

La tecnologia laser scanning per la valutazione statica delle strutture storiche

di Filiberto Chiabrando, Elisabetta Donadio, Giulia Sammartano e Antonia Spanò

Il gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino, ha avviato in collaborazione con il gruppo di Ingegneria delle Strutture, un programma di esperienze condotte su casi studio significativi, per contribuire agli studi che tendono a delineare buone pratiche per la generazione di modelli relativi a diverse tipologie di strutture storiche.

Questo contributo intende riferire alcuni risultati di queste esperienze: in particolare viene approfondita la generazione di modelli accurati da nuvole dense e della loro riduzione a modelli dalle geometrie semplificate, con l'ulteriore finalità di ricercare strategie di automazione del processo di generazione ed editing che conduca a modelli adeguati per il calcolo strutturale analitico.



La tecnologia laser scanner e la sua versatilità per le analisi architettoniche

I metodi aggiornati del rilevamento *close-range*, basati su sistemi a sensore attivo o passivo che consentono di generare modelli tridimensionali accurati e altamente descrittivi degli oggetti rilevati, sono sempre più chiamati ad accompagnare l'intero sviluppo dei progetti di Conservazione del patrimonio costruito.

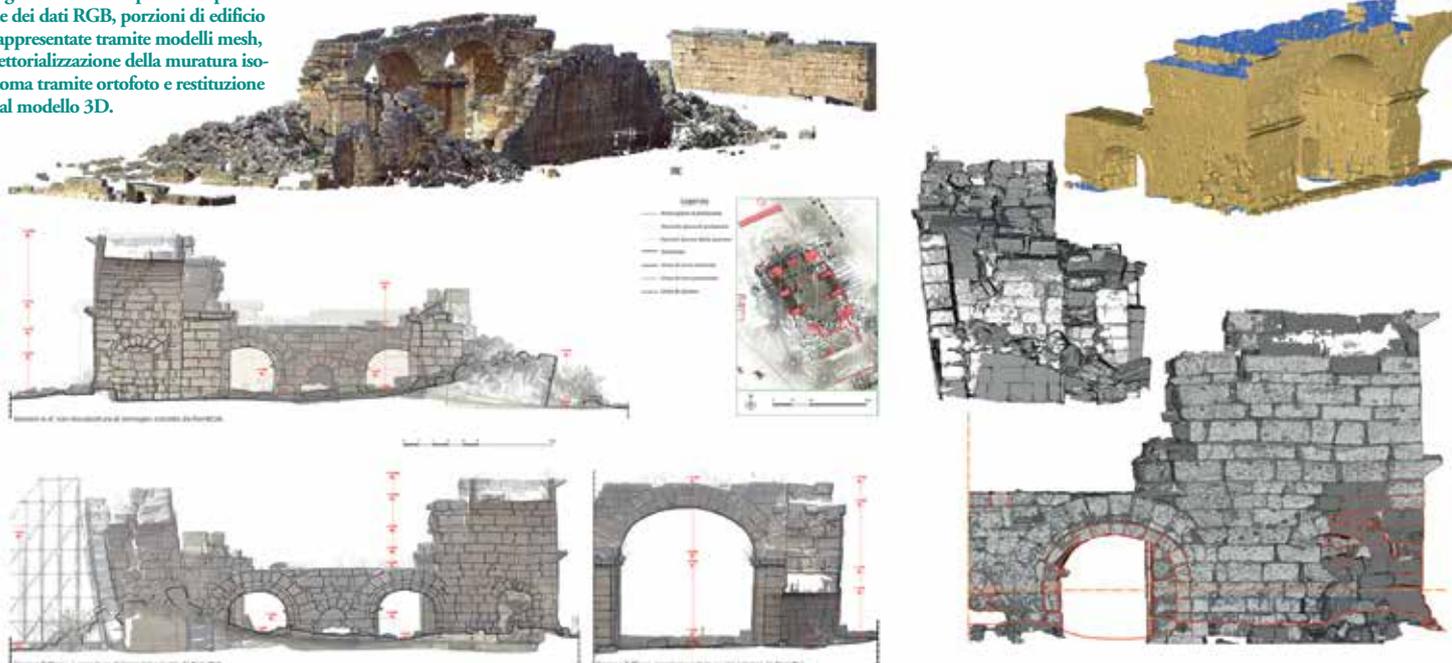
Le finalità principali per le quali viene richiesto l'intervento di metodologie in grado di fornire risultati metrici verificabili e di qualità predefinite possono essere variegati e sempre più spesso non indipendenti fra loro.

L'introduzione di automatismi nella raccolta dati, elaborazione, gestione, produzione e comunicazione dei risultati consente di focalizzare l'attenzione sulla lettura e interpretazione delle informazioni, sui sistemi di rappresentazione e comunicazione, sulla diffusione condivisa e sulla facilità di fruizione dei risultati. Il vantaggio pienamente riconosciuto ormai da un certo tempo alle tecnologie della fotogrammetria digitale e del *terrestrial laser scanning* (TLS), e soprattutto alla loro integrazione, è quello dell'elevata produttività di acquisizione dei dati, densi e accurati e tridimensionali, che consentono di costituire un archivio digitale 3D dal quale

selezionare e declinare le elaborazioni successive al fine di derivare prodotti del rilievo, modelli digitali 2D, 3D e le ortofoto. (Boehler, Marbs, 2004; Shan, Toth, 2008)

L'insieme delle nuvole di punti è a tutti gli effetti un database tridimensionale, che sicuramente consente di indagare più dettagliatamente il manufatto, tramite anche i prodotti derivati; l'ortoproiezione e i DEM hanno avuto infatti un ruolo fondamentale nello studio e analisi del variegato mondo dei Beni Culturali, principalmente architettonici e archeologici ma anche tutti gli altri, da quelli paesaggistici a quelli artistici, poiché hanno consentito di

Fig. 2 - Modello di punti con proiezione dei dati RGB, porzioni di edificio rappresentate tramite modelli mesh, vettorializzazione della muratura isodoma tramite ortofoto e restituzione dal modello 3D.



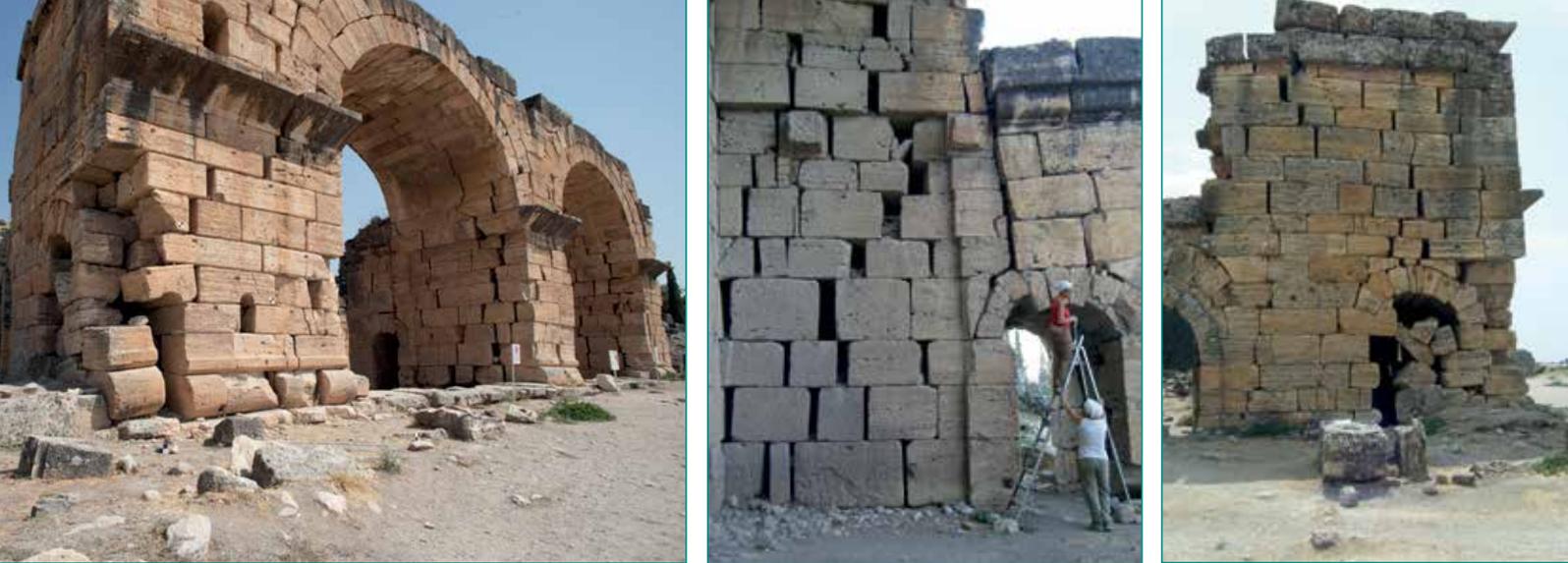


Fig. 1 - Alcuni esempi degli imponenti disesti delle murature e delle volte delle Terme-chiesa.

finalizzare le indagini di sistemi costruttivi, elementi architettonici, materiali, degrado superficiale e strutturale, nonché nel monitoraggio degli stati di conservazione. (Patias, 2013)

La generazione di modelli idonei alla valutazione statica

Il campo di studi della valutazione e del consolidamento delle strutture architettoniche caratterizzate da tecniche costruttive tradizionali, deve sicuramente affrontare la sfida di un infinito delinearci di casi studio, di scenari diversi dovuti a sistemi e tecniche costruttive differenti, materiali diversi, moltiplicati in declinazioni di aree geografiche che esprimono le proprie peculiarità. Con il crescere della consapevolezza della fragilità dei beni ed al

contempo del rischio cui sono sottoposti per le ragioni sia antropiche che naturali, oltre ad essere accresciute le capacità di analisi e di intervento, si è sviluppata la fiducia nelle sinergie interdisciplinari. E' quindi un'importante conseguenza che le linee guida dedicate agli interventi sul patrimonio costruito tutelato¹ suggeriscano esigenze ai sistemi di documentazione e rilievo, ed anzi è rilevante che i diversi campi di studio si confrontino e si infittiscano gli studi in collaborazione in quanto è sicuramente riconosciuta preminente la necessità di poter disporre di quadri conoscitivi il più possibile dettagliati ed approfonditi. (Pieraccini et al., 2013, Castellazzi et al., 2015) La generazione di modelli idonei alle valutazioni statico-

strutturali si può considerare sicuramente una specializzazione ulteriore della generazione di modelli architettonici dedicati in senso più vasto alle variegate indagini e monitoraggi richiesti dai progetti di conservazione. In linea generale la segmentazione del modello che individua porzioni omogenee rispondenti all'organizzazione degli elementi architettonici e costruttivi della fabbrica comporta un livello di organizzazione del modello che è sicuramente cruciale per poterlo utilizzare con finalità specializzate di diverso tipo. Tale livello di organizzazione deve essere ulteriormente finalizzato al riconoscimento del sistema strutturale per le indagini di stabilità condotte con il metodo degli Elementi Finiti, che è una tecnica numerica che permette

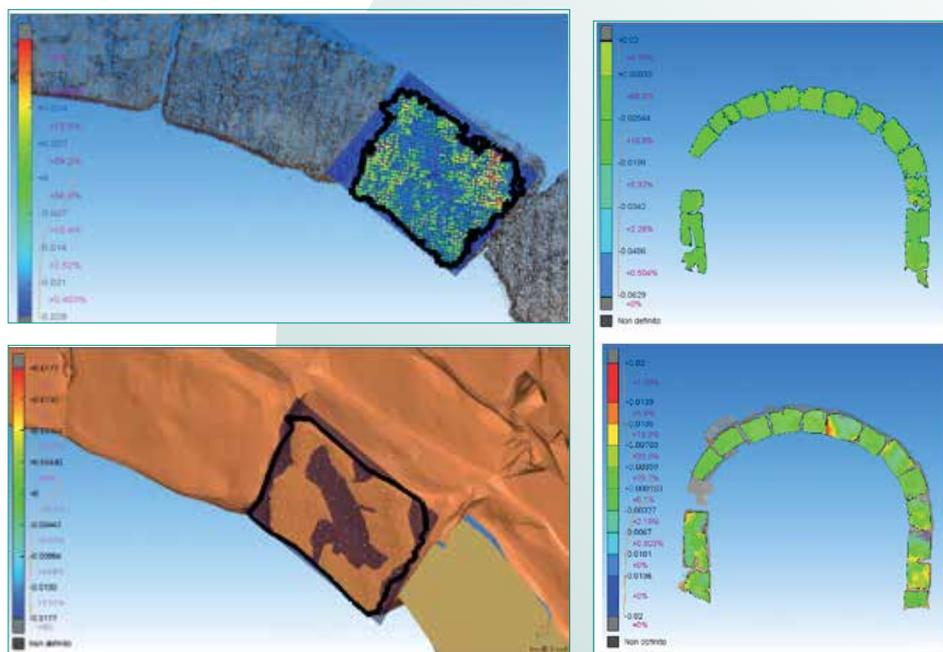


Fig. 3 - A sinistra, applicazione dell'algoritmo region growing per l'individuazione di superfici piane sulla mesh dei conci architettonici. La variazione di tolleranza della ricerca dei punti complanari consente l'individuazione dei contorni dei singoli blocchi murari. A destra l'estrazione dei contorni dei conci di un arco, applicata alla nuvola di punti e alla superficie triangolata. Il riconoscimento a partire dalla nuvola è molto accurato (sul 70% dei punti lo scarto dalla nuvola originale è inferiore a 7mm); leggermente meno accurato è il riconoscimento a partire dalla mesh ma la linearità del profilo e il numero di vertici estratti è sicuramente più opportuno per gli obiettivi indicati (sul 40% circa dei punti lo scarto è inferiore a 3mm, il 40% circa tra 3 e 7 mm e per i restanti si raggiungono anche i 2cm).

di determinare lo stato di sforzo e di deformazione di una struttura soggetta a una condizione di carico, quando la soluzione per via analitica sia impossibile da ricavare. (Carpinteri, 1997; Corradi Dell'Acqua, 2010)

La complessità dell'operazione risiede anche nel fatto che la caratterizzazione funzionale deve essere accompagnata da quella materica; quest'ultima esula dal campo d'azione delle tecniche geomatiche che supportano la caratterizzazione morfologica degli elementi costruttivi delle fabbriche e delle loro alterazioni².

Sul versante dell'introduzione di processi automatici nella gestione dei modelli da nuvole

di punti, la segmentazione delle nuvole ha rivestito un ruolo importante e gli approcci possono essere classificati nelle due categorie delle tecniche *region based* e *edge based*. (Alshwabkeh et al., 2006; Crosilla et al., 2009; Lari et al., 2011)

Esperienze di generazione di modelli 3D sul patrimonio antico, storico e moderno - Murature antiche. Le Terme extraurbane di Hierapolis di Frigia (TK)

Il complesso delle Terme-Chiesa (Mighetto, 2012) per l'entità dei dissesti e dei crolli che gli derivano da due disastrosi eventi sismici (I e nel III sec.; Hancock, Altunel, 1997), è stato scelto come l'edificio più

rappresentativo del progetto di Parco archeo-sismologico ierapolitano (D'Andria, 2007). Al proposito di rendere l'intero edificio oggetto di un articolato programma di consolidamento e restauro è legato il rilievo TLS completo e la conseguente preliminare indagine condotta con il metodo degli Elementi Finiti utilizzando il software iDiana^{®3}, che è particolarmente indicato per lo studio dei fenomeni di propagazione della frattura che caratterizzano i modi di collasso fragili, come pure il comportamento delle interfacce coesive e scabre, come quelle che si riscontrano al contatto tra i blocchi della muratura di travertino. (Invernizzi et al., 2014)

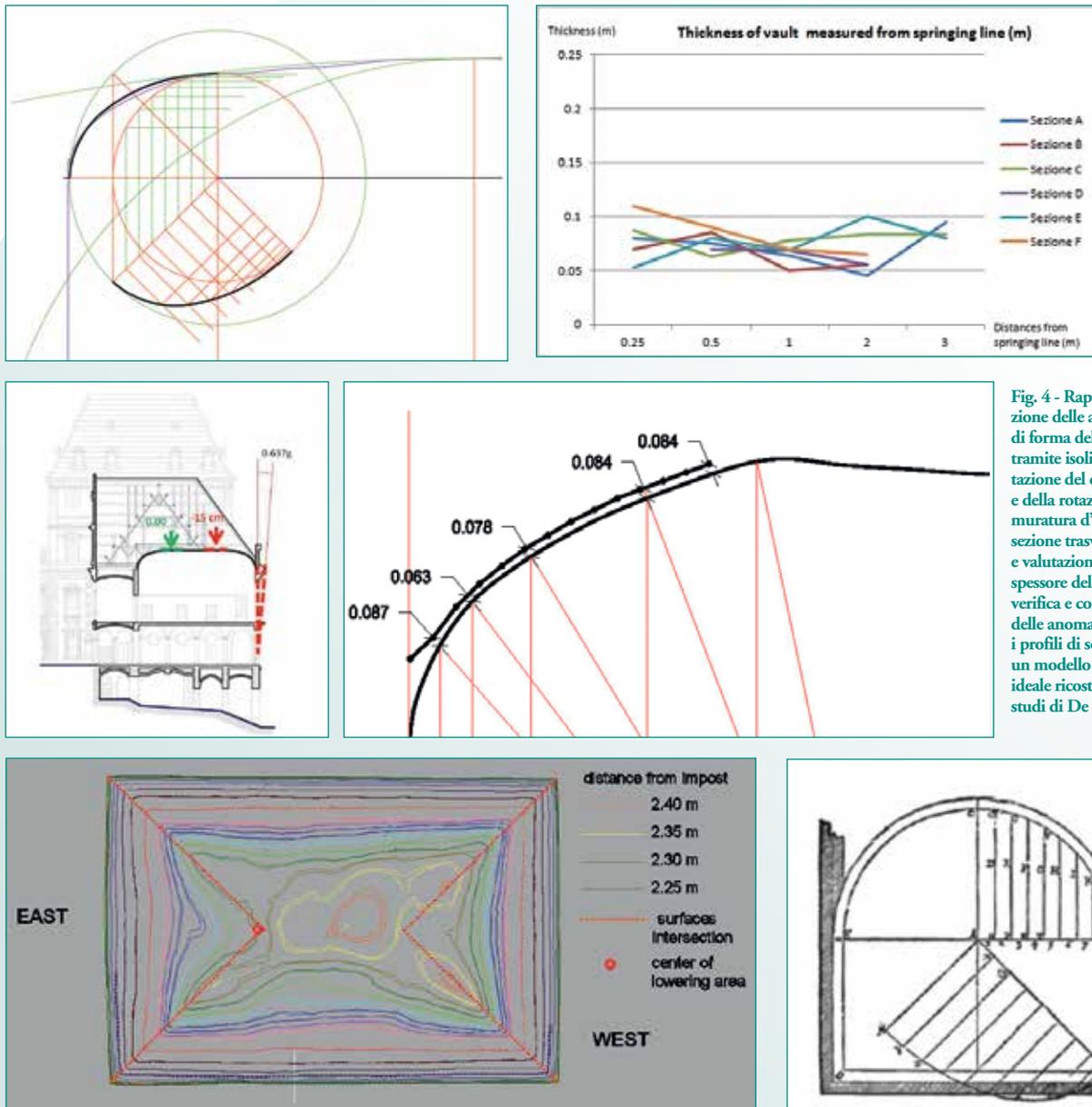


Fig. 4 - Rappresentazione delle anomalie di forma della volta tramite isolinee, valutazione del cedimento e della rotazione della muratura d'ambito, sezione trasversale e valutazione dello spessore della volta, verifica e confronto delle anomalie lungo i profili di sezione con un modello geometrico ideale ricostruito dagli studi di De L'Orme.

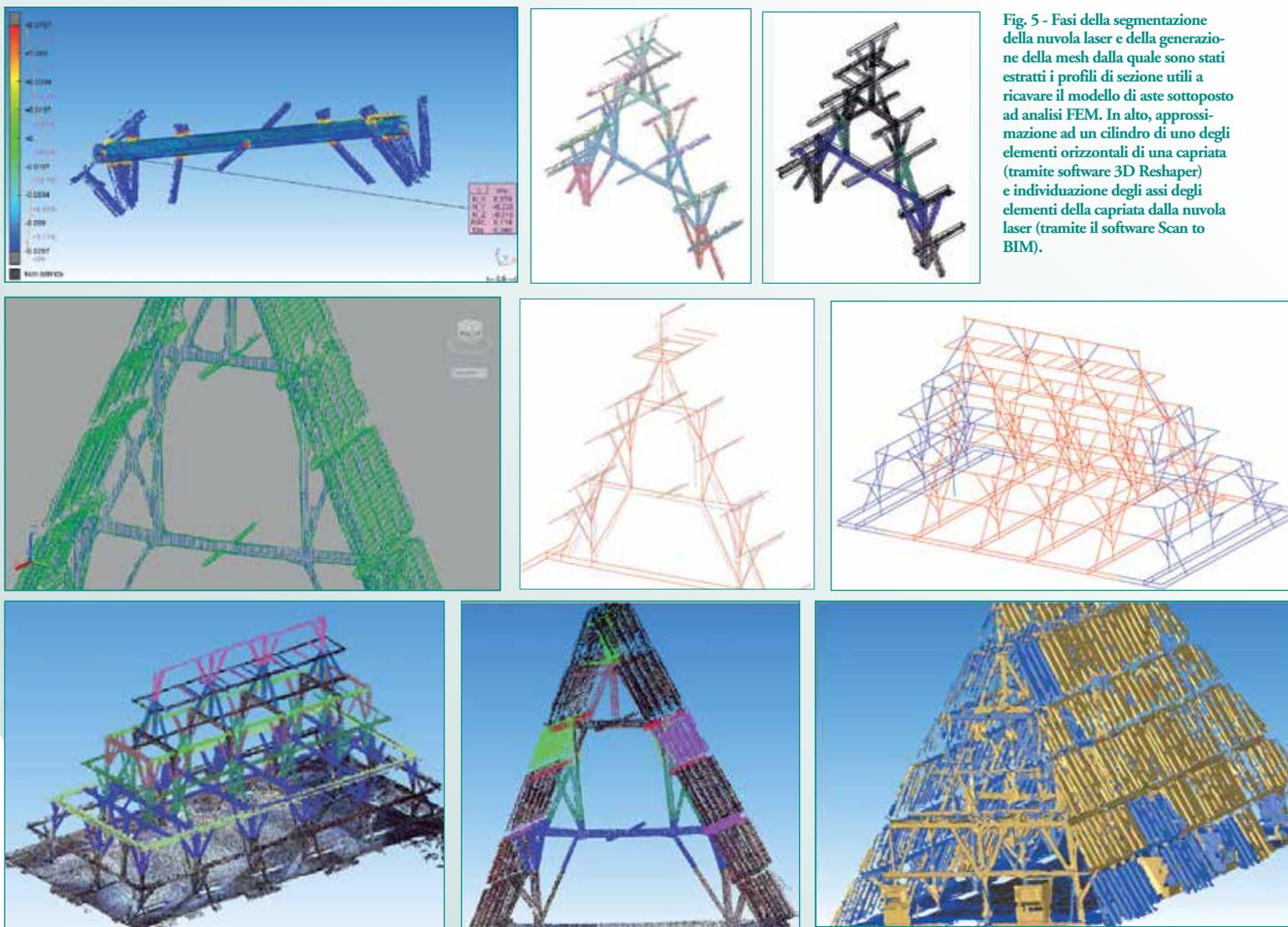


Fig. 5 - Fasi della segmentazione della nuvola laser e della generazione della mesh dalla quale sono stati estratti i profili di sezione utili a ricavare il modello di aste sottoposto ad analisi FEM. In alto, approssimazione ad un cilindro di uno degli elementi orizzontali di una capriata (tramite software 3D Reshaper) e individuazione degli assi degli elementi della capriata dalla nuvola laser (tramite il software Scan to BIM).

Nel quadro complessivo degli imponenti disesti, l'effetto leggibile più rilevante è il cedimento e la rotazione della muratura isodoma a grandi blocchi, in particolar modo del fronte est, che ha determinato la disarticolazione delle murature dei possenti pilastri che sostenevano le volte della struttura termale, creando l'attuale configurazione dei conci a cui manca una parte dell'ammorsatura. Il rilievo laser scanning e fotogrammetrico integrati hanno dimostrato che nelle situazioni peggiori l'allontanamento tra i blocchi lungo la sezione trasversale di volte e murature vale circa 30 cm, con punti in cui la distanza tra blocchi, in origine contigui, è addirittura di 43÷45 cm. Il fuori piombo totale della muratura orientale supera il

metro sulla sommità ($h = 12\text{m}$ circa). Per la realizzazione del rilievo laser scanning sono state eseguite un totale di 43 scansioni con passo tra i punti alla distanza dieci metri pari a 6 mm; per raggiungere i requisiti di precisione e di georeferenziazione sono stati misurati target distribuiti a partire da una rete topografica d'inquadramento dell'edificio. La registrazione delle nuvole di punti è stata gestita raggruppando set diversi di scansioni, suddivise per aree differenti dell'edificio, sia per agevolare il calcolo, sia per consentirne un miglior controllo (tale impostazione di base del rilievo TLS caratterizza anche le esperienze dei prossimi paragrafi).

Sebbene questa ricchezza informativa sembri a piena disposizione tramite gli infiniti possibili profili di sezione generabili automaticamente, l'isolamento di un singolo profilo di sezione dalla sua giacitura e dal modello che lo genera diviene alquanto sterile, a meno di casi corrispondenti a profili di sezione apportati su giaciture specifiche di elementi architettonici (imposte, chiavi, modanature ecc.). L'estrazione di un modello bidimensionale della struttura rilevata inoltre, sezionata o proiettata su un piano architettonico, è un'operazione che se gestita manualmente richiede tempi onerosi di editing (Fig. 2) e che può essere quindi efficacemente supportata da strumenti automatici (Fig.3).

Sistemi lignei di età barocca. La volta del salone centrale e la travatura di una porzione della copertura del Castello del Valentino

Il castello del Valentino collocato sulla riva sinistra del Po ed oggi compreso nel tessuto urbano, era originariamente un villino fluviale e fu scelto dalla famiglia Savoia come residenza extraurbana; attestato fin dalla metà del XVI secolo, nel 1620 fu trasformato alla configurazione grossomodo attuale per volere di Cristina di Francia e per opera dell'architetto di corte Carlo di Castellamonte. Il gusto francese della sistemazione prevedeva il *pavillon system*, con quattro torri angolari e una corte centrale.

Le zone oggetto di indagine integrata tramite rilievo laser scanning e monitoraggio dello stato di salute oltre che di analisi FEM, sono stati l'estesa volta del salone d'onore e la struttura lignea di copertura di una delle torri, unica superstite seicentesca dopo le sostituzioni occorse per i restauri.

La volta a padiglione, cosiddetta "falsa volta" poichè realizzata

tramite il getto di un intonaco di gesso su incanniccio appeso a centine lignee, è interamente affrescata e fu danneggiata da infiltrazioni d'acqua dovute ai bombardamenti dell'ultimo conflitto mondiale.

Il rilievo TLS ha interessato l'intradosso e l'estradosso, con il ruolo di determinare anche lo spessore della volta, che proprio per il ripristino del manto in luogo dell'affresco ha reso disomogenea la distribuzione dei carichi originari. Gli esiti più rilevanti dell'indagine (Bertolini et al., 2013) hanno evidenziato un cedimento piuttosto significativo, da imputare oltre al consolidamento della volta, anche ad una rotazione e spianamento della muratura d'ambito orientale. (Fig. 4)

Per migliorare la valutazione dell'entità delle anomalie della volta, una mirata serie di profili di sezione del modello laser sono stati confrontati con un modello dalla geometria derivata dall'ipotetico progetto della volta, dal momento che il sistema costruttivo ed il tipo di curvatura lo hanno ricondotto

ai tipi di P. De l'Orme (P. De l'Orme, *Nouvelles inventions pour bien bastir à petits frais*, Frédéric Morel, Paris, 1561.) (Fig. 4, sotto)

La struttura lignea delle coperture ha un'organizzazione tridimensionale; nelle torri la sezione trasversale presenta una serie di grandissime capriate con legature finali, mentre nella longitudinale presenta, inferiormente alla trave di colmo, 5 serie di controventi e 3 ordini di impalcato con funzione di irrigidimento; lo spiovente ha inclinazione molto accentuata ed al tavolato terminale sono ancorate le lastre di ardesia.

In seguito al rilievo laser scanning, una prima strategia per generare un modello utile alle analisi FEM, è stata l'estrazione a passo regolare e ravvicinato di profili di sezione della complessa struttura per ricercare l'asse baricentrico dei singoli elementi dell'orditura lignea che è stata in tal modo verificata con metodo FEM (Bertolini et al., 2015) (Fig. 5 in alto).

La nuvola laser, benchè rumorosa a causa del colore, rui-

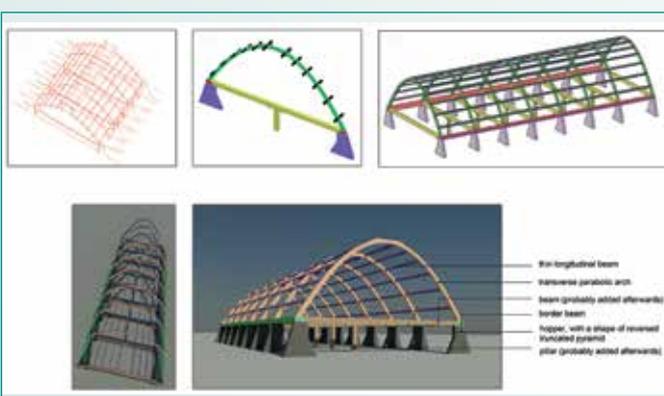
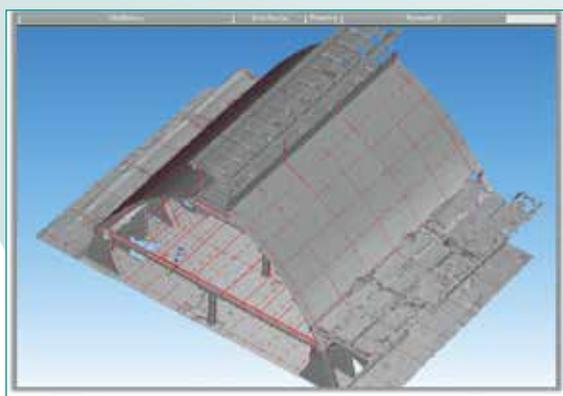
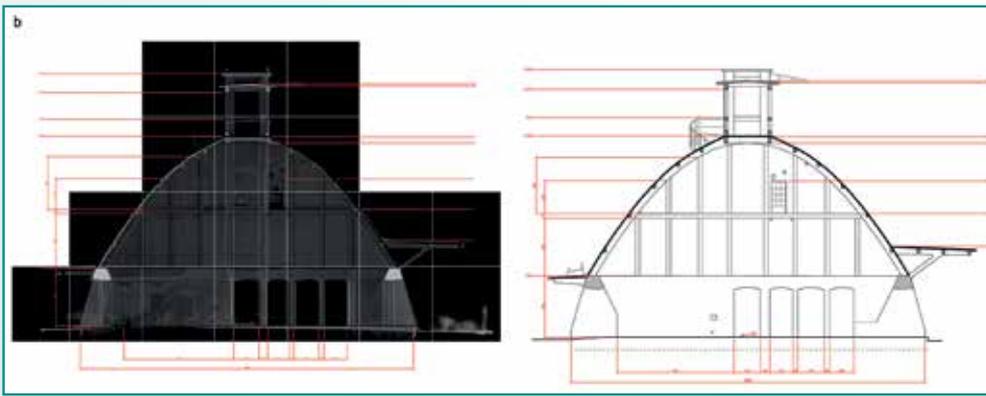


Fig. 6 - (in alto) Il paraboloido di Casale Monferrato in uno scorcio dell'interno e in due rappresentazioni architettoniche di sezione trasversale, con e senza proiezione della nuvola; (in basso) sezioni mirate del modello laser per la ricostruzione organizzata secondo il ruolo funzionale dei singoli elementi strutturali.

dezza e per lo spesso strato di polvere che ricopre l'orditura lignea storica, una volta ottimizzata ben si presta ad essere riconosciuta e approssimata a elementi geometrici dalle primitive notevoli come i cilindri; ciò è oggi raggiungibile tramite software di modellazione da nuvole, o dedicati alla gestione e archiviazione come i Building Information Modeling (BIM). (Barazzetti, 2015)

Le volte sottili in CA resistenti per forma. Il Paraboloide di Casale Monferrato

Il caso studio del Paraboloide di Casale rappresenta un caso esemplare delle architetture resistenti per forma poiché la sua epoca di costruzione, ipotizzata intorno agli anni '20 del '900, ne fa un punto cardine nell'evoluzione delle costruzioni in CA. Il rilievo laser scanning applicato sia all'intradosso che all'estradosso della membrana paraboloidale, ha consentito di valutare un'estrema aderenza alla geometria di progetto (direttrici paraboliche traslate nella direzione dell'asse longitudinale dell'edificio), non essendo osservabili cedimenti o deformazioni in alcun punto della grande superficie paraboloidale. Il vantaggio più rilevante del rilievo TLS è stata la possibilità di ricavare in modo agevole un modello semplificato di forma, molto fedele all'originale, ed utile alla verifica statica. (Bertolini et al., 2014)

La volta è spessa soltanto 8cm (per circa 23 m di luce) ed è nervata tramite archi parabolici che si concludono in pilastri principali e secondari e travi di irrigidimento longitudinali.

In questo caso la complessità e la pesantezza del modello triangolato, ha suggerito la strategia di creazione di un modello di superfici NURBS, i cui singoli elementi sono stati derivati dai profili di sezione del modello laser, già studiati per la realizzazione del complesso di disegni architettonici standard per la rappresentazione bidimensionale del complesso.

Conclusioni

Più che valutazioni conclusive, si può dire che l'uso integrato dei modelli derivati dalle tecnologie *range based* nel campo della valutazione statica delle strutture storiche sia in progressivo sviluppo. Il quadro attuale testimonia quanto strumenti specialistici di settori diversi fino a poco tempo fa racchiusi in specifici ambiti disciplinari integrino strategie e strumenti di calcolo. Le analisi FEM, si direzionano verso una più completa e integrata gestione dei dati 3D; i sistemi che gestiscono NURBS e BIM sono sempre più in grado di controllare ed elaborare dati provenienti da sistemi a scansioni laser.

NOTE

- 1 DPCM 2011, Valutazione e riduzione del rischio sismico...
- 2 Dedicata ai contributi che la Geomatica può offrire all'analisi e all'interpretazione strutturale di architetture storiche in muratura, la tesi di dottorato di N. Guardini 2014
- 3 TNO Diana@, 2007; Url: <http://tnodiana.com/>

BIBLIOGRAFIA

- Alshawabkeh, Y. Haala N., Fritsch D. (2006), 2D-3D feature extraction and registration of real world scenes, IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25-27 September 2006.
- Barazzetti, L.; Banfi, F.; Brumana, R.; Gusmeroli, G.; Oreni, D.; Previtali, M.; Roncoroni, F.; Schiantarelli, G. (2015), BIM From Laser Clouds and Finite Element Analysis: Combining Structural Analysis and Geometric Complexity. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2015, XL-5/W4, 345-350.
- Boehler W., Marbs A. (2004) *3D scanning and photogrammetry for heritage recording: a comparison*. Proceedings of the 12th International Conference on Geoinformatics, University of Gävle, Sweden, 291-298.
- Carpinteri A. (1997), *Calcolo Automatico delle Strutture*, Pitagora Editrice, Bologna.
- Castellazzi G., D'Altri A. M., Bitelli G., Selvaggi I., Lambertini A. (2015), From Laser Scanning to Finite Element Analysis of Complex Buildings by Using a Semi-Automatic Procedure, *Sensors*, 15, 18360-18380; doi:10.3390/s150818360.
- Bertolini Cestari C. (1988) Il castello del Valentino. Analisi strutturale. I modelli di comportamento strutturale delle incavallature lignee. *Recuperare. Progetti. Cantieri. Tecnologie. Prodotti*, vol. 36: 429-435
- Bertolini-Cestari C., Chiabrandò F., Invernizzi S., Marzi T., Spanò A. (2013) Terrestrial Laser Scanning and Settled Techniques: a Support to Detect Pathologies and Safety Conditions of Timber Structures. *Advanced Materials Research*, vol. 778: 350-357
- C. Bertolini Cestari, F. Chiabrandò, S. Invernizzi, T. Marzi, A. Spanò (2014) *The thin concrete vault of the Paraboloid of Casale, Italy. Innovative methodologies for the survey, structural assessment and conservation interventions*. In: *Structural Faults & Repair - 2014 Engineering Technics Press Structural Faults & Repair*, London, UK 8-10 July 2014, pp 10, ISBN: 094764475X
- Bertolini-Cestari C., Invernizzi S., Marzi T., Spanò A. (2015) *Numerical survey, analysis and assessment of past interventions on historical timber structures: the roof of valentino castle*, 3rd International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, Wrocław - Poland, September 9-11, 2015
- Corradi Dell'Acqua L. (2010) *Meccanica delle strutture 2 - Le teorie strutturali e il metodo degli elementi finiti*, McGraw-Hill, Milano.
- D'Andria F (2007) *Le attività della MAIER. Missione archeologica italiana 2000-2003*, in D'ANDRIA F, CAGGIA P., (edd.), *Hierapolis di Frigia I. Le attività delle campagne di scavo e restauro 2000-2003*, Istanbul, 1-45
- Guardini N. (2014), *3D Survey and Modelling for structural analysis*, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Firenze.
- Invernizzi S., Spanò A., Alferi C. (2014) *Combined Laser Surveying and Finite Element Modeling for The Structural Assessment of Masonry Structures at the Hierapolis Outer Bath Complex*. In: 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Construction SAHC2014, Mexico City, 15-17 Ottobre 2014.
- Lari Z., Habib A. F., Kwak E., (2011), *An adaptive approach for segmentation of 3d laser point cloud*, ISPRS Archives, Volume XXXVIII-5/W12, pp 103-108.
- Mighetto P., Galvagno F. (2012) *Le Terme-Chiesa e la sfida della conservazione dei segni dell'attività sismica: i primi interventi di messa in sicurezza e di consolidamento del complesso monumentale*. In D'Andria F, Caggia P., Ismaelli T., (edd.) *Hierapolis di Frigia V. Le attività delle campagne di scavo e restauro 2004-2006*, Istanbul, 469-482.
- Patias, P. (2013), *Overview of applications of close-range photogrammetry and vision techniques in Architecture and Archaeology*, in McGlone, Chris (edited by), *Manual of Photogrammetry*, 6th edition, Asprs (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing), p. 1093-1107.
- Pieraccini, M.; Dei, D.; Betti, M.; Bartoli, G.; Tucci, G.; Guardini, N. (2014), Dynamic identification of historic masonry towers through an expeditious and no-contact approach: Application to the "Torre del Mangia" in Siena (Italy). *J. Cult. Herit.*, 15, 1-8.
- Shan, J.; Toth, C. (2008), *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*; CRC: Boca Raton, FL, USA.
- Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008*, Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, in Gazz. Uff. n.47 del 26 febb. 2011 - Suppl. ord. n. 54.

PAROLE CHIAVE

GEOMATICA; STRUTTURE ANTICHE; MODELLI 3D;
LASER SCANNER; VALUTAZIONI STATICHE

ABSTRACT

In recent years, laser scanning technique has aroused huge interest in the field of structural analysis of historical built heritage aimed at the evaluation of different static stress states and the assessment of health conditions. Nowadays it is possible to generate and manage multi-scale and simplified 3D and 2D structural models featured by different levels of detail, on which static assessment can be applied. The Geomatics group of the Politecnico di Torino, in cooperation with the Structural Engineering group, has started a series of experiences and studies oriented to outline "good practices" for the models generation of different historical structures, from ancient stone-walls, up to wooden beams, thin vaults and reinforced concrete structures.

This paper shows some results, issues and considerations of such experiences: an in-depth analysis about the generation of adequate 3D models from point clouds and their geometrical generalization is carried out, which comes with the selection of the best strategies and algorithms for the automation of editing.

The selected case studies are quite different regarding the period in which they were built and, therefore, regarding their building systems. The aim is to highlight tools already available for the automatic and semi-automatic geometrical entities recognition and features extraction which are necessary to develop geometrical models useful for Finite Element Method (FEM). The case studies consist in: the large masonry blocks laid almost dry of the ancient suburban bath of Hierapolis (TK); the thin wooden vault and wooden timbers roof of the large sloping Baroque roofs, both belonging to the seventeenth century Castle of Valentino in Turin; the latest is the reinforced concrete vault of the Paraboloid of Casale Monferrato (AL).

AUTORE

FILIBERTO CHIABRANDO
FILIBERTO.CHIABRANDO@POLITO.IT
ELISABETTA DONADIO
ELISABETTA.DONADIO@POLITO.IT
GIULIA SAMMARTANA
GIULIA.SAMMARTANO@POLITO.IT
ANTONIA SPANÒ
ANTONIA.SPANO@POLITO.IT

DIPARTIMENTO ARCHITETTURA E DESIGN
POLITECNICO DI TORINO