

## **Il sisma aquilano: rilievo laser-scanner delle architetture e interpretazione dei dati**

Valentina Buttolo

Università IUAV di Venezia, Sistema dei Laboratori, Laboratorio di Fotogrammetria  
Santa Croce 191, 30135 Venezia, Tel. 041 257 1521

### **Riassunto**

Il rilievo delle aree colpite dal sisma è da intendersi soprattutto nel suo uso strumentale di appoggio alle discipline di analisi strutturale e di restauro.

Il laser a scansione è stato utilizzato, appena dopo l'emergenza e durante le successive esperienze di alcune Scuole Estive tenutesi a L'Aquila, per rilevare i fronti degli edifici del borgo storico di Sant'Eusanio Forconese.

La nuvola di punti è stata opportunamente filtrata e trattata, ed è stato possibile verificare e quantificare con esattezza le deformazioni subentrate nel tempo e successivamente al terremoto, rispetto alla geometria e alla morfologia originarie della fabbrica.

Il rilievo laser-scanner permette l'acquisizione della forma nel complesso delle sue irregolarità e non solo nelle sue linee essenziali. L'informazione topologica ottenuta è più complessa rispetto a quanto ottenuto attraverso i metodi tradizionali (topografia e fotogrammetria), ma risulta estremamente utile per rilevare deformazioni e dissesti subiti da strutture la cui geometria elementare è difficilmente leggibile sul campo perché estremamente complessa ed impossibile da raggiungere fisicamente con strumenti di misura convenzionali.

### **Abstract**

The survey of portion of the city hit by an earthquake is to be intended in its being a useful support for other structural analysis and conservation and restoration studies.

Laser scanner has been used just after the earthquake in L'Aquila and during several summer schools that took place every year since the earthquake, to survey the facades of the buildings of the old center of Sant'Eusanio Forconese.

The point cloud has been treated and filtrated, in order to quantify and verify exactly the deformations due to the earthquake, confronted with the original form and geometry of the building.

Laser scanning surveys allow the acquisition of the complexity of the form of the building, with its irregularity, not only in some essential lines, as it is in topography. The whole information is more complex than what we obtain with traditional techniques (topography and photogrammetry), but it is extremely useful to survey and measure deformation and dissests of structures which geometry is extremely difficult to read because of the damage due to the earthquake and the impossibility of reach it physically with traditional methods of measurement.

### **Articolo**

Il rilievo delle aree colpite dal sisma presenta alcune caratteristiche specifiche, che lo rendono difficilmente ascrivibile agli schemi convenzionali e alle metodologie standardizzate di questo tipo di attività. Ogni situazione diventa un caso a sé stante e richiede l'intervento e l'integrazione di metodi e strumenti che operano con precisioni non omogenee ma che devono colloquiare in qualche modo tra loro all'interno di un unico sistema di riferimento generale.

I riferimenti che in genere guidano e sottendono la costruzione dell'architettura e quindi anche il suo rilievo (piani paralleli ai solai e alle murature), spesso vengono a mancare. Le architetture presentano gravi lesioni che ne modificano la forma, spesso sono avvenuti dei crolli e quindi non rimangono che macerie. In tali situazioni i riferimenti prima considerati come fondamentali per la progettazione e l'esecuzione di un rilievo, vengono completamente persi.

Il rilievo delle aree colpite dal sisma del 6 aprile 2009 in Abruzzo, data la vastità e la diffusione sul territorio dell'evento, pone la necessità di:

- rilevare la posizione dei manufatti all'interno di un'area urbana circoscritta;
- rilevare ogni singolo edificio (rilievo dei manufatti architettonici emergenti);
- rilevare alcuni particolari al fine di permetterne un possibile recupero.

Il tutto però va sempre inserito in un quadro più vasto, in modo che non vadano mai persi i rapporti tra le parti di cui si compone l'area considerata.

Il rilievo in questo caso non è infatti più finalizzato allo studio della città e delle sue fabbriche, ma diviene soprattutto un contenitore multi-scala dove possono essere catalogate le emergenze: è quindi inteso in questo senso nel suo uso strumentale per le discipline di analisi strutturale e di restauro.

## **Il Rilievo**

L'obiettivo principale delle operazioni di rilievo pianificate nel borgo era definire le posizioni dei diversi volumi edificati prospicienti la piazza del centro urbano e rilevare i fronti dei palazzi, al fine di poter effettuare un'analisi dello stato di degrado e una valutazione statica delle strutture, il cui comportamento è influenzato dai dissesti e dalle deformazioni morfologiche che si sono succedute nel tempo, il tutto aggravato ancor più dal possibile innesco di alcuni cinematismi dovuti alla forte scossa sismica del 6 aprile 2009.

Proprio la grande rapidità di acquisizione dei dati si caratterizza come particolarità fortemente positiva nell'utilizzo del laser scanner, che unisce alla precisione metrica del rilievo degli edifici la definizione dell'immagine delle facciate. L'immagine urbana è così caratterizzata contestualmente alla definizione dimensionale corretta degli edifici e degli spazi urbani oggetto del rilievo, consentendo la ricostruzione tridimensionale dello spazio esterno della piazza e relazionando tutti gli elementi tra loro.

Il rilievo topografico (eseguito mediante una stazione totale Leica TCR) ha definito la rete geometrica di riferimento e ha consentito di riportare in un unico sistema di riferimento tutte le scansioni effettuate nello spazio urbano del piazzale, arrivando a definire un modello tridimensionale, per punti, dello spazio stesso.

La tecnologia del laser scanning consente di acquisire digitalmente oggetti tridimensionali di varie dimensioni sotto forma di nuvole di punti. La descrizione geometrica digitale dell'oggetto è discreta: quanto maggiore è la risoluzione impostata per l'acquisizione tanto più densa sarà la nuvola di punti e quindi il dettaglio della rappresentazione.

Ciascun punto è definito da una posizione spaziale in coordinate  $x$  e  $y$  e  $z$  rispetto al punto di origine rappresentato dalla posizione dello scanner. Se lo scanner è dotato di fotocamera digitale incorporata è possibile mappare anche il valore RGB, quindi il valore cromatico, del punto acquisito.

A Sant'Eusanio Forconese è stato utilizzato il laser scanner in dotazione al laboratorio di fotogrammetria, il modello LMS-Z360i della Riegl, integrato con camera digitale Nikon D100, che consente di arrivare ad avere precisioni di 2 mm e misura fino a 11000 punti al secondo.

Questo tipo di strumento è un laser a tempo di volo (TOF, *Time Of Flight*), cioè le coordinate 3D dell'oggetto sono derivate dalla misura del tempo che il raggio laser impiega a ritornare verso l'oggetto dopo averlo colpito. Si tratta di un sensore terrestre portatile, adatto all'acquisizione veloce di immagini tridimensionali di buona qualità anche in presenza di difficili condizioni ambientali. E' considerato un sistema "ibrido laser scanner-fotogrammetrico", che offre la

possibilità di acquisire non solo le tre osservazioni necessarie alla determinazione delle coordinate X,Y, Z di ogni punto ma anche i valori RGB corrispondenti al singolo punto rilevato.

L'acquisizione automatizzata per passi angolari discreti annulla la preventiva operazione di discretizzazione propria del rilevamento diretto o con stazione totale, che impone una conoscenza a priori dei punti interessati dai fenomeni di dissesto. Il laser scanner rileva la posizione di tutti i punti nello spazio su una maglia ortogonale fissata: riducendo la distanza tra i punti acquisiti a valori molto piccoli, nell'ordine del centimetro è quindi possibile rilevare intere superfici, nella loro forma complessiva, senza bisogno di ridurle a linee individuate da predeterminati piani di sezione orizzontali e verticali.

Il prodotto finale delle scansioni è una “nuvola di punti” con una densità superiore ad un punto per centimetro, che ricostruisce la forma complessiva dell'oggetto attraverso la visualizzazione delle sue superfici.

Nonostante si sia parlato in precedenza di acquisizione automatica dei dati, anche nel caso di un rilevamento con laser scanner occorre un accurato progetto preliminare delle fasi di rilievo e dunque un sopralluogo al fine di verificare le caratteristiche geometrico – dimensionali del manufatto e l'accessibilità dei luoghi. Immaginando di paragonare lo scanner ad una sorgente luminosa si devono infatti prevedere sufficienti punti di acquisizione in modo da coprire tutti i “coni d'ombra” che superfici sporgenti, sottosquadri, rientranze e impedimenti vari inevitabilmente proiettano.

La grande piazza del borgo ha favorito in questo senso il rilievo da punti sufficientemente lontani, in modo da permettere di minimizzare la copertura dovuta a rientranze ed oggetti. Sulla base di questi fattori sono state definite, oltre alla strumentazione da usare, al posizionamento e al numero delle stazioni, anche le impostazioni di scansione che determinano la quantità dei punti rilevati.

Essendo state necessarie molte scansioni per acquisire tutte le superfici murarie e coprire tutte le superfici, è seguita una fase di post-processamento dei dati in cui, con l'utilizzo di specifici software si sono assemblati i risultati ottenuti dai singoli lavori. Per poter ricomporre ed allineare le scansioni in una nuvola globale si è proceduto secondo una metodologia chiamata “georeferenziazione sui target”, che prevede l'uso di dati topografici.

Dopo questa prima fase di assemblaggio delle scansioni e di registrazione dei dati il modello tridimensionale dell'oggetto può considerarsi completo, anche se costituito solamente da milioni di punti nello spazio.



*Figura 1 – Le scansioni della piazza del Borgo di Sant'Eusanio Forconese.*

Uno dei motivi che ha portato alla scelta di un rilievo attraverso l'utilizzo di un laser scanner è stata proprio la necessità di acquisire la forma nel complesso delle sue irregolarità e non solo nelle sue linee essenziali, per poter esprimere valutazioni sulla sua qualità costruttiva e sulle possibili deformazioni subentrate nel tempo e dopo il sisma e quindi ipotizzare corretti fenomeni di dissesto e conseguenti adeguati progetti di consolidamento.

Il laser scanner è stato scelto anche per la possibilità di rilevare parti non raggiungibili con metodologie più tradizionali e per la necessità di minimizzare l'esposizione dell'operatore in un contesto ad alto rischio come quello di porzioni di città colpite dal sisma.

Sono poi possibili restituzioni raster e vettoriali ottenibili in modo semplificato e la tecnologia laser scanner permette anche nuovi prodotti grafici, come l'ortofoto 3D e le immagini solide.

La nuvola di punti, risultato della scansione laser scanner, è stata utilizzata, nel caso del borgo di Sant'Eusanio Forconese, per lo studio di una particolare applicazione volta ad analizzare la facciata di Palazzo Barberini, prospiciente la piazza, come verifica di alcune ipotesi di dissesto dopo il terremoto del 6 aprile dello scorso anno.

Attraverso un programma di modellazione di superfici in 3D, *Surfer 9*, distribuito dalla *Golden Software*, si è voluta studiare l'elaborazione di un possibile metodo automatico-assistito per l'individuazione dei meccanismi di dissesto innescatosi nelle fabbriche colpite dal sisma.

Si ricorre spesso a metodologie basate su dati in formato digitale per descrivere la variazione continua di quote nello spazio, utilizzando i cosiddetti *Digital Terrain Model* o *Digital Elevation Model*. I *DTM*, inizialmente introdotti proprio per descrivere l'andamento delle quote del territorio, sono ora impiegati per descrivere l'andamento di un qualsiasi attributo (ad esempio inquinanti o temperature al suolo), al variare delle coordinate planimetriche.

I dati per costruire un *DTM* vengono acquisiti con differenti distribuzioni spaziali a seconda del tipo di impiego a cui è finalizzato il *DTM*: nel caso di scansioni laser i dati sono costituiti da una serie di punti ognuno con coordinate  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Il programma utilizzato permette la creazione di *DSM* (*Digital Surface Model*) a partire da una nuvola di punti con coordinate  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Solitamente è usato per la creazione di modelli digitali di terreno a partire da scansioni laser o da cartografia numerica, in questo caso se ne è voluta testare la validità creando superfici 3D dei prospetti degli edifici del borgo per studiarne l'andamento rispetto ad un asse di riferimento stabilito.

Si è scelto di testare il metodo descritto su una facciata di palazzo Barberini a Sant'Eusanio, di cui sono state compilate le schede speditive di rilievo del danno fornite dalla Protezione Civile, in modo da consentire un confronto tra i risultati ottenuti e le ipotesi da verificare.

L'acquisizione dei dati del laser scanner avviene senza selezione preventiva dell'operatore e consente una vasta raccolta di dati, che però devono essere sempre selezionati: la nuvola di punti ottenuta dal laser scanner è stata pulita, eliminandone gli errori e prendendo in considerazione solo la porzione di edificio desiderata. Sono stati cancellati i punti troppo distanti dalla facciata e non appartenenti al piano medio, rispetto a cui si vogliono evidenziare i discostamenti.

Viste le considerazioni fatte in precedenza sulla formazione di *DTM*, è stato necessario modificare il sistema di riferimento della nuvola: è stata rototraslata in modo che il piano formato dagli assi  $x$  e  $y$  individui il prospetto considerato e l'asse  $z$  ne risulti conseguentemente ortogonale. Il programma *Surfer* infatti, essendo concepito per la cartografia territoriale a vasta scala, procede con la creazione di *DSM* a partire dalla variazione in quota dei punti considerati, considerando quindi il valore  $z$  della terna di coordinate. In pratica si considerano gli scostamenti dal piano medio provocati dall'attivazione dei meccanismi di collasso come "differenze di quota" rispetto ad uno "zero", un asse medio stabilito in modo opportuno.

A partire dalla nuvola di punti, la cui distribuzione è irregolare, si è proceduto alla creazione di un file grid (grigliato), ottenuto mediante il ricampionamento regolare dei punti originali di misura, che tipicamente sono distribuiti invece in maniera irregolare. Il file che contiene i dati digitali che

rappresentano il *DSM* è quindi una matrice di valori, ognuno dei quali corrisponde alla quota attribuita a un pixel del raster che rappresenta il modello stesso. Nel caso considerato è stata usata una griglia regolare di punti: fissato il passo di campionamento (e quindi l'intervallo della griglia), le coordinate *x* e *y* sono implicite.

Per ricavare una griglia regolare di valori a partire dai dati a disposizione è possibile utilizzare diversi algoritmi di interpolazione. Surfer permette la scelta tra numerosi diversi algoritmi, nel caso considerato si è optata per la scelta dell'algoritmo di Kriging, che permette di creare una buona qualità di grigliato per molti set di punti. Per eliminare la rumorosità dei dati è stato applicato un filtro sulla mediana, in modo da ottenere una superficie meno disturbata.

È stato quindi creato il *DSM* della facciata dell'edificio. Attraverso una scala a falsi colori è possibile individuare, in modo semplice ma nello stesso tempo univoco, gli scostamenti rispetto al piano medio impostato. Sono proprio questi scostamenti che individuano i dissesti provocati dal sisma e in questo modo la lettura degli stessi risulta molto agevolata.

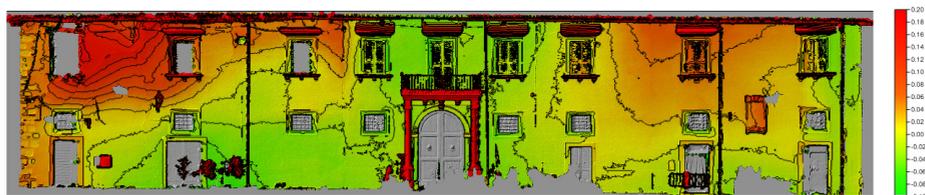


Figura 2 – *DSM della facciata con visualizzazione a falsi colori.*

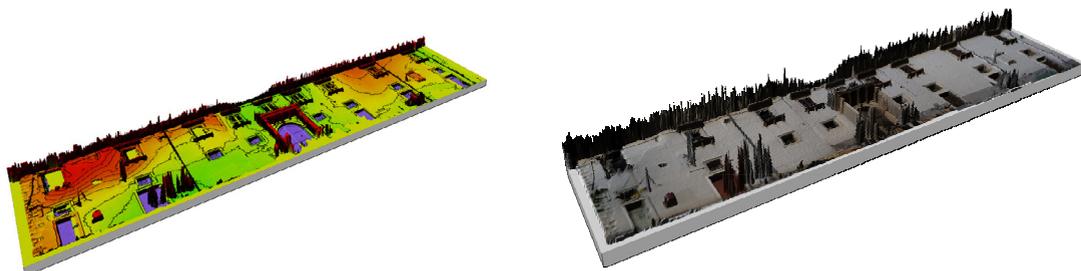
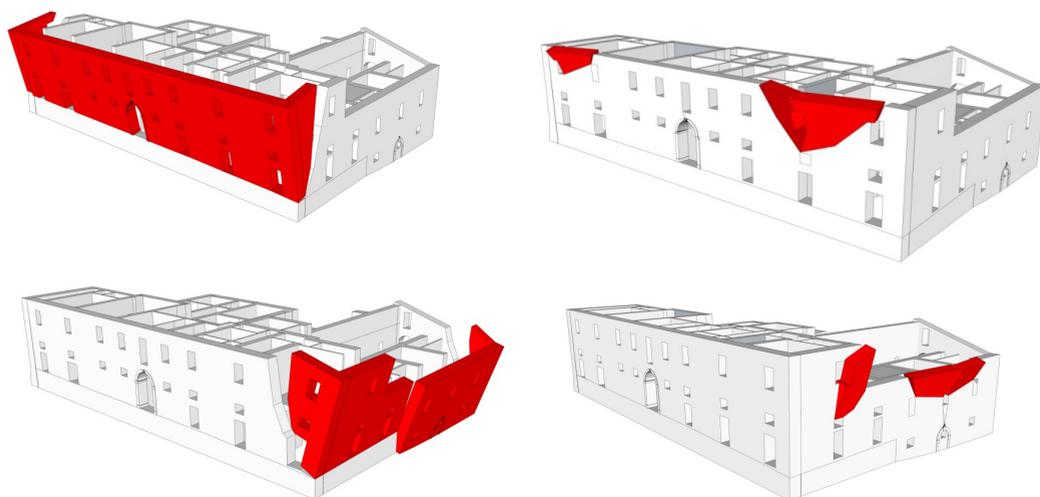


Figura 3 – *Visualizzazione 3D del DSM a falsi colori e con valori RGB.*

### Conclusioni

Attraverso questo metodo sembra possibile verificare, utilizzando i dati laser acquisiti sul posto, delle ipotesi di danneggiamento che sono state fatte a seguito del sisma in modo speditivo e a vista, in genere eseguite nella prima fase di emergenza post-sismica. I meccanismi di collasso si manifestano infatti in genere in modo visibile sulle fabbriche, provocando lesioni e danno che ne sono diretta testimonianza e che sono sempre gli stessi per lo stesso meccanismo di danno.

Con questo tipo di elaborazioni è possibile evidenziare anche minime variazioni rispetto al piano, non apprezzabili se non con metodi strumentali ma che tuttavia testimoniano meccanismi attivati, permettendo sempre e comunque un confronto con il dato numerico.



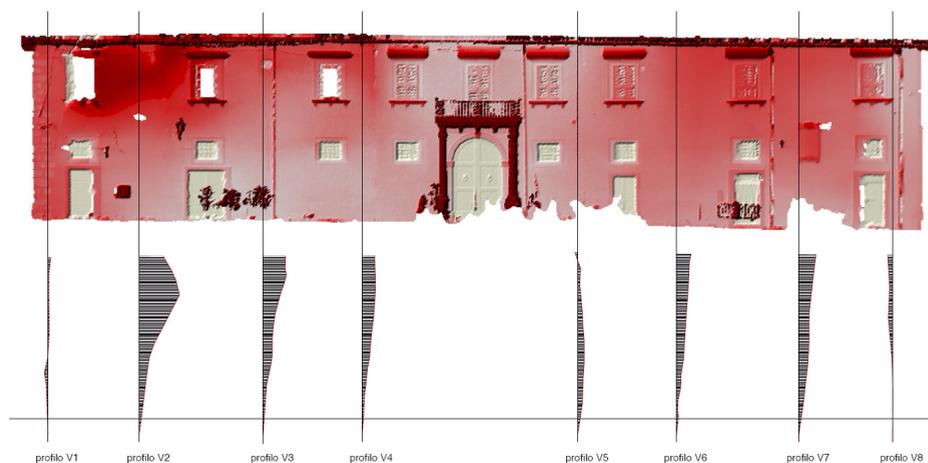
*Figura 4 – Confronto tra danni identificati visivamente e dopo la verifica con DSM  
- facciata e lato est.*

Viene posticipata la fase di elaborazione dei dati e quindi ridotto il rischio che deriva dall'esposizione dell'operatore in luoghi pericolosi come quelli del centro storico colpito dal sisma: l'acquisizione automatica di una grande quantità di dati permette tempi brevi di permanenza.

Le nuove elaborazioni grafiche ottenute sono facilmente ottenibili e comprensibili, comunicano con precisione i dati metrici e hanno forte impatto grafico, ma è tuttavia possibile ottenere anche elaborazioni più tradizionali, attraverso l'estrazione automatica di profili o di curve di livello, anche con esagerazioni volte ad evidenziare determinati fenomeni di dissesto.

Proprio la divisione del lavoro in due fasi successive, una di campagna e una di elaborazione, può portare a qualche problema interpretativo: viene a mancare infatti il contatto diretto con la fabbrica. La lettura dei meccanismi di dissesto delle fabbriche risulta particolarmente agevole per quelli che vengono definiti "danni di primo modo", cioè attivati da forze che agiscono in modo ortogonale al piano della facciata e che generano quindi danni fuori dal piano come rotazioni, ribaltamenti o espulsioni di materiale. Sono proprio questi scostamenti dal piano che vengono evidenziati attraverso l'utilizzo di una scala a falsi colori del programma Surfer.

La lettura non è altrettanto agevole per quanto riguarda i danni di secondo modo, cioè provocati da forze che agiscono nel piano della muratura, che generano soprattutto rotture a taglio nei maschi murari e nelle fasce di piano. Questo tipo di danno è testimoniato dalle tipiche rotture della muratura ad X, ma proprio perché avviene nel piano stesso della muratura non è direttamente leggibile come spostamenti del materiale murario rispetto ad uno zero. Per questo motivo tale tipo di elaborazione grafica andrebbe sempre accompagnata da disegni e da analisi di tipo tradizionale, come possono essere i quadri fessurativi o deformativi, di cui potrebbe essere considerata come un completamento. Solo in questo modo è possibile una lettura globale di un sistema complesso come quello di un edificio, per avere informazioni adeguate circa lo stato di salute dello stesso dopo il sisma. Devono infatti sempre tenere in considerazione anche altri aspetti, non solo "spaziali", quali lo stato di conservazione e di degrado del materiale che compone la muratura e la bontà delle connessioni tra le parti della fabbrica.



*Figura 5 – DSM ed elaborazioni tradizionali: profili verticali.*



*Figura 6 – DSM ed elaborazioni tradizionali: quadro fessurativo*

## **Bibliografia**

- Achille C, (2008) "Applicazioni di tecniche miste laser scanner e fotogrammetria", in "Il cantiere della conoscenza: metodologie e strumenti per la conservazione e il restauro", a cura di A. R. Genovese, Arte Tipografica, Napoli.
- Balletti C, Guerra F. (2006), "Il rilievo per la rappresentazione 3D: la città romana di Grumentum", in Atti del convegno nazionale SIFET "Le nuove frontiere della rappresentazione 3D", Castellaneta Marina, Taranto, 14-16 giugno 2006.
- Guerra F, Balletti C, Adami A, (2005), "3D multiresolution representations in archaeological sites", in Proceedings of CIPA 2005 XX International Symposium "International cooperation to save the world's cultural heritage", Torino, 26 settembre - 1 ottobre 2005.
- Guidi G, Beraldin J A, (2004) *Acquisizione 3D e modellazione poligonale. Dall'oggetto 3D al suo calco digitale*, Edizioni Poli design, Milano.
- Monti C, Fregonese L, (2008), "Il rilievo e il patrimonio culturale: le interrelazioni con la scienza e la pratica", in "Il cantiere della conoscenza: metodologie e strumenti per la conservazione e il restauro", a cura di A. R. Genovese, Arte Tipografica, Napoli.