

Archeologia e Calcolatori
24, 2013, 209-229

LASER SCANNER 3D PER LO STUDIO E LA CATALOGAZIONE DELL'ARCHEOLOGIA MEDIEVALE: LA CHIESA DI SANTA CROCE IN BERGAMO

1. INTRODUZIONE

L'utilizzo dei nuovi sensori ottici attivi ha profondamente modificato le metodologie del rilievo per i beni culturali, considerati nella loro accezione più ampia (CARBONARA 2008; DOCCI 2009; FIORANI 2009). La conservazione e la valorizzazione del patrimonio richiedono un'approfondita documentazione sia in termini di forma, colore e geometria sia di caratteristiche più propriamente storico-costruttive e l'avanzamento incessante della ricerca scientifica garantisce, oggi, nuove possibilità e nuove tecnologie di cui appare indispensabile potersi (e sapersi) avvalere, in un'ottica di sperimentazione responsabile e cosciente (GUIDI, RUSSO, BERALDIN 2010; CARDACI, VERSACI 2010, 2012). In ambito archeologico, al rilievo automatico 3D è ormai riconosciuto un «valore aggiunto» rispetto alle prassi operative tradizionali e «in particolare appare sempre più chiaro il contributo attivo che tali tecnologie possono fornire nella fase interpretativa, nella conservazione e archiviazione dei dati e nella valorizzazione del bene attraverso il web» (RUSSO, REMONDINO, GUIDI 2011, 169). Tutti aspetti che concorrono certamente a un miglioramento generale dell'informazione e alla crescita della ricerca in tale settore.

D'altra parte, pur considerando la rapidità del procedimento, l'accuratezza della misura e il contenuto informativo dei dati registrati (FIORINI 2008), non sono mancati gli inviti a riflettere sul ruolo che il laser scanning può rivestire nel mondo dell'archeologia, poiché, in particolare nel caso degli scavi archeologici, «alla luce delle sperimentazioni fino ad ora conosciute, crediamo non sia ancora ben delineato il ruolo di questi nuovi sistemi di documentazione» (FIORINI 2008, 176). Ruolo che, invece, sia per il rigore scientifico che lo informa così come per la flessibilità di cui la scansione laser 3D beneficia, appare opportuno chiarire e positivamente consolidare, anche attraverso la conduzione di nuovi studi e approfondimenti.

In tale ottica, è stata portata avanti l'attività di ricerca che qui si illustra e che concerne la chiesa di Santa Croce in Bergamo. Finalizzata all'intervento di restauro sull'opera, essa ha inteso fornire, attraverso metodologie innovative di alta precisione e in tempi estremamente ridotti, quell'apporto in termini di conoscenza storica, geometrica, costruttiva e stratigrafica, che appare sostanziale per le successive operazioni di conservazione, catalogazione e promozione. L'esperienza ha permesso la realizzazione del modello

tridimensionale completamente misurabile della fabbrica architettonica, altrimenti non ottenibile (o per lo meno, molto difficilmente e con precisioni inferiori) con le metodologie tradizionali, contribuendo a chiarire aspetti relativi alla fase di edificazione del monumento e alle tecniche impiegate. Tale caso di studio costituisce un utile esempio dell'applicazione di queste tecniche non solo all'archeologia, ma anche all'archeologia dell'architettura, perché la chiesa era già stata rilevata come edificio a sé in passato, in occasione del suo isolamento dalle "superfetazioni" e del conseguente restauro (ANGELINI 1940), e il suo piano inferiore è stato messo in luce solamente grazie a scavi archeologici recenti (FORTUNATI, VITALI 1999-2000; GHIROLDI 2007).

È stato, quindi, possibile analizzare vantaggi e criticità nell'uso delle scansioni laser 3D in un contesto complesso e sotto punti di vista diversi. Il confronto tra le proiezioni ortografiche ottenute e i rilievi eseguiti negli anni '30, poi integrati con metodi tradizionali in occasione degli ultimi lavori di sistemazione dell'area, non è un semplice esercizio di comparazione metrica e di ricerca della precisione (peraltro, non privo di motivi di interesse), ma un'occasione importante per verificare in quali aspetti il rilievo effettuato con laser scanner "produca" informazioni utili all'interpretazione archeologica e alla prassi restaurativa.

2. LA CHIESA DI SANTA CROCE A BERGAMO

La piccola cappella romanica di Santa Croce di Bergamo si trova in un cortile tra la Curia Vescovile e l'angolo sud-occidentale della cattedrale di Santa Maria Maggiore (Fig. 1), cioè nel contesto archeologico e architettonico plurisecolare della cattedrale doppia (PIVA 1990), che anche recentemente ha restituito importanti resti archeologici (FORTUNATI, GHIROLDI 2006). Sono indubbi pertanto il valore e la "densità" di significati di quest'area per la storia della città.

Caratterizzata da una particolare planimetria quadrilobata, la chiesa si sviluppa su due livelli principali, privi di comunicazione interna in quanto divisi da un sistema voltato, e un tiburio. Il piano superiore, ritmato da sottili lesene collegate da una serie di tre piccoli archi in laterizio e provvisto di due monofore strombate (oltre che, molto probabilmente, di un portale sul lato O), fu messo completamente in luce negli anni '30 del secolo scorso da Luigi Angelini nell'ambito del suo piano di risanamento per Bergamo Alta (ANGELINI 1940, 1963; ANGELINI 1989), quando «il piccone ha demolito le ultime sovrastrutture che deturpavano e comprimevano la chiesetta» (ANGELINI 1940), ovvero alcune strutture addossate (Fig. 2). Quello inferiore è invece privo di lesene, ha una porta (difesa da un muro che lo pone in rapporto diretto con la Curia e non con il passaggio "pubblico") a livello del piano di calpestio medievale e due finestre rettangolari, ed è ora visibile grazie agli

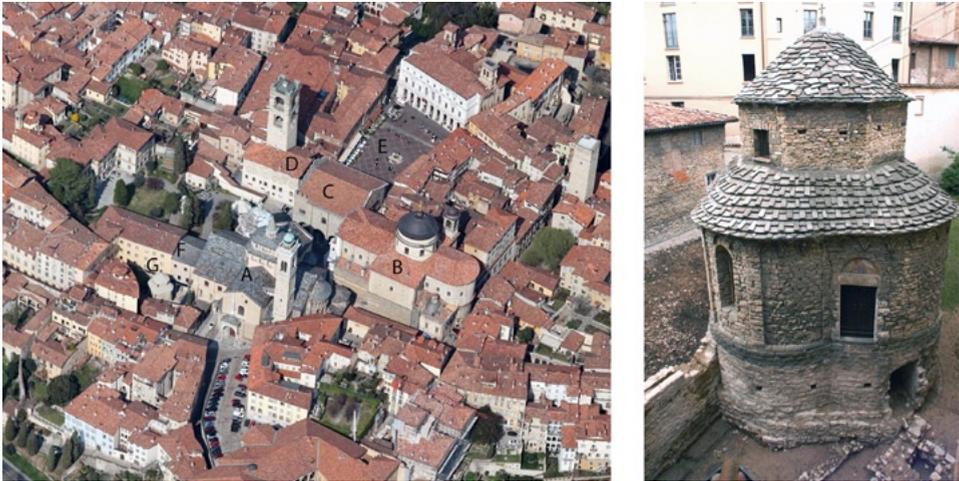


Fig. 1 – Il centro storico di Bergamo: a) Cattedrale di Santa Maria Maggiore; b) Duomo-cattedrale di San Vincenzo; c) Palazzo della Ragione; d) Palazzo del Podestà e Torre del Comune; e) Piazza Vecchia; f) Palazzo Episcopale; g) Santa Croce e la chiesa di Santa Croce a fine scavo archeologico (2004) (foto Studio Arch. Calzana).

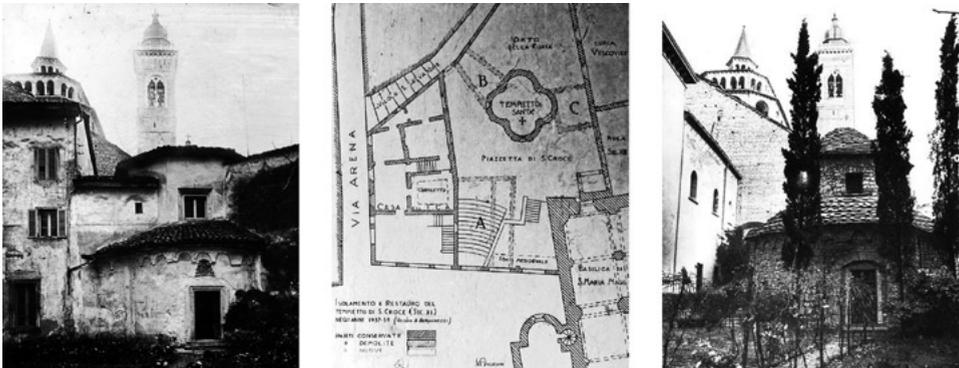


Fig. 2 – La chiesa di Santa Croce negli anni '30, prima dell'intervento di "liberazione" e restauro effettuato da Luigi Angelini, la planimetria dell'area redatta da Luigi Angelini a fine lavori, con indicazione delle demolizioni compiute, e al termine degli abbattimenti e del restauro.

scavi archeologici recentemente eseguiti (FORTUNATI, VITALI 1999-2000; GHIROLDI 2007).

Peraltro, la stratificazione archeologica che è stato possibile indagare, e che è in corso di revisione, si è rivelata piuttosto avara di informazioni per uno scavo urbano, poiché le fondazioni della chiesa raggiungono sì i resti di alcuni edifici di età romana (Fig. 3), i cui muri sono stati rasati a pochi

corsi di altezza, ma mancano poi sicure indicazioni sulle fasi tardoantiche e altomedievali, con l'eccezione, a pochi metri di distanza, di un edificio (quasi sicuramente una chiesa, vista la sua posizione; lettera B) a pianta trilobata o quadrilobata, conservato per parte dell'alzato e che non è stato possibile indagare in estensione perché si trova al di sotto dello sperone rinascimentale (lettera D) che sorregge lo spigolo S-O di Santa Maria. Questo spazio venne poi attraversato da un acquedotto in muratura (Us 115, lettera C) ben rilevato dal terreno, che alimentava la fontana di *Antescolis* presso la cattedrale di Santa Maria fino a pochi decenni fa e del quale, a differenza di quanto sostenuto fino ad ora, abbiamo accertato la posteriorità costruttiva al lobo S dell'edificio B suddetto. La chiesa di Santa Croce è stata costruita poi, al centro dell'area libera, letteralmente a cavallo dell'acquedotto, che infatti è inglobato e ben visibile al piano terra della cappella. In tutta l'area venne poi accumulata una omogenea e consistente ricarica di macerie post-medievali, che nascose interamente il piano inferiore della chiesa. L'intervento fu compiuto, con ogni probabilità, per adeguare le quote di calpestio del cortile a quelle imposte dalle modifiche della vicina cattedrale, così come avvenne per una porzione degli ambienti medievali dell'adiacente palazzo episcopale (CALZANA, CACCIA 2008).

A causa dell'addossamento di edifici moderni di vario genere, la chiesa risultò quasi nascosta, e quindi, nella sua globale configurazione, rimase ignota ai "classici" studi di Fernand De Dartein (DE DARTEIN 1865-1882) e Arthur Kingsley Porter (PORTER 1916); negli anni recenti però ha attirato l'attenzione di numerosi studiosi di diversa formazione (LEONI 1999; MILLER 2000; ZIZZO 2000; CALZANA, CACCIA 2008), che ne hanno interpretato in modo vario tanto la conformazione quanto la cronologia e la successione delle fasi costruttive. Le interpretazioni muovono dall'"estremo" di chi individua una sola fase romanica (come anche noi crediamo, pur con tutte le modifiche che la chiesa poi conoscerà, ad esempio l'apertura delle porte Us A215 e B213 visibili alla Fig. 3a), di chi ritiene che i tre "lobi" verso N (costruiti "a vista") siano anteriori a quello meridionale (edificato sì contro terra, ma perché posto al di là del muro di sostegno dell'acquedotto antico Us 115 che attraversa l'area), per giungere a chi (LEONI 1999) interpreta i corsi inferiori della muratura come resti di una cisterna romana, descrivendo quindi una successione di molte fasi, che peraltro non sembrano documentate da evidenze archeologiche o stratigrafiche.

La più antica fonte d'archivio nota sulla chiesa è un documento *actum in capella episcopi* del 1173 (LUPO 1784-99), formula generica nella quale si riconosce un implicito riferimento alla chiesa di Santa Croce. Questa lettura è condivisibile perché avvalorata da un atto del 1180 relativo ad un *privilegium (...) actum in capella Sancte Crucis* e da altri documenti trecenteschi che la ricordano *sita in episcopali hospitio pergamensi* (LOCATELLI 1939).



Fig. 3 – La chiesa di Santa Croce prima dello scavo e l’area attorno a fine scavo (2004): a) Edifici di età romana; b) Edificio trilobato (o quadrilobato?); c) Acquedotto a cavallo del quale è stata costruita la cappella di Santa Croce; d) Sperone rinascimentale a sostegno della cattedrale di Santa Maria Maggiore (foto Studio Arch. Calzana).

Già Angelini (ANGELINI 1940, 40) riconobbe, però, che tale cronologia era troppo bassa e «non attendibile in quanto in quel tempo edifici costruiti nella stessa regione bergamasca e la stessa attigua e monumentale chiesa di Santa Maria Maggiore, cominciata nel 1137, recano saggi di decorazione e di finezza di lavoro ben maggiore della rustica fattura del Tempietto sorto in un tempo alquanto anteriore». La sua proposta di assegnazione all’inizio dell’XI secolo rimane degna di considerazione ed è stata accolta a lungo (ad es. in VENANZIO 1959; CHIERICI 1991; KLING 1995; MILLER 2000). Non sono mancate, tuttavia, sia ipotesi di un’ulteriore retrodatazione al X (LORENZI, PELLEGRINI 2003), sia di un attardamento alla fine dell’XI (CALZANA, CACCIA 2008; SCIREA 2010) o all’inizio del XII secolo (GHIROLDI 2007).

La nostra conoscenza delle tecniche murarie bergamasche non è così sviluppata da permettere datazioni precise tra il X e l’XI secolo, poiché mancano capisaldi cronologici affidabili, ma certamente gli edifici “sicuri” dei primi decenni del XII secolo (*in primis* il gruppo abisdale della vicina cattedrale di Santa Maria Maggiore e il monastero suburbano di Valmarina) presentano una litotecnica così precisa e sicura da escludere che la tessitura “da muratore” o al più “da sbizzatore” di Santa Croce rientri in questo ambito produttivo e cronologico (per queste categorie tecniche si rimanda a MANNONI 1997). Alcuni elementi ci conducono a sostenere una datazione alla seconda metà dell’XI secolo: l’uso degli archetti in laterizi che decorano le specchiature, che non risultano attestati negli edifici altomedievali (PIVA 2012); la tessitura muraria che, per quanto composta da elementi non ben riquadrati, è già nell’“orbita” tecnica del Romanico per la ricerca di regolarità dei corsi e per la cura nella realizzazione dello zoccolo da cui si dipartono



Fig. 4 – La chiesa di Santa Croce: proiezione ortografica dei prospetti e sovrapposizione dell’analisi stratigrafica con i riferimenti alle Us individuate.

le lesene; la forma della monofora strombata sull’abside E (Us B110), con profilo già piuttosto stardardizzato ma con piedritti costruttivamente ancora indistinti dalla muratura circostante. Un tema a sé, che svilupperemo oltre, è quello dell’irregolarità costruttiva nei primi corsi di elevato.

Ci limitiamo ora a sintetizzare alcuni ulteriori elementi sugli interventi di scoperta e restauro che interessarono la chiesa. Nel corso dei restauri di Angelini, il piano di calpestio del cortile fu probabilmente abbassato di circa 70 cm e di circa 90 cm la “cupoletta”, a seguito del riconoscimento di una linea di gronda precedente, attribuendo la sopraelevazione ad un rifacimento del 1561 come indicherebbe una fonte documentaria peraltro non bene specificata. I tetti furono completamente rifatti e, nel corso della rimozione di quello superiore, furono ritrovati tre frammenti di capitelli che Angelini interpretò come appartenenti alle bifore medievali ma che non volle però ricostruire, mantenendo (stranamente, viste le modalità operative di allora) le finestre rettangolari definite «sgraziate». Inoltre, furono rimossi tutti gli intonaci, dei quali rimane oggi solo qualche piccolo lacerto; i giunti della muratura esterna furono completamente “ripassati” in cemento e la muratura integrata con intenti mimetici che rendono oggi difficile una lettura stratigrafica, effettuata sulla base del rilievo laser scanning, e l’individuazione delle Us (Fig. 4).

La particolare pianta quadrilobata di Santa Croce, a parere dell'Angelini, trova i suoi confronti più pertinenti in edifici battesimali, e anche la bibliografia dedicata al tema del *Vierconchenbau* (UNTERMANN 1989; KLING 1995) conferma in buona misura le sue ipotesi, con i casi di Mariano Comense e Biella in evidenza. Questa somiglianza, unitamente alla presenza dell'acquedotto, ha indotto molti ad ipotizzare una funzione battesimale della chiesa, nonostante ne manchino i riscontri nella documentazione e, soprattutto, in assenza di tracce della vasca battesimale.

Una questione a sé, e di grande rilievo, è poi il tema degli edifici a pianta centrale, ovvero dell'interpretazione "obbligata" di Santa Croce come derivazione diretta dal Santo Sepolcro di Gerusalemme (LEONI 1999; CALZANA, CACCIA 2009). A causa della bibliografia pressoché sterminata e della limitata pertinenza con questa sede editoriale, rimandiamo la discussione di questo problema e ci limitiamo qui a sottolineare che gli studiosi più autorevoli (KRAUTHEIMER 1993; STALLEY 1999; PIVA 2000; SALVARANI 2008a, 2008b) hanno ampiamente dimostrato la problematicità del concetto di "copia" nel Medioevo.

3. IL RILIEVO AUTOMATICO QUALE STRUMENTO DI ANALISI DELL'ARCHITETTURA MEDIEVALE

L'architettura romanica dell'XI e XII secolo in molti casi non si manifesta con costruzioni geometricamente rigorose, a fronte però di paramenti murari che dall'inizio del XII secolo hanno invece una perfetta regolarità e omogeneità dei singoli elementi e della tessitura che ne risulta, anche grazie a stilature accurate dei giunti (per l'area bresciana e bergamasca cfr. GALLINA 2009). Per questi ultimi, vale a dire le murature in opera quadrata, ogni concio lavorato era destinato a occupare una precisa posizione (sia per la complessità di lavorazioni necessarie a ottenere un solo elemento squadrato, sia per l'elevato peso di ogni concio che suggeriva di evitare errori o trasporti a vuoto di materiale), mentre per le opere di minore accuratezza o cronologicamente anteriori si prediligeva l'utilizzo di pietre «con più semplici lavorazioni a spacco, generalmente di dimensioni ridotte, che non avevano una posizione univoca nella muratura e potevano essere impiegate in qualsiasi punto (...) In questo secondo tipo di tecnica anche la realizzazione degli archi delle finestre o dei timpani non era condizionata dalla forma dei blocchetti, poiché ogni elemento poteva essere scambiato di posto, oppure adattato con l'aggiunta di una scaglia lapidea, di un frammento laterizio» (CAGNANA 2000, 390). È normale, quindi, che in genere la costruzione degli edifici minori non seguisse un progetto definito (almeno come inteso nella moderna accezione, basato su disegni metrici e sulla definizione di chiare fasi realizzative), poiché «non era necessario uno schema generale di partenza, dato che, di volta in volta, il

muratore procedeva nella posa in opera adattando ciò che aveva a disposizione e cercando le combinazioni migliori» (CAGNANA 2000, 390).

Se consideriamo però la chiesa di Santa Croce, è chiaro che essa deriva da una composizione piuttosto complessa di volumi che generano un edificio per nulla banale, cioè assai distante dalla “consueta” piccola chiesa a pianta rettangolare e absidata, con tetto a due falde. Ciò impone ben precise difficoltà di cantiere, ad esempio, l’inserimento della volta asimmetrica del piano terra, e la gestione del raccordo architettonico dai quattro lobi al tiburio sopra il secondo livello. C’è quindi, in tutta evidenza, un’idea iniziale di spazio riconducibile a una costruzione con più assi di simmetria, basata su un centro – l’asse verticale dell’edificio – rispetto al quale sono tangenti le quattro circonferenze che disegnano la pianta quadrilobata, ma la fase realizzativa, pur seguendo grossolanamente questa impostazione, non l’ha rispettata in modo rigoroso: le “circonferenze” sono dei tondi a raggio e curvatura variabile, gli allineamenti appaiono casuali, e più che a delle rette somigliano a linee incerte e ondegianti. Soprattutto, l’esistenza di più riseghe di fondazione differenti tra loro è testimonianza di aggiustamenti in corso d’opera, finalizzati alla correzione dei volumi della costruzione nelle sue prime fasi di realizzazione. Infine, la stessa idea unitaria di spazio che lega all’esterno la pianta e l’elevato in ragione di un rapporto di 2/3, all’interno è contraddetta dalla volta del solaio che divide la chiesa in due ambienti (Fig. 5).

Davanti a questo contrasto tra “modello” geometrico e realizzazione viene spontaneo chiedersi quali fossero il ruolo e la presenza dell’architetto (termine che usiamo per comodità, ma per il quale cfr. TOSCO 2003), e quale il rapporto con il cantiere, anche se edifici di questa cronologia e di questa dimensione non abbiamo riferimenti o confronti sicuri ai quali appoggiarci. Infatti la storiografia sul Romanico ha sì affrontato il tema dei cantieri (CASANELLI 1995), ma, a causa dell’assenza di specifiche fonti iconografiche o scritte tra X e XI secolo, la questione del rapporto tra progetto ed edificio, così come le fasi iniziali del cantiere (tracciamento della planimetria sul terreno e controllo dei primi corsi di alzato) sono poco conosciute. Sulla conduzione del cantiere per la costruzione di una chiesa scrive D. KIMPEL (2002, 193-194) che «gli inizi furono semplici: sul terreno previsto si tracciava la pianta, con l’aiuto di corde, in scala uno a uno, per mezzo della quadratura o della triangolazione (...) Per i dettagli venivano usate assicelle per misurare e grandi compassi per il terreno. Molti particolari erano stabiliti solo nel corso della costruzione». Oltre all’uso di poche regole teoriche desunte dall’esperienza (come i triangoli rettangoli detti “di Archimede” ottenuti con lati 3-4-5), si sottolinea «come per buona parte dell’età medievale non si conosca il passaggio dalla fase ideativa e progettuale alla realizzazione pratica, né i supporti “teorici” a disposizione dei costruttori nel loro pratico operare», e si conclude che «quanto alla matematica e alla geometria non sappiamo quale spazio

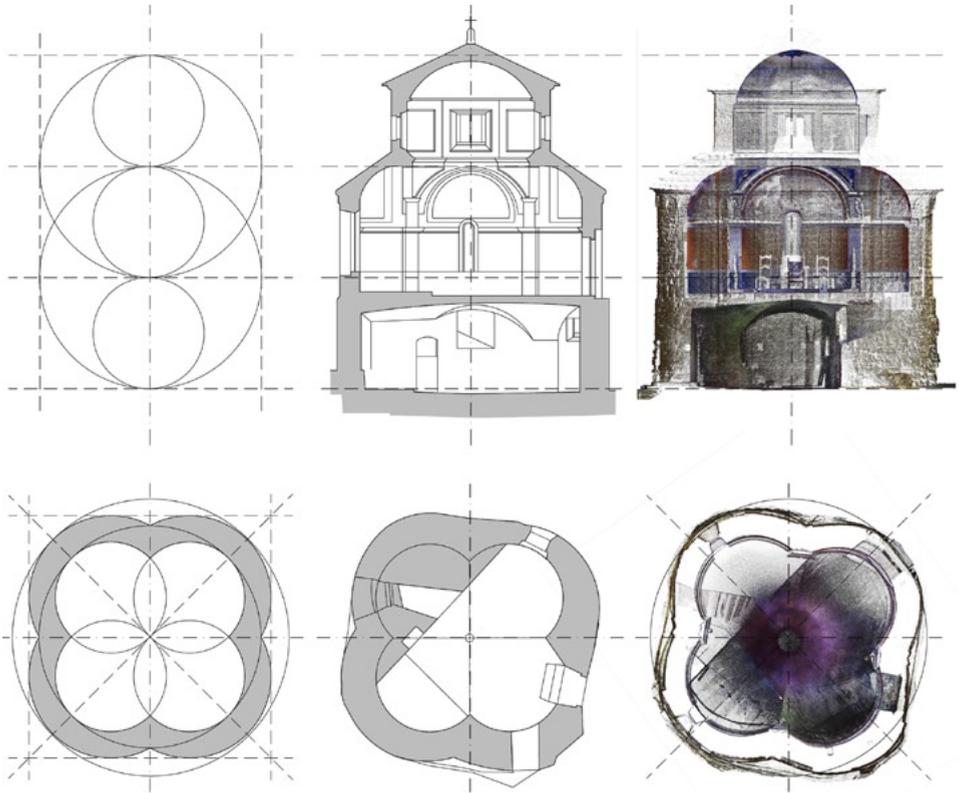


Fig. 5 – La chiesa di Santa Croce: confronto e analisi tra il modello ideale della cappella, il rilievo con tecniche di rilievo tradizionali (2004, Studio Arch. Calzana): piante e sezioni ottenute dalla scansione laser 3D.

avessero nelle fasi progettuali ed esecutive» (GRECI 2003, 85). Anche per un progetto grandioso quale fu l'abbazia di Cluny (nella sua fase della fine dell'XI secolo), è noto che l'abate Gunzo vide in sogno l'inizio del cantiere, nel quale il tracciamento della pianta veniva fatto direttamente sul terreno con lunghe corde (BAUD 2003).

Ben diversa è la situazione per epoche più tarde, cioè tra la fine del XII e gli inizi del XIII secolo, e in particolare nei grandi cantieri dove, a causa dell'enorme complessità costruttiva delle chiese e delle soluzioni tecniche necessarie, è largamente documentato l'impiego di disegni in scala su pergamena e/o modelli lignei sia per quanto riguarda la fase iniziale di studio che per l'esecuzione vera e propria (RECHT 2001), nonché la presenza di graffiti di cantiere tracciati a terra come guida per l'esecuzione delle parti più complesse (BINDING 1993, 192-198; PAGELLA 2002, 486; CAGNANA 2000). È peraltro

interessante osservare che anche in questi casi di organizzazione del lavoro più complessa e specializzata, dove è stato possibile il confronto con l'opera finita, si sono rilevate delle divergenze anche notevoli rispetto ai disegni iniziali (BORGHERINI 2001): segno di una prassi diffusa di avviare la costruzione di un edificio da un'idea iniziale dell'opera, ma lasciando largo spazio a possibili varianti, anche sostanziali, e piena libertà di scelta ai mastri costruttori nella fase di cantiere (CHIOVELLI 2006).

Tornando dunque a Santa Croce, è proprio in ragione delle difformità esistenti tra il modello "ideale" e l'edificio realmente costruito, che si è deciso di operarne la lettura attraverso il "rilievo automatico" giacché il rilievo tradizionale, sia esso diretto sia strumentale, lascia al rilevatore una possibilità interpretativa della geometria, mediata dalla sua conoscenza e cultura, che sono inevitabilmente lontanissime dalla mentalità simbolica e analogica medievale. La scelta dei punti da misurare (ovvero, la selezione tra ciò che è "da misurare" e ciò che, invece, può essere trascurato) si manifesta sin dalle fasi iniziali del disegno degli eidotipi, schizzi indispensabili nel rilievo tradizionale per riportare le misure di volta in volta eseguite. Ancora, nella schematizzazione delle piante, delle sezioni e dei prospetti è già configurata un'idea della geometria regolarizzata e gerarchizzata tra le parti ritenute più importanti.

Inversamente, il rilievo automatico è caratterizzato da una sorta di incapacità dello strumento di misura di operare delle scelte "intelligenti". Il laser a scansione rileva tutto ciò che è intorno ad esso e ad esso visibile, senza però realmente "vedere" ciò che misura e senza distinguere per "importanza" le parti dell'edificio. Ogni elemento è interpretato semplicemente come una sequenza di punti distanziati più o meno costantemente tra di loro. In definitiva, uno strumento di acquisizione automatica non possiede la capacità umana di interpretare forme e geometrie ed è atto a restituire, quindi, proiezioni ortografiche e/o cross-section, quali semplici sequenze di punti, non condizionate da una forse erronea e precedente interpretazione della spazialità del monumento.

4. IL RILIEVO LASER SCANNING DELLA CHIESA DI SANTA CROCE

Il rilievo 3D laser scanning si esegue attraverso più "scansioni" realizzate da altrettante stazioni collocate attorno al monumento da rilevare. Una scansione è una rappresentazione 3D dell'oggetto: una fotografia solida che permette di ricavare un'immagine in cui ogni pixel fornisce anche la posizione spaziale di ogni particolare "colto" dallo strumento. Una sola scansione non può rilevare l'intero edificio e ricoprirlo interamente; come nel rilievo fotografico, è necessario scattare una serie di immagini per apprezzarlo in ogni suo dettaglio ed eliminare possibili coni d'ombra, svelando così ogni parte nascosta (Fig. 6).



Fig. 6 – Workflow delle fasi di lavoro: dalla pianificazione del rilievo laser 3D scanning alla produzione delle analisi materico-stratigrafica di elaborati in scala.

Nell'ambito di tale metodologia di rilevamento, ancor più che i metodi tradizionali, la fase di pianificazione delle operazioni, intesa quale momento propedeutico alle misurazioni *in situ*, è di particolare importanza. Se attraverso le tecniche consuete, il rilievo costituisce essenzialmente un documento di base, un canovaccio sul quale impostare e sviluppare delle elaborazioni successive, l'utilizzo delle tecniche a scansione laser richiede una cura particolare relativa alla collocazione delle basi e dei target per la rete di appoggio e compensazione, la definizione dei passi di scansione e della risoluzione di ogni singolo range scan, la corretta scelta dei punti di stazione, al fine di ottenere una nuvola di punti globale che possa “ricoprire” totalmente l'oggetto di studio, limitando il più possibile le zone di occlusione (GARCÍA-GÓMEZ *et al.* 2011; BERTOCCI, BINI 2012).

Nel caso della chiesa in oggetto, struttura architettonica dalla geometria non particolarmente complessa, ma irregolare e contraddistinta da due spazi interni posti su livelli differenti e tra loro non collegati, tale progettualità ha dovuto considerare le problematiche riguardanti l'allineamento (in gergo, registrazione) delle singole scansioni, in altre parole, la necessità di contenere l'errore nei limiti di una tolleranza dello stesso ordine di grandezza dello strumento di misura (la scansione di una superficie deve sovrapporsi al termine della registrazione, non dare origine a due superfici diverse sfalsate tra loro).

Il rilievo è stato sviluppato effettuando le acquisizioni seguendo un percorso a spirale che dall'interno del vano interrato si è mosso per chiudersi al piano superiore. Le campagne sono state compiute in due sessioni: una prima,



Fig. 7 – La chiesa di Santa Croce: la campagna di rilievo eseguita con il FARO Focus3D. Particolare dei target (mark checkerboard e mark registration spheres) impiegati per la rete di inquadramento.

avvalendosi della strumentazione FARO Photon 120 nel maggio del 2011, e una seconda, nel mese di marzo 2012 con lo strumento FARO Focus3D (Fig. 7). Le dimensioni certamente “importanti” del primo strumento, non dotato di un’apparecchiatura interna di acquisizione del dato colore e non device-indipendente, nonché le limitazioni imposte da una necessità di alimentazione esterna a batteria, hanno dilatato notevolmente i tempi di lavorazione. L’esigenza di contenere quindi il numero delle scansioni (ne sono state realizzate 10: 8 esterne secondo i quattro assi di simmetria e 2 interne), in un’ottica di time and cost saving e di semplicità d’uso, ha spinto il gruppo di ricerca a ripetere la sperimentazione al fine di acquisire una maggiore conoscenza del monumento e indagarlo attraverso mezzi innovativi.

La seconda strumentazione, infatti, seppur basata sulla medesima tecnologia phase shift (a differenza di fase), risulta molto più rapida e precisa, poiché in grado di acquisire fino a 976.000 punti per secondo, con un ridotto errore di distanza lineare (± 2 mm a 25 m) e una maggiore affidabilità nella ripetibilità sulla misura grazie anche a un sensore di inclinazione particolarmente

preciso ($\pm 0.02^\circ$, risoluzione 0.001° , distanza $\pm 15^\circ$) per l'autocompensazione dello strumento sulla verticale. Inoltre, l'ingombro ridotto dello strumento ($24 \times 24 \times 10$ cm e peso di soli 5 kg) ha permesso di velocizzare le operazioni di rilevamento e di collocarlo anche in luoghi angusti: sono state, infatti, eseguite 24 scansioni (18 esterne e 6 interne) secondo risoluzioni variabili tra $1/4$ e $1/2$ della risoluzione massima (distanza media del passo di scansione: 3 mm a 10 m), per una durata media di ognuna di 15 minuti, comprensiva dell'acquisizione del dato colore.

Le fasi di misurazione sono state compiute per mezzo di "acquisizioni ambientali" a 360° , che hanno permesso di costruire la nuvola di punti, non solo della chiesa di Santa Croce, ma anche dell'intero cortile. La velocità di misurazione e ottenimento dei dati del FARO Focus3D è, infatti, tale da rendere più conveniente – in termine di riduzione dei tempi di lavoro – l'acquisizione della totalità delle informazioni, per poi ripulire le nuvole dai punti superflui, piuttosto che regolare angolo di presa e risoluzione. Così operando, sono stati inclusi in ogni singola scansione anche gli elementi di riferimento utili all'unione delle scansioni stesse: una cinquantina di target cartacei piani (mark checkerboard) combinati a cinque sfere calibrate con base magnetica (mark registration spheres) disposti a differenti quote sopra o in prossimità dell'edificio e in punti visibili a più stazioni. Il pre-allineamento e la registrazione delle scansioni sono stati effettuati con il software FARO Scene 5.1 e i risultati ottenuti sono stati molto soddisfacenti, con un errore medio di sovrapposizione delle singole scansioni di 0,38 cm e una deviazione standard di 0,30 cm.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'esperienza condotta sulla chiesa di Santa Croce, unitamente alla revisione dello scavo archeologico, ha permesso di evidenziare una serie di benefici e potenzialità del rilievo laser scanning. In primo luogo la "globalità" del rilievo permette di contemplare le esigenze di conoscenza del monumento derivanti da due approcci differenti ma convergenti: quello dell'architetto restauratore e quello dell'archeologo. Per il primo, la necessità di pervenire a una lettura globale della fabbrica (attraverso la restituzione di piante e sezioni in scala), facendo «affiorare, da una compagine muraria spesso illeggibile a prima vista, un'eccezionale specie di documenti, tutti di garantita autenticità» assicurando quella «conoscenza intima e totale del monumento» utile a «studiarne a fondo la consistenza, notando caratteristiche e particolarità (allineamenti, diversità di spessori murari, soluzioni di continuità, variazioni, anche minute, di apparecchio murario) che altrimenti sfuggirebbero. Particolarità che sono sempre indicative di qualche nodo storico-artistico, cronologico od anche semplicemente costruttivo che non dev'essere trascurato e va comunque

risolto» (CARBONARA 2012, 24). Il rilievo ha, inoltre, fornito la possibilità di capire ed esprimere relazioni fra le parti dell'edificio, permettendo una lettura rapida, sinottica e comparata dell'oggetto di studio, e di meglio valutare i degradi e i dissesti e analizzare il quadro fessurativo, rappresentandoli su un supporto di precisione.

L'avvicinamento dell'archeologo è prioritariamente mirato al riconoscimento e alla datazione delle singole parti, operati attraverso piante schematiche spesso esemplificative delle vere geometrie, rilievi fotografici sui quali riconoscere le unità stratigrafiche che consentono di ripercorrerne la successione costruttiva e rilievo da scansione che garantisce la completezza e il dettaglio di queste informazioni. In secondo luogo, è bene riconoscere che nell'analisi archeologica la considerazione delle architetture è spesso piuttosto limitata, perché tradizionalmente viene valorizzata più la visione planimetrica della stratificazione sepolta che la verticalità e tridimensionalità di un edificio. Questo è un atteggiamento ancora assai diffuso, nonostante la disciplina dell'archeologia dell'architettura non sia più una novità. Come ha incisivamente scritto Olof Brandt (BRANDT 2012, 10), è necessario ribellarsi a questa "tirannia delle piante", poiché «la pianta spesso riceve un'attenzione squilibrata rispetto alle altre forme di rappresentazione grafica. La pianta non viene trattata solo come una forma di documentazione grafica, di solito una sezione orizzontale poco sopra il pavimento. La pianta è diventata una categoria mentale che tende a monopolizzare l'attenzione degli studiosi, forse perché l'archeologo viene formato sullo scavo di strutture demolite, di cui spesso sopravvivono solo le fondazioni, e dove la pianta è l'unica forma di documentazione grafica possibile. Si impara perciò prevalentemente a ragionare sulle piante».

I rilievi da scansione laser possono essere la via d'uscita da queste astratte, annose e fuorvianti abitudini, che hanno dato vita a modelli, categorie, e presunte "evoluzioni" dei diversi tipi planimetrici delle chiese senza guardare a come esse si sviluppassero in elevato, arrivando a comprendere in una medesima "famiglia" edifici che in elevato e nella realtà sono assai diversi. Ad eccezione della notissima pianta dell'inizio del IX secolo del monastero di San Gallo (considerata più una "idea-guida" che un progetto; PAGELLA 2002, 476) e di pochi altri casi (BINDING 1993), e benché si affermi che «la rappresentazione planimetrica deve essere esistita lungo tutto il corso del medioevo» (RECHT 2001, 27), le raffigurazioni delle chiese medievali nei codici, nei dipinti e negli affreschi sono in netta prevalenza dei modellini tridimensionali, come quelli sorretti dalle mani del Santo titolare.

Inoltre, il rilievo da laser scanner comprende e risolve un ulteriore aspetto debole della pratica archeologica, vale a dire la piena documentazione del rapporto tra deposito sepolto e strutture fuori terra. Nel nostro lavoro su Santa Croce, il rilievo ottenuto dalla scansione laser, benché eseguito a fine

scavo e pertanto limitato alla documentazione di questa interfaccia, si è infatti rivelato un imprescindibile ausilio interdisciplinare, autonomo rispetto agli artificiosi criteri settoriali e supporto univoco sia per il progetto di restauro che per l'analisi archeologica.

Un altro aspetto positivo dell'uso del laser scanning è la maggiore precisione del rilievo. Un rilievo più accurato dà ragione anche dell'irregolarità costruttiva dell'edificio, che non deve essere considerata il "degrado" di un'idea progettuale dovuto all'imprecisione dell'accidentale realtà del cantiere, ma una peculiarità degli edifici medievali. La geometrizzazione e rettificazione, che di consueto si applica nella rappresentazione grafica di strutture che di fatto sono prive o quasi di pareti rettilinee o di rigorose simmetrie, sono davvero fuorvianti per gli edifici romanici, la cui regolarità è apparente, e in particolare per quelli del primo romanico, che si caratterizzano per esecuzioni e soluzioni tecniche ancora piuttosto incerte. Nel caso di Santa Croce, il passaggio dai corsi di fondazione all'alzato è piuttosto "tormentato" sia all'esterno che all'interno della cappella, poiché è ottenuto grazie a più riseghe e con profili difformi; queste sono state in passato interpretate come resti di fasi più antiche (a partire da una presunta cisterna romana), ma è assai probabile che si tratti, invece, dell'esito di un cantiere che trova le proprie soluzioni mano a mano che si procede, come è proprio degli edifici anteriori allo sviluppo della litotecnica e dell'organizzazione del ciclo produttivo dell'*opus quadratum* propriamente detto, che come fenomeno generale si impone più tardi, cioè dai primi decenni del XII secolo (GALLINA 2009; CAGNANA 2011).

È di conseguenza chiaro che questi progressivi aggiustamenti dal profilo della fondazione ai primi corsi di alzato e poi allo spiccato vero e proprio, se correttamente rilevati e rappresentati, sono elementi che concorrono alla datazione e comprensione della chiesa. L'irregolarità che ne risulta, sia nella rappresentazione in piante e sezioni, che in quella volumetrica, non è quindi un elemento marginale o, peggio, da scartare, ma anzi una caratteristica che deve essere colta e valorizzata.

Il rilievo laser scanning offre anche un'indiscutibile facilità nell'elaborazione di proiezioni ortografiche di architetture irregolari. Nell'alveo di un sistema di rilievo tradizionale, stanti le irregolarità costruttive dell'architettura romanica e la pianta quadrilobata della chiesa, sarebbe stato piuttosto complesso ottenere delle proiezioni metricamente corrette. Attraverso la tecnologia laser scanning è stato, invece, possibile ricavare una vista in proiezione parallela per ogni lato del tiburio ottagonale di Santa Croce, beneficiando, quindi, di ampie zone di sovrapposizione per le quattro absidi del primo e secondo livello, utili nella fase di individuazione autoptica delle unità stratigrafiche e dell'analisi delle tessiture murarie. Dal modello 3D della nuvola sono state con facilità estratte piante, prospetti e sezioni su cui è stato eseguito il rilievo stratigrafico, in attesa di "trasferirlo" pienamente sul modello 3D, come in

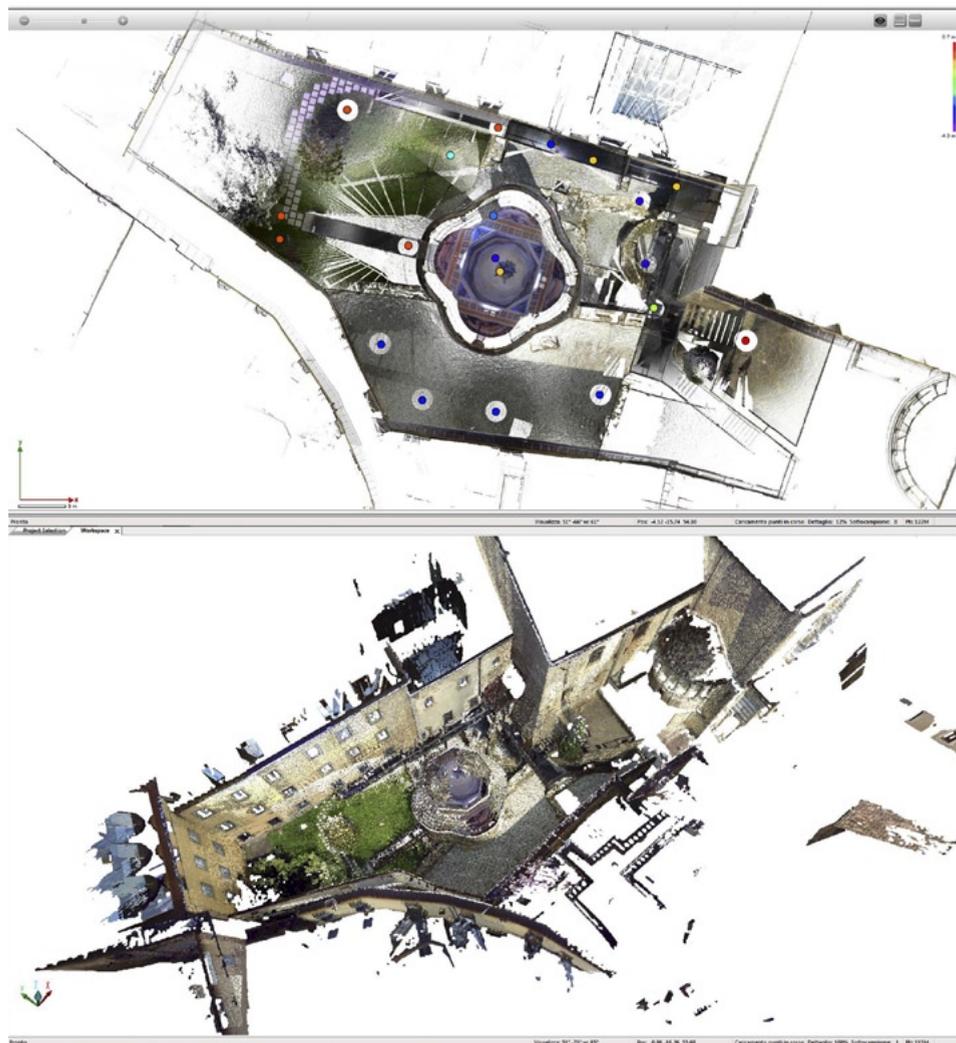


Fig. 8 – La chiesa di Santa Croce: la planimetria con indicazione delle stazioni e il modello 3D della chiesa e del cortile dell'episcopato.

alcuni casi già è stato fatto in modo ottimale (FIORINI, ARCHETTI 2011; DRAP *et al.* 2012).

La possibilità di sovrapporre in trasparenza i rilievi dell'esterno e dell'interno ha portato a considerare e verificare, nel caso di studio in oggetto, alcune interpretazioni funzionali dell'edificio, vale a dire la discussione se

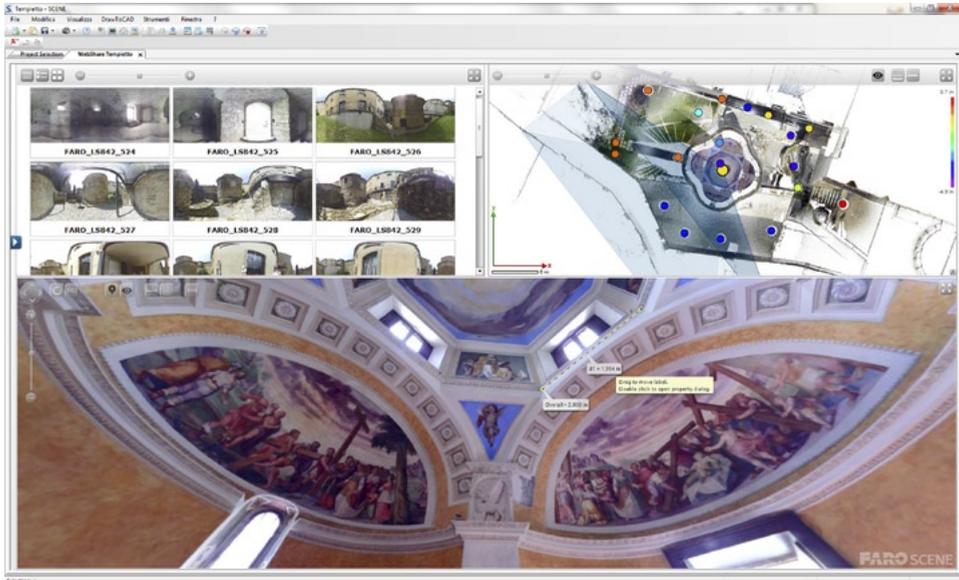


Fig. 9 – La chiesa di Santa Croce: mappatura delle scansioni e foto sferiche ottenute con 3D laser scanning.

l'originaria articolazione interna di Santa Croce fosse in un unico e ampio volume o in due livelli che furono poi divisi dall'inserimento della volta, come spesso è stato sostenuto. La parziale esistenza di una risega a livello della volta, visibile in alcuni piani di sezione, sembrerebbe escludere che in origine vi fosse un unico volume, perché essa interrompe la continuità delle pareti interne. È quasi certo che una differenza così esigua e per di più non presente su tutta la pianta non sarebbe stata evidenziata da un rilievo di tipo tradizionale.

Infine, la nuvola di punti costituisce un vasto archivio digitale per lo studioso, un database immenso da indagare a piacere in funzione di nuovi percorsi di ricerca e anche a posteriori. Un tale insieme di dati si può rilevare un insostituibile alleato per il restauratore poiché permette di eseguire, sul modello 3D ottenuto, analisi virtuali dell'oggetto rilevato in termini di volumi e dimensioni, baricentri e pesi, fare confronti tra diversi file dello stesso oggetto ottenuti da rilievi distanti tra loro nel tempo, per verificare lo stato di conservazione del bene e ancora monitorare l'eventuale futuro danneggiamento dovuto ad agenti esterni.

Accanto a tali molteplici aspetti positivi, è opportuno porre l'accento, però, su alcuni aspetti del rilievo a scansione laser che presentano ancora delle criticità, legate in particolar modo al costo dell'attrezzatura (sia della strumentazione che dell'hardware necessario all'elaborazione della grande

quantità di dati), alle necessarie competenze nell'uso dei software per l'elaborazione e alle difficoltà di importazione e utilizzo dei modelli (point clouds o poligonali) nei normali applicativi CAD e di grafica. Inoltre, la conoscenza necessaria all'analisi storico-interpretativa di un edificio medievale non può comunque esaurirsi esclusivamente con l'acquisizione esatta del dato metrico, informazione spesso sufficiente in molti altri ambiti dell'architettura. Il dato cromatico possiede, infatti, ai fini della riconoscibilità delle unità stratigrafiche, un'importanza elevata quanto la determinazione geometrica rigorosa del monumento. Il rilievo fotografico è tra gli strumenti più frequentemente impiegati dall'archeologo come base dei suoi studi. In particolare, il fotomosaico ottenuto dal raddrizzamento delle prese fotografiche ha costituito, grazie alla semplificazione della fase di restituzione avutasi con l'avvento della fotografia digitale, la principale base interpretativa del lavoro dell'archeologo. L'evoluzione tecnologica e la diminuzione dei costi permettono oggi di impiegare il rilievo fotografico sia nella fase di comprensione del monumento che per la sua successiva valorizzazione, sino a costituire una base integrativa di documentazione indispensabile al rilievo 3D laser scanning.

La sperimentazione riguardante la chiesa di Santa Croce ha visto le fasi di rilievo metrico e fotografico svolgersi contestualmente (Fig. 8). Le prese effettuate tramite il laser scanner hanno permesso la costruzione di un modello virtuale "a punti" dell'architettura dell'edificio nel suo insieme mentre le prese fotografiche HDR hanno prodotto un puntuale catalogo di dati atti alla classificazione dei singoli elementi costruttivi. I moderni strumenti di misura 3D, quali ad esempio il FARO Focus3D utilizzato in questa ricerca, sebbene permettano di ricavare nuvole colorate e anche cromaticamente corrette dalle quali produrre proiezioni ortografiche ottimali al progetto di restauro (VERSACI, CARDACI 2011, 2012), non sono in grado di poter sostenere il confronto con il dettaglio della rappresentazione a scala 1:1 (Fig. 9).

ALESSIO CARDACI

Università degli Studi di Bergamo

DARIO GALLINA

Dipartimento di Storia, Archeologia e Storia dell'Arte
Università Cattolica del Sacro Cuore, Milano/Brescia

ANTONELLA VERSACI

Università degli Studi di Enna "KORE"

BIBLIOGRAFIA

ANGELINI L. 1940, *Scoperte e restauri di edifici medievali in Bergamo alta*, «Palladio. Rivista di Storia dell'Architettura», 4, 35-43.

- ANGELINI L. 1963, *I lavori compiuti per il Piano di risanamento di Bergamo Alta, 1936-1943, 1950-1960*, Bergamo, Stamperia Conti.
- ANGELINI S. (ed.) 1989, *Bergamo: Città Alta. Una vicenda urbana*, Bergamo, Comune di Bergamo.
- BAUD A. 2003, *Cluny, un grand chantier médiéval au coeur de l'Europe*, Paris, Editions A&J Picard.
- BERTOCCHI S., BINI M. 2012, *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Novara, CittàStudi Edizioni.
- Biblioteca Civica A. Mai, Bergamo, Fondo Angelini, Fald. 306, cartella "Città Alta. Interventi su monumenti, Tempietto di Santa Croce - 1938-1940".
- BINDING G. 1993, *Baubetrieb im Mittelalter*, Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- BORGHERINI M. 2001, *Disegno e progetto nel cantiere medievale. Esempi toscani del XIV secolo*, Venezia, Marsilio.
- BRANDT O. 2012, *Battisteri oltre la pianta. Gli alzati di nove battisteri in Italia*, Roma, Pontificio Istituto di Archeologia Cristiana.
- CAGNANA A. 2000, *Un graffito di cantiere dagli scavi del Duomo di S. Andrea a Venzona (UD)*, in G.P. BROGIOLO (ed.), *Atti del II Congresso Nazionale di Archeologia Medievale (Brescia 2000)*, Firenze, Edizioni all'Insegna del Giglio, 389-394.
- CAGNANA A. 2010, *Oriente e Occidente: contatti e trasmissioni di tecnologie fra X e XII secolo*, in G.P. BROGIOLO (ed.), *Archeologia dell'architettura: temi e prospettive di ricerca. Atti del Convegno (Gavi 2010)*, «Archeologia dell'Architettura», 15, 197-204.
- CALZANA P., CACCIA B. 2008, *Attorno a Santa Croce*, «La Rivista di Bergamo», 54, 29-34.
- CARBONARA G. (ed.) 2008, *Trattato di restauro architettonico. Secondo Aggiornamento. Grandi temi di restauro*, Torino, UTET.
- CARBONARA G. 2012, *Disegno e documentazione per il restauro: un impegno interdisciplinare*, «Disegnarecon», 5, 10, 9-20 (<http://disegnarecon.unibo.it/article/view/3292/2670/>).
- CARDACI A., VERSACI A. 2010, *Il rilievo nel progetto di restauro: Il caso studio del Duomo di Enna*, in *Disegno e Progetto. Sesto Congresso UID, XXXI Convegno Internazionale delle discipline della rappresentazione (Lerici 2009)*, Genova, GS Digital, I, 48-53.
- CARDACI A., VERSACI A. 2012, *Documentare per conservare: l'uso delle nuove tecnologie per la conoscenza, la salvaguardia e la comunicazione del patrimonio culturale armeno*, «Disegnarecon», 5, 10, 255-264 (<http://disegnarecon.unibo.it/article/view/3354/2729/>).
- CASSANELLI R. (ed.) 1995, *Cantieri medievali*, Milano, Jaca Book.
- CASTELNUOVO E., SERGI G. (eds.) 2002, *Arti e storia nel Medioevo. I. Tempi Spazi Istituzioni*, Torino, Einaudi.
- CASTELNUOVO E., SERGI G. (eds.) 2003, *Arti e storia del Medioevo, II. Del costruire: tecniche, artisti, artigiani, committenti*, Torino, Einaudi.
- CHIERICI S. 1991, *La Lombardia*, Milano, Jaca Book, 366-367.
- CHIOVELLI R. 2006, *Tecniche costruttive murali medievali. La Toscana*, Roma, L'Erma di Bretschneider.
- DE DARTEIN F. 1865-1882, *Étude sur l'architecture lombarde et sur les origines de l'architecture romano-byzantine*, ristampa in facsimile, Como 1963, Novindustria.
- DOCCI M. 2009, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Bari-Roma, Laterza.
- DRAP P. et al. 2012, *An information system for Medieval archaeology based on photogrammetry and archaeological database: The Shawbak Castle Project*, «Progress in Cultural Heritage Preservation. Lecture Notes in Computer Science», 7616, 119-128.
- FIORANI D. (ed.) 2009, *Restauro e tecnologie in architettura*, Roma, Carocci.
- FIORINI A. 2008, *Esperienze di fotomodellazione e stereofotogrammetria archeologica*, in G. DE FELICE, M.G. SIBILANO, G. VOLPE (eds.), *L'informatica e il metodo della stratigrafia. Atti del Workshop (Foggia 2008)*, Santo Spirito, Edipuglia, 175-186.

- FIORINI A., ARCHETTI V. 2011, *Fotomodellazione e stereofotogrammetria per la creazione di modelli stratigrafici in archeologia dell'architettura*, «Archeologia e Calcolatori», 22, 199-216.
- FORTUNATI M. (ed.) 2006, *Medioevo a Bergamo. Archeologia e antropologia raccontano le genti bergamasche*, Truccazzano (MI), Arti grafiche Bianca & Volta.
- FORTUNATI M., VITALI M. 1999-2000, *Bergamo, Cappella di Santa Croce. Le strutture ipogee tra età romana e Medioevo*, «Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Lombardia», 199-202.
- GALLINA D. 2009, *Tecniche costruttive e tipologie dell'architettura bassomedievale nei paesi del Sebino bresciano e bergamasco*, «Notizie Archeologiche Bergomensi», 17, 47-137.
- GARCÍA-GÓMEZ I., FERNÁNDEZ DE GOROSTIZA M., MESANZA MORAZA A. 2011, *Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios*, «Arqueología de la Arquitectura», 8, 25-44.
- GHIROLDI A. 2006, *Gli scavi*, in FORTUNATI 2006, 25-27.
- GHIROLDI A. 2007, *La Cappella di Santa Croce in Bergamo*, in M. FORTUNATI, R. POGGIANI KELLER (eds.), *Storia economica e sociale di Bergamo. I primi millenni. Dalla preistoria al Medioevo*, II, Bergamo, Fondazione per la Storia Economica e Sociale di Bergamo - Istituto di Studi e Ricerche, 534-538.
- GRECI R. 2003, *I cantieri: le corporazioni*, in CASTELNUOVO, SERGI 2003, 69-106.
- GUIDI G., RUSSO M., BERARDIN J. 2010, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, Milano, McGraw-Hill Education.
- KIMPEL D. 2002, *I cantieri*, in CASTELNUOVO, SERGI 2002, 171-197.
- KLING M. 1995, *Romanische Zentralbauten in Oberitalien. Vorläufer und Anverwandte*, Hildesheim-New York, Georg Olms Verlag.
- KRAUTHEIMER L. 1993, *Introduzione a un'iconografia dell'architettura sacra medievale*, in R. KRAUTHEIMER, *Architettura sacra paleocristiana e medievale e altri saggi su Rinascimento e Barocco*, Torino, Bollati Boringhieri, 98-150.
- LEONI J. 1999, *Il tempietto di S. Croce, Bergamo. Mémoire*, Master of Conservation of Historic Towns and Buildings, Faculteit toegepaste wetenschappen Centre R. Lemaire pour la conservation, Katholieke Universiteit Leuven.
- LOCATELLI G. 1939, *Origine della cappella di S. Croce*, «L'Eco di Bergamo», 8 maggio.
- LORENZI M., PELLEGRINI A. 2003, *Sulle tracce del romanico in provincia di Bergamo tra storia, architettura, paesaggio*, Bergamo, Provincia di Bergamo.
- LUPO M. 1784-1799, *Codex diplomaticus civitatis, et ecclesiae bergomatis a canonico Mario Lupo eiusdem ecclesiae primicenio digestus notis, et animadversionibus illustratus*, Bergomi, Ex typographia Vincentii Antoine.
- MANNONI T. 1997, *Il problema complesso delle murature storiche in pietra. I, Cultura materiale e cronotipologia*, «Archeologia dell'Architettura», 2, 15-24.
- MILLER M.C. 2000, *The Bishop's Palace. Architecture and Authority in Medieval Italy*, Ithaca-London, Cornell University Press.
- PAGELLA E. 2002, *Vedere, copiare, interpretare: artisti e circolazione di modelli nell'ambito ecclesiastico*, in CASTELNUOVO, SERGI 2002, 473-511.
- PIVA P. 1990, *Le cattedrali lombarde. Ricerche sulle "cattedrali doppie" da Sant'Ambrogio all'età romanica*, Quistello, Edizioni Ceschi.
- PIVA P. 2012, *La chiesa dei Santi Nazario e Celso a Pluda (Leno). Una testimonianza di edilizia culturale fra altomedioevo e "premier art roman"*, «Brixia Sacra. Memorie Storiche della Diocesi di Brescia», s. III, XVII, 1-2, 109-126.
- PORTER A.K. 1916, *Lombard Architecture, II. Monuments. Abbazia di Albino, Milan*, New Haven, Yale University Press.
- RECHT R. 2001, *Il disegno d'architettura. Origine e funzioni*, Milano, Jaca Book.

- RUSSO M., REMONDINO F., GUIDI G. 2011, *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, «Archeologia e Calcolatori», 22, 169-198.
- SALVARANI R. 2008a, *La fortuna del Santo Sepolcro nel Medioevo. Spazio, liturgia, architettura*, Milano, Jaca Book.
- SALVARANI R. 2008b, *Chiese a pianta circolare e imitazioni del S. Sepolcro nei secoli centrali del Medioevo. Aspetti storici*, in V. VOLTA (ed.), *Rotonde d'Italia. Analisi tipologica della pianta centrale*, Milano, Jaca Book, 33-44.
- SCIREA F. 2010, *Il complesso cattedrale di Bergamo*, in R. CASSANELLI, P. PIVA (eds.), *Lombardia romanica. II, Paesaggi monumentali*, Milano, Jaca Book.
- TOSCO C. 2003, *Gli architetti e le maestranze*, in CASTELNUOVO, SERGI 2003, 43-68.
- UNTERMANN M. 1989, *Der Zentralbau im Mittelalter: Form, Funktion, Verbreitung*, Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- VENANZIO O. 1959, *Costruzioni romaniche a sistema centrale nel Bergamasco*, «Arte Lombarda», 4, 1, 29-35.
- VERSACI A., CARDACI A. 2011, *Il rilievo "automatico" del colore: nuove tecnologie a supporto della lettura cromatica per il restauro dell'edilizia storica*, in P. FALZONE (ed.), *Il colore nel costruito storico. Innovazione, sperimentazione, applicazione (Lerici 2011)*, Roma, Aracne Editrice, 1-7.
- VERSACI A., CARDACI A. 2012, *Innovative methodologies of automatic color survey in the service of architectural restoration*, in *Colore e Colorimetria. Contributi Multidisciplinari*, VIII, Santarcangelo di Romagna (RN), Maggioli S.p.A., 191-198.
- ZIZZO G. 2000, *S. Croce, Bergamo*, in P. CAPELLINI, G.M. LABAA (eds.), *Itinerari dell'Anno Mille. Chiese romaniche nel Bergamasco*, Bergamo, Sesaab Editrice, 63-66.

ABSTRACT

The improvement of new active optical sensors has revolutionized the methods for documenting cultural heritage. The conservation and appreciation of our cultural legacy require an extensive documentation both in terms of shape, color and geometry as well as the more traditional art-historical features. The incessant development of scientific research today provides new possibilities and tools which are essential to know and use in a responsible and scientific way. In the field of archaeology, the automatic 3D survey is now recognized as an "added value" compared to traditional practices and the active contribution that this technology can provide to the interpretative phase, cataloguing and promotion of archaeological assets, even through the web, is becoming increasingly clear. On the other hand, even considering the speed of the procedure and the accuracy of measurement, there have been calls for reflection on the role that laser scanning can play in the field of archaeology; this role needs to be clarified and consolidated by conducting new studies and experiments, such as the one presented here that concerns the Church of Santa Croce in Bergamo, a small octagonal Romanesque chapel built in the first half of the 11th century.

