

## Rilevo e modellazione 3D a supporto dell'analisi strutturale: un approccio metodologico e sostenibile per il patrimonio architettonico

Grazia Tucci (\*), Nadia Guardini (\*\*)

(\*) Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Laboratorio GeCo,  
via Pier Antonio Micheli 8, 50121, Firenze, 055 2756587, grazia.tucci@unifi.it  
(\*\*) nadia.guardini@yahoo.it

### Abstract

L'obiettivo della ricerca, sviluppata nell'ambito della tesi di Dottorato "*3D survey and modelling for structural analysis*" (Guardini, 2014), è definire quale possa essere il contributo che la geomatica può offrire all'analisi e all'interpretazione strutturale di architetture storiche in muratura. Lo scopo è l'individuazione di una metodologia che, a partire da un progetto di rilievo che ha come finalità la realizzazione del supporto metrico per l'analisi strutturale, proponga metodi e procedure per tutte le fasi del rilievo. La metodologia utilizzata ha come punto di partenza la determinazione degli obiettivi e dei risultati attesi. La proposta e l'ottimizzazione di percorsi che, soffermandosi sulle fasi di elaborazione dei dati, comprendono procedure automatiche e semi-automatiche di processamento dei dati 3D acquisiti con tecniche di rilievo *close-range* (sistemi a scansione 3D e fotogrammetria digitale terrestre) hanno la finalità di soddisfare i requisiti per le seguenti fasi individuate: la conoscenza della geometria complessiva e della distribuzione spaziale; il rilievo del quadro fessurativo; l'analisi delle geometrie 3D al fine di individuare asimmetrie e anomalie geometriche (quadri deformativi) ed infine la realizzazione di modelli per l'analisi con il metodo degli elementi finiti (FEM). L'ultimo passo è costituito dall'applicazione dei metodi proposti ad alcuni casi studio reali, collaborando con esperti di ingegneria strutturale. In questo modo è stato possibile creare un momento di dialogo e di confronto, che ha avuto come esito la verifica e la validazione delle soluzioni presentate.

**Parole chiave:** Tecniche di rilievo *close-range*, sistemi a scansione 3D, Fotogrammetria digitale, Metodologia di rilievo, Modellazione 3D, Analisi Strutturale, FEM

### 1. Obiettivi

Il primo obiettivo è sicuramente quello di definire in che modo la geomatica può supportare l'analisi strutturale; in secondo luogo, individuare una metodologia di lavoro per l'acquisizione ed il processamento nel caso di rilievo applicato con finalità strutturali. Individuare delle tipologie di analisi dei dati metrici tridimensionali e valutarne l'efficacia ed, in ultimo, individuare delle procedure per la modellazione strutturale e l'analisi agli elementi finiti. Il tutto in un'ottica di sostenibilità intesa come ottimizzazione dei tempi e dei risultati.

Il contributo della Geomatica all'interpretazione strutturale è legato al processo di **conoscenza** che ha come obiettivo l'acquisizione delle informazioni necessarie alla **caratterizzazione** della struttura da analizzare. Le moderne tecniche *close-range* consentono di ottenere un modello tridimensionale della struttura con alta densità e accuratezza uniforme, offrendo la possibilità di: considerare la struttura come unicum, osservare il modello e le relazioni tra le parti che lo costituiscono come non sarebbe possibile nella realtà, eseguire analisi sulla geometria 3D.

## 2. Panoramica e stato dell'arte

Dall'inizio del XXI secolo si è visto un crescente interesse per l'applicazione delle tecniche geomatiche a supporto dell'analisi strutturale. Le prime sperimentazioni, che contemplavano l'uso di tecniche celerimetriche, utilizzavano la misura di alcuni punti selezionati criticamente, per ottenere un modello semplificato 3D delle strutture da analizzare con codici agli elementi finiti (Alessandri et al., 2004). All'evoluzione tecnologica, che ha visto la nascita e l'affermazione di tecniche di rilievo *close-range* quali *laser scanning* e fotogrammetria digitale, sono seguite numerosissime sperimentazioni con finalità di applicazione delle tecniche emergenti al campo dell'analisi strutturale. Tra queste ricerche, che spaziano dalla scala ambientale alla grandissima scala per lo studio di piccoli oggetti quali sculture, possiamo ricordare (Park et al., 2007) e (Chellini et al., 2012) con proposte di metodi di calcolo per stimare sforzi e sollecitazioni delle travi mediante scansione laser terrestre e FEM; (Schueremans, Van Genechten, 2009) con l'applicazione di tecniche a scansione 3D per la valutazione della sicurezza di volte in muratura; (Bertacchini et al., 2010) e (Giandebaggi et al., 2009) in cui vengono presentate esperienze relative all'utilizzo di tecniche a scansione laser terrestre per il rilievo ed il monitoraggio di torri medievali; (Marconi et al., 2012) con un lavoro relativo all'impiego di TLS e FEM per il monitoraggio di ponti in acciaio. I principali problemi irrisolti sono legati alla fase di elaborazione dei dati, a causa del lungo tempo che è richiesto ed ai limiti computazionali, legati cioè alle caratteristiche degli strumenti hardware. Numerosi studi sono stati infine indirizzati all'introduzione di un elevato livello di automazione nelle procedure di elaborazione, proprio al fine di ridurre i tempi. Un esempio può essere trovato in (Crosilla et al., 2007) e (Crosilla et al., 2009). Queste sono solo alcune delle principali esperienze nel panorama internazionale, che lasciano intendere quanto centrale e aperto risulti il tema di ricerca, che presenta ancora oggi numerose criticità.

## 3. Metodologia

Per quanto riguarda la metodologia di lavoro, possiamo dire che le prime fasi sono applicabili a qualsiasi rilievo a prescindere dalla finalità. Queste consistono, infatti, in:

- a. identificazione di scopi e obiettivi;
- b. identificazione dei metadati;
- c. progettazione e pianificazione;
- d. acquisizione;
- e. pre-elaborazione;
- f. allineamento e referenziazione;
- g. elaborazioni.

Sappiamo che le informazioni derivate dalle operazioni di rilievo 3D costituiscono la base geometrica sulla quale costruire il modello numerico. Inoltre, è importante sottolineare che le informazioni derivate dal rilievo possono essere utili sia come input delle analisi, sia come controllo e supporto all'interpretazione dei risultati di queste. Una volta costruito il *database* 3D, è possibile scegliere quali informazioni estrarre e come utilizzarle a seconda degli obiettivi. All'interno dell'ultima fase dell'elenco precedente, quella relativa alle elaborazioni, possiamo individuare 4 ulteriori sotto-fasi che risultano fondamentali per supportare l'interpretazione e l'analisi strutturale e che possono essere riassunte come segue:

1. conoscenza della geometria complessiva e della distribuzione spaziale;
2. rilievo del quadro fessurativo;
3. individuazione di asimmetrie e anomalie geometriche (in seguito quadri deformativi);
4. realizzazione di modelli 3D per analisi con il metodo agli elementi finiti (FEM).

Per ciascuna delle 4 sotto-fasi individuate, è proposto un *modus operandi*, mirato alla definizione di un percorso metodologico e all'identificazione di alcuni risultati (output grafici) che soddisfino le

necessità ed i requisiti attesi, supportando gli esperti strutturali nella fase di interpretazione del comportamento delle strutture.

La metodologia e le procedure proposte, sono state applicate a casi studio reali allo scopo di verifica e validazione, ed in particolare:

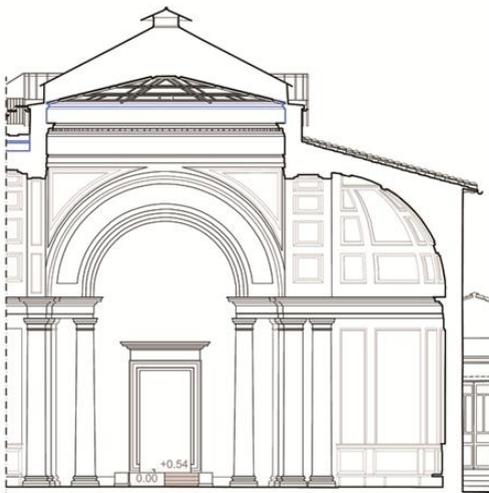
- Applicazione alle strutture snelle: la Torre del Mangia a Siena;
- Rilievo 3D per la valutazione del rischio sismico: la Galleria dell'Accademia a Firenze;
- Studio geometrico e analisi FEM della cupola della Basilica di San Vitale a Ravenna.

I casi studio applicativi non saranno presentati in questa sede, ma alcune delle elaborazioni e dei risultati ottenuti saranno inseriti a scopo illustrativo. Per approfondimenti sui singoli casi studio, si rimanda a (Pieraccini *et al.*, 2013) e (Tucci *et al.*, 2012).

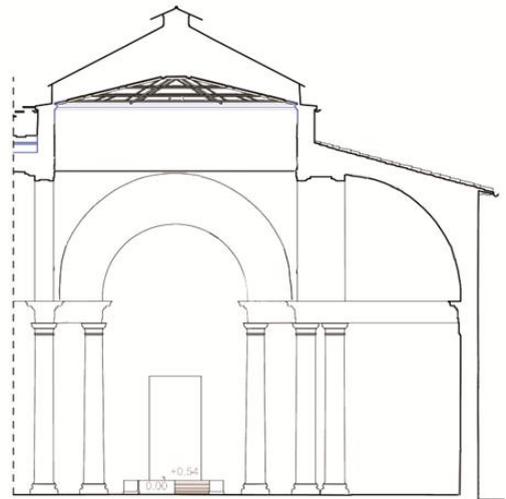
#### 4. Conoscenza della geometria

Per l'interpretazione della geometria complessiva gli elaborati convenzionali della rappresentazione architettonica possono costituire il supporto geometrico adatto. La possibilità di creare un modello 3D denso di punti dell'intera struttura architettonica consente di procedere all'estrazione dei dati necessari per la realizzazione degli elaborati necessari. L'output è, quindi, costituito da **elaborati 2D** realizzati attraverso la **restituzione grafica** di piante e sezioni. Va sottolineata, in questa fase, la differenza tra il rilievo architettonico ed il rilievo strutturale, intendendo con quest'ultimo il rilievo degli elementi che hanno valenza strutturale. In *Figura 1*, si possono apprezzare le differenze tra i due. Il risultato è l'introduzione di una componente di interpretazione, che implica competenze architettoniche e strutturali seppur basilari, oltre a quelle prettamente geomatiche.

**Rilievo architettonico**



**Rilievo strutturale**

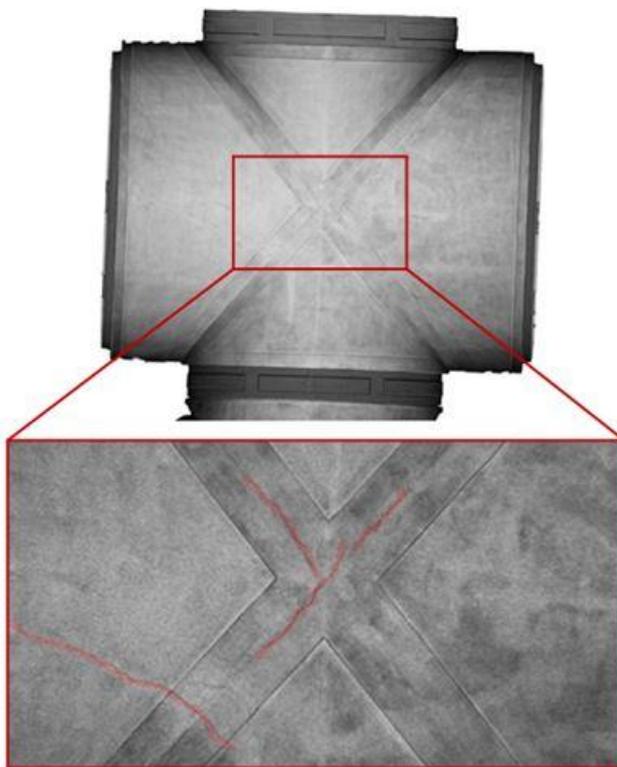


*Figura 1 - Rilievo della Galleria dell'Accademia di Firenze, stralci della sezione longitudinale della Galleria dei Prigioni. A sinistra, la sezione architettonica, a destra quella strutturale. Originali in scala 1:100.*

#### 5. Rilievo del quadro fessurativo

Il rilievo del quadro fessurativo, che sappiamo essere elemento fondamentale in quanto sintomo dei dissesti che interessano una struttura e possibile chiave di lettura delle cause degli stessi, può essere rilevato tramite diverse tecniche a seconda della struttura interessata dal dissesto. In generale, visto l'ordine di grandezza delle lesioni, i sistemi a scansione 3D ne consentono la lettura solo qualora la

risoluzione di scansione (intesa come passo di campionamento) sia molto elevata (nell'ordine di qualche millimetro). In presenza di una risoluzione adeguata, le lesioni possono essere leggibili direttamente sul modello di punti denso (da scansione 3D o da tecniche fotogrammetriche), seppur dopo operazioni di miglioramento dell'immagine (*Figura 2*).



*Figura 2 - Rilievo della Galleria dell'Accademia di Firenze, lettura del quadro fessurativo di strutture voltate sul modello di punti 3D. Originale in scala 1:100.*

Nel caso in cui la conformazione delle strutture e degli spazi da rilevare porti ad avere un dato eccessivamente rumoroso, o qualora non sia possibile ottenere un passo di campionamento sufficiente per mezzo di sistemi a scansione, si ritiene maggiormente idoneo il rilievo per mezzo di tecniche fotogrammetriche.

## **6. Analisi delle geometrie 3D**

La possibilità di disporre di un dato 3D denso ed accurato, consente di ottenere una descrizione pressoché continua delle superfici che possono quindi essere analizzate allo scopo di individuare anomalie geometriche locali e globali, ovvero quadri deformativi, dove la deformazione non si intende come spostamento monitorato nel tempo ma bensì come deviazione rispetto ad una condizione geometrica ideale. Esempio di analisi dei quadri deformativi può essere la creazione di mappe di elevazione ottenute attraverso la creazione di opportuni piani di riferimento rispetto ai quali visualizzare gli scostamenti dei punti misurati sulle superfici. Un'ulteriore possibilità è costituita dall'analisi della geometria 3D della struttura, attraverso il calcolo delle deviazioni 3D. Questa tecnica consente di verificare la corrispondenza tra la struttura (misurata) e modelli geometrici ideali che potrebbero essere assunti per descriverla (*Figura 3*).

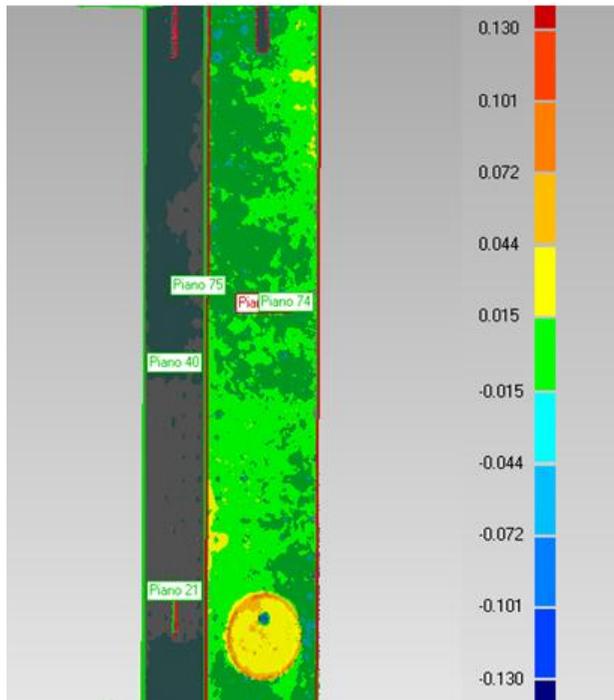


Figura 3 - Studio geometrico della Torre del Mangia di Siena: analisi delle deviazioni 3D rispetto al piano di best-fitting.

Altri esempi di analisi della geometria 3D possono essere assimilate ad analisi puntuali; pur beneficiando della tridimensionalità e della densità del modello di punti dal quale sono estratte, infatti, non considerano le superfici come oggetti continui, ma hanno la peculiarità di osservare le caratteristiche geometriche della struttura localmente, in punti differenti, e di metterle poi in relazione tra loro. In *Figura 4*, è riportata l'analisi delle geometrie 3D della Torre del Mangia a Siena, condotta con l'obiettivo di determinarne l'inclinazione.

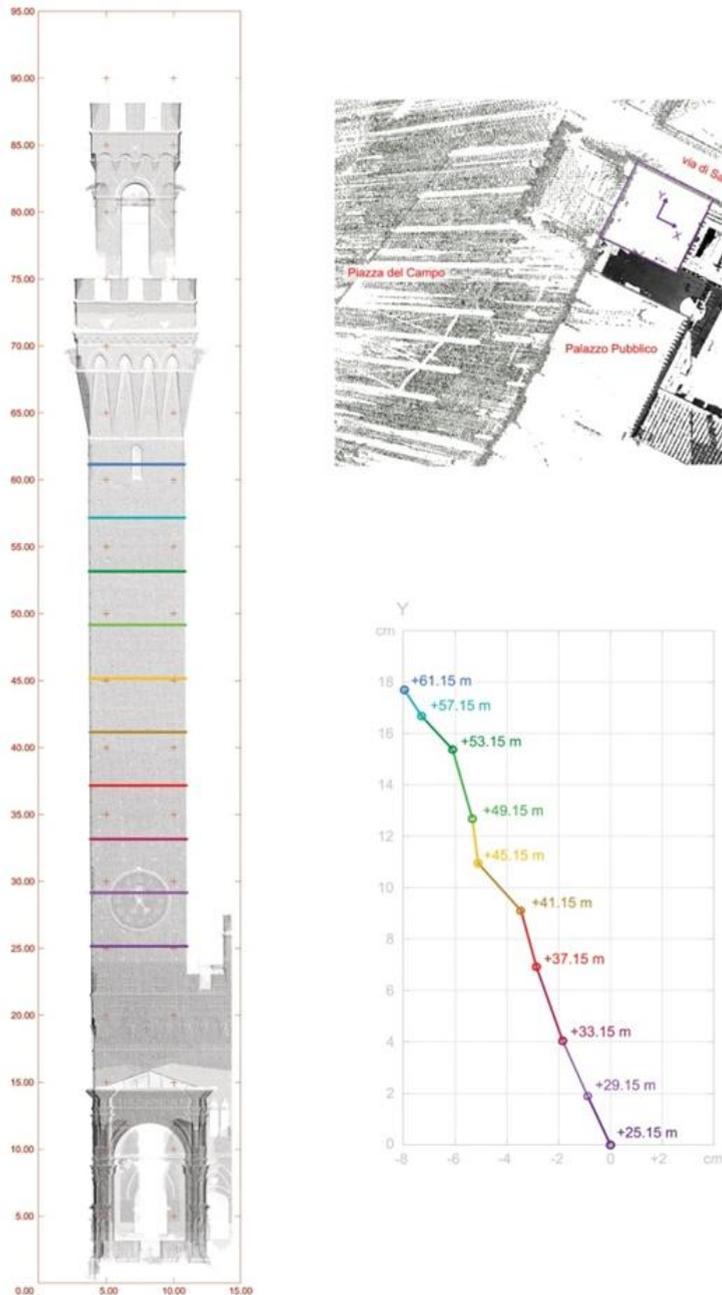


Figura 4 - Torre del Mangia, Siena. Grafico degli spostamenti relativi del baricentro geometrico tra diversi livelli (in basso a destra). A sinistra, schema delle 10 sezioni orizzontali estratte dal modello di punti, riportato sul prospetto verso Piazza del Campo. In alto a destra, schema planimetrico con il sistema di riferimento locale scelto per l'analisi degli spostamenti relativi del baricentro geometrico.

## 7. Dal rilievo 3D al modello strutturale

Per rappresentare correttamente la realtà complessa, le analisi strutturali sono in genere eseguite attraverso una simulazione numerica agli elementi finiti. Partendo dal presupposto che un modello a elementi finiti è un modello matematico, cioè una rappresentazione formale di un fenomeno volto a comprendere e controllare lo stesso fenomeno, risulta chiaro che, per costruire un modello matematico che rappresenta qualsiasi oggetto e fenomeno esistente, è necessaria un'operazione interpretativa (Bathe, 1982). La creazione di un modello strutturale è un'operazione che richiede, dunque, competenze strutturali: vale a dire, la capacità di interpretare l'architettura dal punto di vista costruttivo. Questa fase dovrebbe quindi essere considerata come una fase di compenetrazione tra i due campi: se da un lato gestiamo un dato metrico 3D, dall'altra parte, da questo, dobbiamo generare un modello utilizzando anche informazioni che non possono essere derivate attraverso tecniche Geomatiche.

Sono diverse le strategie di modellazione che possono essere utilizzate per la rappresentazione di strutture in muratura. I componenti principali di una architettura in muratura, quali pareti, volte, pilastri, possono essere considerati come semplici modelli 2D. I sistemi 3D complessi presenti nella realtà, i cui componenti sono costituiti da diversi tipi di murature e materiali, possono dunque essere modellati da elementi finiti che includono opportune leggi costitutive. Idealmente, l'analista rappresenterebbe ciascuna unità fisica con un elemento caratterizzato dalle proprietà meccaniche del materiale dell'unità, generalmente modelli costituiti da blocchi in pietra o mattoni e malta, (Lubowiecka et al., 2009). Una seconda possibilità, a seconda del tipo di analisi che si vuole effettuare, è quella di considerare ogni parte della struttura come un modello 3D continuo agli elementi finiti. La geometria rilevata, a seguito delle opportune procedure di post-elaborazione è così utilizzata per costruire la geometria strutturale del modello architettonico che viene analizzato nel software FEM. I requisiti di base che il modello 3D deve garantire sono i seguenti:

- Leggerezza
- Superfici chiuse che definiscono i volumi (*water-tight*)
- Segmentazione sulla base della funzione strutturale e della caratterizzazione materica
- Formato supportato dai codici FEM

La necessità di avere delle superfici chiuse, dipende dal modo in cui i codici FEM leggono le geometrie: le mesh ottenute per triangolazione, se non opportunamente convertite, vengono recepite come superfici pur definendo di fatto un volume chiuso. Qualora si desideri svolgere un'analisi in campo 3D è invece necessario che il volume venga recepito come solido, ovvero non come spazio vuoto delimitato da superfici, ma come elemento materiale che possa essere suddiviso in elementi finiti. Perché questa condizione sia garantita, il modello non deve presentare fori e i diversi elementi che lo compongono non devono compenetrarsi (Guardini, 2014). Aumentando la complessità dell'oggetto, aumentano di conseguenza le criticità nel rispondere ai requisiti.

In relazione alle tecniche di modellazione 3D, possiamo individuare **procedure** e **percorsi differenti** a seconda della tecnica di rilievo, che ovviamente è scelta a sua volta in base alle finalità.

Una delle tecniche di modellazione diffusa in ambito strutturale si basa sull'estrusione di primitive geometriche, che descrivono puntualmente le superfici, derivate da disegno bidimensionali. Considerando l'analogia tra questi e i profili sezione che possono essere estratti dal modello di punti, ne consegue che una delle procedure può essere quella di utilizzare i profili estratti come primitive per la generazione di volumi e superfici. La descrizione della geometria richiede un maggior numero di primitive (o profili sezione) quanto maggiore è la sua complessità morfologica (*Figura 5*).

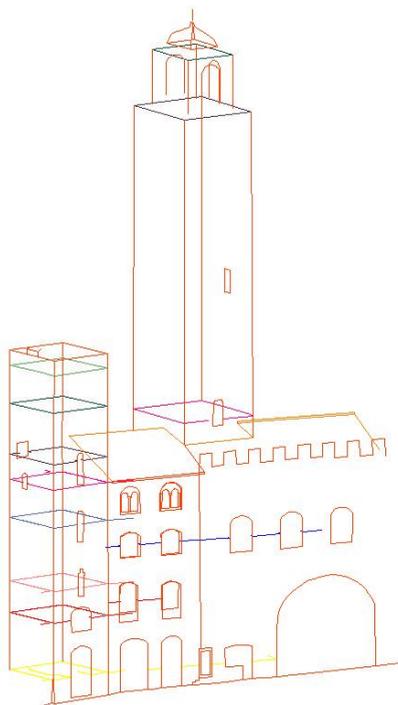


Figura 5 - Torri del centro storico di San Gimignano. Restituzione del modello 3D sulla base dei profili sezione estratti dal modello di punti rilevato con sistemi a scansione terrestre.

Per quanto riguarda l'applicazione di tecniche fotogrammetriche classiche, i profili restituiti possono costituire la base per la modellazione con tecniche di rappresentazione parametrica (NURBS) o modellazione CAD. Per quanto riguarda la modellazione CAD, i principali vantaggi sono la rapidità e la possibilità di generare direttamente oggetti solidi unici (*water-tight*). Per contro prevedono strumenti di modellazione poveri con la conseguente difficoltà nel mantenere elevata rispondenza del modello al reale. Per quanto riguarda le tecniche parametriche, ovvero la modellazione NURBS, possiamo dire che sono caratterizzate da maggiore flessibilità e consentono quindi di mantenere una maggiore accuratezza.

Anche per quanto riguarda le tecniche di modellazione a partire da nuvole di punti 3D dense, possiamo individuare diverse procedure (Remondino, 2003) e (Tucci *et al.*, 2004). Una prima possibilità è quella di ricorrere all'estrazione di sezioni 2D, operazione che riconduce alla situazione di modello sparso. Va detto comunque che in genere i modelli densi sono di più difficile gestione e le operazioni per l'estrazione di dati puntuali sono più *time-consuming* (Bonora, Tucci, 2005).

Le procedure applicabili per l'estrazione delle primitive possono essere semi-automatiche o automatiche. Nel primo caso, si procede selezionando i punti di interesse per la descrizione della geometria, estraendoli e restituendo manualmente i profili 3D del modello. Nel secondo caso (estrazione automatica) viene analizzata la curvatura delle superfici e vengono create delle *break-lines* nei punti in cui la curvatura cambia. Questa tecnica, non risulta sempre efficace a causa delle difficoltà di conversione automatica delle *break-lines* in elementi sufficientemente regolari.

Una volta estratte le sezioni dal modello di punti (o dal modello triangolato) è possibile procedere alla generazione di superfici NURBS.

Una seconda possibilità è quella di applicare tecniche di modellazione per superfici (come ad esempio la triangolazione) che offrono grandi vantaggi consentendo di mantenere un elevato livello di accuratezza del modello, ma presentano altre criticità, soprattutto legate al peso dei modelli e al numero di poligoni che li costituiscono. Una possibile soluzione a questi problemi può essere la generazione di un modello NURBS per conversione di un modello *mesh* triangolato. Considerando che i modelli triangolati ad alta risoluzione sono in genere caratterizzati da un numero elevato di poligoni e le superfici non possono essere direttamente convertite in volumi (almeno con gli strumenti attualmente disponibili), è necessario, in questo caso, operare una *ri-topologizzazione* (ovvero una trasformazione topologica del modello) che agisce sulla struttura dei dati senza alterarne la geometria (Figura 6).

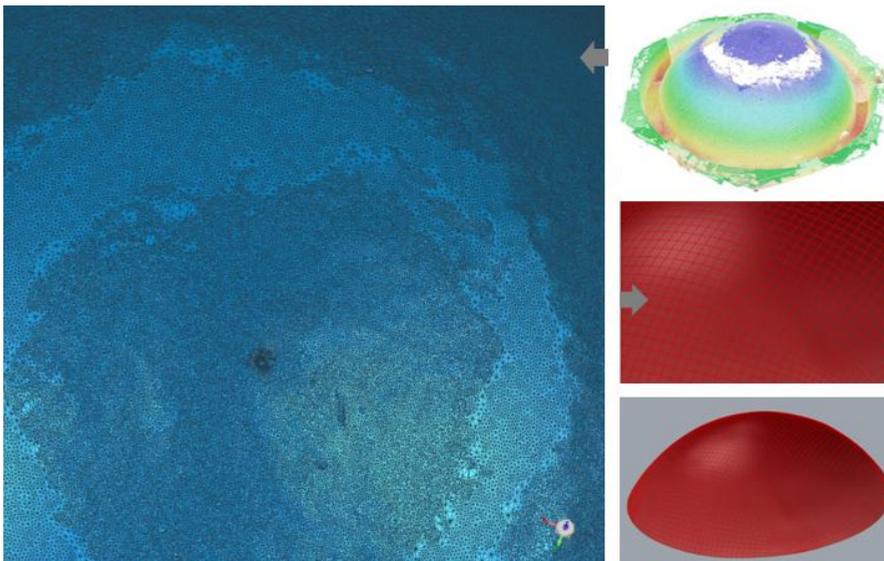


Figura 6 - Cupola della Basilica di San Vitale a Ravenna. Conversione del modello triangolato dalla nuvola di punti in un modello costituito da superfici NURBS operando una trasformazione topologica dei dati.

## 8. Livello di dettaglio geometrico del modello e risultati delle analisi

E' noto che il livello di dettaglio di un modello dipende da molti fattori (Tucci *et al.*, 2013). Sappiamo comunque che, nel rilievo architettonico, livello di dettaglio, accuratezze e scala di rappresentazione sono fortemente legati gli uni agli altri. Per quanto riguarda la modellazioni ai fini strutturali, il livello di approssimazione della geometria è legato al tipo di analisi da eseguire ed i criteri guida non sono necessariamente i medesimi del rilievo architettonico. Per intenti strutturali, possiamo dire che in generale una accuratezza di  $\pm 0.05\text{m}$  è sufficiente. Il livello di dettaglio richiesto corrisponde ad un livello intermedio tra la scala 1:100 e 1:200. La rappresentazione degli elementi strutturali deve evidentemente prevalere su quella degli elementi decorativi che, normalmente, è preferibile escludere dal modello. In altre parole, per una data analisi, precisione e livello di dettaglio del modello possono non avere lo stesso livello.

Per valutare l'influenza del livello di dettaglio geometrico del modello sul risultato dell'analisi strutturale, e validare le tecniche di modellazione individuate, è stato condotto un test realizzando due modelli con differenti livelli di approssimazione, utilizzando come test la cupola della basilica di san Vitale a Ravenna. In un primo caso (modello A) si è proceduto estraendo una sezione dal modello triangolato e generando, a partire da questa, un modello *NURBS* per rivoluzione. L'analisi delle deviazioni 3D del modello *NURBS* ottenuto dal modello di punti rilevato con sistemi a

scansione tridimensionale, indica scostamenti che si attestano sui 16cm. Nel secondo caso, il modello triangolato dal modello di punti rilevato con sistemi a scansione tridimensionale, è stato convertito, sia con procedure automatiche sia semi-automatiche, in un modello *NURBS* (modello B). In questo caso le deviazioni 3D dal modello triangolato, sono contenute nei 2 cm.

Entrambi i modelli (costituiti da superfici chiuse) sono stati esportati come solidi 3D. Il *meshing* solido è stato realizzato all'interno di un codice di calcolo FEM commerciale (Ansys). Successivamente è stata analizzata la struttura sotto l'effetto del peso proprio (non essendovi altri pesi gravanti sulla cupola) e sono stati calcolati: gli spostamenti verticali e quelli complessivi; le tensioni principali di trazione e di compressione; gli sforzi normali di meridiano e di parallelo. Come mostrato in Figura 7 (che riporta il grafico delle tensioni principali di trazione calcolate per i due modelli), c'è una leggera differenza tra i risultati del modello A e B.

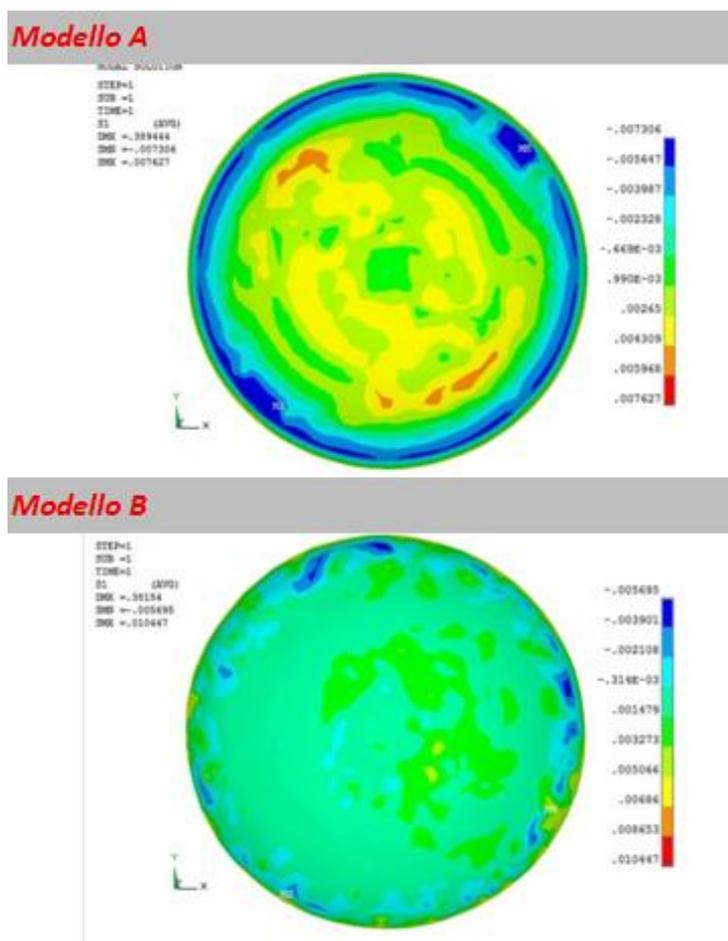


Figura 7 - Cupola della Basilica di San Vitale a Ravenna. Risultati delle analisi FEM sui due modelli a confronto (tensioni principali di trazione).

Indipendentemente dai valori (dal momento che il test ha scopo dimostrativo e non è finalizzato alla comprensione del comportamento della struttura) possiamo dire che l'irregolarità geometrica reindirizza i flussi tensionali. La disponibilità di una descrizione densa 3D permette di ottenere un

modello numerico per l'analisi strutturale che può essere costruito di volta in volta con diversi livelli di approssimazione secondo la necessità. In conclusione si può affermare che la possibilità di avere un modello accurato ha una certa influenza, soprattutto nel caso di asimmetrie, irregolarità e significativi quadri fessurativi.

## 8. Conclusioni

La disponibilità di strumenti che supportano la conoscenza della morfologia degli elementi rapidamente ed accuratamente, può essere molto importante nei casi in cui questa diventa significativa dal punto di vista strutturale. Come noto inoltre, in relazione alla velocità di acquisizione (20 % del totale), l'elaborazione richiede tempi decisamente più lunghi (80 % del totale); è evidente, quindi, l'importanza di individuare procedure semi-automatiche per ottimizzare risorse e tempi. Un ulteriore aspetto da considerare è la velocità di acquisizione consentita dalle tecniche *close-range*, che può garantire un aggiornamento continuo e rapido dei dati.

I metodi proposti per la restituzione delle caratteristiche geometriche consentono un'accurata analisi della geometria delle strutture nel loro complesso, fornendo informazioni non rilevabili con altre tecniche in modo semplice. Le possibilità offerte dall'alta densità, e dalla tridimensionalità dei dati permette di valutare le caratteristiche geometriche delle strutture con un approccio alta risoluzione; questa operazione ha come conseguenza il raggiungimento di un livello di conoscenza approfondito.

Bisogna comunque tenere presente che l'incertezza dei dati influisce sui risultati delle analisi, anche se alcuni fattori hanno meno influenza di altri: per cercare il comportamento reale di una struttura, bisogna ricorrere a delle riproduzioni semplificate, i modelli. In questo contesto, risulta interessante cercare di raccogliere tutte le informazioni disponibili per costruire un modello il più possibile rispondente alla realtà ed entrano quindi in gioco anche gli aspetti geometrici.

Per quanto riguarda la modellazione 3D, la possibilità di effettuare analisi meccaniche sulla base di modelli 3D con una configurazione geometrica vicina a quella dell'oggetto reale significa controllare le approssimazioni geometriche. Il punto di forza della procedura identificata è duplice: da un lato la possibilità di raggiungere un livello profondo di conoscenza della geometria delle strutture e mantenerlo nell'analisi; dall'altro l'ottimizzazione del processo, con l'introduzione di una forte componente di automazione. Operando una trasformazione su dati rilevati in modo da ottenere direttamente modelli 3D adatti ad essere processati in codici FEM, è possibile non solo ottimizzare le procedure ma anche controllare meglio i risultati in termini di affidabilità.

Le maggiori criticità riscontrate durante la ricerca, riguardano principalmente la definizione di obiettivi/esigenze e di un linguaggio comune tra diversi settori disciplinari. Non secondarie, inoltre, le problematiche di gestione dei modelli di punti (principalmente legate ai limiti della strumentazione hardware e software disponibile). Per quanto riguarda nello specifico la modellazione 3D, possiamo osservare che si incontra una molteplicità di procedure e di percorsi possibili, molti dei quali inesplorati, nonché una serie di problemi legati alla necessità di utilizzare 3-4 strumenti differenti per eseguire l'intera procedura con conseguenti problematiche di interscambio dei formati

Sarebbe quindi di grande interesse, per quanto riguarda le possibili prospettive future: lo sviluppo di strumenti dedicati per il trattamento di dati ottenuti tramite tecniche *close-range* con finalità strutturali; l'individuazione di standard per quanto riguarda requisiti e obiettivi ed, infine, la definizione di linee guida per regolamentare le procedure da applicare.

## 9. Ringraziamenti

Gli autori intendono ringraziare tutti coloro che hanno preso parte ai rilievi delle architetture sulle quali sono stati sviluppati i casi di studio. In particolare per il rilievo della Galleria dell'Accademia di Firenze: Dr. Arch. Valentina Bonora (inquadramento topografico), Arch. Alessandro Conti e Arch. Lidia Fiorini (sistemi a scansione 3D). Per il rilievo della Basilica di San Vitale a Ravenna: Dr. Arch. Valentina Bonora (sistemi a scansione 3D); Ing. Paolo Aminti e Dr. Arch. Alessia Nobile (Rete GNSS).

Per il rilievo della Torre del Mangia a Siena: Geom. Roberto Nesti (sistemi a scansione 3D e inquadramento topografico), Dr. Arch. Valentina Bonora, Arch. Armagan Gulec Korumaz e Dr. Arch. Mustafa Korumaz (sistemi a scansione 3D); Dr. Ing. Fabio Remondino (coord. scientifico rilievo fotogrammetrico).

Un ringraziamento speciale al Prof. Gianni Bartoli e al Dr. Ing. Michele Betti (Università di Firenze, DICEA) per il supporto durante la fase di verifica e validazione dei modelli 3D per l'analisi FEM della cupola della Basilica di San Vitale a Ravenna.

Un ringraziamento particolare a quanti hanno permesso lo svolgimento delle ricerche sui casi studio citati: Dr. Arch. Nora Lombardini del Politecnico di Milano, L'amministrazione vescovile, nella persona del Monsignor Guido Marchetti ed il Geometra Zibordi; L'arch. Emilio Agostinelli della Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici dell'Emilia Romagna per il progetto relativo alla Basilica di San Vitale di Ravenna. Prof. Mario De Stefano (responsabile scientifico del progetto *Applicazione sperimentale del DPCM 12 ottobre 2007 e ss.mm.ii. per la valutazione e riduzione del rischio sismico del Patrimonio Culturale alla Galleria dell'Accademia di Firenze*); Dr. Arch. Giuseppe Giorgianni (RUP e referente scientifico presso la Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Toscana per il medesimo progetto); Prof. Massimiliano Pieraccini (responsabile scientifico del progetto di ricerca *Monitoraggio del Patrimonio architettonico storico-artistico mediante sensori remoti radar e laser*); Comune di Siena.

## Riferimenti bibliografici

- Alessandri, C., Balzani, M., Cami, R., Zaltron, N., Martin-Deque, J. F., Brebbia, C. A., & Diaz de Terán, J. R. (2004), "An integrated automatic procedure for monitoring and evaluating ground instabilities", *First International Conference on Monitoring, Management, Simulation and Remediation of the Geological Environment (Geo-Environment), Segovia, Spain, 2004*, 133-142.
- Bathe K. J. (1982), *Finite element procedures in engineering analysis*, Prentice Hal, Upper Saddle River, New Jersey.
- Bertacchini, E., Boni, E., Capra, A., Castagnetti, C., & Dubbini, M. (2010, April), "Terrestrial Laser Scanner for Surveying and Monitoring Middle Age Towers", *Proceedings of the 24th FIG International Congress*, 11-16.
- Bonora V., & Tucci G. (2005), "Individuazione degli spigoli su un modello architettonico realizzato da scansioni 3D", *Atti della IX Conferenza Nazionale ASITA, Catania, 15-18 novembre 2005*, I: 431-438.
- Chellini, G., Nardini, L., Pucci, B., Salvatore, W., & Tognaccini, R. (2014), "Evaluation of Seismic Vulnerability of Santa Maria del Mar in Barcelona by an Integrated Approach Based on Terrestrial Laser Scanner and Finite Element Modelling", *International Journal of Architectural Heritage*, 8(6): 783-794.
- Crosilla, F., Visintini, D., & Sepic, F. (2007), "An automatic classification and robust segmentation procedure of spatial objects", *Statistical Methods and Applications*, 15(3):329-341.
- Crosilla, F., Visintini, D., & Sepic, F. (2009), "Automatic modelling of laser point clouds by statistical analysis of surface curvature values", *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXVIII-5/W1:1682-1750.

- Giandebiaggi, P., Zerbi, A., & Capra, A. (2009), "Il rilevamento della torre Ghirlandina. The surveying of Ghirlandina tower", in *R.Cadignani - La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione/ The Ghirlandina tower. Conservation project*, Luca Sossella Editore Roma, 78- 87.
- Guardini N. (2014), *3D Survey and Modelling for structural analysis*, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Firenze.
- Lubowiecka I., Armesto J., Arias P., & Lorenzo H. (2009), "Historic bridge Modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics", *Engineering Structures*, 31(2009):2667-2676.
- Marconi, G.P., Remondino, F., Jiménez Fernández-Palacios, B. & Cozzini M. (2012), "X-Bridge Project: development of a new methodology for the monitoring of steel bridges", in *APPLIED MECHANICS AND MATERIALS, 2nd International Conference on Civil Engineering and Transportation (ICCET 2012), Guilin, China, 10/27/2012 - 10/28/2012*, n. %val, 256-259 2013:1537-1541.
- Park, H. S., Lee, H. M., Lee, I., & Kang, D. S. (2007). Computing method for estimating strain and stress of steel beams using terrestrial laser scanning and FEM. *Key Engineering Materials*, 347:517-522.
- Pieraccini, M., Dei, D., Betti, M., Bartoli, G., Tucci, G., Guardini, N. (2013), "Dynamic identification of historic masonry towers through an expeditious and no-contact approach: Application to the "Torre del Mangia" in Siena (Italy)", *Journal of Cultural Heritage*, 08/2014 15(3):275-282.
- Remondino, F. (2003), "From point cloud to surface: the modelling and visualization problem", International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXIV-5/W10: 5-16.
- Schueremans, L., & Van Genechten, B. (2009). "The use of 3D-laser scanning in assessing the safety of masonry vaults. A case study on the church of Saint-Jacobs", *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3):329-335.
- Tucci, G., Bonora, V., & Guardini, N., (2013). Analysis of the factors affecting 3D models resolution – Application to the recording of vaults in Sangallo's house, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5/W1, 2194-9050:307-312.
- Tucci G., Bonora V., Sacerdote F., Costantino F., & Ostuni D. (2004), From the acquisition to the representation: quality evaluation of a close range model, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. XXXV, Part B5, 591-596.
- Tucci G., Lombardini N., Bonora V., Guardini N., & Focaccia P. (2012). The survey of the Dome of the Basilica of San Vitale in Ravenna, in: Tampone G., Corazzi R., Mandelli E. (eds.), *Proceedings of the International Congress "Domes in the World"*, Florence, March 19-23 2012, Firenze, Nardini Editore.