

## Rilievo tridimensionale e analisi dei dissesti della Pieve di Romena

### 3D Survey and instability's analysis of Romena parish

La Pieve di San Pietro a Romena si trova nel comune di Pratovecchio, nella vallata casentinese. La sua edificazione risale, basandosi su quanto scolpito su di un capitello, al 1152 d.C. per volere di Matilde di Canossa, si tratta quindi di un edificio romanico, anche se dell'edificio originario in realtà non resta molto, anche a causa dei molti terremoti che hanno interessato la vallata. Sulla base di quanto richiesto dal DM 01/2008 sulle costruzioni l'analisi del monumento è stata fatta seguendo vari step conoscitivi: una corretta analisi delle fonti storiche d'archivio per condurre le prime ipotesi di sviluppo dell'edificio, un rilievo laser scanner in modo da avere un rilievo molto affidabile. Sulla base della nuvola di punti sono state ottenute tutte le sezioni e i prospetti necessari a descrivere l'edificio e a completare l'analisi con gli elaborati materici, dei fotopiani, dei degradi superficiali. Parallelamente si è portata avanti l'analisi stratigrafica sulla pieve, utile a capire come l'edificio è stato concepito e quali trasformazioni ha subito nel tempo, in modo poi da impostare il progetto di restauro.

The Romanesque parish church San Pietro a Romena is located in the municipal district of Pratovecchio, in the Casentino valley. It was built, due to a inscription chiselled on a capital, in 1152 d.C. probably wanted by Matilde di Canossa, who has promoted the construction of a lot of churches in this area. We don't have many informations about the first church, probably destroyed by an earthquake, event that frequently has hit the valley. We based our research on what the DM 01/2008 requests, so our analysis was made following some steps of knowledge: firstly an accurated research in the archive of the Fiesole diocese, to suppose how the building has evolved during the ages, then a 3D laser scanner survey. Thanks to the accurate point cloud we could draw our sections of the church, integrating the material analysis, the orthophotos and the degradation analysis. In parallel has been developed the stratigraphic analysis of the building, which is useful to understand how it has been constructed and how it has grown, so that a coherent restoration project can be efficiently designed.



#### Stefano Bertocci

è architetto e professore ordinario di Rilievo dell'Architettura presso il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze. Coordina diversi gruppi di ricerca che studiano vari aspetti del rilievo, dal paesaggio, all'urbano, al monumentale. Ha studiato vari edifici e centri storici sia in Italia che all'estero con particolare attenzione al medioriente e la Russia.



#### Giovanni Minutoli

è architetto e dottore di ricerca in Materiali e strutture dell'architettura; è professore a contratto di Restauro presso il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze dove è anche assegnista di ricerca dal 2011. Si occupa principalmente di vulnerabilità sismica degli edifici storici e di salvaguardia dei centri storici minori.



#### Giovanni Pancani

è architetto e dottore di ricerca in Rilievo e rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente; dal 2006 insegna come professore a contratto presso l'Università degli Studi di Firenze. Dal 2002 al 2010 è assegnista di ricerca presso l'Università degli Studi di Firenze, dedicandosi alla messa a punto di un protocollo per la restituzione bidimensionale delle nuvole di punti e per lo svolgimento delle pitture su superfici voltate.

Pieve romanica  
Rilievo laser-scanner 3D  
Analisi stratigrafica  
Analisi strutturale



### 1. INQUADRAMENTO E ANALISI STORICA<sup>1</sup>

Nel versante meridionale del colle di Romena, sotto l'omonimo castello feudale sorge una delle pievi più interessanti della vallata casentinese, dedicata a San Pietro Apostolo<sup>2</sup>. La pieve, rispetto alla zona del proprio piviere, si trova in posizione centrale e bene accessibile per la presenza di una rete già agibile nel territorio fin dal periodo dell'Alto medioevo. Come le chiese plebane di Stia, Strada e Montemignaio quella di Romena viene riferita dalla tradizione popolare all'iniziativa della contesa Matilde di Toscana<sup>3</sup>.

L'ipotesi che la Chiesa primitiva sia stata costruita sopra un preesistente edificio etrusco-romano di culto è attendibile se si tiene conto dei reperti ritrovati durante i lavori di scavo del 1893<sup>4</sup>. Le risultanze archeologiche indicano la presenza di un insediamento etrusco fin dal III secolo a.C. caratterizzato da un edificio di culto e dalla relativa necropoli<sup>5</sup>.

La testimonianza più remota è del 1054: la pieve viene riportata dagli *Annales Camaldulenses* con il nome di S. Pietro a Ormena<sup>6</sup>. La data di edificazione, più probabilmente di riconsacrazione, e il nome del pievano dell'epoca si leggono nei capitelli delle due colonne vicine alla porta d'ingresso: "*tempore famis anno 1152*", "*Albericus plebanus*

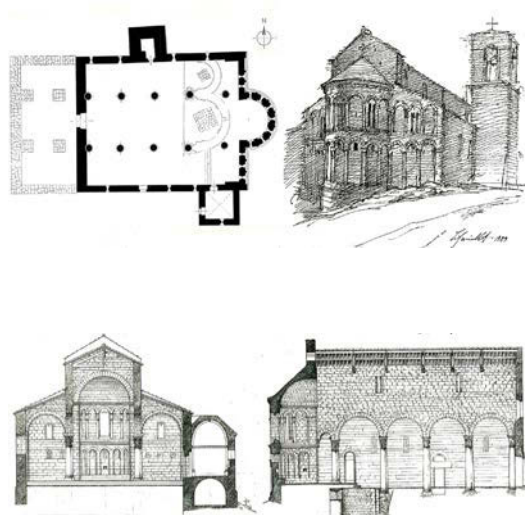


Fig. 1. Vista della parte absidale della pieve

Fig. 2. Pianta e sezioni della pieve eseguite dopo le operazioni di scavo del 1893.

vista prospettica risalente al 1989.

*fecit hoc opus*". Gli scavi condotti dalla Soprintendenza di Arezzo nei primi anni del 1970 hanno messo in evidenza anche una chiesa più antica al di sotto di quella attuale<sup>7</sup>. L'edificio triabsidato si estendeva fino alla attuale zona presbiteriale. Le absidi laterali e anche quella centrale conservano la parte basamentale degli altari e il pavimento in lastre di pietra. I muri della parte residua dell'edificio primitivo risultano costruiti con elementi lapidei di piccola pezzatura in alberese, mentre le murature dell'edificio consacrato nel 1152 presentano grandi blocchi squadrati di arenaria.

Le fonti d'archivio documentano che la navata della chiesa fino al 1678<sup>8</sup> presentava sei campate, dato che è stato confermato anche dagli scavi realizzati negli anni settanta del Novecento. Si scoprì che l'edificio aveva tre diverse quote altimetriche: la più bassa occupava la parte anteriore della Chiesa, in prossimità dell'ingresso, superati tre gradini si arrivava al recinto del coro, dove era generalmente collocato anche l'ambone e infine attraverso altri due scalini si giungeva alla zona del presbiterio.

La pieve oggi si presenta ripartita in tre navate e quattro campate divise da cinque colonne monolitiche sormontate da archi a tutto centro con interasse variabile. Le navate laterali sono chiuse da cappelle quadrangolari coperte con

volta a botte, mentre la navata centrale è delimitata da una importante abside semicircolare. La facciata, ricostruita con pietrame di recupero dopo il crollo del 1678, non presenta alcuna elemento decorativo. Un doppio ordine di otto colonnine e altrettanti archetti decorano la parte absidale; i capitelli dell'ordine superiore, in arenaria, risultano corrosi dal tempo e in parte sostituiti. Nell'ordine inferiore si aprono tra le colonnette piccole monofore che toccano la sommità degli archi, mentre nell'ordine superiore l'apertura al centro dell'abside è trifora e le altre quattro bifore. Le monofore della navata maggiore e quelle delle navate laterali sono disposte in modo asimmetrico. Sopra l'archeggiatura dell'abside si riconosce un'apertura cruciforme, attualmente tamponata. Una porta nella navata destra introduce in una stanza adibita a sacrestia, forse in origine Battistero, a pianta quadrata con aperture irregolari, coperta con volta a crociera con nervature. Il campanile a torre è addossato al lato sinistro della Chiesa e la base, preesistente alla pieve attuale, faceva parte della primitiva costruzione. Il terremoto del 1599 danneggiò il campanile<sup>9</sup> che fu abbassato una prima volta; nel 1729 un ulteriore terremoto<sup>10</sup> lo rese pericolante e per questo fu nuovamente sbassato. Fu allora che si provvide alla costruzione dell'attuale cella campanaria a quattro luci.

## 2. LE METODOLOGIE DELLE INDAGINI STRATIGRAFICHE DELLE MURATURE AI FINI DELLA CONSERVAZIONE E DELLA DIAGNOSTICA<sup>11</sup>

Rilevare una struttura architettonica con le sue apparecchiature murarie ed i suoi corredi funzionali ed estetici, come spesso è stato sottolineato, costituisce un'operazione che se condotta correttamente diviene per lo studio storico ed architettonico, oltre che sotto il profilo delle indagini strutturali in generale, una condizione essenziale per la lettura delle strutture in elevato, utile soprattutto nel corso di analisi che investano resti dove, spesso, scarse e sommarie risultano le fonti storiche. I campi di applicazione delle indagini architettoniche, strutturali, tipologiche, geometriche e formali, tipiche degli studi architettonici, hanno ormai da tempo trovato fertili e proficue integrazioni anche con le metodologie di indagine che si sono sviluppati nel campo delle indagini archeologiche.

Con l'affermazione anche in campo architettonico delle metodologie di indagine stratigrafica, ambiti di ricerca che comportano, in genere, una maggiore attenzione alle tracce che sono conservate dal testo architettonico dal manufatto o dal reperto murario in genere, siamo giunti ad applicazioni di metodologie di studio delle strutture in elevato derivate da quelle utilizzate per lo studio di reperti di interesse archeologico<sup>12</sup>.

La lettura stratigrafica dell'elevato implica una tecnica di analisi assolutamente non invasiva che mira ad individuare quali tipi di rapporti fisici esistono fra i risultati delle azioni costruttive, oppure distruttive, che hanno lasciato una traccia sull'apparato della muratura. Tale metodologia considera ogni intervento sul manufatto come uno strato che restituisce la successione dei lavori di adattamento compiuti dall'uomo oppure da eventi di qualsiasi natura. Ampliamenti o crolli, demolizioni e restauri che hanno interessato ogni singola parte di muratura, una volta individuati e riportati in una successione stratigrafica, definiscono un "prima" ed un "poi" relativo a ciascuna attività documentata, restituiscono sia la cronologia relativa alle fasi dell'edificio sia, alla conclusione dell'indagine, la storia della sua vita materiale con tutte le implicazioni che ne possono conseguire anche dal punto di vista strutturale. Queste azioni si concretizzano in manufatti di vario genere che, spesso, sono individuati mediante il riconoscimento di porzioni di murature omogenee, e forniscono un quadro complessivo estremamente utile per

tutti gli aspetti delle successive fasi della diagnostica, della conservazione e del restauro dei manufatti stessi. Le esperienze maturate in decenni di attività nel campo del rilievo per l'archeologia si sono inserite pertanto nel dibattito scientifico contemporaneo, unitamente al crescente interesse per lo studio di temi legati al recupero ed alla valorizzazione dei siti di interesse archeologico. Come è stato ampiamente discusso sul piano scientifico, tutto il procedimento grafico del rilievo e della restituzione deve svilupparsi, per quanto attiene al settore del rilievo per l'archeologia, all'interno di un sistema logico stabilito dallo specifico settore disciplinare, dove la scelta soggettiva del rilevatore e disegnatore si interfaccia comunque con la specifica professionalità dell'operatore e dell'archeologo, affinché possa venire interpretata senza possibilità di equivoci<sup>13</sup>.

Le operazioni di rilievo e la successiva restituzione grafica devono essere condotte in maniera tale da individuare le singole unità stratigrafiche murarie tramite contorni, evidenziando le superfici di contatto o interfacce; ogni unità avrà una numerazione ed una scheda di registrazione dei dati che emergono dall'analisi della stessa. Come nello scavo stratigrafico, anche in questo tipo di indagini, le strutture murarie, oltre a rappresentare strati archeologici, costituiscono classi di reperti da studiare rispetto ai contesti socio-culturali che li hanno prodotti, considerando le loro modificazioni in rapporto ai cambiamenti d'uso nella storia del manufatto. L'analisi di un immobile può essere condotta a vari livelli di approfondimento: si può variare il grado di analiticità della registrazione, adattandosi alle diverse situazioni secondo la strategia dell'intervento ed i livelli di approfondimento delle indagini, in relazione agli obiettivi della ricerca. In questo campo esiste la concreta possibilità di confrontare le esperienze di studio dell'edificio unificando i metodi di indagine architettonica ed archeologica, queste ultime tuttavia non sostituiscono gli altri metodi scientifici generalmente utilizzati quali le indagini storico-archivistiche, le analisi tipologiche, le varie metodologie diagnostiche e quant'altro sia utile alla formazione di un quadro complessivo delle conoscenze nello specifico settore della conservazione e del restauro.

Le singole sequenze delle murature si devono individuare tenendo presente che l'edificio è un oggetto a tre dimensioni, di notevole consistenza spaziale, e che si comportano in maniera diversa rispetto ad uno stra-

to orizzontale reperibile in scavo dove generalmente i rapporti di sovrapposizione danno luogo ad una cronologia relativa, un prima ed un poi, dovuto principalmente alle leggi della gravità della sedimentazione naturale. Le murature in elevato costituiscono un bacino di sedimentazione del tutto particolare: la sequenza e la sovrapposizione delle unità stratigrafiche murarie deve essere letta non solamente dal basso verso l'alto, ma anche in senso orizzontale, dall'esterno all'interno e viceversa: le sequenze non sono quindi solo orizzontali ma si sviluppano anche in senso verticale e nel senso dello spessore delle murature, delle volte e dei solai. Oltre a questi rapporti fisici diretti sono stati individuati, da alcuni autori, rapporti stratigrafici indiretti di contemporaneità, utili nel caso in cui non vi siano effettivamente rapporti stratigrafici, o non siano visibili o verificabili, sia nel caso di rapporti tipologici e funzionali<sup>14</sup>. Si possono verificare per *identità*, ad esempio, due porzioni dello stesso muro tagliato in verticale, per *tipologia* una serie di finestre uguali sia per forma che per materiali di impiego nella costruzione, per *funzionalità*, per esempio, buche pontate pertinenti allo stesso cantiere edilizio.

Il diagramma stratigrafico proposto da Harris per la comprensione dei rapporti fra le unità stratigrafiche è stato adattato al rilevamento delle unità stratigrafiche murarie USM fornendo una schematica rappresentazione che fornisce la successione temporale degli strati<sup>15</sup>. R. Parenti sottolinea, ad esempio, come l'analisi di un edificio richieda elaborati utili a determinare il volume degli elementi presenti, o dei singoli corpi di fabbrica, e le tracce lasciate dalle diverse distribuzioni funzionali e spaziali, prima di poter tentare ipotesi ricostruttive con il contributo del diagramma stratigrafico. Numerosi approfondimenti sono stati sviluppati anche nel settore della documentazione delle murature in elevato con *sezioni e prospetti di unità stratigrafiche murarie* destinate a rappresentare in un unico elaborato stratigrafie verticali, spesso per loro stessa natura non completamente indagabili per mezzo dello scavo (con saggi che in molti casi potrebbero configurarsi vere e proprie demolizioni), che documentano lo sviluppo nel tempo delle murature indagate<sup>16</sup>. In parallelo a quanto avviene nello scavo stratigrafico, per le murature in elevato è stato introdotta la nozione di *elemento strutturale* e di *componente*; l'insieme di più componenti forma uno strato o *unità stratigrafica mu-*

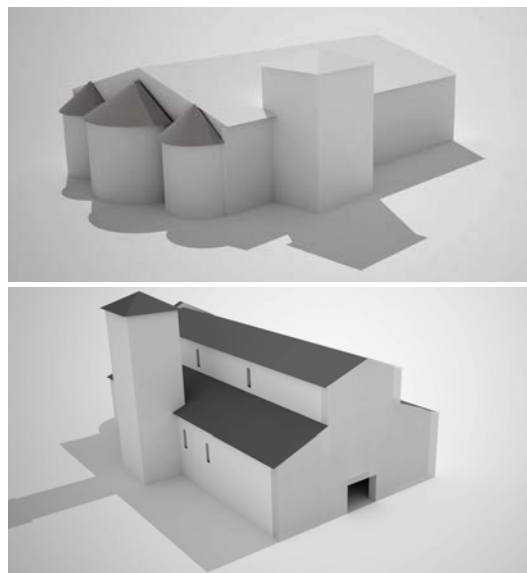
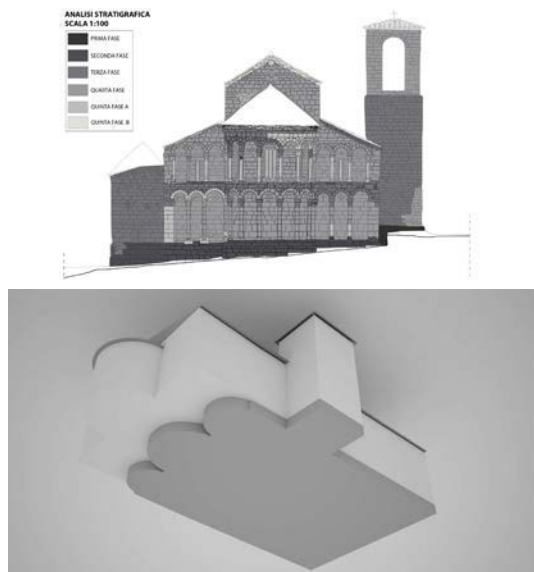


Fig. 3. Analisi stratigrafica per fasi costruttive del prospetto est  
Fig. 4, 5, 6. Modellini evolutivi del complesso

ria definita *context*, l'insieme di più strati organizzati coerentemente costituisce l'elemento strutturale o *feature*. Particolare rilievo assume dunque la scelta del linguaggio grafico usato rimanendo tuttavia estremamente difficoltosa l'adozione di una simbologia univoca ed universalmente accettata a causa della estrema varietà delle situazioni indagate e delle possibilità di approfondimento del livello qualitativo e quantitativo delle indagini in relazione alle peculiarità delle caratteristiche di ogni sito<sup>17</sup>.

### Sintesi delle fasi costruttive individuate nella Pieve di Romena

#### Prima fase (X-XI secolo prime testimonianze 1054):

Costruzione di una chiesa in pietra alberese con blocchetti di piccole dimensioni, squadrati e disposti su filari orizzontali e paralleli (leggendo le tre absidi è possibile notare due fasi costruttive distinte).

#### Seconda fase (metà XII secolo-1152):

Costruzione della chiesa mono-absidata, più grande della precedente, in pietra arenaria (attualmente molto degradata sulla superficie esterna) con blocchi di medio-grandi dimensioni, squadrati e sbalzati su filari orizzontali e paralleli. In questa fase si ipotizza un'altezza più

bassa per il tetto della chiesa (evidente sia dalla lettura stratigrafica che dalle canalette di scolo presenti ai fianchi del campanile), per l'abside centrale e per il piano di calpestio (per quest'ultimo si ipotizza come riferimento la soglia delle porte con arco a tutto sesto visibile in un locale dell'attuale canonica dove viene attestata inoltre la rasatura del muro in alberese per la costruzione di quello in arenaria). Costruzione del campanile ammorso al paramento esterno di una parete laterale e quindi in fase con quest'ultima. In questa prima fase è possibile collocare la costruzione delle due pareti che suddividono la navata centrale da quelle laterali mediante la datazione impressa su uno dei capitelli delle colonne. Attualmente i capitelli, le colonne e probabilmente le pareti soprastanti a questi sembrano appartenere ad un periodo successivo (probabilmente risalente alla 3 o addirittura 4 fase).

#### Terza fase (XVI secolo):

Rialzamento del tetto e dell'abside (in quest'ultimo caso solo ipotizzabile in quanto non leggibile sia all'interno che all'esterno a causa dell'evidente restauro e sostituzione delle pietre e della maggior parte degli elementi architettonici). Si alza anche il piano di calpestio e vengono probabilmente costruiti i colonnati delle navate presenti ancora oggi.

#### Quarta fase (XVII secolo):

Costruzione della nuova facciata a seguito del crollo delle due prime campate e della facciata antica.

#### Quinta fase (XIX-XX secolo):

Ridimensionamento della porta d'ingresso e consolidamento di alcune strutture portanti.

A queste cinque fasi evolutive si aggiungono (in quinta fase) due importanti interventi di restauro uno di fine Ottocento e uno degli anni Settanta del Novecento, come di seguito ripotato:

**Fase quinta A:** interventi di restauro databili intorno alla fine dell'Ottocento che hanno comportato la cerchiatura di molte colonne e la sostituzione dei capitelli.

**Fase quinta B:** inserimento di un cordolo nella parte sommitale delle pareti della chiesa e rialzamento del tetto al piano attuale.

Nell'analisi dell'edificio rimane comunque da chiarire la datazione della costruzione della cella campanaria, identificare con chiarezza quali siano i rapporti stratigrafici di anteriorità o posteriorità della porzione alta della muratura delle navate appoggiate alla parete dell'arco trionfale e quindi posteriori a quest'ultima, e datare con precisione la costruzione dei colonnati.

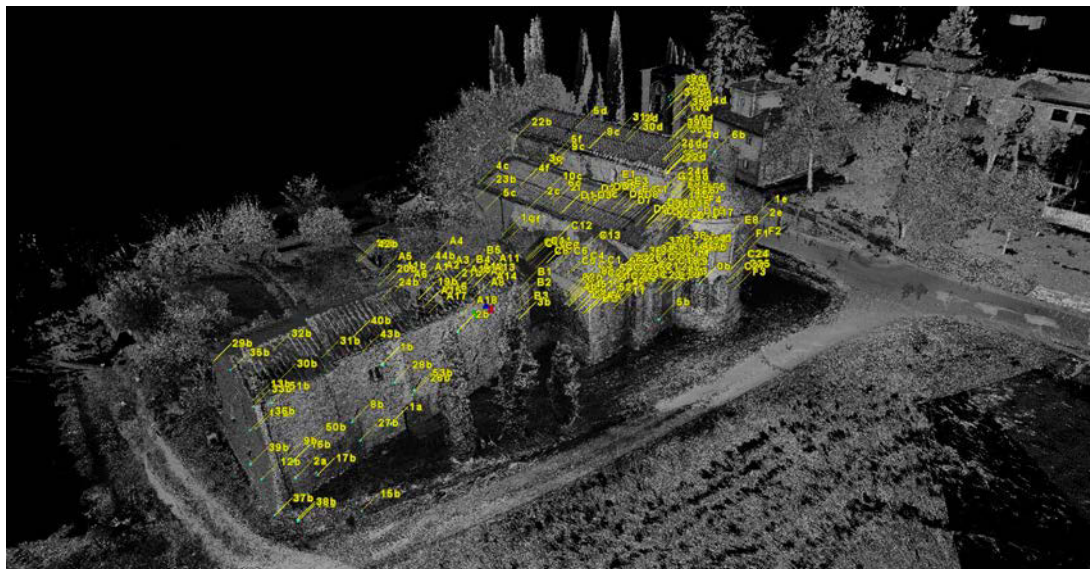


Fig. 7. Nuvola di punti di Romena, in giallo i punti omologhi tra le scansioni necessari per la registrazione

Fig. 8. L'esterno del complesso in modalità di vista fotorealistica



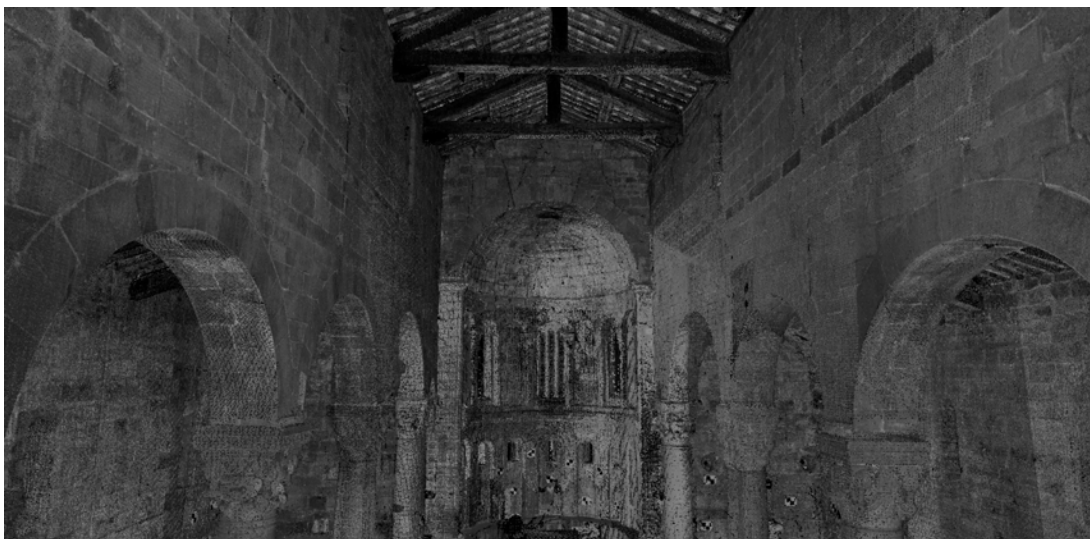
### 3. IL RILIEVO LASER SCANNER 3D DEL COMPLESSO ECCLESIASTICO<sup>18</sup>

#### Morfologia del sito

Il complesso della Pieve di Romena si presenta con uno schema planimetrico ad “T” e la chiesa oggetto del rilievo ha uno schema tipico a tre navate. A causa di un crollo la lunghezza dell’edificio religioso si è ridotta di almeno due campate conferendo al fabbricato una conformazione massiccia dalla quale sporgono, sul lato sinistro, il campanile quadrato, sistemato a circa metà navata, e l’abside semicircolare a chiudere l’edificio verso est. Sul lato destro, all’altezza del presbiterio, inglobata in quello che è il resto del complesso della pieve, è presente una sagrestia quadrata coperta da una pregevole volta a padiglione a sesto acuto. Sotto la chiesa è presente una cripta, dove sono stati eseguiti scavi archeologici dai quali è emersa la zona absidale della chiesa preesistente. Sempre a destra del fabbricato si estendono i locali della Pieve che rappresenta il lato lungo della “T” in cui è inserita la sagrestia di cui sopra e gli altri ambienti, trasformati nella



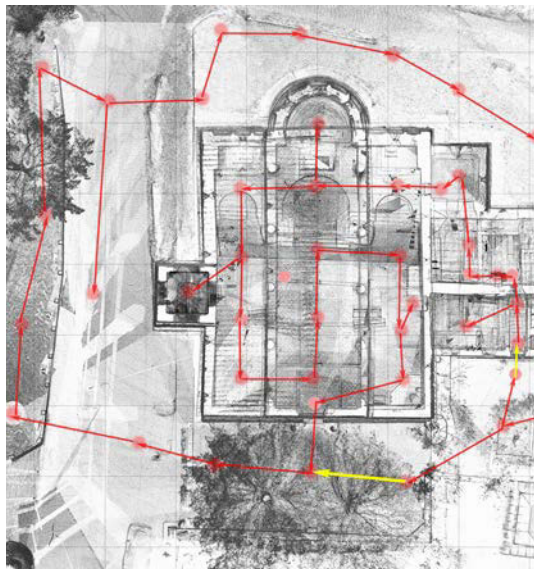
Fig. 9. Snapshot della nuvola tagliata, utilizzata per il ripasso di una sezione  
Fig. 10. Vista della navata centrale



foresteria della comunità religiosa che gestisce il complesso, a seguito di una consistente ristrutturazione. Nel progetto di rilievo laser scanner del complesso sono compresi tutti i locali, ma la restituzione ed il rilievo strutturale sono stati realizzati solo sulla chiesa, il campanile e la sacrestia.

#### **Valutazione delle caratteristiche delle nuove strumentazioni e dei software utilizzati**

Le prime strumentazioni laser scanner utilizzate per il rilievo architettonico erano molto ingombranti e pesanti, utilizzavano un sistema di misurazione con tecnologia a tempo di volo, erano molto lente e potevano effettuare scansioni con angoli di campo limitati. Dopo alcuni anni, intorno al 2004, sono comparse le prime strumentazioni in grado di eseguire scansioni con angoli di campo fino a 360° in orizzontale e circa 270° in verticale, escludendo in pratica dalla ripresa solo la porzione di campo occupata dal treppiede, che hanno semplificato molto le operazioni di ripresa. Sempre nello stesso periodo sono inoltre giunte sul mercato le prime strumentazioni a differenza



di fase, molto veloci (fino ad un milione di punti al secondo), avevano portate limitate, fino a 40 metri, ed i dati presentavano un non trascurabile rumore digitale. Negli ultimi anni, grazie allo sviluppo del mercato ed ad un'accresciuta concorrenza, il rilevatore può disporre di strumentazioni molto più performanti, più leggere e, per quanto riguarda gli strumenti a differenza di fase, con dati meno "rumorosi". Lo sviluppo tecnologico delle strumentazioni è andato di pari passo con lo sviluppo ed il miglioramento dei software per la gestione dei dati di rilievo ed in particolare per la gestione delle registrazioni delle scansioni, introducendo nuovi metodi di riconoscimento dei target in laboratorio, utilizzando sia sistemi di facilitazione per l'individuazione e numerazione manuale, sia sistemi di riconoscimento automatico, mediante il principio dei triangoli simili, o anche di riconoscimento automatico di superfici e forme simili fra loro.

Tale evoluzione tecnologica, assieme alla possibilità di contenere i costi, ha incoraggiato ricercatori e professionisti ad eseguire rilievi laser scanner senza l'ausilio del rilievo topografico; da pri-



ma limitandosi a piccoli e semplici rilievi, come ad esempio le facciate di edifici, per poi passare a rilievi più complessi.

**Progetto di rilievo e paralleli rispetto ai progetti eseguiti con l'ausilio del rilievo topografico**

Il nostro gruppo di studio non è rimasto immune da questa tendenza pur tenendo conto dei rischi che potevano derivare dall'affrontare un progetto complesso senza l'ausilio del rilievo topografico. È stata pertanto ritenuta opportuna la sperimentazione di alcuni protocolli di lavoro che ci permettessero di valutare la reale possibilità di ottenere rilievi, seppur moderatamente complessi ma sufficientemente affidabili anche senza il consueto rilievo topografico.

È appunto in questa prospettiva che si inserisce il rilievo della Pieve di Romena. Il piccolo complesso religioso, infatti si presenta come un agglomerato di due fabbricati, la chiesa e la canonica, dalle dimensioni adeguate al bisogno e dalla morfologia non troppo complessa, caratteristiche ideali per iniziare un'adeguata sperimentazione di nuove metodologie di acquisizione atte

Fig. 11. Planimetria del complesso, in evidenza la poligonale di scansioni effettuate

Fig. 12. La Pieve di Romena con lo scanner Faro focus 3D durante le operazioni di rilievo

ad essere messe a registro abbastanza facilmente senza l'ausilio della topografia.

Per la realizzazione del rilievo abbiamo utilizzato un laser scanner Faro focus 3D, strumento di misura a differenza di fase che all'epoca del lavoro, nell'autunno 2012, vantava circa due anni di vita e pertanto già se ne conoscevano bene le potenzialità. Lo stesso garantisce grande maneggevolezza grazie al peso ridotto, buon dato generale anche se talvolta lievemente rumoroso, portata nominale fino a 120 metri ma con dati effettivamente e pienamente utilizzabili fino a circa 60/65 metri, buona la riflettanza<sup>19</sup> se opportunamente trattata, ottimo sistema di acquisizione delle immagini, veloce e di notevole qualità, elevata velocità di scansione, soprattutto grazie alla grande maneggevolezza. Lo strumento era già stato utilizzato in lavori molto più complessi, come ad esempio il rilievo del castello di Poppi, il rilievo dei centri storici di Poppi, Pontedera e Castel Focognano, casi in cui potevamo tuttavia disporre del rilievo topografico. Nel rilievo del centro storico di Castel Focognano avevamo a disposizione un rilievo topografico "semplificato" in quanto

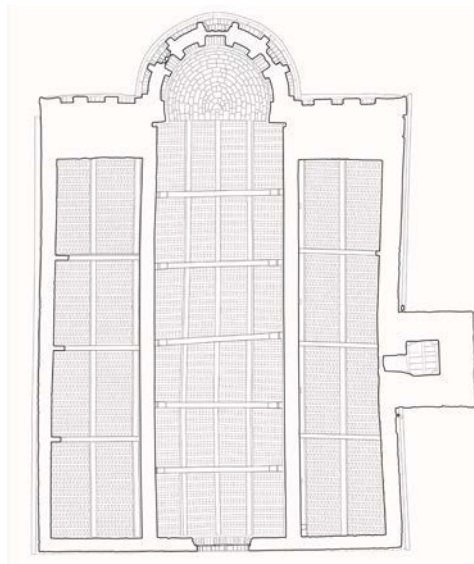
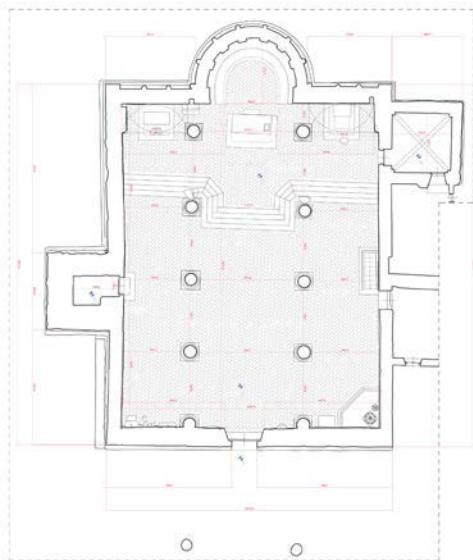


Fig. 13. Pianta del piano terra dell'edificio

Fig. 14. Vista in proiezione ortogonale delle coperture dal basso

non tutte le scansioni avevano i target rilevati, caratteristica presente solo nelle scansioni principali, ovvero in quelle aderenti alla poligonale, mentre per alcuni rami del rilievo esterni alla poligonale topografica avevamo registrato fra loro le scansioni con i soli target, facendo attenzione che in entrambe le scansioni da registrare le mire fossero visibili in più gruppi di tre.

### Strategie utilizzate per raggiungere sufficienti standard di affidabilità

In questo lavoro sono state affinate alcune metodologie di acquisizione che erano state sperimentate seppur marginalmente, in altre esperienze. Un convincimento tuttavia era chiaro, per eseguire un rilievo laser scanner senza il rilievo topografico di appoggio occorrevano più scansioni e più target. Il motivo si evince facilmente poiché, in mancanza di un presidio, se si intendono ottenere tolleranze ed accuratezze simili, occorre qualcosa che sia in grado di sostituirlo anche se parzialmente. Un esempio può aiutare a rendere chiaro il concetto: nel caso si debba rilevare un edificio di forma quadrangolare,

facendo uso del rilievo topografico di appoggio, occorrono almeno due stazioni topografiche per rilevare i target sul fabbricato ed almeno quattro scansioni per rilevare la quattro facciate; in assenza del rilievo topografico sono necessarie le stesse quattro scansioni ed almeno altre quattro posizionate ai quattro spigoli del fabbricato a cavallo delle facciate con sufficiente ampiezza di sovrapposizione con le precedenti per collegare le scansioni dei fronti fra loro.

Nel rilievo della Pieve di Romena è stato previsto, già a livello di progetto, che si sarebbero dovute realizzare molte più scansioni di quelle solitamente necessarie per l'acquisizione dei locali, in quanto a queste andavano sommate quelle per i collegamenti fra i vari ambienti. Oltre alle scansioni andavano previsti molti più target, in primo luogo per la strategia distributiva, che analizzeremo più avanti, ed in secondo luogo per la minore precisione di acquisizione delle strumentazioni laser scanner rispetto a quelle topografiche. Come è noto, infatti, i target utilizzati per questo rilievo, del tipo a centro di massa, vengono acquisiti dallo scanner secondo una maglia

di acquisizione molto fitta quando si è vicini, più rada mano a mano che ci si allontana. Nelle operazioni di riconoscimento, in fase di preregistrazione, il centro del target viene determinato automaticamente dal software di gestione della nuvola di punti in base a opportuni algoritmi che elaborano la forma e la posizione dei centri di massa, la cui affidabilità è funzione della corretta acquisizione, ovvero della distanza del target dallo strumento; per contro con la stazione totale il centro viene esattamente riconosciuto ed acquisito dall'operatore attraverso il cannocchiale di precisione dello strumento che garantisce accuratezze molto elevate. Quindi anche se in presenza di rilievo topografico, il target viene acquisito almeno una volta dal laser scanner, questo avviene da distanze modeste e da posizioni di solito ottimali e per la singola scansione da referenziare. Quando invece si faccia a meno del rilievo strumentale di appoggio, il medesimo target viene acquisito ed utilizzato anche da altre scansioni, nelle quali il laser scanner è di solito più distante e spesso anche in posizione di maggiore scorcio, rendendo pertanto l'operazione meno accurata



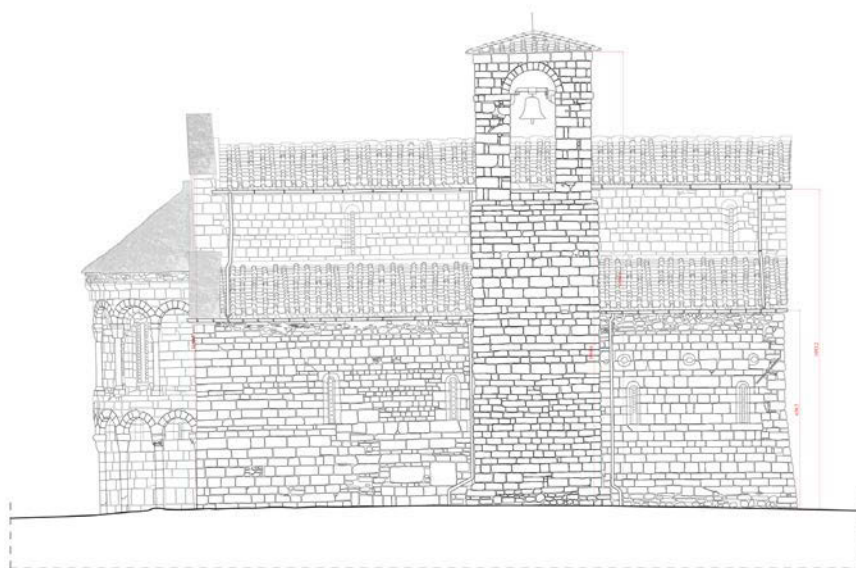
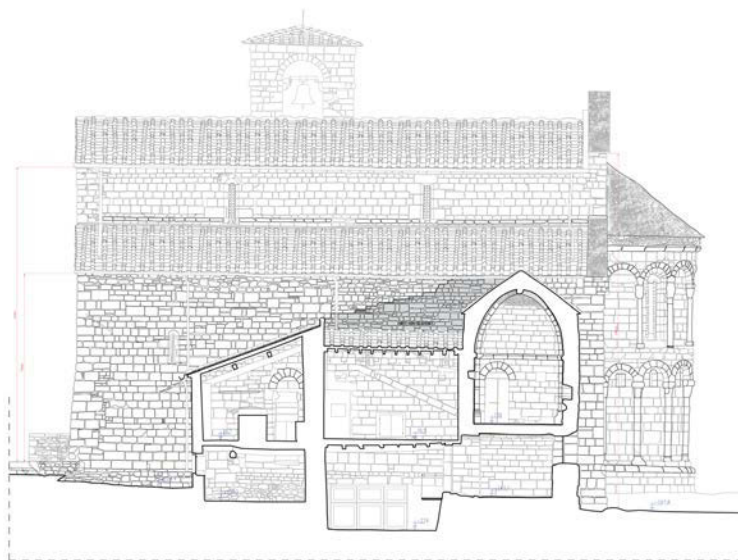


Fig. 15. Prospetto Nord, fil di ferro

Fig. 16. Prospetto Sud, fil di ferro



dal punto di vista metrico. Ne consegue che se aumentiamo il numero di target generale ci si avvale dell'opportunità di averne sempre alcuni in buona posizione acquisiti con più precisione e pertanto più affidabili. Per quanto riguarda invece la posizione stessa dei target, si è visto che la loro ubicazione è indissolubilmente legata alla posizione dello scanner e pertanto, deve essere pensata contestualmente allo sviluppo del piano di acquisizione ed ai movimenti dello scanner sul terreno del rilievo. Da alcuni test che sono stati condotti su manufatti di piccole dimensioni, per sperimentare alcune tecniche di acquisizione prima del rilievo di Romena, è risultato che il posizionamento delle scansioni e conseguentemente dei target doveva rispondere a precisi requisiti. In primo luogo da ogni scansione si dovevano vedere: almeno tre target per referenziare la scansione stessa, almeno altri tre presenti anche nella scansione precedente, e infine almeno ulteriori tre target visibili dalla scansione successiva. Considerazione in apparenza banale ma sostanzialmente molto importante ai fini del raggiungimento di una sufficiente affidabilità del rilievo.

Fig. 17. Sezione trasversale, fotopiano



Molto spesso, infatti, fra due scansioni ci sono solo tre target in comune e questo a volte dà luogo a problemi di accuratezza nella registrazione. Le scansioni, già a livello di progetto, si dovranno prevedere posizionate in una successione tale da consentire la realizzazione di un percorso che potremmo definire in modo poco ortodosso come una poligonale. Infine, è stato osservato come il posizionamento di alcune scansioni "nodo", ovvero scansioni di collegamento poste in punti di snodo e di raccordo fra i vari locali interni e fra l'interno e l'esterno, consentano di controllare eventuali spostamenti eccessivi dovuti ad errori ed imprecisioni di rilievo. Il percorso di acquisizione delle scansioni è importante che termini là dove è cominciato. Infatti è necessario al riguardo che la maglia di acquisizione possa coprire, magari con qualche sovrapposizione, tutto il fabbricato, ma è altrettanto importante che con l'ultima scansione si possano acquisire i target della prima, così da chiudere il "percorso guidato di acquisizione" e da trattare al pari di una poligonale chiusa. Si deve tuttavia tenere presente che gli attuali software di gestione e rototraslazione

delle nuvole di punti non consentono di effettuare compensazioni, come invece è possibile fare con i software di natura topografica.

#### Strategie di registrazione (rototraslazione rigida)

Per la registrazione delle 106 scansioni sono stati utilizzati due software. Nella prima fase le scansioni sono state elaborate attraverso "Faro Scene", programma nativo per la gestione delle nuvole di punti acquisite con laser scanner Faro, nel nostro caso il Focus 3D". Con "Faro Scene" si è provveduto al primo trattamento dati: filtraggio, applicazione delle immagini alla nuvola di punti e prima registrazione di blocchi di circa 15/20 scansioni. Infatti il suddetto software è consigliabile per registrare progetti di piccole dimensioni, in quanto necessita di grandissime quantità di memoria RAM e pertanto con progetti oltre le 20 scansioni le memorie di normali workstation (16 gb) non riescono a sopportare la mole di lavoro richiesta, impedendo di procedere. Occorre precisare che "Faro Scene" seppure riesca, spesso e brillantemente, ad effettuare in modo auto-

matico il riconoscimento dei target a differenza di massa e delle sfere, talvolta, in presenza di condizioni critiche, target troppo lontani o in eccessivo scorcio, non riesce a configurare una corretta registrazione delle scansioni suddette che debbono così essere esportate e registrate con un'altro software.

Nella seconda fase di registrazione le prime rototraslazioni parziali sono state esportate ed importate in un nuovo software: Cyclone, programma per la gestione di nuvole di punti prodotto da Leica Geosystems, che rappresenta senz'altro un modello per chiunque voglia avventurarsi nella progettazione di un software per la gestione dei dati laser scanner. In Cyclone sono state importate anche le sei scansioni per le quali non si riuscivano ad acquisire i target in "Faro Scene". Nel nuovo ambiente virtuale sono stati acquisiti manualmente e in modo semiautomatico i target che sono serviti per rototraslare le registrazioni parziali e le scansioni non registrabili con il software precedente.

Nella rototraslazione rigida delle scansioni parziali è stato necessario procedere con ordine rac-

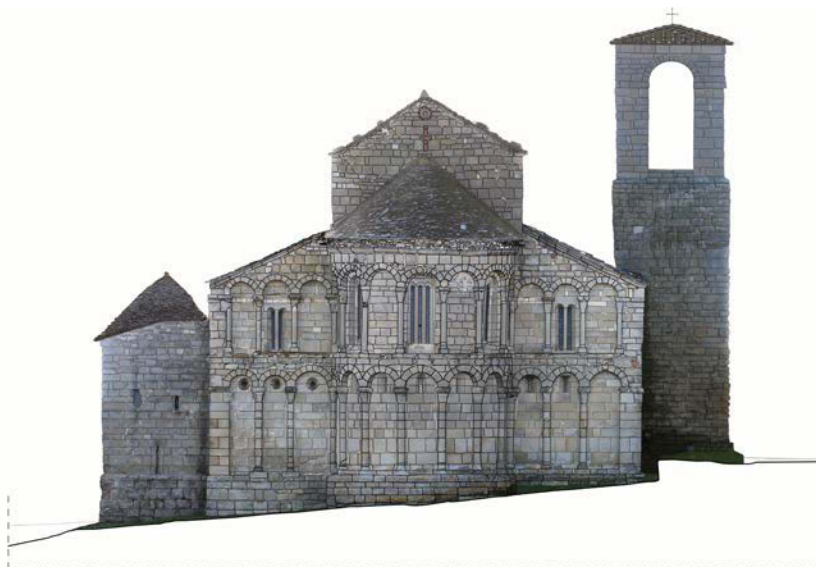


Fig. 18. Prospetto Est, fotopiano

cogliendo le stesse per gruppi di locali omogenei e per piani, suddividendo gli esterni dagli interni, prestando attenzione agli eventuali errori nella registrazione cercando di compensarli manualmente, soprattutto ponendo attenzione a mantenere gli scarti molto ridotti, sempre nell'ordine di pochi millimetri, effettuando continui controlli sulle sezioni effettuate direttamente sulle porzioni di nuvola di punti registrata, soprattutto verificando che non vi fossero doppie linee di sezione.

#### Gestione della nuvola di punti

Il data base di rilievo rappresentato dalla nuvola di punti è stato strutturato, già in fase di registrazione, utilizzando alcuni accorgimenti che hanno consentito di disporre sia di un ambiente virtuale in cui vi fosse l'intero rilievo nella sua versione completa, sia di altri in cui fosse possibile avere il rilievo ripartito secondo schemi che ne facilitassero l'utilizzazione, suddividendo gli interni dagli esterni e raggruppando per gruppi di locali e corpi di fabbrica omogenei. Tali strategie, oltre che a rappresentare una fruizione del rilievo più

elastica, sono servite anche per un migliore controllo in fase di registrazione.

Questa politica di gestione dei dati ha permesso di eseguire tutte le sezioni necessarie alla restituzione 2D, soprattutto facilitando la lettura delle complesse tessiture murarie sia negli esterni che negli interni. Ha agevolato l'esito l'aver eluso la sovrapposizione di proiezioni di più pareti su di uno stesso piano, risultato reso possibile dall'organizzazione del data base in piccole registrazioni suddivise per gruppi di scansioni, separando quelle degli esterni dagli interni e questi a loro volta ripartiti per locali omogenei.

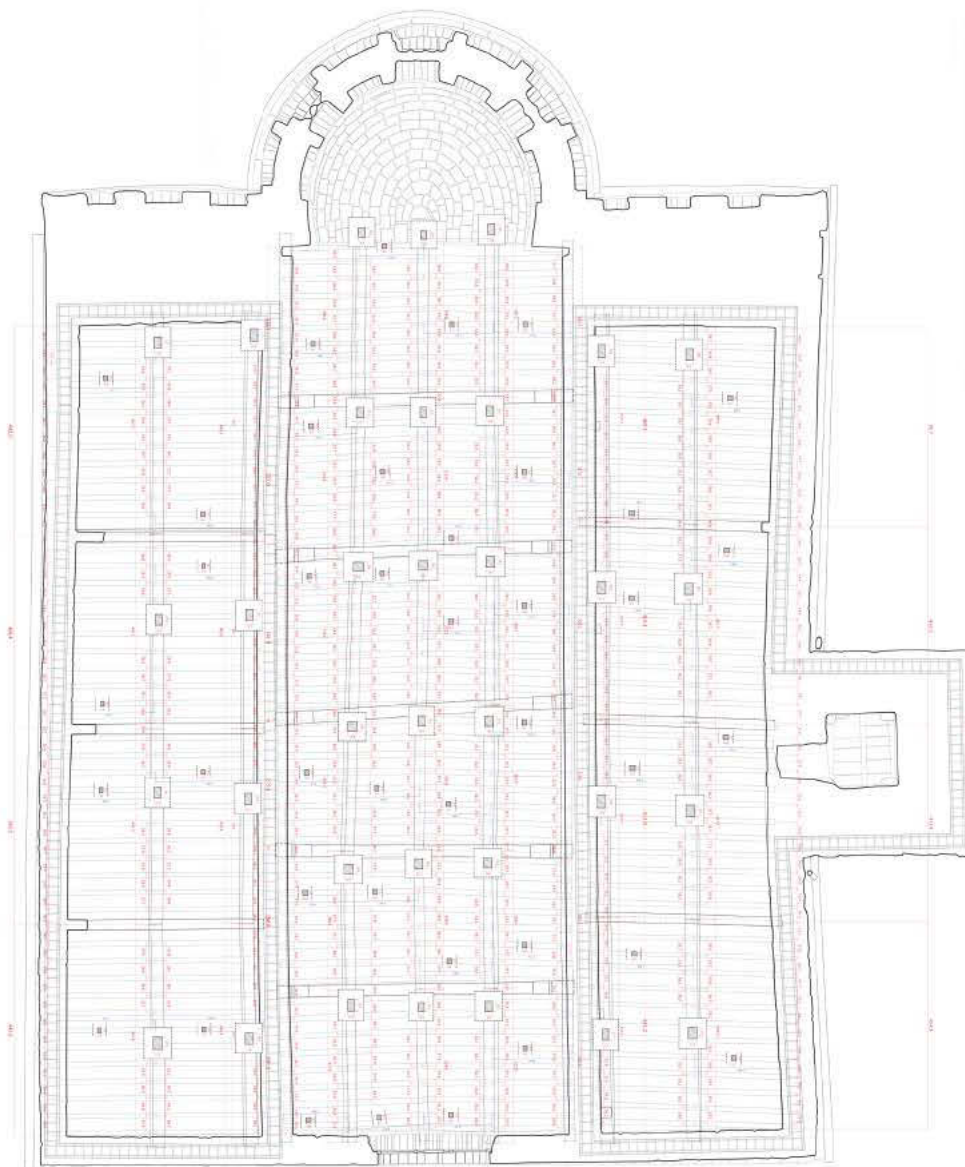
Dalla nuvola dei punti sono stati inoltre estratte delle mappe relative alla "displanarità" dei punti di una parete rispetto ad un piano predeterminato, nel lessico del software Cyclone questa procedura è detta Elevation-map.

#### Metodologie di estrazione dati 2D per la restituzione del rilievo e la preparazione delle carte tematiche

Nella nuvola di punti, per la restituzione 2D e la successiva realizzazione di numerose carte tema-

tiche, sono stati posizionati molti piani di taglio, in corrispondenza dei piani di sezione, orizzontali e verticali. Da questi sono state ricavate numerose immagini rasterizzate<sup>20</sup>, normalizzate e scalate. Tali immagini, opportunamente definite nel lessico del software Cyclone "Ortho-Image", sono state importate in Autocad e, secondo un procedimento<sup>21</sup> ormai largamente diffuso e sperimentato, sono state vettorializzate attraverso un processo di lettura e ridisegno al "filo di ferro". Questa metodologia necessita di un'attenta valutazione e comprensione dell'architettura da ridisegnare, ma consente di eseguire mappature complete sia dei paramenti più o meno complessi sia delle superfici decorate, se abbinata ad otofotopiani realizzati calibrandoli proprio sulla Ortho-Image. La metodologia permette, inoltre, di disegnare con estrema precisione pitture murali di grande complessità anche se realizzate su superfici curve. La notevole quantità di dati raccolti è stata organizzata nelle carte tematiche in cui sono stati rappresentati sia i dati metrici derivanti dalla nuvola di punti sia quelli provenienti da ulteriori indagini diagnostiche.

Fig. 19. Planta delle coperture, rilievo strutturale



#### 4. ANALISI DEI DISSESTI E DELLE PROBLEMATICHE STRUTTURALI<sup>22</sup>

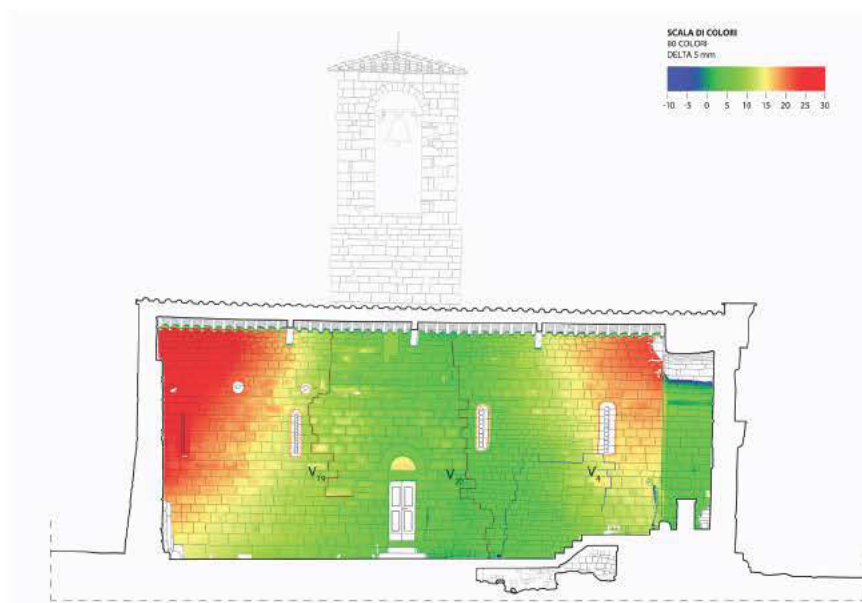
Attraverso l'analisi dei dissesti<sup>23</sup> e dei sistemi fessurativi è stata utilizzata la rielaborazione dei dati forniti dall'*elevation map*, elaborata sulle superfici delle murature in elevato estratte sulla base della nuvola di punti del rilievo laser scanner 3D della chiesa, per sviluppare un'ipotesi di deformazione dei singoli paramenti murari.

L'*elevation map* è un metodo di elaborazione delle superfici estratte della nuvola di punti ottenuta attraverso l'utilizzo del laser scanner 3D che associa una gradazione di colore diversa a seconda della progressiva distanza di ogni punto della nuvola da un piano di riferimento di origine, in questo caso verticale ed assunto come livello 0, misurata rispetto ad uno dei tre assi principali. In questo caso la scala di colori interessata comprende un range di 80 gradazioni dal blu al rosso, ogni variazione di colore corrisponde a un delta orizzontale di 5 mm. Attraverso questo sistema è quindi possibile individuare gli spostamenti e



Fig. 20. Prospetto Nord, analisi delle deformazioni

Fig. 21. Sezione longitudinale analizzante la stessa parete della fig.20 dall'interno, analisi delle deformazioni



le deformazioni dei paramenti murari che appariranno di colore più vicino al rosso tanto più si allontaneranno dal livello di partenza. La scala di colori progressiva si sviluppa sempre secondo la medesima direttrice andando ad identificare con la tonalità del rosso i punti delle pareti che si spostano maggiormente verso l'esterno dell'edificio.

#### Il fronte ovest:

Su questo fronte non si evincono particolari deformazioni: i punti critici sono rappresentati dagli estremi del prospetto. Come si legge dalla mappa delle deformazioni si riscontra un ribaltamento di una porzione del paramento murario verso l'esterno, nel punto di congiunzione con la navata laterale destra. Per quanto riguarda gli apparati fessurativi si nota una lesione nella parte sinistra, nel punto di congiunzione tra la facciata e la parete esterna della navata laterale sinistra, che subisce un movimento rotatorio verso l'esterno. Durante l'intervento di restauro della fine dell'Ottocento sono state inserite tre catene: due sono

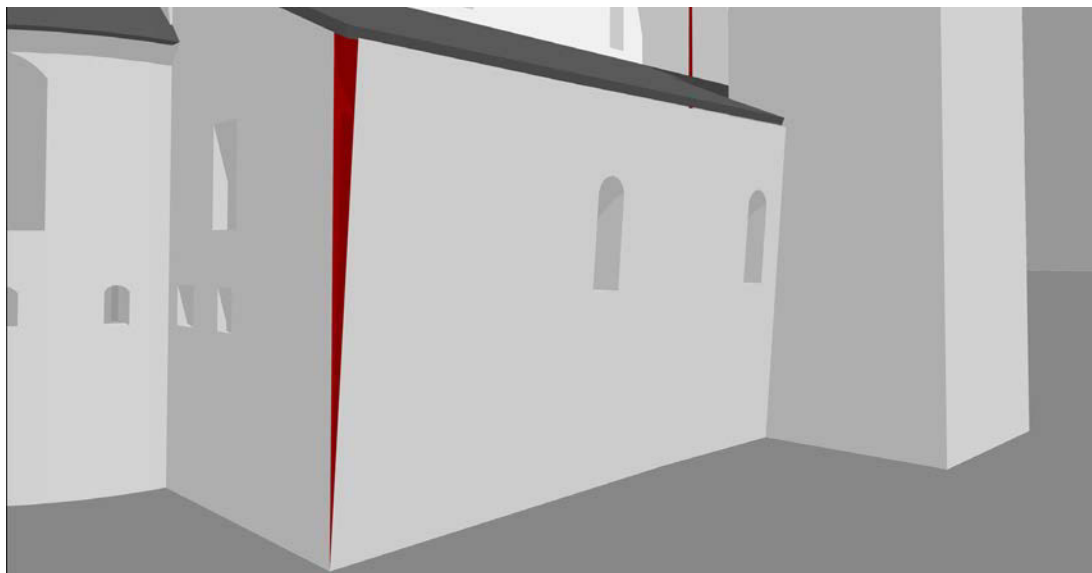


Fig. 22. Prospetto Nord, modello dei dissesti

state disposte longitudinalmente alla pieve e una internamente alla facciata per contenere l'apertura "a libro" dei paramenti murari delle navate laterali.

La facciata originaria insieme a due campate sono crollate a seguito dello smottamento del terreno avvenuto nel 1678, Nel 1729, a causa di un terremoto, la nuova facciata venne fortemente danneggiata tanto da richiedere l'inserimento del barbacane a contenere le spinte.

#### Il prospetto nord:

E' evidente che la torre campanaria e' un corpo di fabbrica indipendente e, comportandosi come tale, non riporta significative deformazioni o ribaltamenti dovuti alla spinta delle coperture. In occasione dei lavori di restauro condotti dalla Soprintendenza di Arezzo negli anni settanta del Novecento e' stato inserito un cordolo in c.a. che collega la struttura del campanile con il muro della navata laterale adiacente, per questo motivo l'effetto della spinta derivante dalla copertura risulta essere

inferiore nelle parti di muro più vicine all'innesto della struttura campanaria. Dal rilievo si evidenzia come la parete laterale esterna sinistra sia nella parte centrale, in corrispondenza del campanile deformata verso l'interno; sembra che il campanile sia scivolato unitariamente verso la chiesa deformandone il prospetto. Come si può dedurre dall'esame dei dati dell'elevation map, la zona maggiormente deformata corrisponde alla localizzazione della volta a botte interna, la cui spinta si somma a quella dovuta alla copertura. Sempre valutando le deformazioni possiamo osservare che si ha un forte spostamento del paramento murario anche nella parte adiacente alla facciata, questo dissesto doveva essere presente già prima dei restauri ottocenteschi, infatti e' stata inserita una catena in ferro per contrastare il ribaltamento dei fronti dell'edificio. Nella parte superiore del muro della navata centrale non si riscontrano particolari ribaltamenti verso l'esterno, gli apparati fessurativi documentati scaturiscono dal movimento della parte tergale, dal disse-

sto della facciata e dalla rotazione delle colonne. Andando a analizzare il sistema fessurativo interno appare evidente che le due lesioni principali corrispondono all'attacco dei muri del campanile e sono dovute entrambe al ribaltamento dei paramenti murari della pieve. La terza lesione corrisponde alla discontinuità materica tra i filari in arenaria della chiesa attuale e una parte di muro con pezzatura minuta e disomogenea in pietra alberese, risalente alla prima fase della pieve.

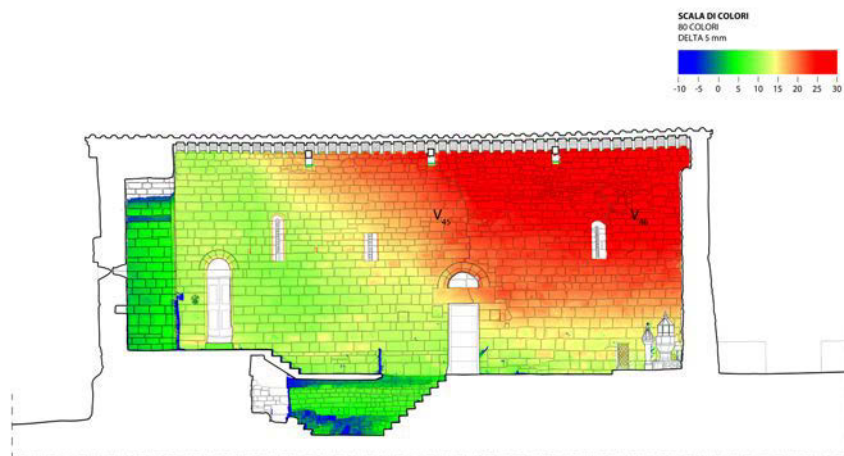
#### Il prospetto est:

Non si evidenziano deformazioni particolarmente accentuate in corrispondenza della navata sinistra, in accordo con quanto riscontrato attraverso l'analisi della parete interna corrispondente. Nella navata destra, notiamo al contrario una forte deformazione del paramento murario esterno causata dal peso della copertura che è aggravata dal cordolo in c.a. La parte superiore della navata centrale è deformata in accordo con il ribaltamento del paramento interno corrispondente. E' da



Fig. 23. Prospetto Sud, analisi delle deformazioni

Fig. 24. Sezione longitudinale analizzante la stessa parete della fig.24 dall'interno, analisi delle deformazioni



notare come le colonnine e le arcature della parte inferiore e superiore del catino absidale non siano in asse tra loro, fatto da ricollegare a un probabile rialzamento del catino in epoca successiva alla costruzione della prima abside. Questa ipotesi trova conferma se si analizzano i sistemi fessurativi presenti, in quanto le lesioni si fermano al primo livello pur avendo, verso dall'alto al basso, dimostrando così di non essere dovute al peso della copertura attuale, quanto piuttosto di una precedente copertura.

### Il prospetto sud:

Per questo fronte non è stato possibile effettuare una analisi delle deformazioni esaustiva in quanto gli edifici accostati alla chiesa creano un "cono d'ombra" che non permette la lettura delle murature. Inoltre la presenza di arredi e suppellettili nei vani interni ha impedito di leggere in maniera adeguata il paramento murario. Dall'analisi del corrispettivo paramento murario interno invece è possibile individuare il ribaltamento verso l'esterno del

## SCALA DI COLORI

80 COLORI

DELTA 5 mm

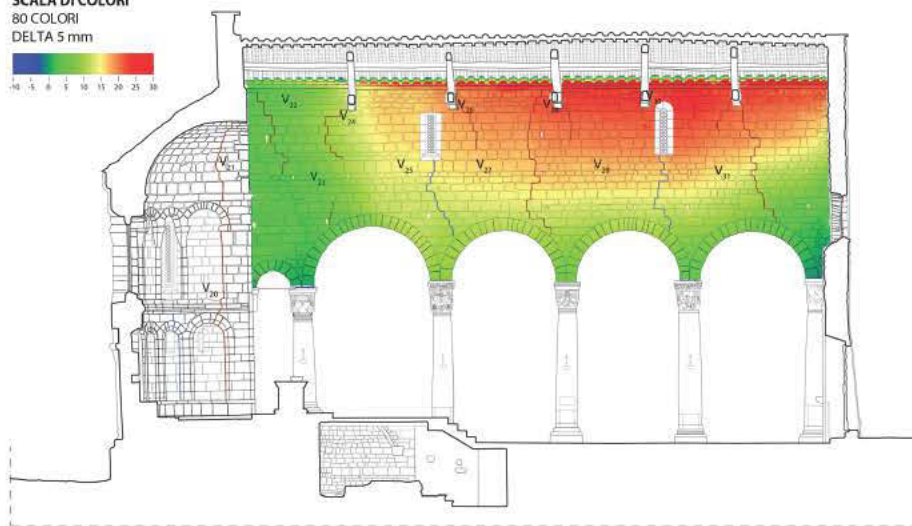
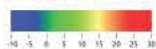
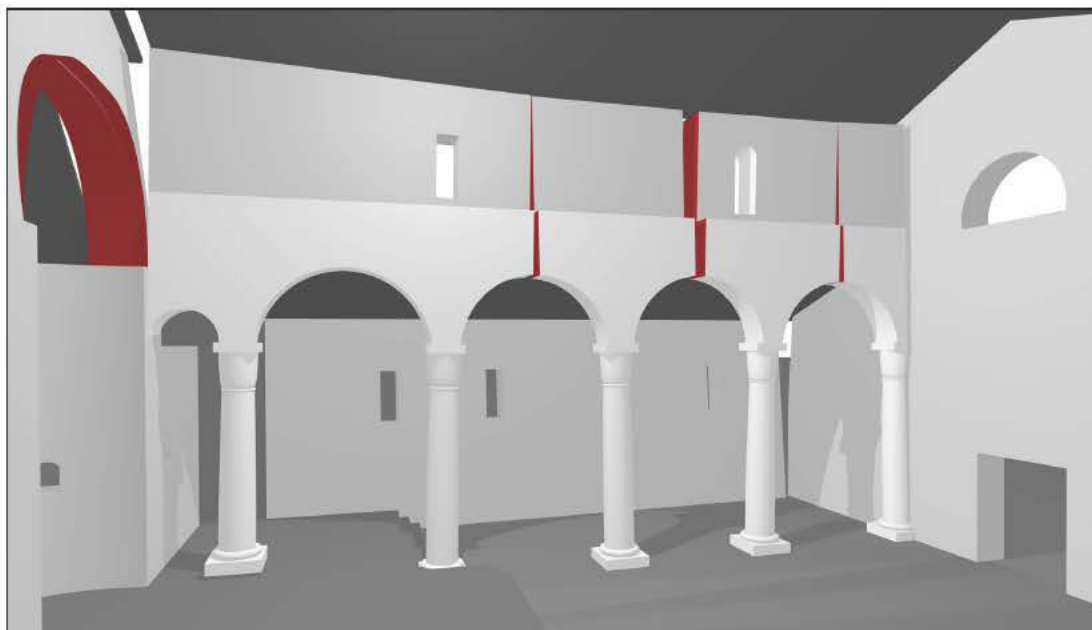


Fig. 25. Sezione longitudinale passante al centro della navata centrale, analisi delle deformazioni

Fig. 26. Modellino del dissesti del sistema colonnato della navata destra



fronte che ha il suo punto massimo di ribaltamento in corrispondenza del fronte principale. Andando ad analizzare il sistema fessurativo risulta evidente una lesione che colpisce la parte centrale del paramento murario, in corrispondenza della porta che collegava la pieve ai locali della canonica, un'altra lesione si riscontra in corrispondenza dell'architrave della terza finestra. Nella porzione di parete compresa tra le due lesioni è evidente una discontinuità materica tra i filari in arenaria della chiesa attuale e una parte di muro con pezzatura minuta e disomogenea. La presenza di un movimento rotatorio della facciata verso l'esterno, probabilmente causato da un mancato ammorsamento di questo elemento con il paramento murario adiacente, causa il ribaltamento del paramento murario.

**Sistema colonnato navata destra:**

Il colonnato è interessato da una rotazione dei piedritti dovuti al trascinarsi delle arcate da parte del movimento del fronte est. Risulta essere particolarmente evidente la ro-



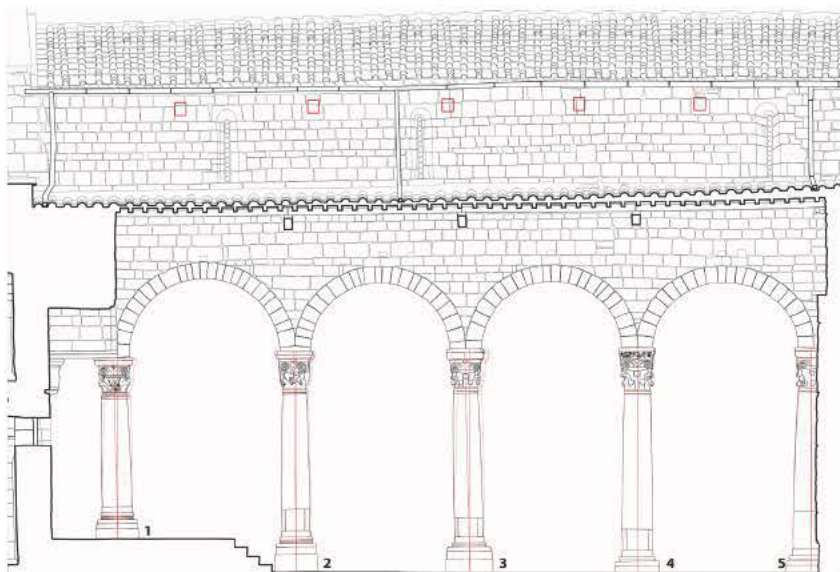
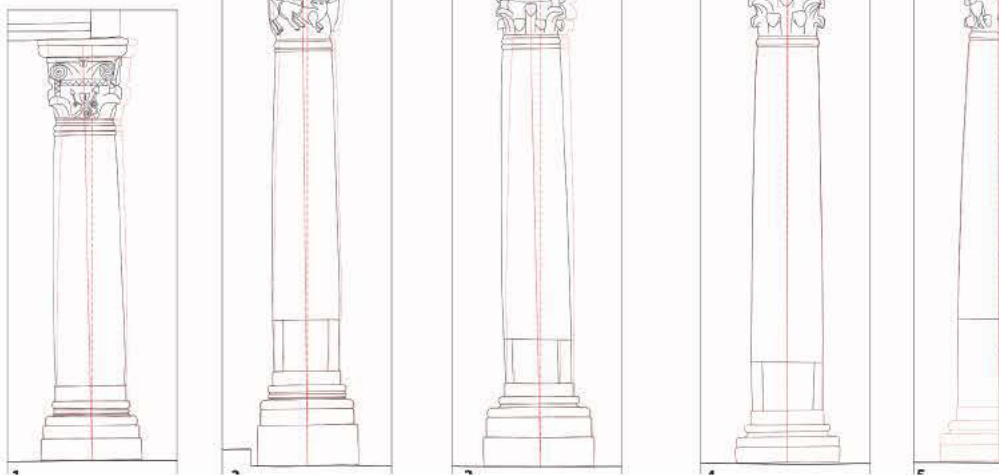


Fig. 27. Sezione longitudinale passante al centro della navata sinistra, analisi del disassamento delle colonne

Fig. 28. Particolare del fuori piombo del sistema colonnato, in rosso la colonna ortogonale al terreno

**ABACO COLONNE**  
IN NERO SONO RIPORTATE LE COLONNE  
CON L'INCLINAZIONE ATTUALE, MENTRE  
IN ROSSO È EVIDENZIATA LA POSIZIONE  
CHE LE COLONNE DOVREBBERO AVERE  
PER RISULTARE ORTOGONALI AL PIANO  
DI CALPESTIO

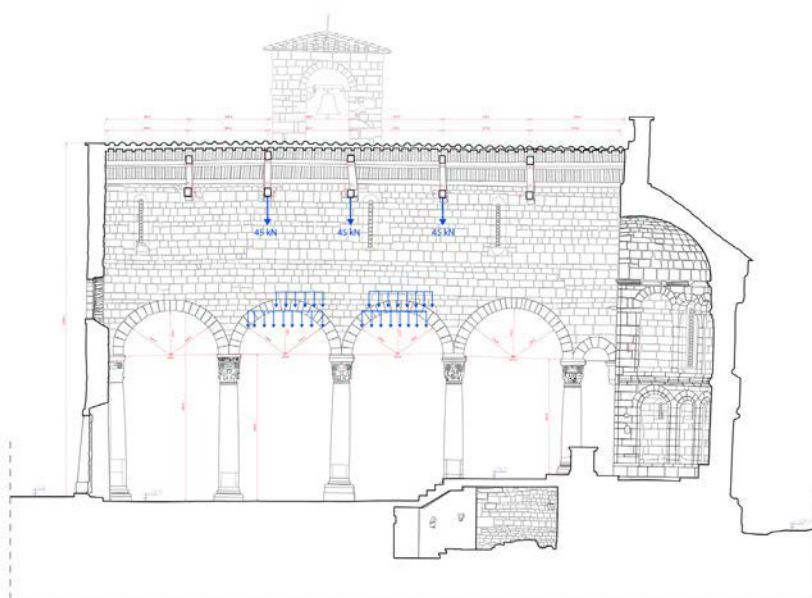
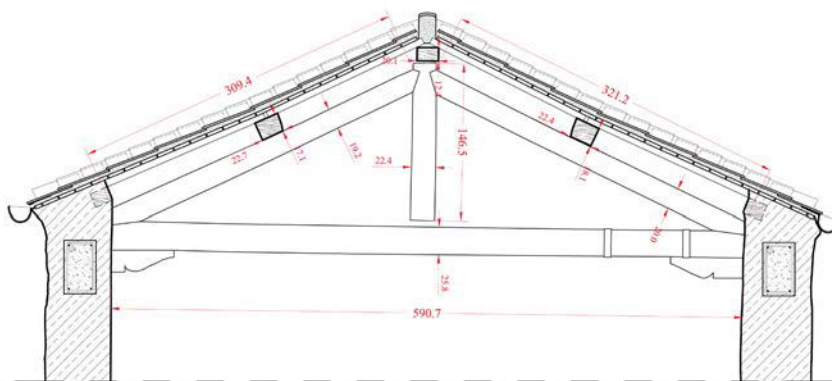


tazione delle ultime tre colonne più vicine alla parete d'altare che provocano evidenti lesioni passanti in corrispondenza del concio di chiave della quarta arcata da sinistra. L'intero paramento murario è interessato da lesioni dovute al sistema di coperture; queste hanno inizio in corrispondenza delle mensole delle capriate biforcandosi successivamente a destra e a sinistra delle stesse. Analizzando i dati dell'elevation map del lato del paramento rivolto verso la navata laterale non sono presenti deformazioni importanti; l'unico punto in cui si riscontrano lievi deformazioni coincide con la zona più vicina alla facciata che, essendo interessata da un modesto fenomeno di rotazione, influenza il paramento murario adiacente. Nella stessa zona, nel fronte rivolto verso la navata centrale, si notano dissesti più accentuati nella stessa porzione di muratura facendo ipotizzare una deformazione discorde dei due fronti del setto murario.

#### Sistema colonnato navata sinistra:

Il paramento murario sopra le arcate presenta, nel fronte rivolto verso la navata centrale, im-

Fig. 29. Capriata più svantaggiosa utilizzata per i calcoli di verifica strutturale  
Fig. 30. Sezione longitudinale passante per la navata centrale, in evidenza i carichi distribuiti dalle capriate sulle arcate



portanti deformazioni: queste sono dovute sia al peso del sistema di coperture sia al disallineamento delle capriate rispetto alle colonne. Il mancato allineamento tra capriate e colonne produce inoltre significative lesioni che partono dall'imposta delle capriate e arrivano alle reni degli archi. Le colonne risultano ruotare a coppie verso il centro delle arcate evidenziando un sistema di dissesti dovuto al peso e al disallineamento delle capriate.

Sul finire dell'Ottocento tutte le colonne, nella terzo inferiore, sono state restaurate attraverso l'inserimento di un placcaggio in ferro. Nell'intervento di restauro degli anni '70 del Novecento sono stati inseriti due cordoli in c.a., uno per la navata centrale e l'altro per la navata laterale destra.

Per quanto riguarda la parte alta della navata centrale non è stato possibile effettuare analisi dettagliate basate sugli elaborati dell'elevation map a causa della particolare conformazione del fabbricato che ha, per questo, determinato un cono d'ombra all'interno della nuvola di punti tridimensionale.

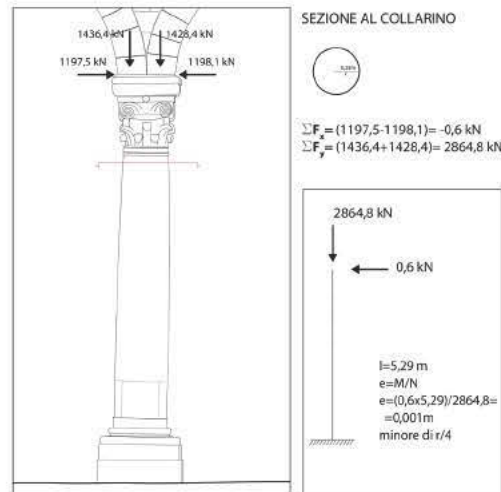


### Analisi strutturali

Per meglio comprendere il comportamento statico dell'edificio sono state redatte le verifiche delle capriate, dell'arco e del piedritto. Si fa riferimento ai "criteri generali per la verifica e sicurezza delle costruzioni e norme tecniche per i carichi e sovraccarichi" di cui al decreto ministeriale 12 febbraio 1982 e successive integrazioni e modificazioni. A parte il metodo semplificato la norma, in base al D.M. 12 febbraio 1982 ammette l'impiego di due differenti metodi di verifica e cioè quello delle tensioni ammissibili e quello semiprobabilistico agli stati limite. Il secondo, che è nato in questi ultimi decenni, valuta lo stato raggiunto da una struttura quando non è più in grado di assolvere la sua funzione, oppure non soddisfa le condizioni di sicurezza.

Per realizzazione delle verifiche si determinano analiticamente gli effetti delle azioni di calcolo i quali dovranno risultare minori delle corrispondenti resistenze di calcolo. Con tale metodo, determinando opportuna-

### VERIFICA A SCHIACCIAMENTO DELLA COLONNA



AREA DELLA SEZIONE:  $2X0,28X3,14 = 1,75 \text{ mq}$

$N/A: 2864,8 \text{ kN} / 1,75 \text{ mq} = 1637,02 \text{ kN/m}^2$

mente i vari coefficienti su basi statistiche, si ha la possibilità di pervenire ad una valutazione della sicurezza più realistica rispetto al metodo classico delle tensioni ammissibili. Di norma per l'effettuazione delle verifiche si considerano più condizioni di carico scelte opportunamente e per ciascuna di queste condizioni le azioni verranno moltiplicate per dei coefficienti di combinazione valutati anch'essi sulla base di considerazioni di natura statistica.

Le componenti di sollecitazione dovute alle azioni permanenti e quelle provocate dalle azioni variabili devono valutarsi separatamente per poi essere combinate in sede di verifica nel modo più sfavorevole.

La verifica delle capriate<sup>24</sup> è stata realizzata per comprendere se il loro dimensionamento risultasse idoneo ai carichi che deve sopportare e per sapere che peso carica sulla muratura sottostante. Questa ha messo in evidenza quanto i carichi siano poco rilevanti<sup>25</sup> avvalorando la tesi che le lesioni siano dovute al non allineamento delle capriate

Fig. 31. Schemate del software di calcolo utilizzato per la verifica dell'arcata  
 Fig. 32. Verifica a schiacciamento della colonna

con le sottostanti colonne. Il valore dei carichi trasmessi agli appoggi è di 45kN e risultano verificate sia il tirante che il puntone. La verifica dell'arco è stata svolta partendo dalla scomposizione dei carichi concentrati localizzati negli appoggi delle capriate linee della copertura in carichi distribuiti uniformemente. Per individuare l'area di influenza dei vari carichi si sono tracciate le direttrici a + e - 30° fino alle reni degli archi. Successivamente si è diviso il carico concentrato per la lunghezza di tali direttrici trovando in questo modo il valore del carico distribuito utile ai fini del calcolo<sup>26</sup> come richiesto dal software<sup>27</sup>.

La curva delle pressioni degli archi rimane interna al terzo medio non evidenziando problematicità interne anche se le lesioni presenti in più punti ci dicono che probabilmente l'insieme dei carichi e delle spinte crea delle interazioni che generano le lesioni visibili, probabilmente anche a causa della rototraslazione delle colonne che rendono l'appoggio poco stabile.

## NOTE

1 Il paragrafo è redatto da Giovanni Minutoli

2 Il lavoro di rilievo, di restituzione e di analisi è stato redatto dagli studenti dei corsi di Rilievo dell'Architettura (prof. Stefano Bertocci) e Laboratorio di Restauro I e II (prof. Silvio Van Riel) coordinati per gli aspetti relativi al rilievo dall'arch. Ph.D. Giovanni Pancani, per gli aspetti relativi all'analisi strutturale e il restauro dall'arch. Ph.D. Giovanni Minutoli, del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze.

3 A. BATISTONI, I Pivieri dell'alto Casentino, Arezzo 1992, pp. 284-299. 4 lvi, p. 285

5 Ibidem

6 lvi, p. 288

7 lvi, p. 290

8 lvi, p. 292, "nel 1678 per lo smottamento del terreno verso il sottostante fosso delle pillozze, rovinarono irrimediabilmente la facciata e due arcate".

9 lvi, p. 291, il 16 Novembre 1599 un terremoto "ne la Pieve di Santi Pietro spacò la nave et caschò l'arco del reliquiare di sopra".

10 lvi, p. 294, nel 1729 un altro terremoto recò danni molto gravi alla nuova facciata, al presbiterio e al campanile che fu allora ribassato.

11 Il paragrafo è redatto da Stefano Bertocci.

12 Cfr. A. CARANDINI, Storie dalla terra. Manuale dello scavo archeologico, Bari, 1981; C. E. HARRIS, Principi di stratigrafia archeologica, trad. it., Roma, 1983; P. DELOGU, Archeologia Medievale: un bilancio di vent'anni, in "Archeologia Medievale", XII, Firenze, 1986, p. 501; R. FRANCOVICH, R. PARENTI (a cura), Archeologia e restauro dei monumenti, Firenze, 1988;

13 Cfr. S. BERTOCCI, M. BINI, Manuale di Rilievo Architettonico ed Urbano, Città Studi editrice, Torino, 2012. Cfr. anche: R. TAGLIABUE, Architetto e Archeologo, confronto fra campi disciplinari, quaderno n. 5 del Dipartimento di Conservazione e Storia dell'Architettura della Facoltà di Architettura del Politecnico di Milano, 1993; cfr. anche M. MEDRI, Manuale di rilievo archeologico, Roma - Bari, 2003.; S. BERTOCCI, Analisi archeologica ed architettonica di edifici campione a Gravina in Puglia (con la collaborazione di E. Donato), in AA. VV. Il Parco della pietra e dell'acqua, Gravina in Puglia, 2000, pp. 165 - 184; S. BERTOCCI, Luce colore e geometrie nell'architettura rupestre a Petra, in Colore Luce e Materia in Architettura, a cura di E. Mandelli, Alinea editrice, Firenze, 2000, pp. 23 - 28; S. BERTOCCI, La torre di Galatrona, comune di Bucine, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Progettazione dell'Architettura, S. Giovanni Valdarno, 2001; M. BINI, S. BERTOCCI, Castelli di Pietre- Aspetti formali e materiali dei castelli crociati nell'area di Petrai in Transgiordania., Polistampa, Firenze, 2004.

14 G. P. BROGLIO, Archeologia dell'edilizia storica, Como, 1988.

15 A. CARANDINI, Urbanistica, architettura e archeologia, in Urbanistica, n. 88, Milano, 1987, pp. 10 - 12 e pp. 120 - 122. R. Parenti, Le strutture murarie: problemi di metodo e prospettive di ricerca, in "Archeologia medievale", X, 1983, pp. 332 - 338.

16 R. Parenti, Le tecniche di documentazione per una lettura stratigrafica dell'elevato, in Archeologia e restauro dei monumenti, a cura di R. Francovich e R. Parenti, ed. All'insegna del Giglio, Firenze, 1988, pp. 249 - 279

17 La lettura stratigrafica della Pieve di Romena è stata condotta dagli studenti del corso di Laboratorio di Restauro I e II, coordinati per l'analisi stratigrafica, dal dott. Andrea Arrighetti dell'Università degli Studi di Siena.

18 Il paragrafo è redatto da Giovanni Pancani

19 Per riflettanza, si intende l'energia elettromagnetica residua, (da quella inizialmente emessa con il raggio laser) che il sensore del laser rileva, per ogni punto misurato. La riflettanza è comunemente funzione di diverse variabili quali ad esempio, la distanza dello strumento dalla superficie misurata, le condizioni atmosferiche, l'angolo di incidenza del raggio con la superficie misurata, le caratteristiche della superficie stessa come il colore, il materiale, il grado di opacità.

20 «Con il termine rasterizzazione si intende il processo di discretizzazione che consente di trasformare una primitiva geometrica definita in uno spazio continuo 2D nella sua rappresentazione discreta, composta da un insieme di pixel di un dispositivo di output» R. Scateni, P. Cignoni, C. Montani e R. Scopigno, Fondamenti di Grafica Tridimensionale Interattiva, McGraw-Hill Italia, Milano, 2005.

21 Alla messa a punto di questo procedimento è stata dedicata una tesi di dottorato, soprattutto per quanto riguarda la digitalizzazione 2D di superfici voltate decorate, G. Pancani, 2005, I Quartieri Estivi di Palazzo Pitti, gestione di una banca dati di rilievo integrato, tesi di dottorato di ricerca in Rilievo e rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente, XVIII ciclo, Firenze, 2005.

22 Il paragrafo è redatto da Giovanni Minutoli

23 Cfr. F. DOGLIONI, A. MORETTI, V. PETRINI, Le chiese e il terremoto: dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione, Trieste 1994; A. GUFFRÈ, La meccanica nell'architettura, Roma 2003.

24 E' stata verificata la capriata con sezioni minori e interassi maggiori.

25 In media 3000 kg/mq.

26 Pur non essendo i vari carichi concentrati di uguale valore abbiamo utilizzato in ogni caso il valore di 45kn, dato più critico in quanto derivante dalla capriata di luce maggiore e sezione minore.

27 La verifica in quanto tale è stata svolta mediante l'aiuto del software di calcolo "arco" sviluppato dall'Università di Brescia