

## **Galleria dell'Accademia a Firenze: un rilievo metrico per l'analisi di vulnerabilità sismica**

Grazia Tucci, Valentina Bonora, Alessandro Conti, Lidia Fiorini, Nadia Guardini

Laboratorio di Geomatica per l'Ambiente e la conservazione dei Beni Culturali (GeCO), DICEA, Univ. Di Firenze,  
Via Micheli, 8, Firenze tel. 055 2756587 info@geomatiaeconservazione.it

### **Riassunto**

Il progetto di ricerca qui esposto ha costituito un esempio pilota voluto dalla Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Toscana per verificare quanto previsto dalle Linee Guida per la “Valutazione e Riduzione del Rischio Sismico del Patrimonio Culturale” ed ha avuto come oggetto di studio la Galleria dell'Accademia a Firenze. Lo studio è stato svolto dal Dipartimento di Costruzioni e Restauro dell'Università degli Studi di Firenze ed in particolare la Sezione Costruzioni del Dipartimento si è occupata delle analisi e valutazioni strutturali mentre il Laboratorio GeCo (Geomatica per l'Ambiente e la Conservazione dei Beni Culturali, ora Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale) ne ha curato il rilievo metrico. Le operazioni di rilievo e le successive elaborazioni e restituzioni sono iniziate nel giugno 2011 e si sono concluse nel Luglio 2012.

### **Abstract**

The foregoing research has established a pilot project, requested by the Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Toscana to assess the “Guidelines for the evaluations and reduction of the seismic risk of cultural heritage” on the case study of the Galleria dell'Accademia in Florence.

The study was carried out by the Department of Construction and Restoration of the University of Florence. In particular the Construction Section of the Department took care of structural analysis and evaluations and the GeCO lab (Geomatics for Environment and Cultural heritage, now pertaining to the Department of Civil and Environmental Engineering - DICEA) took care of the metric survey.

Survey and the subsequent data processing and drawings are started in June 2011 and were completed in July 2012.

### **Introduzione**

La normativa di riferimento (Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni, D.M. 14 gennaio 2008) prevede tre diversi livelli valutativi e prescrive che siano supportati dal rilievo metrico della struttura in esame; in particolare prescrive il rilievo come supporto irrinunciabile per la conoscenza strutturale di un organismo edilizio e come tramite atto a “definire la geometria del modello da usare nell'analisi sismica”. Alcuni punti, seppur espressi in modo non rigoroso, indicano specificatamente che l'analisi deve avvalersi di tecniche strumentali innovative come quelle della geomatica, in particolare negli articoli che esplicano le metodologie di rilievo geometrico e di monitoraggio:

#### *4.1.4 Rilievo geometrico*

*Le difficoltà del rilievo geometrico sono legate all'accessibilità di alcuni spazi ... tuttavia, sono disponibili strumenti che consentono un rapido rilievo e una restituzione accurata anche nel*

*caso di elementi complessi, e tecniche di indagine diretta (endoscopia) o indiretta (termografia, georadar, ecc.)*

#### 4.1.9 Monitoraggio

*... Il controllo geometrico della costruzione può essere eseguito mediante procedure di rilievo topografico, fotogrammetrico, o utilizzando tecniche innovative, come la nuvola di punti generata dal laser scanner ....*

La scelta di verificare concretamente le modalità di applicazione di questa normativa sulla Galleria dell'Accademia è stata certamente dettata da una parte dall'incommensurabile valore artistico delle opere in essa contenute, a partire da quelle di Michelangelo, dall'altra dall'articolazione decisamente complessa dell'organismo architettonico che lo qualificava come un caso di studio particolarmente impegnativo.

#### Obbiettivi

La Galleria dell'Accademia si trova nel centro storico di Firenze e si estende per un intero isolato in cui sono presenti e confinanti altri edifici pubblici e privati di grandi dimensioni, quali l'Accademia di Belle Arti, l'Opificio delle Pietre Dure, il Conservatorio Luigi Cherubini, il Palazzo Budini Gattai.

E' un aggregato urbano il cui comportamento strutturale è fortemente connotato dall'interazione tra le varie parti di cui si compone. I diversi corpi di fabbrica si articolano in una complessa organizzazione spaziale, conseguenza di trasformazioni avvenute nel corso dei secoli, senza alcun progetto unitario.

Per un rilievo strutturale esaustivo di un organismo così articolato è stato indispensabile, innanzitutto, conoscerne la geometria complessiva con particolare attenzione all'andamento degli elementi portanti verticali ed orizzontali e per consentire la verifica della natura e degli spessori delle strutture della Galleria è stato necessario estendere il rilievo alle porzioni dei fabbricati confinanti e che con essa condividono murature verticali e solai.



*Figura 1 – La Galleria dell'Accademia (in blu) ed i fabbricati confinanti.*

L'applicazione delle Linee guida sopra ricordate avrebbe previsto la sola documentazione degli elementi strutturali ed il loro dimensionamento. La successiva analisi FEM realizzata dagli strutturisti richiede infatti un modello estremamente semplificato dell'edificio in analisi. In realtà il

rilievo realizzato è stato invece impostato, dalla fase di acquisizione dei dati a quella di restituzione grafica, per il più oneroso obiettivo di realizzare un rilievo architettonico (di cui l'edificio era privo), ovvero di documentare e dimensionare anche l'apparato decorativo, gli arredi fissi e ogni altro elemento trascurabile ai fini strutturali ma non a quelli di una funzionale gestione del bene.

Il rilievo delle deformazioni e del quadro fessurativo sono altre importanti componenti per una corretta analisi strutturale. La disponibilità di dati ad alta risoluzione su tutte le superfici ha consentito di registrare tutti questi elementi in modo, al contempo, oggettivo e speditivo.

### **Operazioni preliminari**

Le modalità di fruizione degli spazi da rilevare sono un fattore che incide notevolmente sull'organizzazione del rilievo. Una struttura museale presenta infatti forti vincoli derivanti sia dal grande flusso di visitatori sia dalla necessità di evitare rischi alle opere d'arte. Quindi l'estensione dell'area, l'articolazione delle singole fabbriche, i diversi referenti delle medesime, l'accesso a locali generalmente non aperti al pubblico, ragioni di sicurezza e non ultime la necessità di evitare rischi derivanti da interferenze sono componenti che condizionano la libertà operativa, limitando, fra l'altro, l'accessibilità ad alcuni spazi in determinati orari. Tutto ciò quindi ha reso indispensabile una onerosa fase programmatica iniziale in termini di tempo e di impegno. Sono stati così effettuati molti sopralluoghi per pianificare lo svolgimento delle operazioni sul campo, sono stati contattati i soggetti gestori delle diverse unità funzionali per ottenere le autorizzazioni necessarie all'accesso, è stato reperito il materiale grafico e cartografico esistente, ed infine è stato redatto un cronoprogramma.

L'intera area è stata poi suddivisa in 4 macro aree ed ogni singolo ambiente dei complessivi 260 è stato codificato in modo univoco così che tutto il materiale prodotto (fotografie, appunti di rilievo, schedature, monografie) potesse essere facilmente riferibile all'ambiente d'appartenenza.

### **Collaudo del rilievo preesistente**

In precedenza era stato realizzato un rilievo laser scanner dei soli spazi espositivi della Galleria. La Direzione Regionale aveva così reso disponibile il modello di punti allineato, seppur senza altri metadati. Così prima di procedere a nuove acquisizioni, si è ritenuto opportuno eseguire alcune verifiche per valutare se l'attendibilità metrica e la risoluzione del materiale fornito ne consentissero l'utilizzo nel rilievo in corso.

Sono stati individuati e monografati una serie di punti naturali, omogeneamente distribuiti sul rilievo precedente, espresso in un sistema di riferimento la cui materializzazione non era nota. La loro posizione è stata individuata sul modello di punti con un'accuratezza (presumibile, in funzione della risoluzione dello stesso) di un paio di centimetri. Gli stessi punti sono quindi stati misurati con battute celerimetriche a partire dai vertici della nuova rete; è stata quindi calcolata, ai minimi quadrati, una rototraslazione dei due set di dati.

Gli errori residui testimoniavano la presenza di deformazioni significative. Con una più attenta analisi si è evidenziato che il rilievo appare suddiviso in due blocchi intrinsecamente corretti ma con referenziazione non coerente. La causa è stata ipotizzata nella geometria labile dell'inquadramento topografico, realizzato con poligoni aperte.

Si è considerato inoltre che la risoluzione delle scansioni precedenti fosse inferiore al livello di dettaglio prefissato per il progetto, con particolare riferimento al rilievo del quadro fessurativo. Inoltre gli allestimenti di alcune sale espositive nel rilievo precedente risultavano diversi rispetto allo stato attuale e sarebbe stato pertanto necessario effettuare degli aggiornamenti. Così, in funzione di queste considerazioni e valutazioni, si è ritenuto che il rilievo precedente non rispondesse ai criteri adottati e pertanto è stato necessario procedere ex novo con le acquisizioni sull'intero edificio.

## Acquisizioni

La scelta di integrare metodi topografici classici e di scansione tridimensionale offre la possibilità di creare un archivio interrogabile di dati metrici 3D dal quale ricavare le informazioni necessarie alla realizzazione delle successive elaborazioni. Di fondamentale importanza per la creazione del database spaziale è la comune referenziazione dei dati.

La prima fase di acquisizioni è stata quella topografica. La progettazione della rete ha tenuto conto dei vincoli imposti dalla geometria dell'oggetto del rilievo oltre alle condizioni per ottenere una configurazione ottimale. La rete si compone di più di 100 vertici con una distribuzione tale da garantire un buon livello di rigidezza, ciascuno dei quali materializzato permanentemente, in maniera non invasiva e monografato in modo accurato.

E' stata individuata un'organizzazione gerarchica distinguendo:

- rete principale (prim'ordine),
- raffittimenti del second'ordine,
- raffittimenti del terz'ordine,
- sbracci (quart'ordine).



Figura 2 – Schema della rete d'inquadramento.

Le coordinate dei vertici sono state stimate compensando le misure con il metodo dei minimi quadrati. Inoltre sono stati rilevati topograficamente 385 targets dei 600 complessivi posti sulla scena a supporto delle scansioni laser scanner. I rimanenti sono stati riconosciuti sulle scansioni e utilizzati per automatizzare gli allineamenti.

Parallelamente alle acquisizioni topografiche si è proceduto a quelle con laser scanner.

Sono stati utilizzati due scanner distanziometrici a differenza di fase (Leica HDS600, Leica HDS7000) ed uno scanner a tempo di volo (Leica C10) che, avendo una portata maggiore, ha consentito delle idonee acquisizioni soprattutto dalle coperture dei fabbricati.

Anche in questo caso, come già per la topografia, è stato necessario progettare la fase di acquisizione, verificando la copertura delle singole prese, redigendo schemi grafici di ogni singolo vano in cui riportare i punti di stazione ed i targets posizionati. Per ogni scansione è stata compilata

una scheda in cui erano evidenziati tra l'altro, il codice del vano, la qualità e la risoluzione della scansione, i targets posizionati, distinguendo quelli rilevati topograficamente.

Per il rilievo della Galleria dell'Accademia sono state acquisite 416 range map con risoluzione sub-centimetrica per un totale di 13.912.467.757 punti. Questi dati numerici, solo per evidenziare che una simile mole di dati richiede degli accorgimenti particolari per superare sia i limiti imposti dalla strumentazione software e hardware, sia la necessità di una buona organizzazione dei dati e dei metadati.

### **Pre-elaborazioni**

I dati acquisiti sono stati poi elaborati secondo il workflow seguente:

- allineamento
- ottimizzazione con ICP
- organizzazione dei dati
- editing
- suddivisione in sotto-progetti

#### *Allineamento*

Per avviare le operazioni di allineamento dei dati in parallelo al proseguire delle acquisizioni e per lavorare più agevolmente su database di dimensioni non eccessive, il rilievo è stato suddiviso in 35 blocchi selezionati in base alla loro distribuzione spaziale. Ognuno di essi è stato inizialmente allineato, tramite riconoscimento di target e punti naturali, in modo indipendente e referenziato nel sistema locale topografico.

#### *Ottimizzazione dell'allineamento*

Tutti i 35 allineamenti parziali sono poi stati collegati tra loro e globalmente con un algoritmo di tipo ICP (Iterative Closest Point). Per la sola ottimizzazione sono stati necessari 5 giorni di tempo macchina.

#### *Organizzazione dei dati ed editing*

I dati allineati sono quindi stati suddivisi in layer, uno per ciascuna range map, in modo da poterla vedere separatamente dalle altre; nella successiva fase di editing sono stati eliminati dal modello alcuni elementi di scarso interesse, quali le aree circostanti non inerenti l'oggetto del rilievo, la vegetazione ed elementi derivanti da fenomeni di disturbo.

#### *Suddivisione in sotto-progetti*

Il modello complessivo finale risultava così pesante da non poter essere importato in altri programmi per l'estrazione dati; ne è conseguita la decisione di suddividerlo in 10 sotto-progetti.

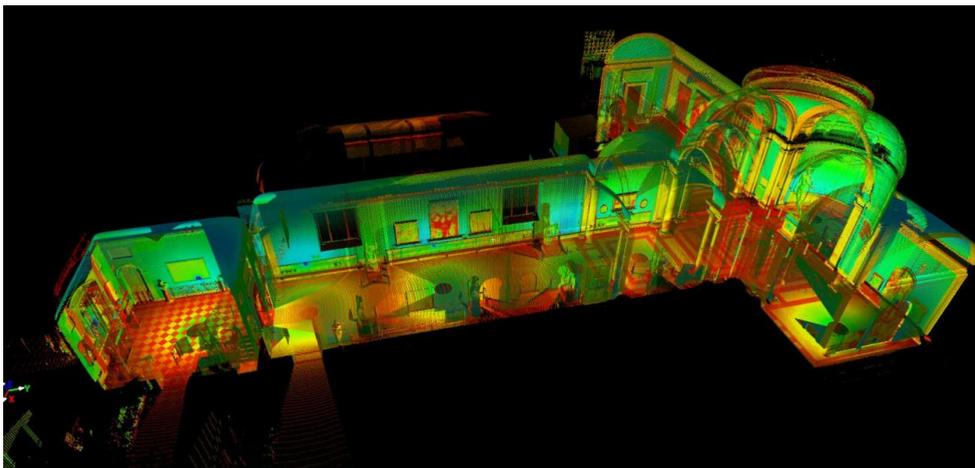


Figura 3 – Modello di punti del blocco “ Galleria dei Prigioni - Tribuna del David”.

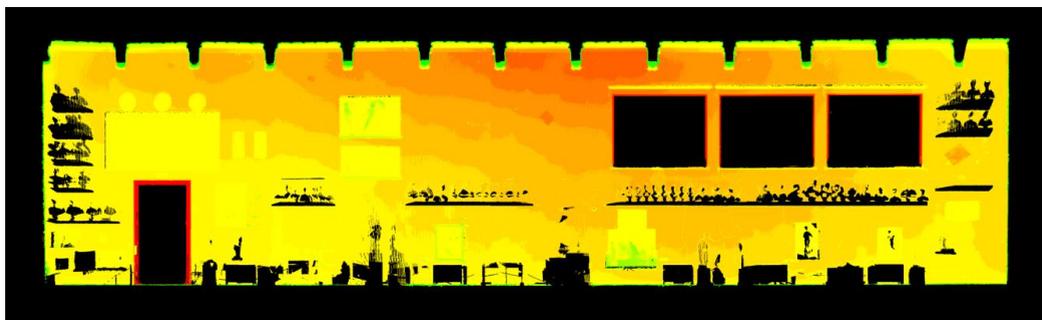
## Output

Terminate le elaborazioni è stato possibile procedere con l'estrazione dei dati dal modello di punti. Per la conoscenza della fabbrica e della sua geometria l'esito più idoneo è risultato ancora quello fornito dagli elaborati convenzionali, in proiezione ortogonale, tipici della rappresentazione dell'architettura (piante, prospetti e sezioni). E' importante sottolineare che pur trattandosi di elaborati bidimensionali, le loro coordinate sono comunque referenziate ed espresse secondo un sistema di riferimento 3D e che la completezza del modello di punti consente comunque di estrarre ulteriori elaborati secondo qualsiasi piano di sezione desiderato. Nello specifico sono stati realizzate 7 piante e 15 sezioni con il dettaglio della scala 1:20 ma riprodotte in scala 1:100 per ragioni di stampa.

Un archivio dati così ricco e complesso nel quale, in funzione del passo di campionamento delle scansioni e della precisione strumentale, è stato possibile raggiungere un livello di dettaglio elevato (sub-centimetrico), ha consentito altre possibilità di indagine strutturale come la lettura del quadro fessurativo grazie anche all'estrazione di orto immagini dal modello di punti. Nel caso specifico gli strutturisti hanno indicato due zone con criticità già evidenti ad una mera analisi visiva su cui effettuare tale lettura: la Sala dei Gessi, che accoglie la gipsoteca di Lorenzo Bartolini, e la volta a crociera che copre la parte terminale della Galleria dei Prigioni. Nel caso della Sala dei Gessi doveva essere indagato l'apparecchio murario ad est a confine con la Tribuna del David, la Sala di Giotto ed il cortile interno, mentre nel caso della volta a crociera era necessario mettere in relazione le lesioni presenti all'intradosso ed all'estradosso della medesima.

In ambedue i casi, sulle ortoimmagini estratte dal modello di punti sono state effettuate semplici elaborazioni radiometriche per enfatizzare le discontinuità della superficie e consentire un'immediata lettura del quadro fessurativo. Gli elaborati sono stati poi referenziati nei disegni CAD per evidenziare le relazioni tra il quadro fessurativo e gli altri elementi strutturali.

Inoltre, lavorando ancora esclusivamente sul modello di punti è stato possibile effettuare sulla medesima parete della Sala Gessi una valutazione sulle possibili deformazioni della struttura graficizzando con mappe di scostamento le distanze tra una geometria ideale (piani verticali) e quella rilevata su entrambe le facce della muratura. Questa modalità di analisi consente anche una verifica periodica (monitoraggio) confrontando acquisizioni, ripetute nel tempo, dello stesso oggetto.



*Figura 4 – Sala Gessi. Rappresentazione delle deformazioni della parete ottenuta valutando la distanza tra i punti rilevati ed un piano di riferimento verticale.*

Tutta la fase di acquisizione è stata accompagnata da documentazione fotografica, al fine di consentire la lettura di informazioni sull'oggetto difficilmente desumibili altrimenti. Ogni singolo vano (complessivamente circa 260) è stato documentato anche con immagini fotografiche. Inoltre per gli ambienti espositivi del Museo sono stati realizzati panorami sferici esplorabili ed interrogabili.

## Conclusioni

La rilevanza dell'esperienza presentata consiste soprattutto nella verifica della applicabilità delle tecniche topografiche e di scansione laser per il rilievo ad alta risoluzione, completo ed esaustivo, di un organismo architettonico grande ed articolato come la Galleria dell'Accademia. L'uso di queste tecnologie è ormai consolidato e sono ben noti gli ottimi risultati conseguibili, tuttavia molti casi di studio hanno finora riguardato architetture di minor complessità, oppure hanno mostrato le potenzialità dei metodi impiegati su singoli campioni significativi. Invece, il caso mostrato ha riguardato un intero organismo, dalle cantine ai sottotetti ed alle coperture, estendendosi anche a tutte le porzioni confinanti degli edifici adiacenti.

L'esperienza ha confermato come la finalità del rilievo non si esaurisca nel fornire un supporto grafico, anche se sempre più attendibile, per studi ed analisi compiuti da altri specialisti, ma anzi rappresenti di per sé un ruolo attivo di conoscenza dell'organismo edilizio nelle diverse componenti (spaziali, strutturali, tecnologiche, ecc.), confrontandosi con gli altri metodi di indagine nel suggerire e nel verificare le diverse ipotesi.

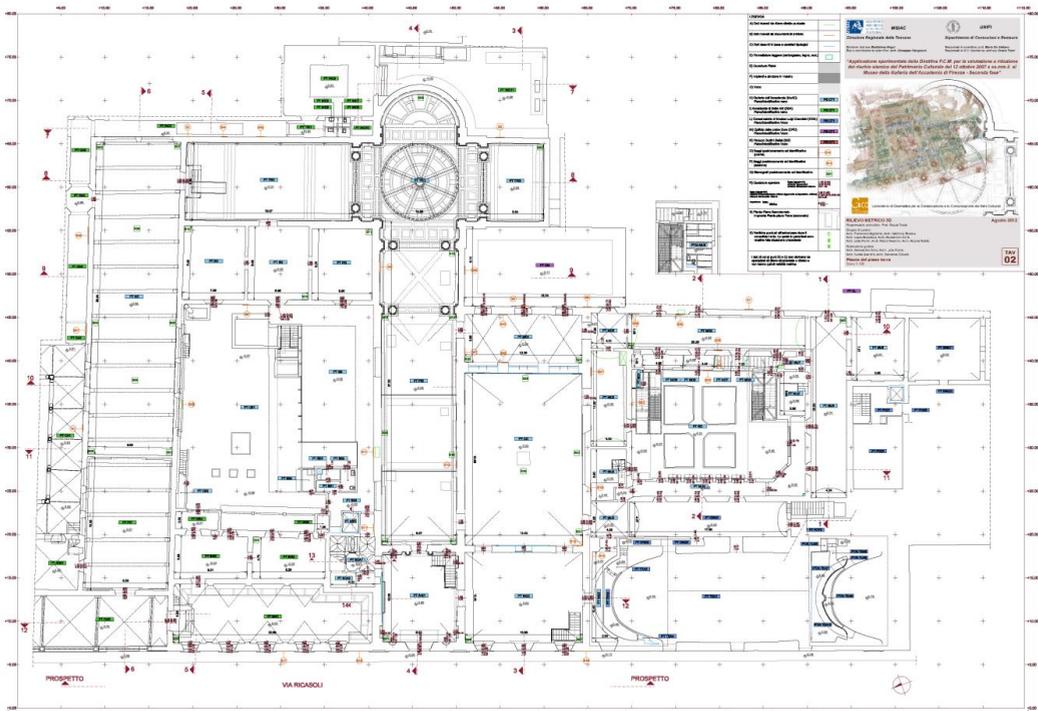


Figura 5 – Pianta del Piano Terra (originale in scala 1:100).

Il caso esaminato, in cui l'attenzione era focalizzata sulla caratterizzazione delle strutture, ha messo in evidenza come l'accuratezza di un rilievo effettuato con tecniche geomatiche sia di un ordine di grandezza superiore rispetto a quello strettamente sufficiente a realizzare modelli per analisi e simulazioni con i software usati in campo strutturale. Tuttavia, anche in questo ambito, un rilievo ad alta risoluzione, da cui si possano ricavare un quadro fessurativo accurato e le deformazioni delle membrature, consente di verificare se le ipotesi svolte su modelli decisamente semplificati corrispondano con gli effetti riscontrabili nella realtà.

Rimangono comunque varie questioni che debbono trovare ancora soluzioni adeguate. Progetti delle dimensioni di quello presentato comportano la raccolta di enormi quantità di informazioni. I soli

dati relativi alle scansioni ed alle loro elaborazioni occupano vari terabyte e, nonostante la scelta di suddividere il modello complessivo per agevolare le restituzioni, ogni consultazione risulta molto difficoltosa. Il complesso dei dati di grandi progetti (non solo quelli topografici e di scansione, ma ovviamente anche gli eidotipi, le fotografie, i documenti testuali, gli elaborati finali ecc.) comporta problemi di gestione e di archiviazione. Necessita quindi, con urgenza, la definizione di strumenti gestionali e di standard che consentano il mantenimento e la trasmissione di questi importanti dati d'archivio, in particolare per quanto riguarda i beni culturali ed il patrimonio pubblico.

*Lo studio presentato è stato condotto nell'ambito della Convenzione di Ricerca "Rilievo metrico ed analisi di vulnerabilità sismica della Galleria dell'Accademia a Firenze" tra dalla Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Toscana e Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Costruzioni e Restauro ora DIDA e DICEA*

### **Bibliografia**

- Tucci G., Bonora V. (2014) New technologies for Cultural Heritage Documentation and Conservation: the role of geomatics, *Newton's Bulletin*, 2014,
- Visintini D., Spangher A. (2013), Rilevamento laser scanning, modello della superficie (DSM) e modello per il metodo agli elementi finiti (FEM) di una struttura *Atti 17a Conferenza Nazionale ASITA*, 5-7 novembre 2013
- 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*, forthcoming.
- Bertacchini E., Capra A., Castagnetti C., Dubbini M., Rivola R., Toschi, I. (2011), "Utilizzo del laser scanner per i beni culturali: analisi dell'assetto geometrico strutturale e di specifiche anomalie geometriche", *ATTI Conferenza ASITA 2011* - pp. da 315 a 322
- Blasi, C., Coisson, E., (2009). Fasi costruttive ed evoluzione dei fenomeni di dissesto. In: Cadignani, R. *La Torre Ghirlandina: un progetto per la conservazione. vol. 1*, p. 147-154, ROMA: Luca Sossella Editore 2010
- Giandebiaggi P., Zerbi A., Capra A. (2009). Il rilevamento della Torre Ghirlandina (The surveying of Ghirlandina tower). *La Torre Ghirlandina: un progetto per la conservazione*. Luca Sossella Editore, Roma.
- Blasi C., Coisson, E. (curatori) *La Fabbrica del Duomo di Parma: stabilità, rilievi e modifiche nel tempo* Ed. Grafica STEP, 2006, Parma.