

# Rapporti tecnici

## INGV

**L'analisi morfologica di dati TLS per individuare variazioni ed irregolarità in relazione allo stato deformativo di un monumento: valutazione del metodo e applicazioni**

# 305



## **Direttore Responsabile**

Stefano Gresta

## **Editorial Board**

Luigi Cucci - Editor in Chief (INGV - RM1)

Andrea Tertulliani (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (INGV - PA)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Barbara Angioni

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

[redazionecen@ingv.it](mailto:redazionecen@ingv.it)



# Rapporti tecnici INGV

## **L'ANALISI MORFOLOGICA DI DATI TLS PER INDIVIDUARE VARIAZIONI ED IRREGOLARITÀ IN RELAZIONE ALLO STATO DEFORMATIVO DI UN MONUMENTO: VALUTAZIONE DEL METODO E APPLICAZIONI**

Arianna Pesci<sup>1</sup>, Federico Bonelli<sup>2</sup>, Giordano Teza<sup>3</sup>, Alexios Liberis Perikleous<sup>4</sup>

<sup>1</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

<sup>2</sup>UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA (Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale)

<sup>3</sup>UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA (Dipartimento di Geoscienze)

<sup>4</sup>UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA (Dipartimento di Ingegneria delle Telecomunicazioni)

# 305



## **Indice**

Introduzione	7
1. Cenni tecnici	8
2. Analisi morfologica e stato deformativo	10
3. I vantaggi dell'analisi morfologica: esperimento	11
3.1 Generazione di dati sintetici	12
3.2 Procedura per l'analisi morfologica	14
3.3 Risultati dell'esperimento con dati sintetici	16
3.4 Valutazione dei risultati	19
4. Applicazione: la Rocca Estense a San Felice sul Panaro	21
5. Conclusioni	26
Ringraziamenti	27
Bibliografia	27



## Introduzione

Gli edifici danneggiati dal terremoto possono presentare un chiaro quadro fessurativo che permette agli addetti ai lavori l'analisi dei danneggiamenti strutturali, una veloce diagnostica per riconoscere i meccanismi di danno attivati ed una conseguente celere messa in sicurezza delle strutture. In molti casi, però, le deformazioni indotte da un sisma, benché potenzialmente pericolose, potrebbero non essere evidenti e/o facilmente interpretabili per cui si rende necessario un lavoro di monitoraggio basato sull'uso di tecniche di osservazione e misura in grado di fornire dati oggettivi in tempi estremamente brevi, secondo le necessità legate all'emergenza. Tecniche di telerilevamento quali il laser scanner terrestre (TLS) sono in grado di soddisfare tali requisiti perché consentono di ottenere nuvole di punti molto dense in tempi relativamente rapidi, a loro volta utilizzabili per generare modelli geometrici dettagliati e precisi (per una trattazione generale sul TLS si veda ad esempio Sgrenzaroli e Vassena, [2007]). L'esecuzione di una sessione di misura in condizioni di emergenza è caratterizzata da forti vincoli per il posizionamento delle strumentazioni e, di conseguenza, le scansioni potrebbero dover essere eseguite in maniera non ottimale. I sistemi TLS very long range (VLR-TLS), cioè quella gamma strumentale concepita prevalentemente per il rilievo ambientale e capaci di lavorare anche a grande distanza dagli edifici di interesse, hanno caratteristiche notevoli in termini di affidabilità del dato e stabilità del risultato, pertanto sono particolarmente adatti all'uso in condizioni di emergenza, quando cioè è necessario operare in tempi estremamente rapidi, in condizione di sicurezza, senza possibilità di sfruttare l'accesso ad edifici vicini alla struttura di interesse per misurare da punti di vista ottimali, e soprattutto fornire informazioni sullo stato deformativo ai tecnici di ingegneria strutturale.

Le esperienze maturate durante il terremoto dell'Emilia hanno dimostrato che il dato VLR-TLS, restituito mediante mappe di deformazione, è uno strumento sinottico efficace. Esse presentano la sinteticità, la semplicità e l'intuitività di interpretazione di una tavola tematica, ma allo stesso tempo risultano uno strumento che racchiude informazioni utili alle diverse esigenze, dalla messa in sicurezza/protezione civile, al possibile restauro e/o consolidamento strutturale. sia per la situazione contingente, sia per le condizioni finali. Infatti, la possibilità di operare in maniera completamente indipendente, sicura e affidabile, unita alla messa a punto di metodologie semplici e veloci, sia in sede di sessione di misura sia al momento dell'analisi dei dati, può confluire in una procedura standard da adottarsi nei momenti di crisi sismica per controllare gli edifici e per fornire, in tempo utile, dati oggettivi al personale addetto ai controlli strutturali ed alla messa in sicurezza. Va precisato che nel contesto architettonico spesso il termine deformazione intende tutto ciò che si discosta dalla regolarità costruttiva e non è utilizzato nella sua accezione matematica che richiede, evidentemente, un confronto tra uno stato pre ed uno post terremoto.

È interessante e importante comprendere che, nonostante una diagnostica completa possa essere fornita esclusivamente mediante uno studio multidisciplinare del monumento di interesse, come evidenziato ad esempio da Teza et al. [2014], i rilievi e le mappe di deformazione in oggetto possono fornire preziose e chiare indicazioni per individuare le zone critiche (fragili), potenzialmente soggette a meccanismi di collasso (a rischio) in caso di evento sismico. È importante ricordare che, nonostante nel presente lavoro sia stata evidenziata l'utilità della metodologia in condizioni di emergenza post-sismica, le mappe morfologiche possono essere utilizzate anche a livello preventivo, per evidenziare difformità strutturali e peculiarità geometriche sintomatiche di patologie strutturali; tali conoscenze possono infatti, in molti casi, suggerire le corrette strategie di intervento diventando una sorta di guida procedurale per le scelte progettuali di miglioramento e/o adeguamento sismico. Inoltre, i dati ottenuti in tal modo possono guidare la scelta degli edifici da monitorare con tecniche di più complessa attuazione come l'analisi modale sperimentale (EMA). Non va infatti trascurato che un evento sismico può portare al danneggiamento di una rilevante quantità di edifici che, con le limitate risorse umane, tecniche ed economiche solitamente disponibili, non potrebbero essere monitorati in modo completo durante lo sciame sismico con tecniche a contatto come l'EMA.

Il tipo di analisi proposta per il controllo degli edifici colpiti da sisma è basata principalmente sullo studio morfologico dei prospetti in esame da cui trarre, se possibile, informazioni sullo stato deformativo. Tale strategia di analisi dati, con la precisione ottenibile (5-10 mm nell'acquisizione del singolo punto dalla distanza di 50 m) e l'elevata quantità di punti disponibile, si pone all'avanguardia come metodologia di interpretazione dello stato deformativo di un edificio.

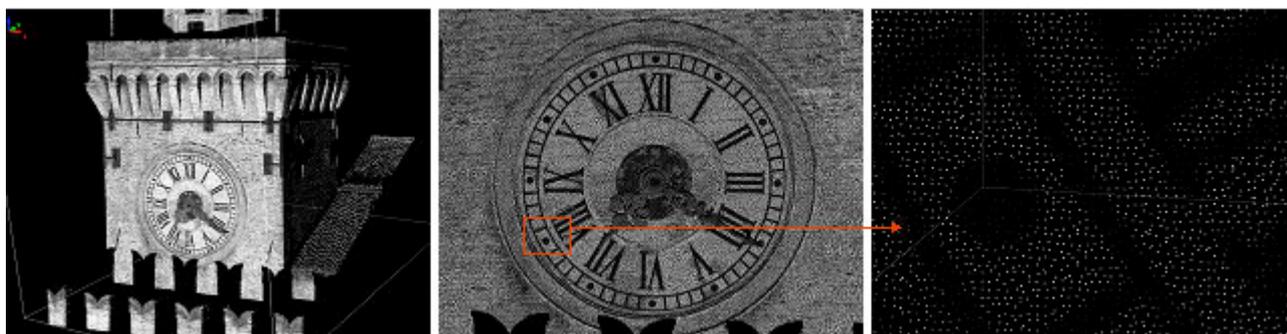
Il percorso prevede la misura, la creazione delle nuvole di punti, un ciclo di lavoro per definire le primitive che meglio rappresentano i prospetti in esame, la creazione delle mappe di deformazione, la verifica (mediante ciclo di controllo) che i valori ottenuti siano maggiori delle distorsioni indotte nel modello dalle condizioni di rilievo. In questo lavoro si mostrerà un esperimento mirato a comprendere l'utilità di effettuare uno studio morfologico per determinare lo stato deformativo di un edificio; inoltre si cercherà di

quantificare il vantaggio di questo genere di approccio rispetto al classico monitoraggio realizzato come confronto di scansioni multitemporali. Sta di fatto che, in questo caso, parlando di confronto tra uno stato iniziale ed uno finale è più rigoroso l'utilizzo del termine deformazione che, se ottenuto da analisi morfologica, si ribadisce che va inteso in senso architettonico come ciò che si discosta da una regolarità iniziale presa come ipotesi e quindi come vincolo per interpretazioni future.

## 1. Cenni tecnici

Il TLS è stato più volte argomento di lavori presentati sulla collana dei Rapporti Tecnici INGV; si ricorda tuttavia qui brevemente che i rilievi TLS consentono di ottenere un insieme di coordinate di punti misurati in un'area di interesse selezionata in fase di programmazione delle scansioni. Gli elementi presenti nel campo di scansione vengono investiti dal passaggio di un fascio laser estremamente collimato secondo una progressione regolare e stabile a ricoprire tutta l'area selezionata (ROI). Generalmente, si parla di linee di scansione orizzontali e verticali composte a loro volta da punti inviati secondo precise direzioni e misurati sulle superfici fisiche presenti. Se immaginiamo di avviare una scansione in base ad una certa ROI la vedremo via via ricoperta da punti che, secondo una vista bidimensionale, formano una sorta di griglia angolare regolare ma, nella realtà 3D la distribuzione dei punti misurati varia a seconda del contenuto oggetto di scansione. Certo è che se l'oggetto del rilievo è un prospetto, quindi un elemento di per sé disposto secondo una direzione preferenziale, e che se il rilievo viene effettuato da una posizione abbastanza frontale alla superficie allora la nuvola di punti, cioè l'insieme delle coordinate dei punti misurati, sarà relativamente regolare e caratterizzata, oltre da una alta densità di contenuto geometrico, anche da un passo di campionamento pressoché costante su tutta l'area.

Nella figura 1 vediamo, a titolo di esempio, il rilievo di una porzione della torre con orologio di Palazzo d'Accursio (Bologna) e notiamo come i punti siano effettivamente distribuiti in modo piuttosto regolare e densi.

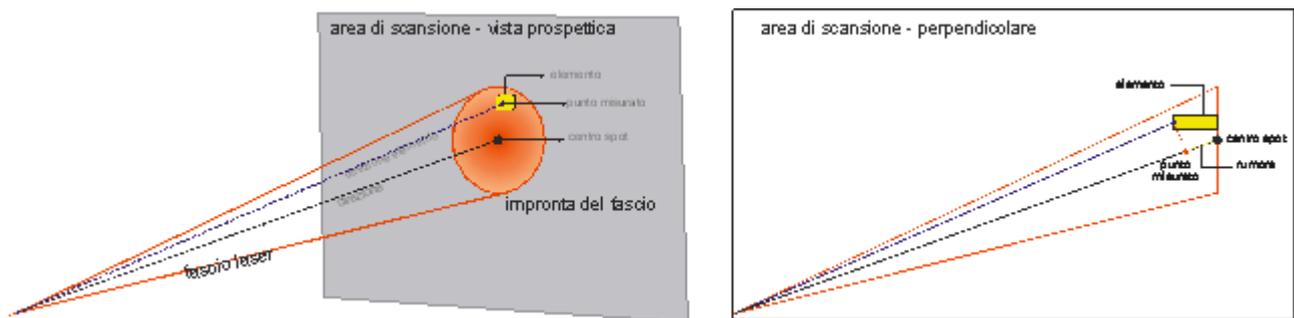


**Figura 1.** Schema non in scala del fascio laser e dell'impronta su una superficie. A sx vista prospettica, a dx vista perpendicolare alla superficie. Si nota come un elemento qualsiasi nell'area illuminata possa essere responsabile del calcolo della distanza strumento-oggetto e come questo valore, assegnato però al centro virtuale dello spot, si traduca in rumore. Una scansione TLS della torre di Palazzo d'Accursio (Bo). Zoomando nella nuvola di punti arriviamo ad osservare la regolarità della distribuzione dei punti nello spazio.

È molto importante sottolineare che un laser scanner non è mai in grado di misurare un punto specifico, ma fornisce invece una copertura di punti che appartengono ad elementi delle superfici fisiche illuminate dal fascio laser. Sostanzialmente non si può misurare mai ripetutamente lo stesso punto ma si misurano punti distribuiti similmente nelle aree di interesse. Questo è un fattore da tenere sempre presente per evitare di credere che un laser scanner possa essere utilizzato come una stazione totale benché sia molto simile come principio di funzionamento per ciò che riguarda il calcolo delle distanze e la collocazione del punto nello spazio 3D. Quindi, se non possiamo considerare ogni singolo punto della nuvola di punti come

rappresentativo degli oggetti acquisiti, possiamo invece considerare tale l'insieme di tutti i punti con i relativi errori e le relative significatività come fortemente significativi degli oggetti acquisiti.

Inoltre va sempre tenuto a mente che l'impronta del fascio laser illumina una piccola area (spot), poiché la divergenza è stretta, ed il valore della coordinata che traduce lo spot in punto tridimensionale si ottiene misurando la distanza e conoscendo gli angoli della direzione del fascio. Lo scanner conosce la direzione di invio del fascio ma considera la misura di distanza in riferimento al centro virtuale dello spot. In realtà il valore misurato della distanza potrebbe dipendere da uno specifico elemento dell'area illuminata e, di conseguenza, la discrepanza si traduce in un rumore sulla direzione di invio, come illustrato in figura 2. Altri effetti legati alla questione sono descritti da Lichti D.D. and Jamtsho [2006] e, con particolare riguardo all'acquisizione di materiali caratterizzati da riflettività elevata, da Pesci e Teza [2008].



**Figura 2.** Schema non in scala del fascio laser e dell'impronta su una superficie. A sx vista prospettica, a dx vista perpendicolare alla superficie. Si nota come un elemento qualsiasi nell'area illuminata possa essere responsabile del calcolo della distanza strumento-oggetto e come questo valore, assegnato però al centro virtuale dello spot, si traduca in rumore.

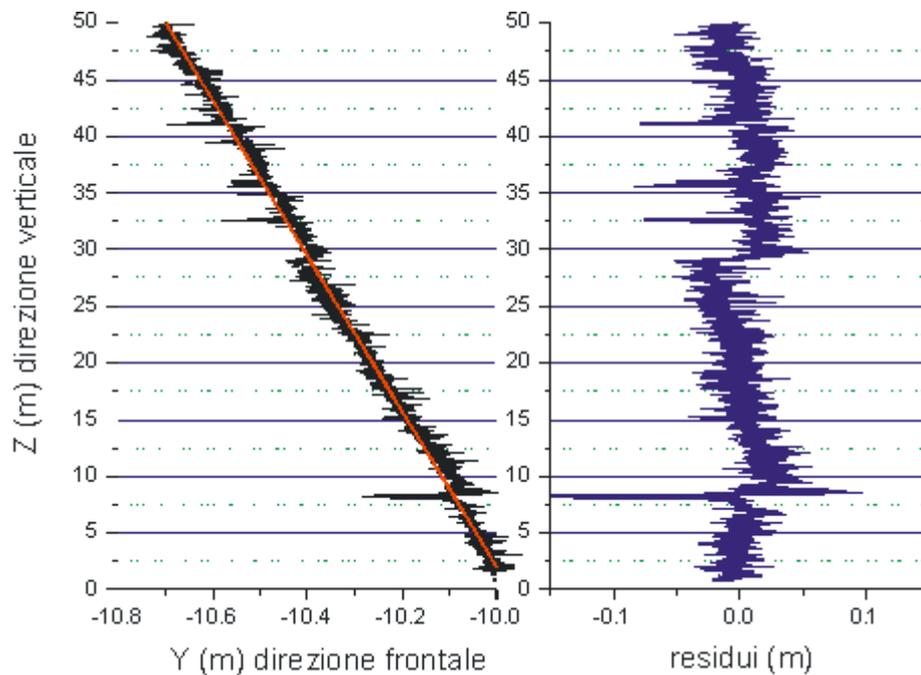
Queste precisazioni sono qui fornite con un solo scopo e cioè quello di fare comprendere come il risultato di una scansione sia da considerarsi nella sua totalità come rappresentativa degli oggetti rilevati e non punto per punto, come sottolineato da Park et al. [2008], dove è ampiamente discusso il fatto che l'uso di una collezione di punti per modellare una linea o una superficie permette di ottenere precisioni nettamente migliori di quella sul singolo punto (precisione di alcuni mm da dati TLS affetti da errore centimetrico). È la grande quantità di punti che conferisce alla scansione la capacità di rappresentare in modo preciso la realtà. Non riporteremo in questa sede le numerose esperienze mirate a comprendere quanto un rilievo fatto in condizioni non ottimali possa alterare il risultato creando geometrie distorte, ma presenteremo una valutazione interessante del grado di affidabilità delle misure TLS nella ricerca di indicatori di stati deformativi o comunque caratteristiche morfologiche interessanti dal punto di vista diagnostico. In particolare si valuteranno i risultati ottenuti dalle mappe create dal confronto dei punti con superfici di riferimento più che dal confronto diretto tra scansioni.

Una nota è necessaria per non incorrere in fraintendimenti sul trattamento dei dati e sulla interpretazione dei risultati: (i) una scansione porta alla produzione di una nuvola di punti, cioè di un denso insieme di punti le cui coordinate sono state misurate e date in un sistema relativo la cui origine è il centro strumentale e gli assi sono, solitamente, paralleli agli assi dello strumento; (ii) una scansione contiene tutto il dato geometrico di interesse e non deve necessariamente essere inserita in un sistema di riferimento esterno per studiare le caratteristiche degli oggetti in essa contenuti; (iii) la ricostruzione completa di un'area di interesse avviene mediante l'allineamento di più scansioni e solo utilizzando specifici algoritmi è possibile unire le nuvole di punti senza introdurre rilevanti errori che possano comportare il degrado del modello finale; (iv) la disposizione dei punti tra loro è un concetto relativo che non risente del sistema di riferimento utilizzato e su ciò si basa appunto l'analisi morfologica descritta in questo lavoro; (v) solo un sistema di analisi completamente indipendente consente di ottenere informazioni rapide ma certe sulla geometria relativa di un prospetto specifico.

## 2. Analisi morfologica e stato deformativo

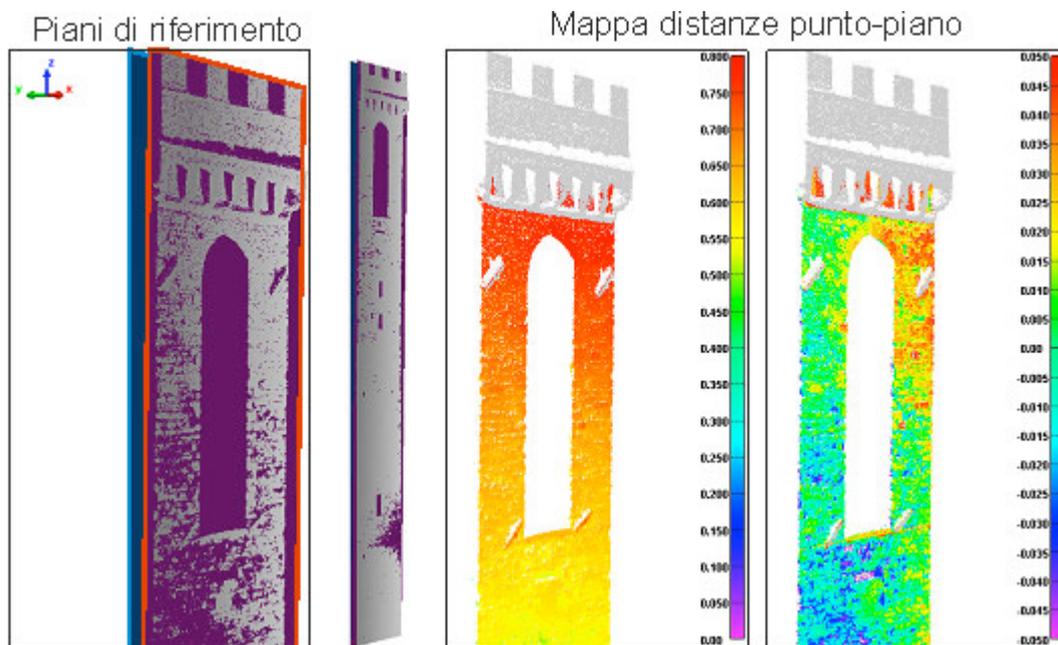
Il tipo di analisi proposto è estremamente semplice ma altrettanto efficace per mettere in evidenza caratteristiche interessanti dei prospetti che, come vedremo, sono spesso correlate a stati deformativi dovuti ad eventi specifici come terremoti o semplicemente al degrado progressivo dovuto al passare del tempo e/o cattiva o assente manutenzione oltre a possibili effetti antropici di varia natura. L'analisi morfologica è stata proposta da Pesci et al. [2013] e Bonali et al. [2014] per strutture di forma generale e, limitatamente alle strutture con sezione circolare, da Teza e Pesci [2013].

In sostanza il motivo per cui si ricorre all'analisi morfologica sta nel fatto che è importante lavorare nel sistema di riferimento più adatto a far risaltare anomalie o stranezze altrimenti difficilmente visibili e tale da poter garantire una facile interpretazione. Questo obiettivo si può raggiungere avvalendosi di un procedimento che preveda la costruzione di una primitiva di riferimento ed il calcolo delle distanze punto-primitiva, lungo la direzione a questa normale, ottenendo una mappa delle distanze. Se la primitiva coincide con l'elemento matematico che riassume l'assetto del prospetto in esame allora si ottiene quella che per noi è una mappa morfologica e cioè la rappresentazione più mirata e zoomata della disposizione relativa dei punti tra loro. In definitiva la primitiva in questione non è nient'altro che l'elemento geometrico tridimensionale interpolato utilizzando le coordinate contenute in quella parte di nuvola di punti che attiene al prospetto considerato e quindi, per sua natura, la migliore e più semplice rappresentazione dello stesso nello spazio. Il senso di ragionare in relativo rispetto ad un piano che rappresenti la facciata e non rispetto ad un piano verticale serve per ottimizzare il risultato eliminando *trend* non necessari che potrebbero rendere impossibile osservare variazioni interessanti a causa una scala di valori troppo estesa. Il significato è evidente se ragioniamo in 2D, per esempio su un profilo estratto da una nuvola di punti come mostrato in figura 3. La sezione è relativa ad una facciata della Torre Volognana (Palazzo Bargello, Firenze) che, oltretutto, ha un fuori piombo di circa 80 cm. Come si può osservare il grafico del profilo è dominato da un trend importante che riguarda l'inclinazione della torre. Se analizziamo gli stessi dati ma dopo avere eliminato il trend ottenuto con un semplice fit lineare dei dati, la scala si riduce enormemente e noi riusciamo ad osservare e a meglio quantificare le piccole variazioni sul corpo della torre. Il tutto si riduce ad un semplice cambio di sistema di riferimento e cioè stiamo operando in un sistema in cui scompare il trend lineare.



**Figura 3.** Profilo verticale di un prospetto della torre Volognana (Firenze). Nei grafici, si mostrano le coordinate dei punti (nero) nel sistema di riferimento “in bolla” nel quale si osserva l’inclinazione della torre e (in blu) le stesse coordinate dopo avere rimosso un trend lineare, cioè la retta calcolata fittando i punti.

Lo stesso ragionamento vale, in 3D, se abbiamo a che fare non con un profilo ma con una intera facciata e non con una retta ma con un piano interpolatore. Sottolineiamo come lo studio potrebbe essere effettuato prendendo a riferimento un piano di arbitrario, ottenendo però risultati molto diversi da un'analisi morfologica; il classico esempio alternativo è l'utilizzo di un piano verticale che permette un'indagine a piccola scala sulla struttura, utile ad esempio per quantificare grandi deviazioni rispetto alla verticalità. La scelta di utilizzare come piano di riferimento una primitiva che abbia una diretta connessione con i dati rilevati risulta necessaria, però, per effettuare una obiettiva indagine a grande scala. Per tale scopo il piano ottenuto dall'interpolazione delle coordinate rilevate certamente è la scelta ideale per due motivi: (1) perché costruita dall'interpolazione dei dati ha la proprietà di essere l'elemento che, in linea teorica, rappresenta il prospetto in esame; (2) perché toglie la discrezionalità all'operatore. In un certo senso, operare in questa maniera equivale a mettere in evidenza tutto ciò che si discosta dalle regolarità e, in fase finale, questo permetterà di collegare le mappe delle differenze punto-piano con la deformazione dell'edificio.



**Figura 4.** Il prospetto completo della torre e due piani di riferimento. Analogo 3D di quanto mostrato nella figura precedente. Le mappe punto-piano mostrano un grande dettaglio se relative al piano di Fit (figura dx) mentre evidenziano l'inclinazione se relative al piano verticale (sx).

### 3. I vantaggi dell'analisi morfologica: esperimento

Una delle domande che più frequentemente si sentono sia nella fase di revisione dei lavori che nelle presentazioni ai convegni riguarda il perché portare avanti uno studio morfologico e cercare di collegare le mappe ottenute con variazioni e/o deformazioni, intese come scostamenti dalla regolarità, e non invece eseguire dei precisi confronti diretti tra scansioni multi temporali. Senza escludere ovviamente questa seconda possibilità che è molto utile, se non spesse volte indispensabile, non si può fare a meno di considerare che: (i) spesso non esistono modelli precedenti di un monumento; (ii) se esistono modelli precedenti, spesso questi non hanno le caratteristiche di precisione, densità e accuratezza necessarie per fare un confronto utile a mettere in evidenza piccole variazioni; (iii) generalmente le deformazioni subite da un monumento sono rappresentative di una situazione cumulativa creatasi nel corso di decenni o secoli e misure eseguite nel giro di pochi mesi o anni non servono per rilevare variazioni; (iv) nel caso in cui ci sia un evento distruttivo come un terremoto o altre cause a danneggiare un edificio in modo grave spesso non occorre una scansione TLS per capire il tipo di danno; (v) se il danno non è eclatante, solo con rilievi geometrici accurati si possono comprendere i meccanismi occorsi e gli schemi di risorsa del monumento e per fare ciò servirebbe

un dato il meno rumoroso possibile; (vi) se la deformazione non è chiara dal quadro fessurativo osservato dagli esperti sul campo, la mappa morfologica può integrare la conoscenza del danno fornendo una quantificazione dello stesso.

Gli ultimi due punti sono molto importanti e facilmente comprensibili. Una nuvola di punti è caratterizzata da una grande densità di informazione geometrica, si parla generalmente di milioni di punti che costituiscono la rappresentazione del prospetto, caratterizzati da un certo rumore a seconda della tipologia di scanner utilizzato comunque generalmente compreso tra 5 mm e 10 mm, alla distanza di acquisizione di 50 m, per i più diffusi sistemi VLR-TLS. È altrettanto importante non dimenticare che per confrontare due scansioni è necessario prima allinearle mediante algoritmi ICP per poi calcolare le differenze dirette punto-punto. Anche in questa fase entra in gioco una sorta di arbitrarietà in quanto se un edificio è deformato sarebbe necessario allineare le scansioni relative a sessioni di misura differenti utilizzando solo la parte non variata cosa che potrebbe non succedere se larga parte dell'edificio è stato danneggiato. Pensare di procedere ad un confronto diretto saltando questa fase e utilizzando magari nuvole di punti misurate con sistemi ottici/elettronici per la verticalità in fase di rilievo e stazioni totali e bersagli specifici per l'orientamento non è pensabile per vari motivi. Innanzitutto, ciò non è possibile perché, come descritto in precedenza, uno scanner non può mai misurare un punto specifico e l'utilizzo dei target per funzionare richiederebbe decine o centinaia di punti, cosa non facilmente attuabile ed economicamente e logisticamente impegnativa. Infine, per ricondursi al punto (iv) va sottolineato che in tali confronti il rumore si somma e le piccole differenze, seppur rilevabili, rischiano di essere poco significative e difficilmente misurabili.

Per comprendere quanto possa essere vantaggioso l'uso delle mappe morfologiche rispetto ai confronti diretti è stato realizzato un esperimento tutto sommato semplice ma che ha fornito risultati molto interessanti. Risultati che sono stati anche confermati da applicazioni a veri casi di studio nel tentativo di studiare una serie temporale di mappe morfologiche relative ad situazioni cosismiche.

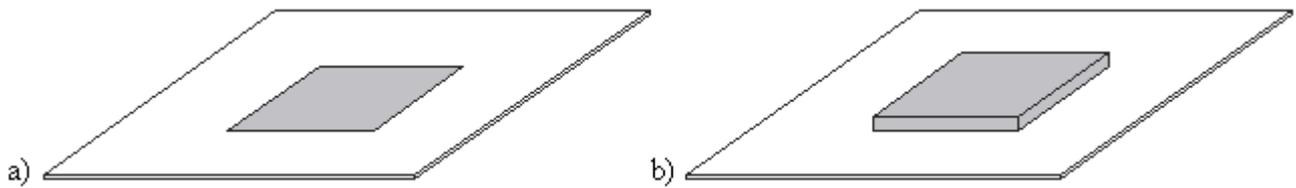
Prima di procedere alla descrizione dello studio e dell'esperimento realizzato a questo scopo, è bene ricordare che in precedenza è stato dimostrato che può essere creato un dato sintetico mediante la convoluzione tra una funzione "geometria dell'oggetto" ed una funzione "laser beam" considerando la prima come digitalizzazione di un target specifico e la seconda modellata come un fascio la cui divergenza è data dalle tabelle tecniche dei costruttori e linearmente dipendente dalla distanza e nel quale la distribuzione dell'energia attorno alla direzione di propagazione (e quindi sullo spot) è una gaussiana. In Pesci et al. [2011] si dimostra che questo tipo di modellazione si adatta molto bene alla costruzione di dati sintetici molto simili a quelli di scansioni reali. Per questo motivo e per eliminare al massimo disturbi esterni focalizzando l'attenzione solo sulle differenze tra confronto tra scansioni e mappe morfologiche è stato condotto l'esperimento con l'utilizzo di scansioni sintetiche.

### 3.1 Generazione di dati sintetici

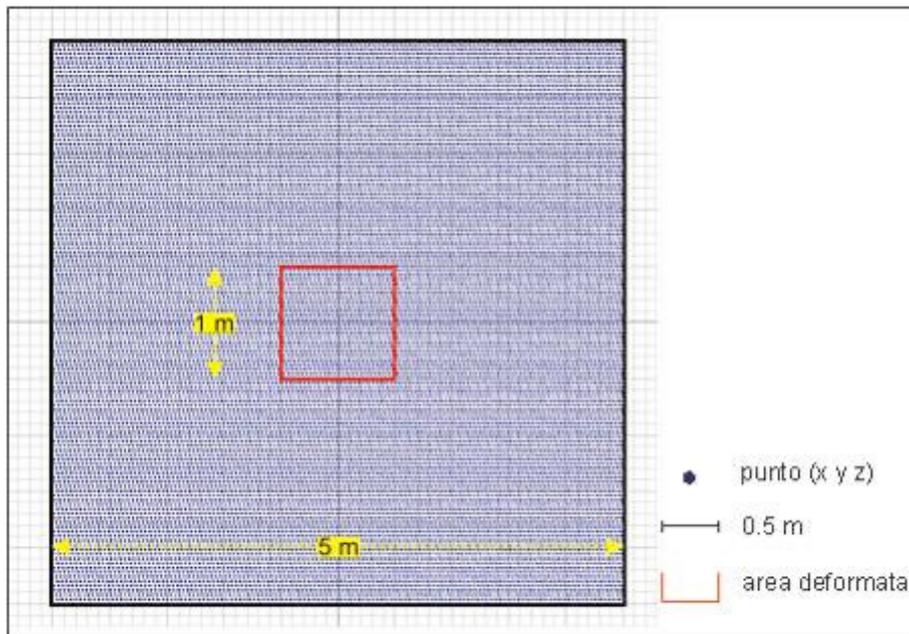
L'esperimento è stato realizzato creando un set di dati sintetici a simulare il rilievo di un target contenente una deformazione nota con una gamma di strumenti di tipo TLS ma caratterizzati da diversi livelli di rumore variabile tra 5 mm e 10 mm. Il target dal punto di vista geometrico è immaginato come un pannello al centro del quale vi è un'area in deformazione. Nel caso specifico la deformazione è stata creata come un'area quadrata in rilievo con uno spessore variabile tra 0 mm e 10 mm e passo di variazione di 1 mm. In pratica sono state considerate 10 variazioni del modello target con una deformazione via via sempre più grande a partire dalla situazione regolare in cui l'area quadrata all'interno non è minimamente in rilievo.

Certamente stiamo parlando di un target ben definito e caratterizzato da una deformazione che non rappresenta una realtà architettonica specifica ma è molto comodo per comprendere il metodo e per ottenere delle valutazioni interessanti sulla sua efficacia e sui vantaggi dello studio morfologico rispetto ai confronti multi-temporali. Anche questi ultimi permettono di ottenere le mappe delle differenze dirette tra scansioni, seppure caratterizzate da un rumore rilevante, che permettono di osservare la deformazione.

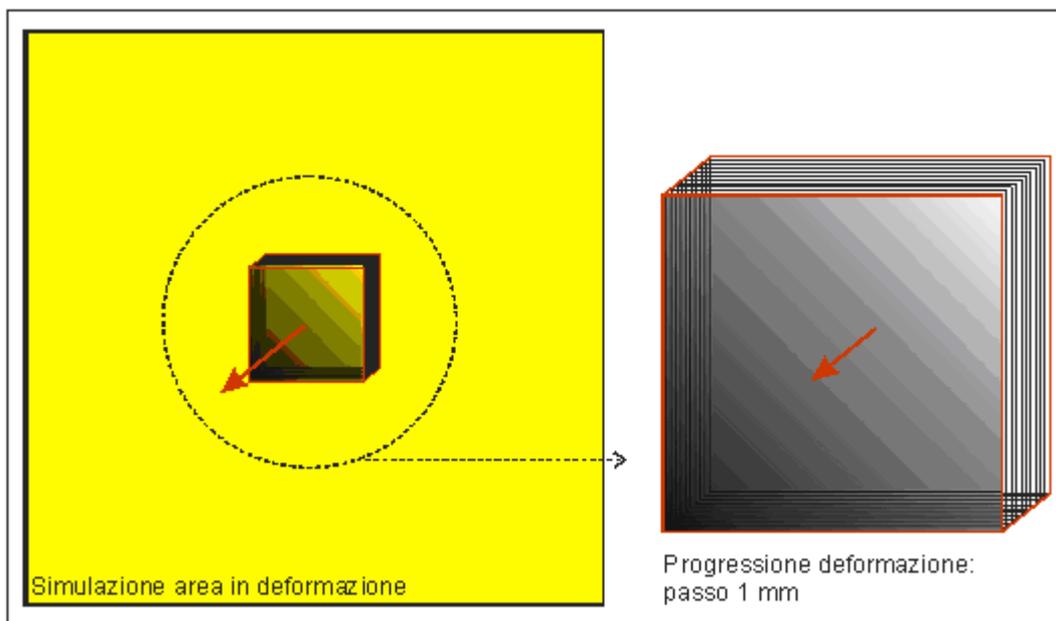
Nelle figure seguenti sono mostrati lo schema del target, la nuvola di punti sintetica che lo rappresenta, la deformazione e la progressione della deformazione sempre intesa come la sporgenza dell'area quadrata al suo interno. Infine, ognuna delle 11 situazioni target/deformazione ha portato alla creazione di 6 nuvole di punti sintetiche a simulare le scansioni con strumenti caratterizzati da rumori diversi, per un totale di 66 elementi da ispezionare.



**Figura 5.** Schema ideale del target. In bianco il pannello, in grigio la zona centrale nello stato inalterato (a) e deformato (b).



**Figura 6.** Il target come acquisito dalla nuvola di punti: dimensioni reali. In blu i punti sintetici. In rosso il quadrato in deformazione.



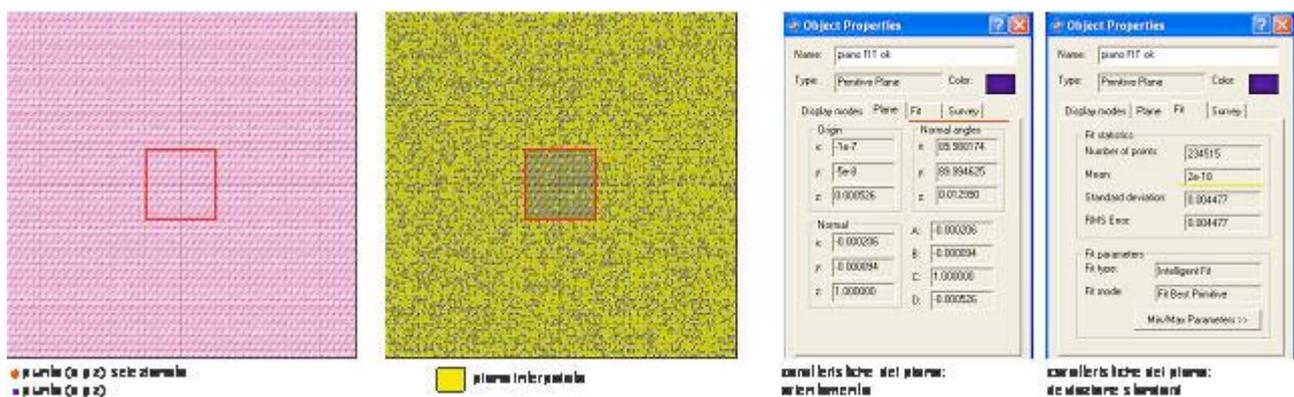
**Figura 7.** Schema del target e della deformazione. L'elemento quadrato sporge da 0 mm a 10 mm con un passo di 1 mm.

### 3.2 Procedura per l'analisi morfologica

La procedura di analisi è stata la stessa per ogni elemento e viene schematizzata a punti come segue: (i) selezione dei punti e (ii) calcolo della primitiva come (piano) di riferimento; (iii) valutazione della primitiva; (iv) creazione della mappa morfologica come insieme dei valori di distanza punto-piano; (v) identificazione della zona deformata; (vi) estrazione dei punti nella zona deformata e statistica dei valori (differenze).

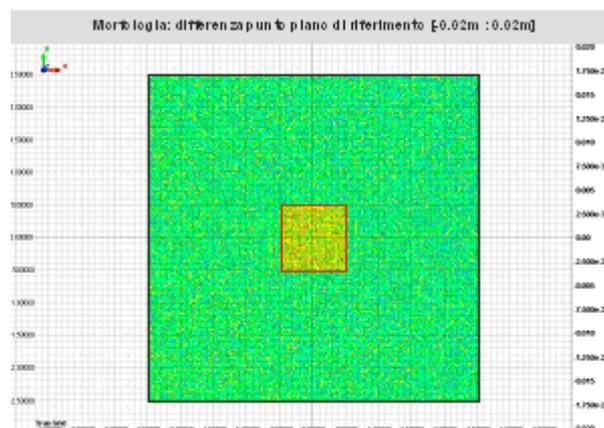
Parallelamente si procederà anche a creare le differenze dirette tra nuvole di punti ottenute confrontando il target inalterato con tutti le scansioni relative ai vari livelli di deformazione (si ricorda da 1 mm a 10 mm con passo di 1 mm) e creando delle mappe con la stessa scala di quelle ottenute in precedenza dalle analisi morfologiche.

Il punto (i) consiste nella selezione dei punti appartenenti al target e nella creazione, mediante il metodo ai minimi quadrati, della primitiva che meglio ad essi si adatta: sostanzialmente, in questo caso, viene fittato un piano. Questo passaggio è critico poiché il piano deve rappresentare l'oggetto ed è il riferimento per tutte le analisi successive (vedi figura 8).



**Figura 8.** Calcolo del piano di fit ai minimi quadrati: selezione dei punti; creazione del piano; caratteristiche geometriche e parametri di calcolo.

È importante osservare il valore della deviazione standard, ottenuta come scarto tra la primitiva ed i punti fittati: se tale valore coincide pressoché con la precisione della scansione allora è già una buona partenza nella verifica che la primitiva sia rappresentativa dell'oggetto nella sua parte non deformata. Una volta ottenuto il piano di riferimento si procede a creare la mappa delle differenze punto-piano lungo la normale al piano stesso. Nella figura si mostra il risultato ottenuto utilizzando il software PolyWorks [Innovmetrics, 2014] e rappresentato con una scala in falsi colori nell'intervallo [-0.02; 0.02] m (vedi figura 9).

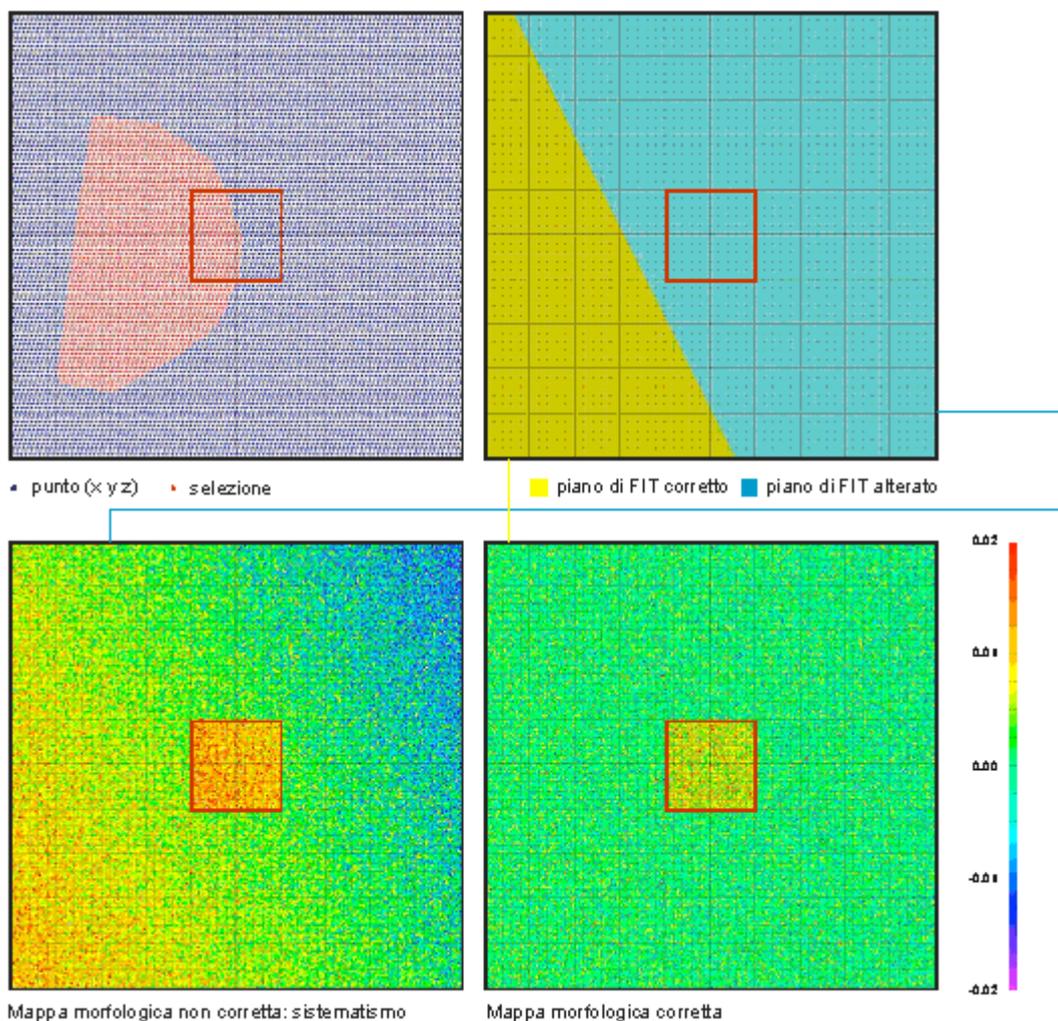


**Figura 9.** Mappa morfologica. Insieme delle differenze punto-piano lungo la normale al piano. in questo caso si evidenzia immediatamente che l'area quadrata è caratterizzata dal colore giallo

Individuata l'area "anomala" sarebbe poi buona norma ricalcolare il piano di riferimento utilizzando tutti i punti ad eccezione di quelli che mostrano variazioni importanti e distribuiti secondo un chiaro pattern.

Una breve nota va qui inserita per comprendere quanto sia importante utilizzare una primitiva di riferimento che sia effettivamente rappresentativa dell'oggetto studiato. Questo è strettamente collegato alla scelta dei punti che saranno poi fittati per calcolare il piano di *best-fit*. In un caso reale, per esempio, immaginiamo di rilevare il prospetto di una chiesa e di volere calcolare il piano che meglio lo rappresenta: nella selezione dei punti da utilizzare chiaramente verranno escluse tutte le parti artificialmente disallineate col prospetto come le finestre, le porte, i cornicioni e tutti gli elementi decorativi presenti. Se la quantità di questi elementi, evidentemente perturbatori, è bassa dal punto di vista statistico la selezione dei punti ad essi corrispondenti non comporterà una variazione significativa dei parametri geometrici del piano di *fit* ma, nel caso contrario, il piano potrebbe risultare non più rappresentativo dell'area in esame.

Nella situazione mostrata nella figura 10 si è volontariamente scelta un'area di selezione dei punti fortemente condizionata dalla presenza della zona in deformazione. È immediato notare, infatti, che il piano che ne deriva è ruotato rispetto al piano del pannello non deformato con un conseguente pattern alterato nella mappa morfologica.



**Figura 10.** Una scelta non corretta dei punti per il calcolo del piano di fit. Schema del procedimento e confronto visivo con il caso corretto.

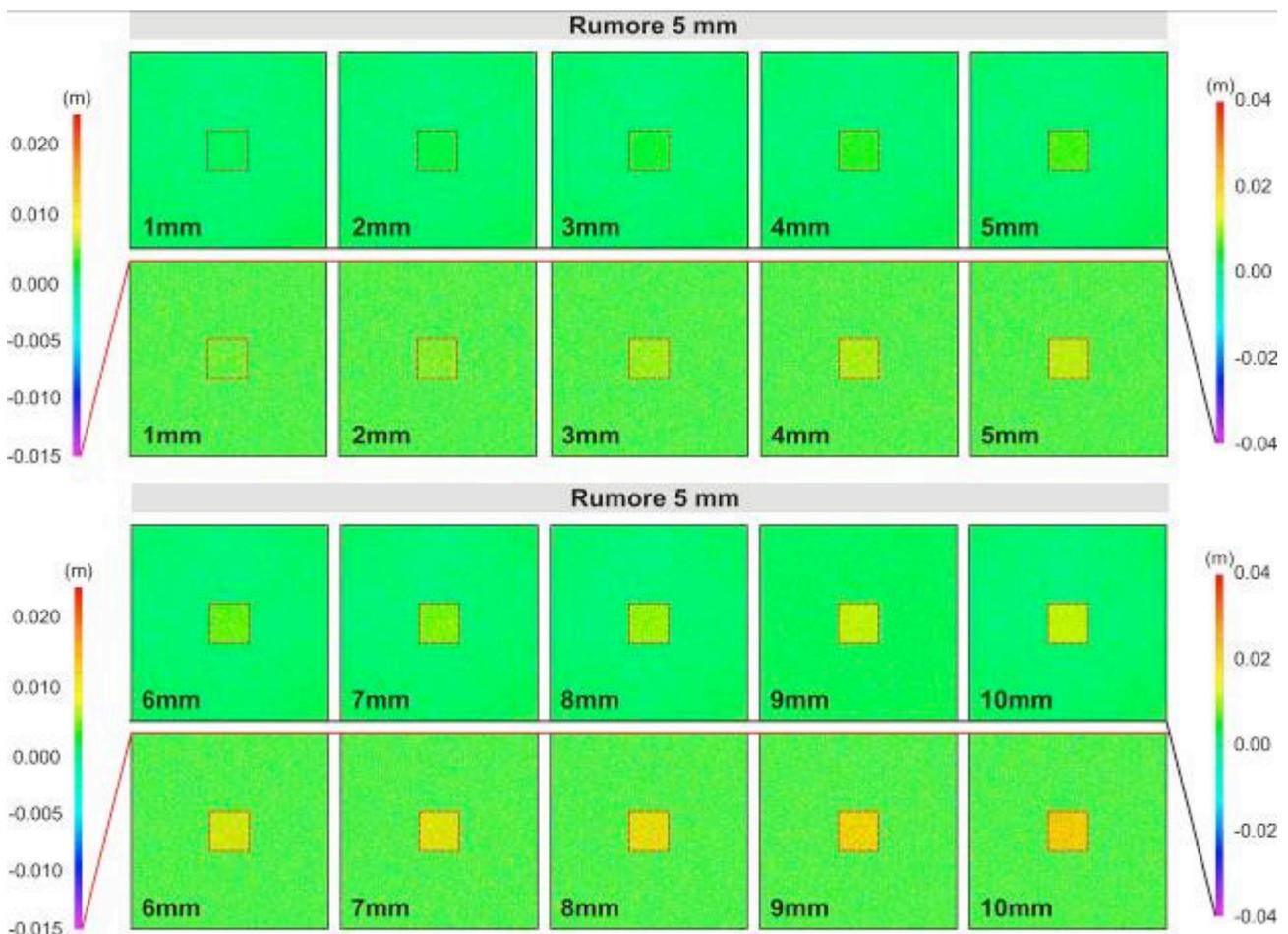
La mappa morfologica ottenuta con una inopportuna scelta dei punti evidentemente porta ad un risultato non accettabile. È vero che la parte in deformazione viene comunque identificata ma su tutto il target appare una distribuzione dei valori delle differenze punto-piano progressiva, ad indicare che i punti sono disposti su un piano non parallelo a quello di riferimento, nel caso bidimensionale si parlerebbe di differenze con un trend lineare. Se la primitiva fosse rappresentativa del target i punti su esso misurati non

dovrebbero avere una distribuzione di questo tipo bensì dovrebbero giacere sul piano con un certo rumore caratteristico dovuto al tipo di strumentazione utilizzata.

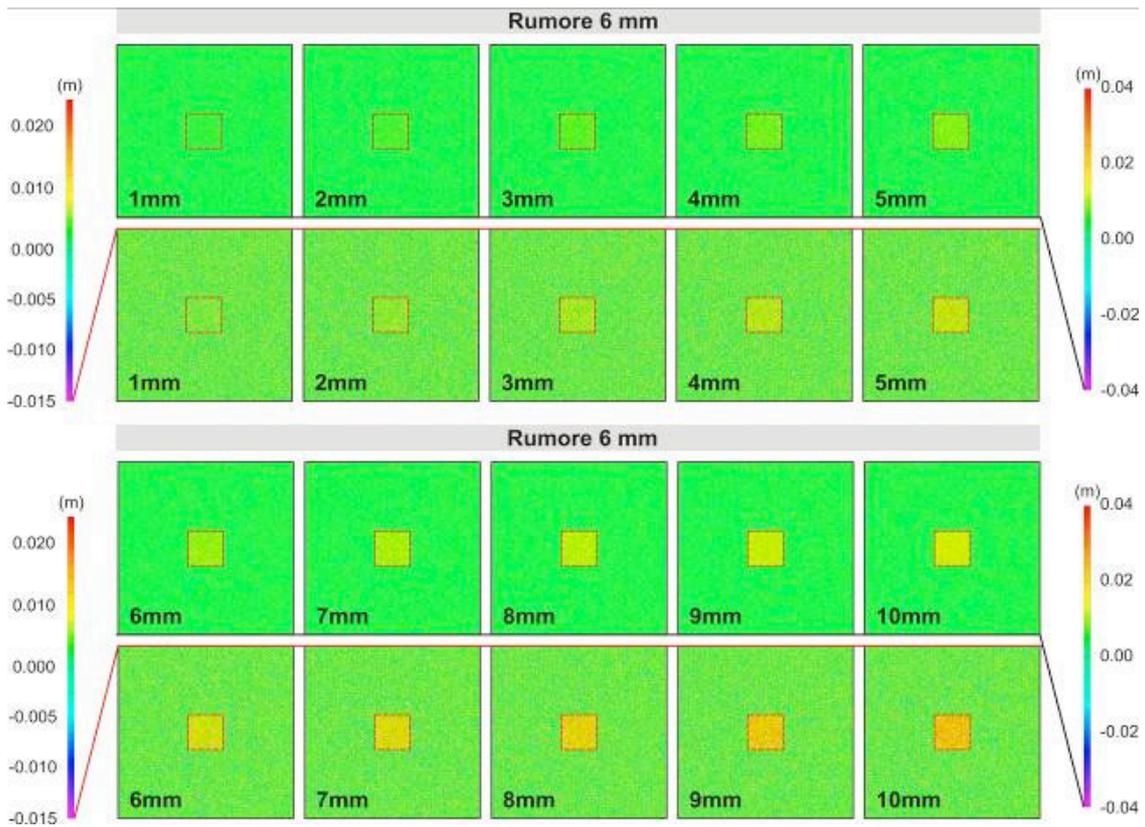
Si deve notare che, estendendo il ragionamento ad un caso reale, a seguito di deformazione post-sismica è possibile una variazione del piano di best fit. Per verificare tale variazione può risultare utile effettuare una preventiva sovrapposizione delle scansioni pre- e post-sisma ma, per i problemi già enunciati, non potremmo effettivamente quantificare le deformazioni avvenute. Lo studio morfologico post sollecitazione è pertanto certo lo strumento atto a determinare le variazioni sul nuovo assetto, indispensabile per una celere diagnostica. Volendo semplificare, pertanto, la sovrapposizione di scansioni, se fattibile, può risultare utile per identificare rilevanti spostamenti rispetto ad una posizione originaria ponendosi come un'indagine a piccola scala; viceversa, lo studio morfologico permette un'indagine a grande scala, potendo con esso identificare lo stato deformativo pregresso e successivo all'azione sollecitante, individuando pertanto i meccanismi di collasso attivati.

### 3.3 Risultati dell'esperimento con dati sintetici

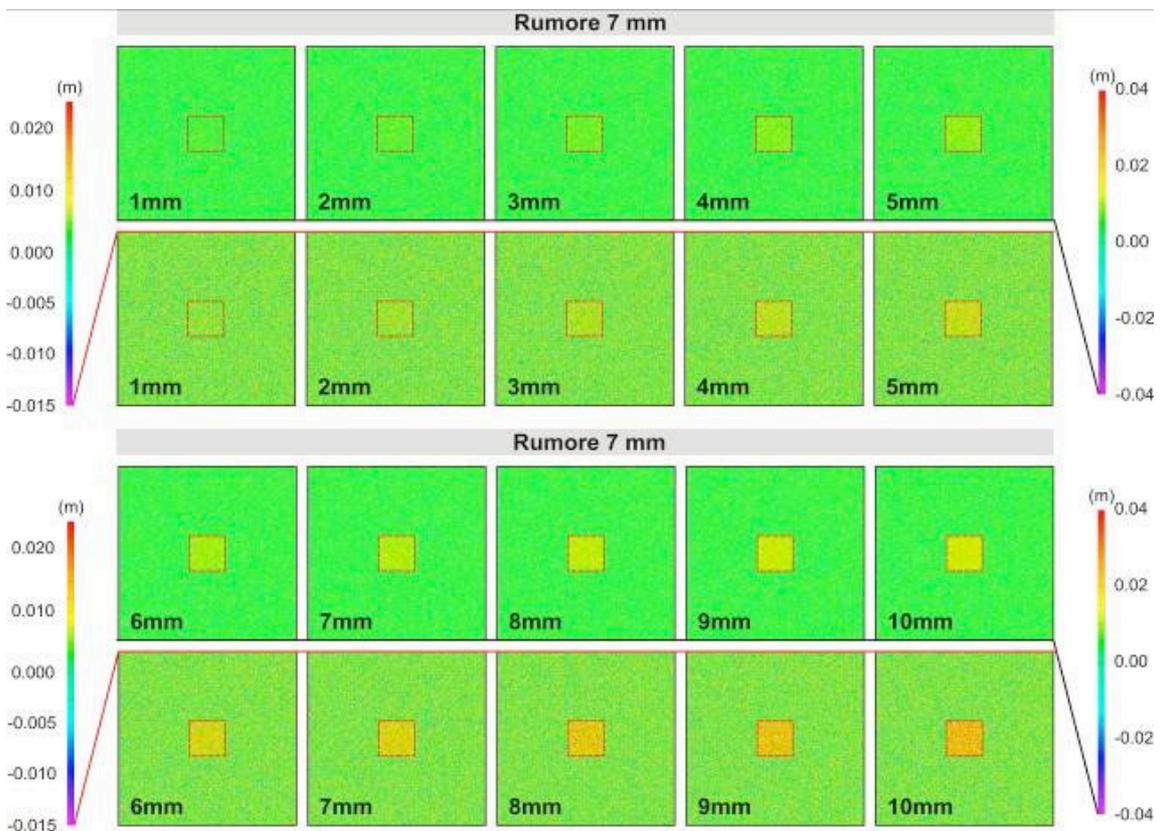
Tornando all'esperimento, nelle figure 11, 12, 13, 14, 15 e 16 sono riportati i risultati ottenuti per tutti casi considerati per tipologia di strumento (rumore) e step di deformazione. Sono mostrate tutte le mappe morfologiche, qui considerate anche mappe di deformazione, e le mappe delle differenze dirette tra scansioni. Per ogni caratteristica di rumore (da 5 mm a 10 mm) e per ogni deformazione (da 1 mm a 10 mm) sono quindi mostrate le mappe e disposte su due file parallele per osservare in modo immediato il contenuto informativo/visivo delle differenze dirette tra scansioni e della morfologia. Si ricorda che la mappa morfologica è stata costruita analizzando di volta in volta ogni singola scansione mentre la "mappa delle deformazioni" è stata elaborata sovrapponendo le scansioni alla scansione "0mm", riferimento indeformato



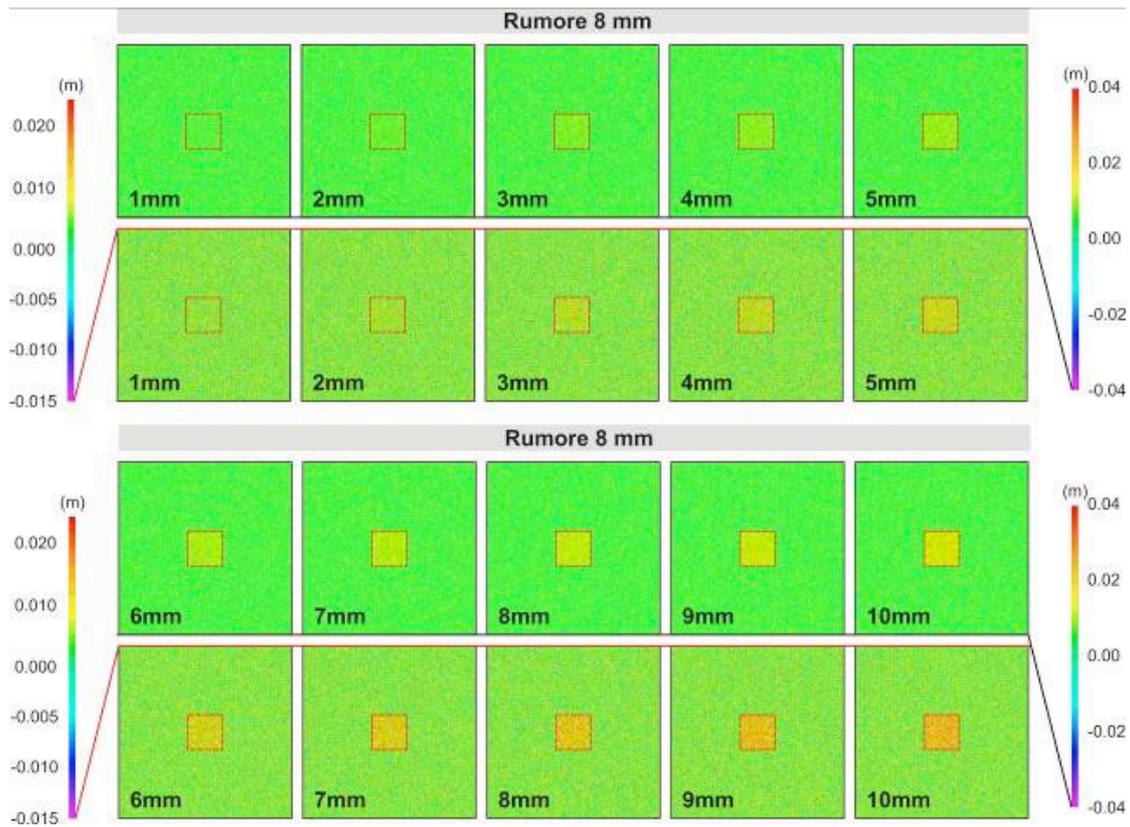
**Figura 11.** Mappe morfologiche e mappe delle differenze di scansioni per dati sintetici con un rumore di 6 mm. Sopra: le mappe morfologiche; sotto: la differenza tra scansioni con la scansione iniziale.



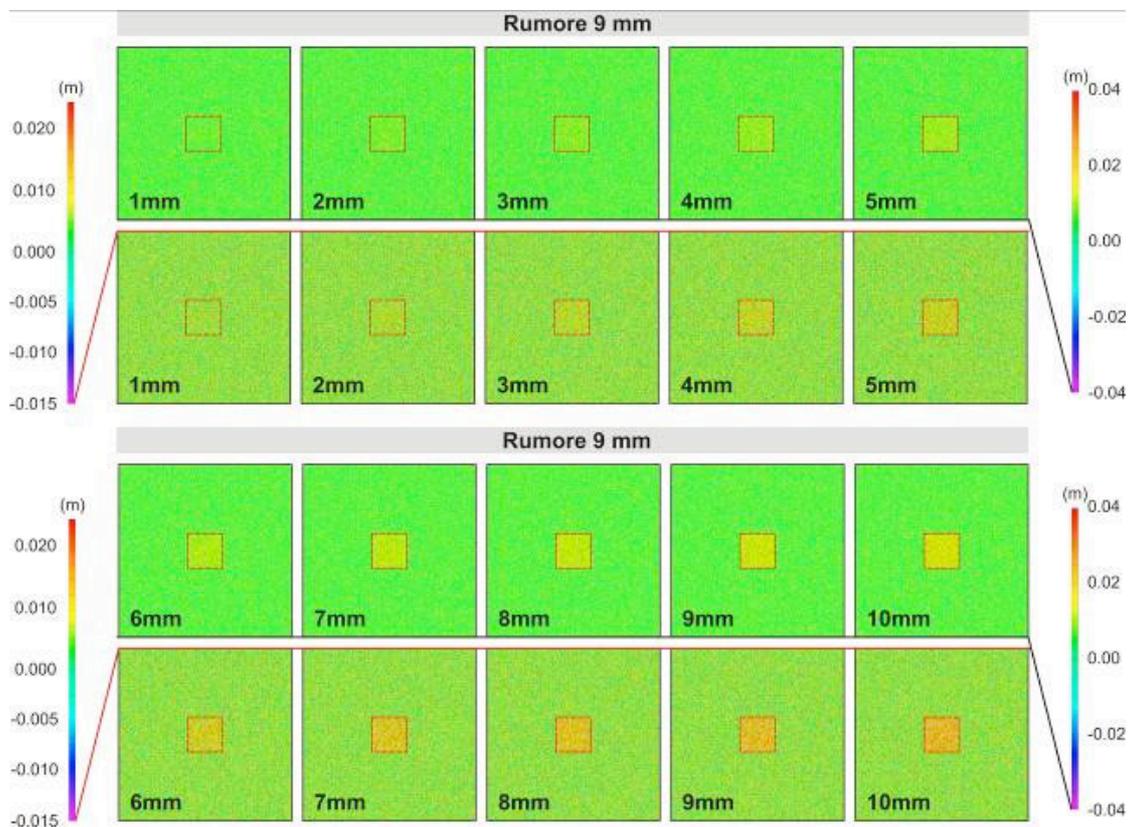
**Figura 12.** Mappe morfologiche e mappe delle differenze di scansioni per dati sintetici con un rumore di 6 mm. Sopra: le mappe morfologiche; sotto: la differenza tra scansioni con la scansione iniziale.



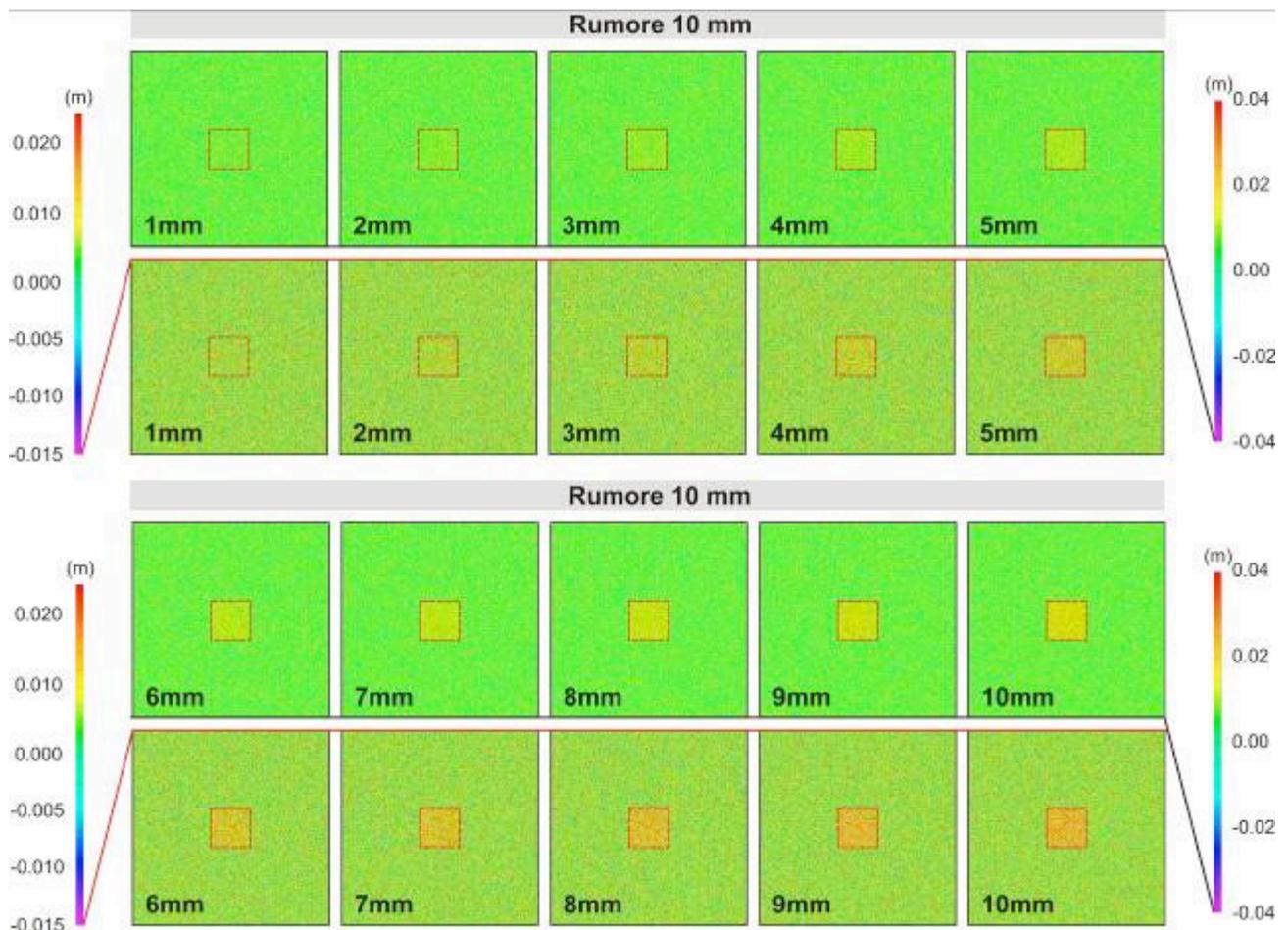
**Figura 13.** Mappe morfologiche e mappe delle differenze di scansioni per dati sintetici con un rumore di 7 mm. Sopra: le mappe morfologiche; sotto: la differenza tra scansioni con la scansione iniziale.



**Figura 14.** Mappe morfologiche e mappe delle differenze di scansioni per dati sintetici con un rumore di 8 mm. Sopra: le mappe morfologiche; sotto: la differenza tra scansioni con la scansione iniziale.



**Figura 15.** Mappe morfologiche e mappe delle differenze di scansioni per dati sintetici con un rumore di 9 mm. Sopra: le mappe morfologiche; sotto: la differenza tra scansioni con la scansione iniziale.



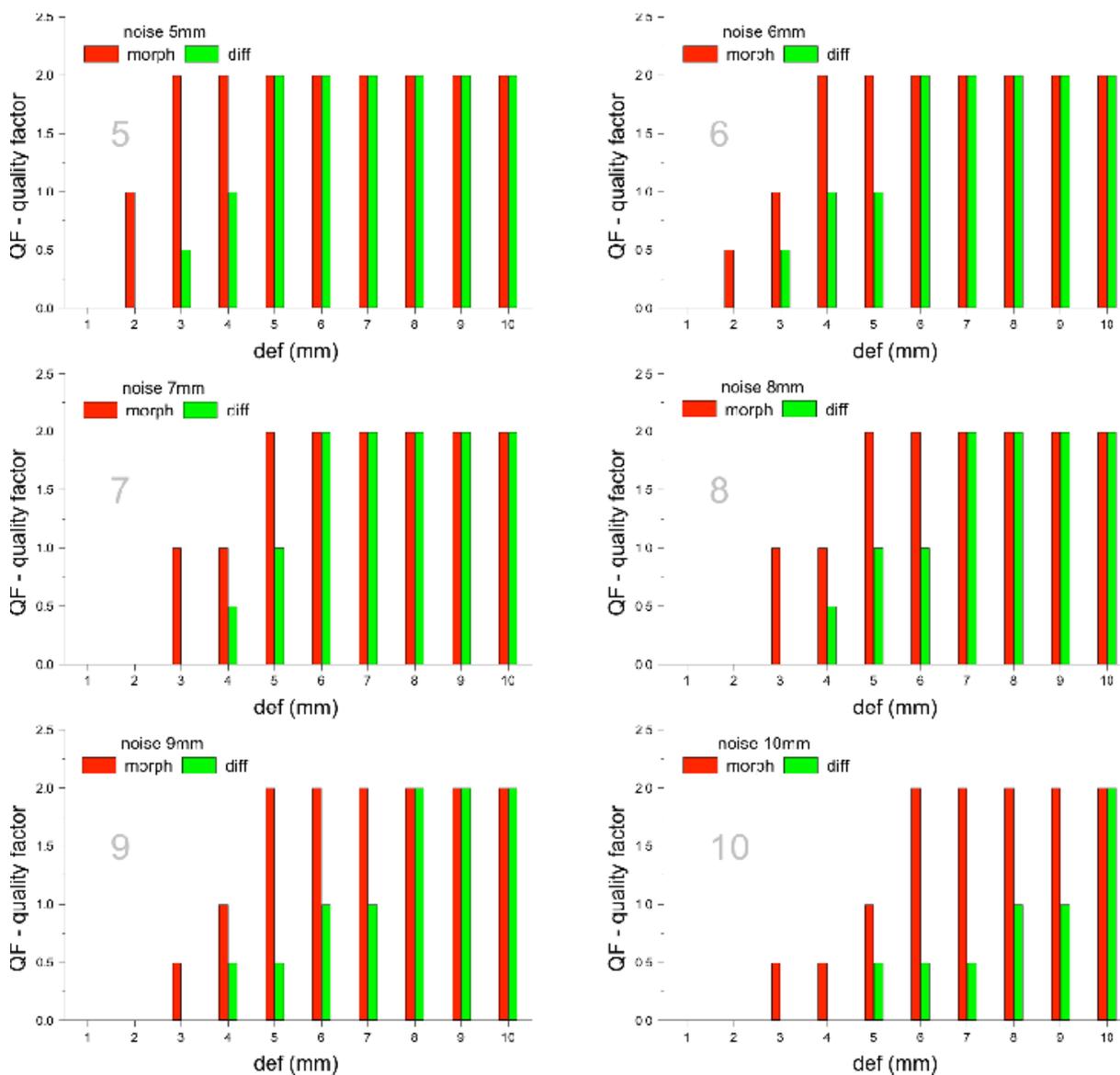
**Figura 16.** Mappe morfologiche e mappe delle differenze di scansioni per dati sintetici con un rumore di 10 mm. Sopra: le mappe morfologiche; sotto: la differenza tra scansioni con la scansione iniziale.

È immediato notare che, in tutti i casi qui riportati, l'analisi morfologica permette di identificare e misurare più efficacemente la deformazione e appare più incisiva sia a livello qualitativo che quantitativo.

### 3.4 Valutazione dei risultati

I dati ottenuti mediante le osservazioni sintetiche sono stati quindi analizzati con i due metodi: il metodo morfologico ed il confronto tra scansioni. Risulta evidente come, nel primo caso, sia decisamente più semplice localizzare e quantificare la deformazione mentre, nel secondo caso, la somma dei rumori rende difficoltosa la lettura in presenza di piccole variazioni.

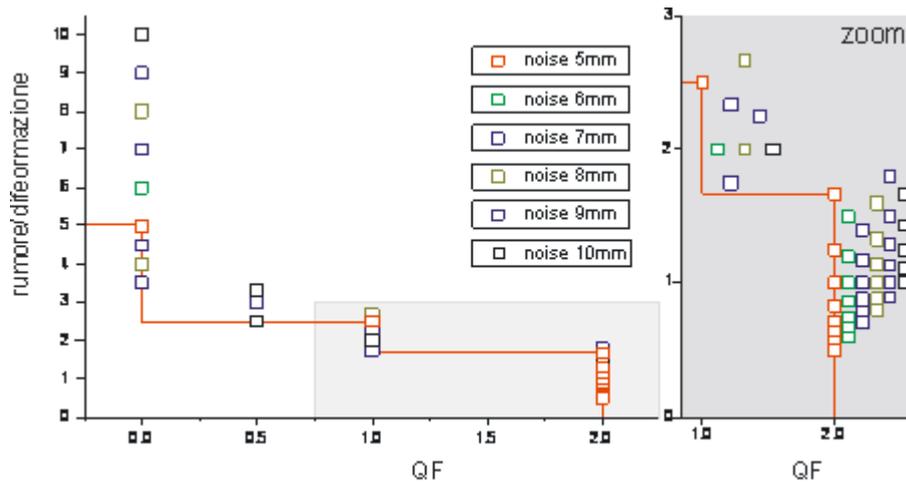
Per confrontare i due metodi in modo più quantitativo e unire insieme tutte le informazioni illustrate finora separatamente (in base al rumore strumentale considerato), si è scelto di assegnare ad ogni mappa un fattore di qualità (QF) secondo i valori 0, 0.5, 1 e 2. Il valore "0" descrive una deformazione non visibile e non misurabile; "0.5" descrive una deformazione appena visibile o intuibile; "1" indica una deformazione visibile e misurabile ma rumorosa; "2", infine, rappresenta una deformazione visibile e ben misurabile.



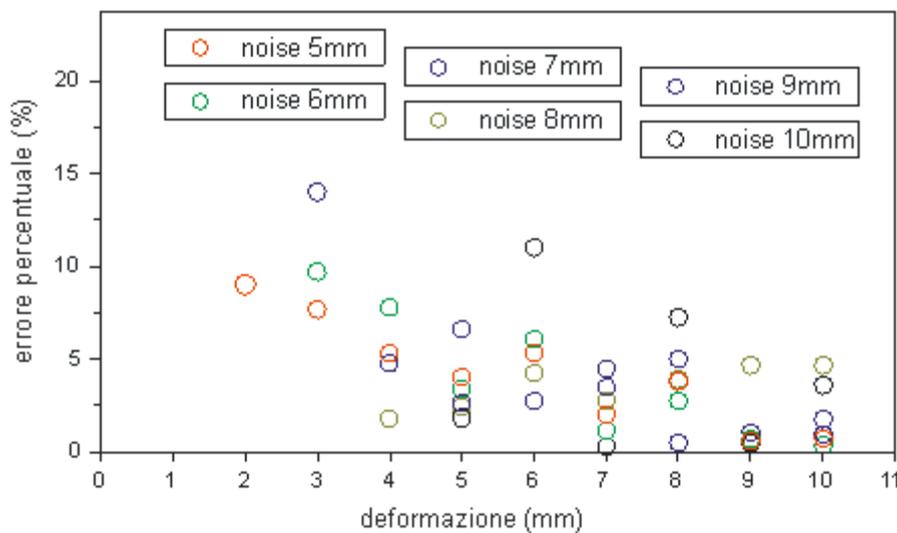
**Figura 17.** Grafici che mostrano per tutti i casi effettuati i risultati paralleli tra uso della mappa morfologica e confronto diretto tra scansioni.

I risultati possono essere utilizzati nella loro totalità costruendo un unico grafico di informazione se si introduce una nuova variabile definita come il rapporto tra il rumore e la deformazione (*rumore/deformazione*). In questo modo è possibile ottenere un risultato unico in riferimento all'esperimento realizzato con tutte le nuvole di punti sintetiche create. In particolare, osservando la nuova figura, si può osservare che nel caso dell'analisi morfologica, quando il rapporto rumore/deformazione è inferiore a 3, la maggior parte dei valori ha un fattore QF accettabile (1 o 2), cosa non altrettanto vera se si utilizza il metodo delle differenze tra scansioni successive.

Infine, è stata fatta una valutazione basata sulla capacità di misurare la deformazione nota, estraendo dalla mappa morfologica i dati identificati nella zona deformata e facendo una statistica. In sostanza si è misurata la distanza media dell'area quadrata dal pannello, cioè piano di riferimento. Nel grafico, si mostra per tutti i casi di rumore considerati, il grafico con l'errore percentuale tra la deformazione calcolata ed il valore noto rispetto alla deformazione. I risultati mostrano che nella quasi totalità di valori l'errore è sotto al 5%.



**Figura 18.** Unione di tutti i risultati: grafico del rapporto rumore/deformazione rispetto al fattore di qualità (QF).



**Figura 19.** Valutazione della bontà nella stima della deformazione: errore percentuale.

I risultati dell'esperimento mostrano che l'analisi morfologica ottenuta semplicemente creando la mappa delle differenze tra i punti TLS ed una primitiva di riferimento calcolata dall'interpolazione degli stessi punti TLS sui prospetti di interesse permette di ottenere un livello di precisione tale da mostrare variazioni significative fino ad  $1/3$  del rumore strumentale e, inoltre, se il pattern della deformazione osservata è abbastanza circoscritto e delineato, ne permette la quantificazione con un errore relativo percentuale di circa il 5% e comunque sempre sotto al 10% per quasi la totalità dei casi osservati. Parallelamente e come era ovvio aspettarsi notiamo che l'approccio classico, qualora possibile, di confrontare scansioni multi temporali implica un aumento notevole del rumore e quindi, a meno che non si parli di deformazioni veramente importanti, ne potrebbe precludere l'identificazione e, in questo caso, certamente la misura.

#### 4. Applicazione: la Rocca Estense a San Felice sul Panaro

Il lavoro fino a qui descritto mostra, in sostanza, un confronto tra due modi di operare al fine di identificare e possibilmente quantificare una deformazione mediante tecnologia TLS: l'analisi morfologica ed il confronto tra scansioni successive nel tempo.

Lo scopo di tale confronto non sta nel dimostrare che un metodo sia migliore dell'altro perché è certo che entrambi questi approcci sono necessari per comprendere e caratterizzare al meglio un potenziale stato deformativo di un monumento. L'idea è invece quella di mostrare dove e come un'analisi morfologica può superare il classico monitoraggio fornendo un pacchetto di informazione più preciso e meglio interpretabile nell'intento finale di estrarre in modo rapido, preciso ed efficace informazioni utili per una diagnostica anche veloce.

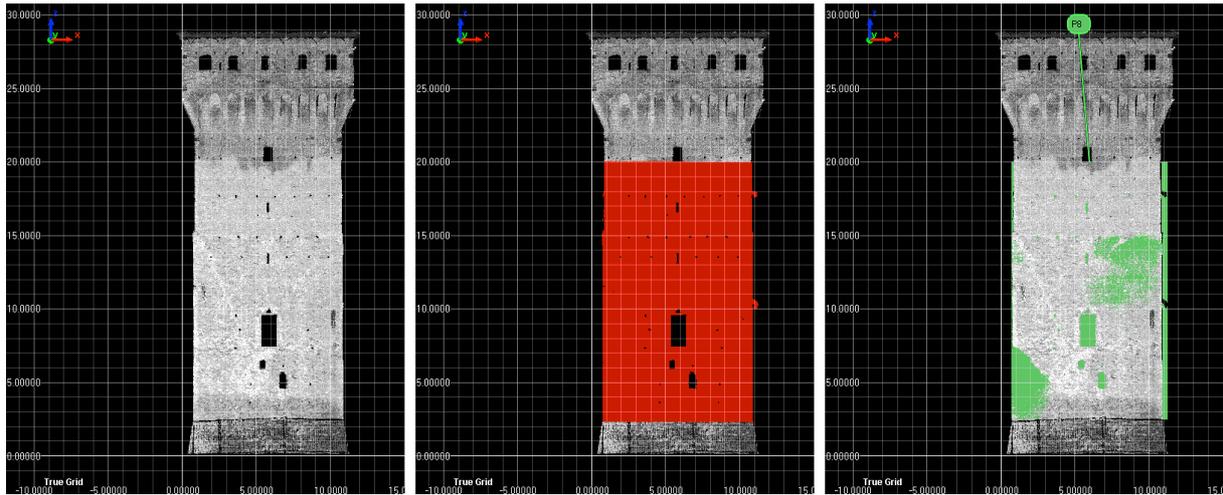
Il caso studiato per focalizzare sull'efficacia del metodo è un torrione (unico superstite) della Rocca Estense a San Felice sul Panaro (MO), paese fortemente danneggiato dal terremoto del 2012 (per una discussione generale sugli effetti di tale sisma sul patrimonio edilizio dell'area si veda ad esempio Milani, [2013]). Il rilievo è stato effettuato nel 2012 con la collaborazione del geom. Tiziano Tondin che si occupò della messa in sicurezza del torrione nei giorni dell'emergenza sismica e che era interessato al procedimento di studio mediante analisi morfologica avendo avuto modo di leggere in vari report ed articoli di giornale le esperienze realizzate dall'INGV sullo studio delle torri e dei campanili danneggiati.



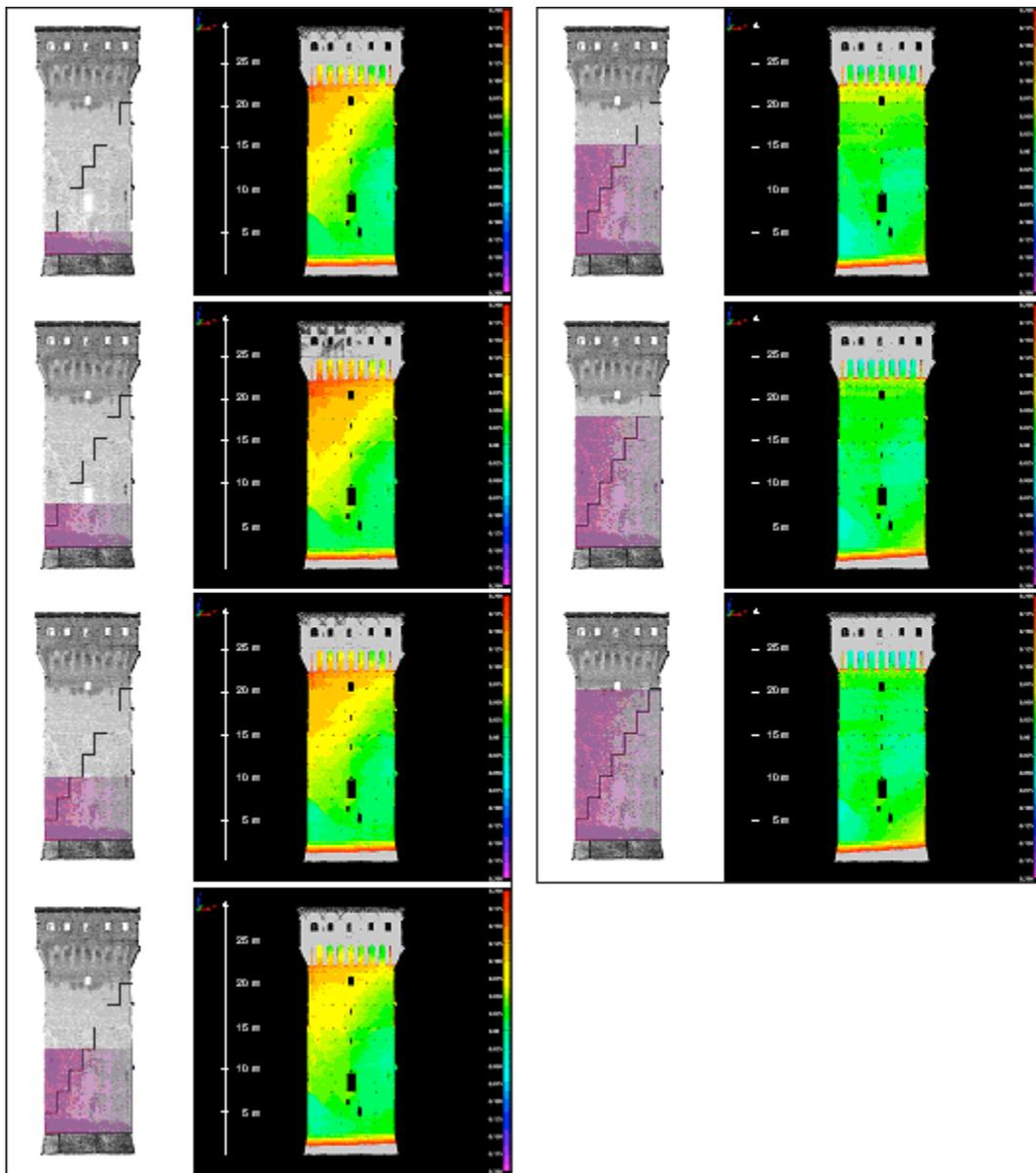
**Figura 20.** Foto della Rocca Estense prima e dopo il terremoto del 2012.

Il prospetto del torrione è stato rilevato mediante lo strumento Optech ILRIS ER [Optech, 2014] da una distanza approssimativa di circa 40-50 m e con un passo di campionamento di 7-8 mm. La scansione è stata effettuata con lo strumento in bolla per avere, seppure per gli scopi non fosse necessario, una verticalità corretta.

La procedura usata per ottenere la mappa morfologica è come più volte indicato nelle pagine precedenti: (i) selezione dei punti; (ii) interpolazione dei punti e creazione del piano di *fit*; (iii) calcolo delle differenze punto-piano e generazione della mappa delle differenze (morfologica). Nella figura seguente si mostra l'applicazione della procedura a partire dalla nuvola di punti del prospetto sud del torrione. Notiamo che sia la base che la parte sommitale non sono state selezionate semplicemente perché per costruzione sono disallineate rispetto al resto del corpo della torre.



**Figura 21.** Schema di lavoro: selezione dei punti e creazione del piano.



**Figura 22.** Le mappe rispetto a 7 piani di fit.

In questo caso specifico è evidente già a prima vista che la parte lesionata riguarda una parte abbastanza ampia del monumento per cui è necessario valutare bene il significato del piano di *fit* per la successiva interpretazione dei risultati. Qualora l'insieme di punti selezionati non fosse ben distribuito rispetto alle aree non deformate, cioè nel caso in cui la percentuale dei punti relativi ad una zona alterata fosse significativa rispetto al numero totale dei dati, allora il piano di *fit* non rappresenterebbe la condizione intonsa del prospetto ma sarebbe semplicemente rappresentativo del piano matematico che meglio si adatta ai punti selezionati. Per questo motivo si è proceduto ad applicare il metodo in modo sequenziale su un'area via a via sempre più ampia a partire dalla base, o meglio dai punti appena sopra lo zoccolo, sino ad interessare l'intero corpo del torrione. Lo schema del lavoro ed i risultati sono tutti mostrati in figura 21. Ciò che è interessante notare è che le mappe sono stabili fino a quando l'area selezionata è sotto i 12.5 m (da terra) mentre cambiano decisamente procedendo verso l'alto.

Piano FIT	da (m)	a (m)	SD (mm)
P1	2.5	5	6.8
P2	2.5	7.5	7.3
P3	2.5	10	8.3
P4	2.5	12.5	9.9
P5	2.5	15	11.2
P6	2.5	17.5	11.3
P7	2.5	20	11.3

**Tabella 1.** I piani catalogati in base all'area di selezione e la deviazione standard (SD) del *fit*.

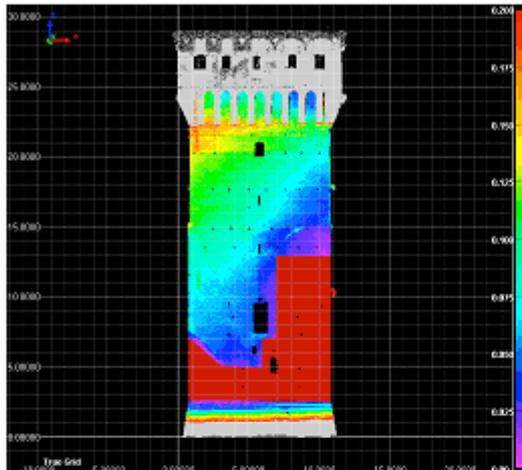
La tabella 1 mostra, infatti, che i valori della deviazione standard risultante dalla statistica delle differenze tra i punti del prospetto selezionati per ottenere il piano ed il piano stesso di *fit*, aumenta sensibilmente allargando l'area di selezione fino a raggiungere valori quasi duplicati. Ciò accade in quanto, come mostrano le mappe sulla parte sx della figura, c'è una chiara zona di discontinuità dovuta alla forte deformazione della parte più alta del torrione rispetto al corpo sottostante con il relativo quadro fessurativo tipico di questi meccanismi.

La mappa definitiva è stata realizzata con una selezione mirata dei punti che, dalle mappe precedenti, sembravano essere nella zona stabile del corpo dell'edificio. Quindi, per raffinare il calcolo del piano migliore che rappresentasse la situazione inalterata dal sisma, si è proceduto secondo lo schema mostrato in figura 22. La nuova mappa, è ritenuta definitiva e mostra un ottimo accordo con le precedenti da selezione sotto ai 12.5 m.

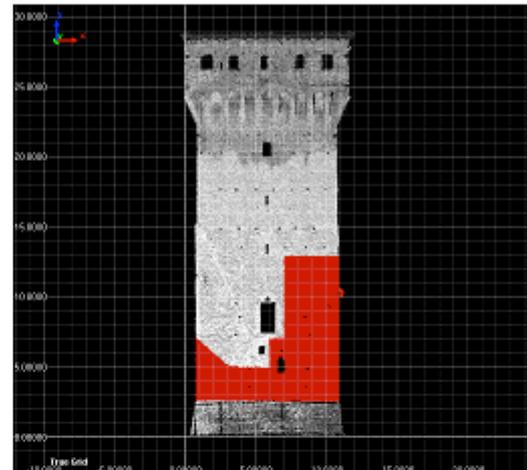
I risultati mostrano con chiarezza che la parte più alta del torrione risulta ruotata rispetto alla base e che nel suo movimento rotatorio ha causato la spaccatura delle murature e creato un chiaro quadro fessurativo tipico di modi torsionali e flessionali (figure 23 e 24). In particolare, la parte alta è rimasta compatta e si è comportata come un corpo rigido anziché aprirsi e crollare, probabilmente grazie ad un intervento di consolidamento realizzato negli anni '80 con il quale le murature sono state imbrigliate inserendo tiranti in ferro su 4 livelli a partire, in riferimento al modello qui mostrato dai 15 m di altezza. È probabile, secondo i tecnici, che questo intervento abbia preservato dal crollo il torrione facendolo resistere alla trazione e in questo senso sono poi stati anche effettuati i lavori di messa in sicurezza.

Per onore del vero è importante ribadire che in questi casi di studio è necessario avere informazioni indipendenti pre-evento sismico al fine di non attribuire le irregolarità osservate e misurate a situazioni pregresse. Il supporto della società Tondin slr, in questo caso, è stato fondamentale per acquisire conoscenza diretta sulle condizioni della struttura prima del terremoto e interpretare le mappe morfologiche come vere e proprie deformazioni. Si sottolinea ancora che il termine deformazione, nel tipo di analisi proposta, viene considerato in accezione architettonica, ovvero, si riconosce come tale ciò che si discosta dalla regolarità. Nell'ipotesi di condizione non alterata in uno stato di partenza allora le misure possono essere più strettamente collegate alla deformazione in senso matematico.

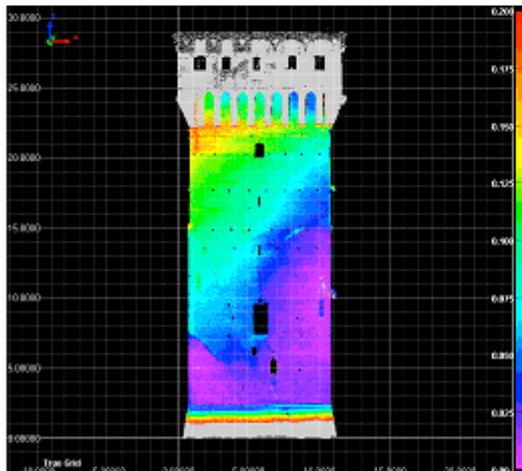
Mappa iniziale (0 - 0.2) m



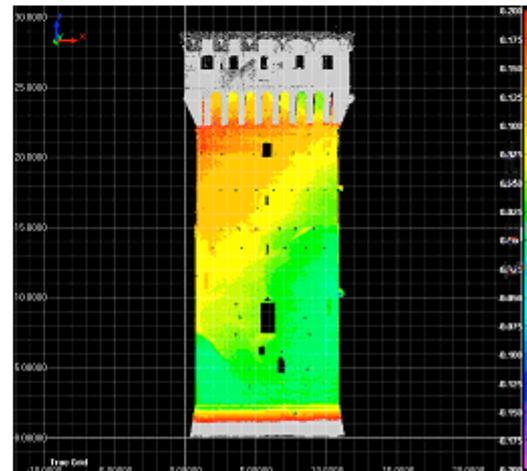
Selezione area stabile



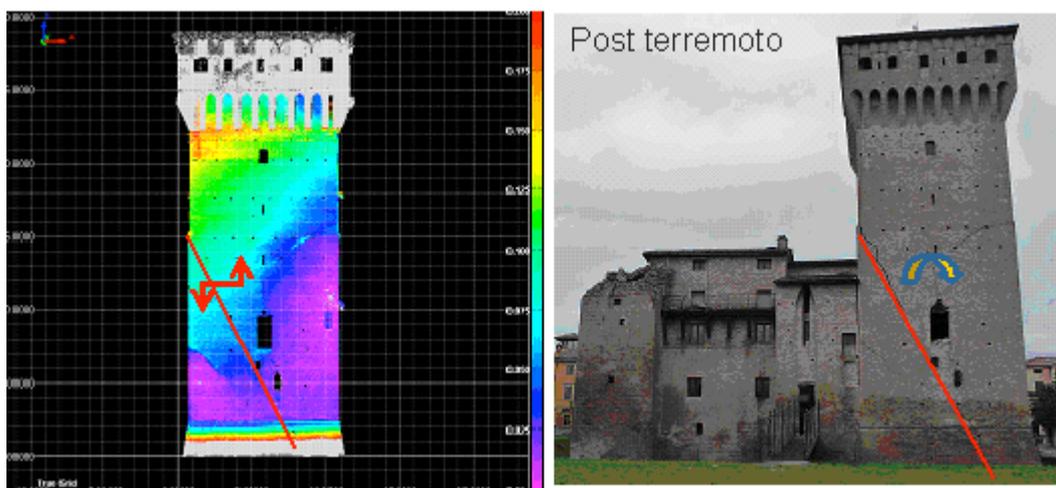
Mappa specifica (0 - 0.2) m



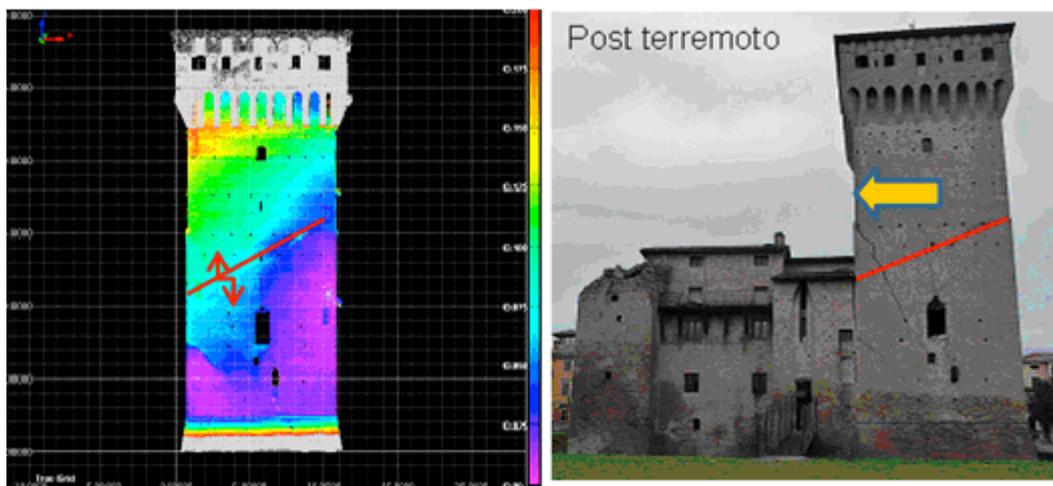
Mappa specifica (-0.2 - 0.2) m



**Figura 23.** Calcolo finale della mappa morfologica con una selezione specifica dei punti per l'interpolazione del piano di riferimento.



**Figura 24.** Quadro fessurativo ad indicare una oscillazione verso dx. Interessante vedere che l'innesto è sui 15m, dove dovrebbe essere stato effettuato l'irrigidimento di piano. Successivamente o contemporaneamente si innesta anche la torsione.



**Figura 25.** Quadro fessurativo ad indicare una oscillazione verso sx.

## 5. Conclusioni

Le nuvole di punti ottenute da una o più scansioni TLS permettono di studiare nel dettaglio un prospetto e di estrarre informazioni sull'assetto e sulle caratteristiche di natura geometrica che, in taluni casi, sono direttamente associate allo stato deformativo. Per fare ciò è estremamente utile creare delle mappe, qui descritte come mappe morfologiche, a rappresentare la distanza tra i punti del prospetto ed una primitiva di riferimento, a sua volta calcolata dal *fit* dei punti in questione e quindi, per sua natura, rappresentativa del prospetto nella sua totalità.

Valutare quali siano i vantaggi a livello di precisione dei risultati nell'uso di una mappa morfologica rispetto al classico confronto tra scansioni multi temporali è importante per comprendere che con questo tipo di approccio si può osservare un eventuale pattern deformativo con valori fino ad un terzo del rumore dello strumento utilizzato. Questo dato è stato ottenuto utilizzando scansioni sintetiche create in base ad esperienze precedenti come convoluzione della funzione oggetto e della funzione TLS [Pesci et al., 2013] per limitare ogni fonte di disturbo e di errore e potere lavorare su una casistica rappresentativa di tutti gli scanner di tipo very long range al fine di ottenere indicazioni generali e non selettive per una sola categoria di strumenti o specifiche di un solo strumento.

L'analisi mediante mappe morfologiche in caso di terremoto è quasi obbligata in quanto non esistono modelli ad alta precisione di torri, campanili, chiese o altri monumenti o edifici storici e moderni in un data base ampio e fruibile e, anche se esistessero, forse mancherebbero i criteri per poter eseguire dei confronti multi temporali su scansioni confrontabili. In ogni caso per quanto concerne piccole deformazioni tuttavia rappresentative di una evoluzione e della progressione di un danno, un confronto tra scansioni potrebbe portare ad una lettura difficile, in quanto troppo rumorosa, dei dati. Nel lavoro abbiamo riportato un caso di studio di interesse realizzato dopo il terremoto dell'Emilia Romagna nel quale si osserva il solo torrione della Rocca Estense non crollato dopo la scossa del 20 Maggio 2012. Applicando il metodo morfologico e potendo constatare già visivamente che una buona parte del prospetto era interessato da deformazione, si è eseguito un calcolo sequenziale del piano di riferimento allargando via via la selezione dei punti fino ad ottenere una mappa stabile e significativa che ha reso possibile interpretare il meccanismo di rottura.

Infine occorre ancora sottolineare che, per non incorrere in interpretazioni errate sull'eventuale stato deformativo del monumento, anche qualora sia verificata l'accuratezza e significatività del dato nelle varie condizioni di utilizzo degli strumenti legate alle necessità di rapidità, sicurezza, completezza e bontà del rilievo, sia nel confronto di scansioni multi temporali che nelle analisi morfologiche ottenute da una o più sessioni di misura, una conoscenza storica o comunque abbastanza precisa delle condizioni iniziali rappresenta un vincolo di estrema importanza. Per questo motivo è necessario avere sempre ben presente che una sola tecnica di osservazione e monitoraggio può fornire informazioni importanti ma non è mai completamente sufficiente al fine di un serio studio strutturale.

Attualmente, gli autori, stanno studiando l'integrazione tra misure TLS e fotogrammetriche SfM (Structure from Motion) al fine di aggiungere migliorie nel contesto delle analisi morfologiche per situazioni di emergenza.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il geom. Tiziano Tondin per le interessanti collaborazioni e le informazioni tecniche fornite al fine di interpretare le mappe di deformazioni ed il dott. Ing. Elena Bonali per il prezioso contributo nella fase di rilievo ed analisi dati.

## Bibliografia

- Bonali E., Pesci A., Casula G. and Boschi E., (2014). *Deformation of Ancient Buildings inferred by Terrestrial Laser Scanning methodology: the Cantalovo church case study (Northern Italy)*. *Archaeometry*, 56 (4), 703-716.
- Innovmetric (2014). PolyWorks web page. <http://www.innovmetric.com/en/products/polyworks-inspector>. Accessed 14 November 2014.
- Lichti D.D. and Jamtsho S., (2006). *Angular resolution of terrestrial laser scanners*. *The Photogrammetric Record*, 21 (114), 141-160.
- Milani G., (2013). *Lesson learned after the Emilia-Romagna, Italy, 20-29 May 2012 earthquakes: A limit analysis insight on three masonry churches*. *Engineering Failure Analysis*, 34, 761-778.
- Optech (2014). ILRIS-3D web page. <http://www.optech.ca/prodilris.htm>. Accessed 6 June 2014.
- Park H.S., Lee H.M., Adeli H. and Lee I. (2007). *A New Approach for Health Monitoring of Structures: Terrestrial Laser Scanning*. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22, 19-30.
- Pesci A. and Teza G., (2008). *Terrestrial laser scanner and retro-reflective targets: an experiment for anomalous effects investigation*. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (19), 5749-5765.
- Pesci A., Teza G., and Bonali E., (2011). *Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization*. *Remote Sensing*, 3 (1), 167-184.
- Pesci A., Teza G., Bonali E., Casula G. and Boschi E., (2013). *A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, 185-198.
- Sgrenzaroli M. and Vassena G.P.M., (2007). *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner. Volume 1 - Introduzione generale*. Starrylink Editrice, Brescia.
- Teza G. and Pesci A., (2013). *Geometric characterization of a cylinder-shaped structure from laser scanner data: development of an analysis tool and its use on a leaning bell tower*. *Journal of Cultural Heritage*, 14 (5), 411-423.
- Teza G., Pesci A. and Trevisani S. (2014). *Multisensor surveys of tall historical buildings in high seismic hazard areas before and during a seismic sequence*. *Journal of Cultural Heritage*, in press, doi: 10.1016/j.culher.2014.06.008.

# Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2015 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**