia.

Ha partecipato a 8 spedizioni scientifiche italiane in Antartide (2002/03, 2003/04, 2004/05, 2010/11, 2011/12, 2012/13, 2013/14, 2014/15).

Dal 2012 è Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca di Geodesia nell'ambito del Programma Nazionale di Ricerca in Antartide P.N.R.A., "Misure geodetiche per il monitoraggio della Terra Vittoria settentrionale".

Svolge l'attività di ricerca nei settori della Topografia, Geodesia e Fotogrammetria, pubblicando articoli su riviste nazionali ed internazionali.

Conduce inoltre ricerche relative alle moderne tecniche geomatiche per il controllo dei movimenti crostali superficiali con reti GNSS ripetute nel tempo, ai fini dello studio della geodinamica regionale e continentale.