

## ***Metodo basato sulla tecnologia laser scanning per la misura delle deformazioni indotte negli edifici dai sismi o altri eventi distruttivi***

Arianna Pesci - Elena Bonali - Giordano Teza - Giuseppe Casula - Enzo Boschi

*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale UniBO –  
Dipartimento di Fisica UniBO – Dipartimento di Geoscienze UniPD*

*Il monitoraggio di edifici danneggiati in un'area colpita da un terremoto richiede l'uso di tecniche di osservazione e misura in grado di fornire dati molto rapidamente, in particolare in condizioni di 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 tempo relativamente breve, a loro volta utilizzabili per generare modelli geometrici dettagliati e precisi degli edifici osservati. L'esecuzione di una sessione di misura in condizioni di emergenza è generalmente caratterizzata da forti vincoli sulle possibili posizioni dello strumento utilizzato; ciò comporta che la distanza di acquisizione e l'angolo di incidenza del fascio laser potrebbero essere molto lontani dalle condizioni ottimali per alcune parti, anche molto estese, dell'edificio studiato. Per tali motivi, una corretta interpretazione di dati richiede una serie di esperimenti e di simulazioni numeriche finalizzate ad una realistica quantificazione del rumore di osservazione, registrazione e modellazione, con enfasi sul riconoscimento e sulla riduzione dei corrispondenti artefatti, ossia errori sistematici legati all'uso del TLS in condizioni non ottimali. E' pertanto qui proposta una strategia operativa basata sulla generazione iterativa di mappe morfologiche quali differenziale tra nuvola di punti e una o più corrispondenti primitive. Si tratta di un metodo di facile uso per il monitoraggio di precisione in condizioni di emergenza. Al fine di metterne in evidenza la validità, sono mostrati i risultati principali (mappe di deformazione) ottenuti dall'applicazione del metodo ad alcuni edifici colpiti dal recente terremoto dell'Emilia Romagna.*

## ***Metodo basato sulla tecnologia laser scanning per la misura delle deformazioni indotte negli edifici dai sismi o altri eventi distruttivi***

Arianna Pesci - Elena Bonali - Giordano Teza - Giuseppe Casula - Enzo Boschi

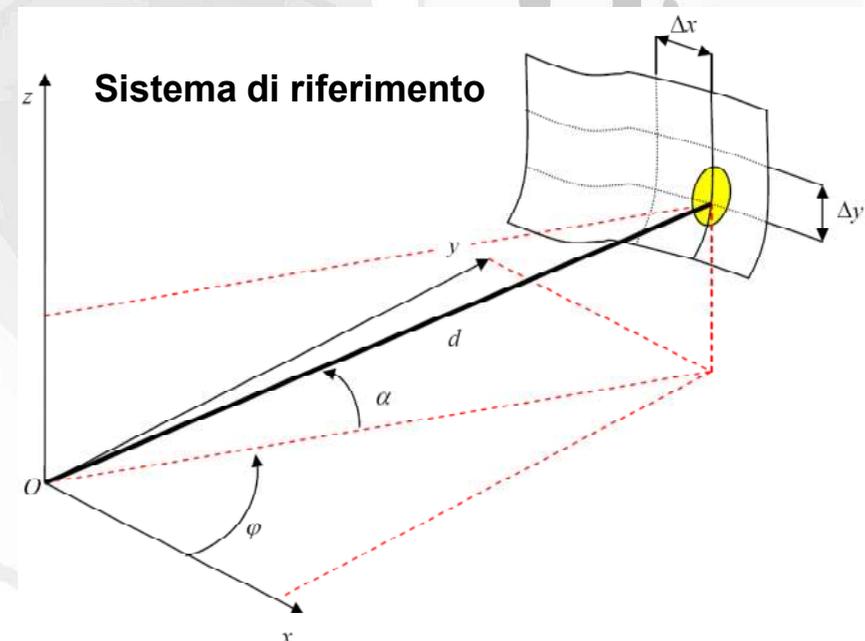
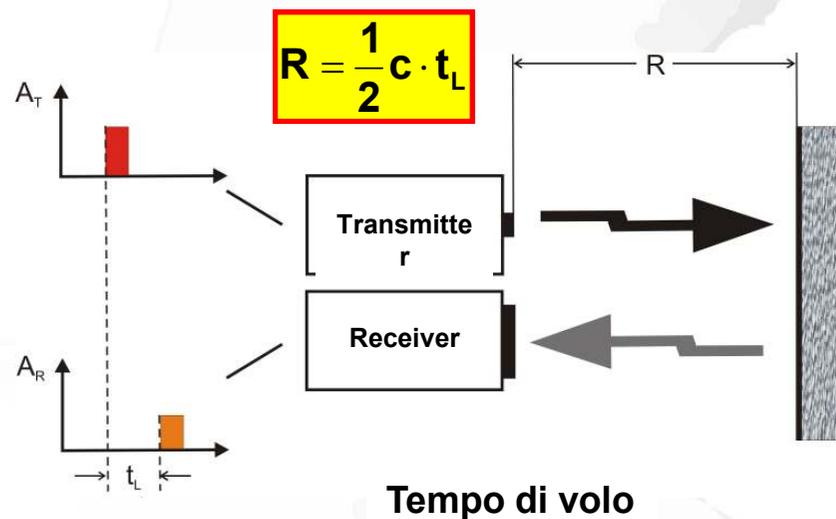
*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale UniBO –  
Dipartimento di Fisica UniBO – Dipartimento di Geoscienze UniPD*

- ❑ Riassunto delle esperienze recenti di rilievo di edifici mediante tecnologia laser scanning a lunga portata (very long range scanning): in particolare torri e campanili.
- ❑ Esperimenti e casi di studio necessari per mettere a punto una strategia operativa per il rilievo e l'analisi dei dati e fornire molto rapidamente, in caso di emergenza, informazioni precise sullo stato deformativo degli edifici per interventi di messa in sicurezza e consolidamento
- ❑ Durante il terremoto dell'Emilia sono stati effettuati vari interventi nelle zone rosse insieme agli ingegneri dei comuni terremotati ed ai vigili del fuoco.

# SISTEMA LASER SCANNING *very long range*

*principio funzionamento*

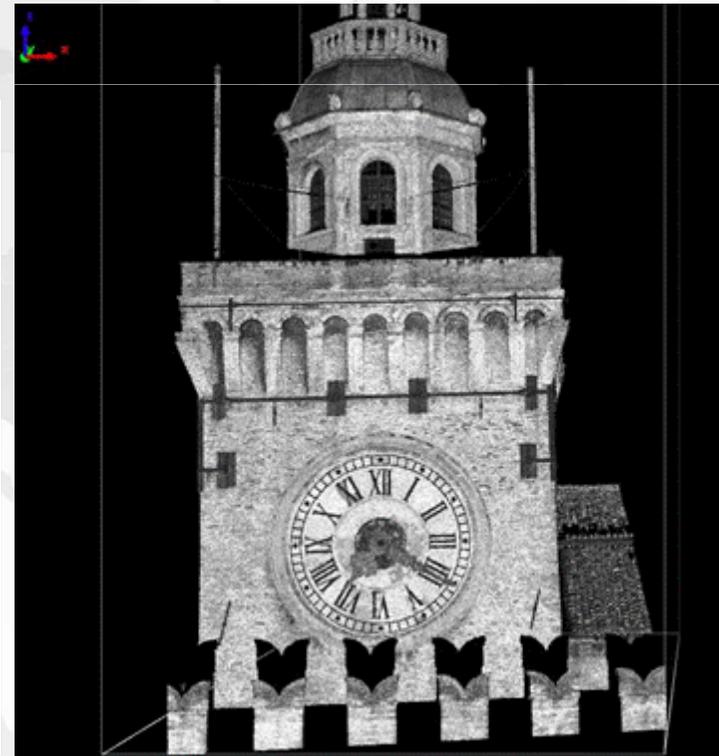
Il laser scanning terrestre (TLS) a lunga portata (very long range TLS, VLR-TLS) permette di acquisire dati anche su distanze dell'ordine di uno o più chilometri. Il sistema VLR-TLS è un sistema a tempo di volo (TOF), che dunque opera misurando la distanza percorsa da un impulso laser nel tragitto strumento-oggetto-strumento mediante il calcolo del tempo di volo. Il segnale viene deflesso su una fitta griglia angolare calibrata mediante un sistema di specchietti oscillanti e rotanti e, grazie alla conoscenza precisa delle direzioni di invio, è possibile ottenere le coordinate dei punti campionati sulla superficie osservata (nuvola di punti).



## **SISTEMA LASER SCANNING *very long range***

*Nuvola di punti (scansione)*

Il laser scanning terrestre (TLS) a lunga portata (*very long range* TLS, VLR-TLS) permette di acquisire dati anche su distanze dell'ordine di uno o più chilometri. Il sistema VLR-TLS è un sistema a tempo di volo (TOF), che dunque opera misurando la distanza percorsa da un impulso laser nel tragitto strumento-oggetto-strumento mediante il calcolo del tempo di volo. Il segnale viene deflesso su una fitta griglia angolare calibrata mediante un sistema di specchietti oscillanti e rotanti e, grazie alla conoscenza precisa delle direzioni di invio, è possibile ottenere le coordinate dei punti campionati sulla superficie osservata (nuvola di punti).



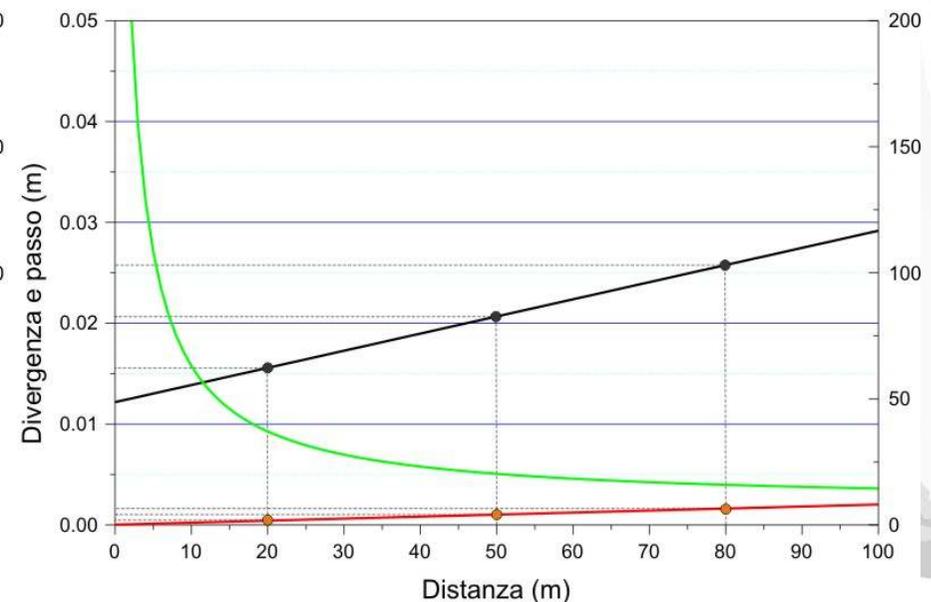
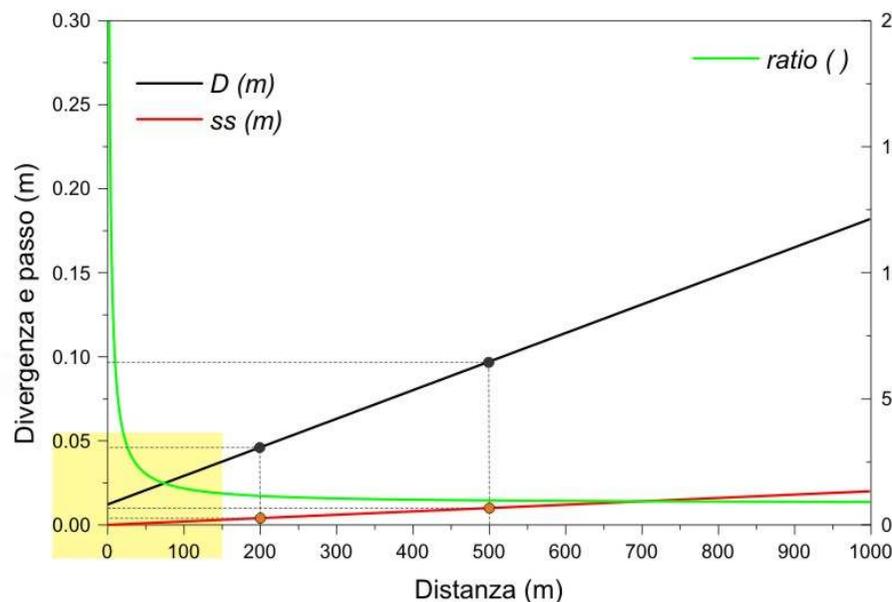
# SISTEMA LASER SCANNING *very long range*

## *caratteristiche tecniche*

Il segnale è caratterizzato da una stretta divergenza angolare (inferiore a 0.2 mrad per ogni sistema *very long range* TLS), da cui una crescita pressoché lineare con la distanza del diametro dello spot cioè dell'impronta del fascio sulla superficie. Il sistema è in grado di deflettere il fascio laser su angoli molto piccoli, inferiori alla larghezza angolare del fascio. Lo strumento utilizzato è l'ILRIS ER, specificatamente costruito per il rilievo ambientale, poiché capace di rilevare anche da distanze notevoli prossime al chilometro e oltre. Le caratteristiche note in termini di diametro dello spot e passo di campionamento (massimo) sono fornite secondo le equazioni lineari:

$$D(r) = 0.17 \cdot 10^{-3} \cdot r + 0.012$$

$$ss(r) = 0.02 \cdot 10^{-3} \cdot r$$



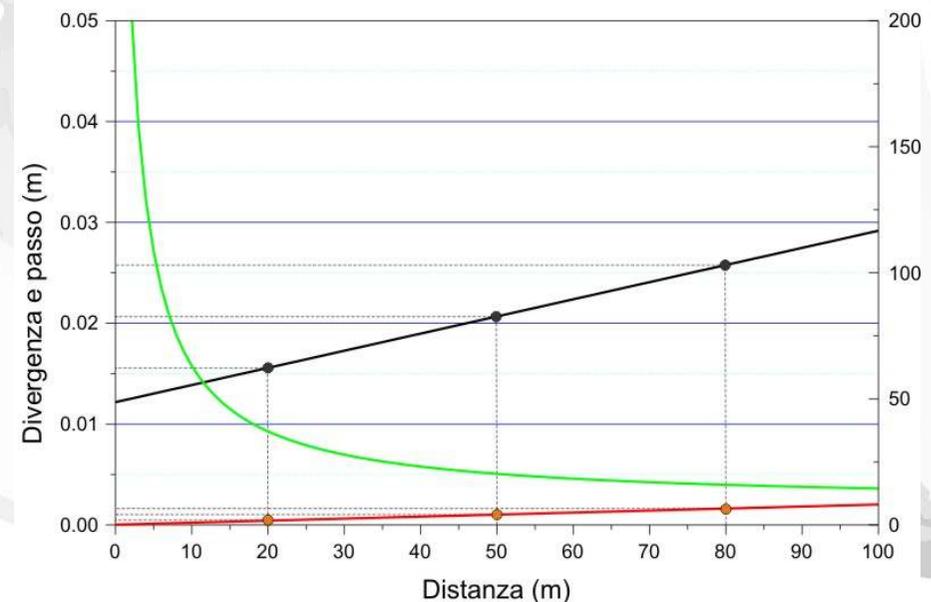
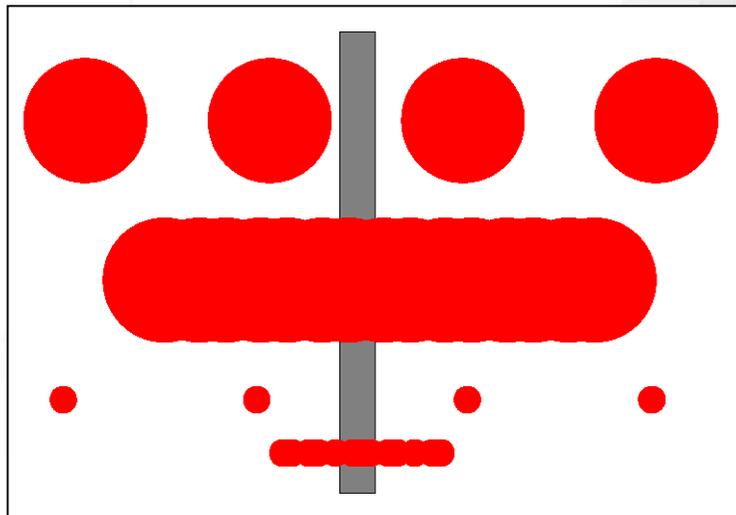
# SISTEMA LASER SCANNING *very long range*

## *caratteristiche tecniche*

Il segnale è caratterizzato da una stretta divergenza angolare (inferiore a 0.2 mrad per ogni sistema *very long range* TLS), da cui una crescita pressoché lineare con la distanza del diametro dello spot cioè dell'impronta del fascio sulla superficie. Il sistema è in grado di deflettere il fascio laser su angoli molto piccoli, inferiori alla larghezza angolare del fascio. Lo strumento utilizzato è l'ILRIS ER, specificatamente costruito per il rilievo ambientale, poiché capace di rilevare anche da distanze notevoli prossime al chilometro e oltre. Le caratteristiche note in termini di diametro dello spot e passo di campionamento (massimo) sono fornite secondo le equazioni lineari:

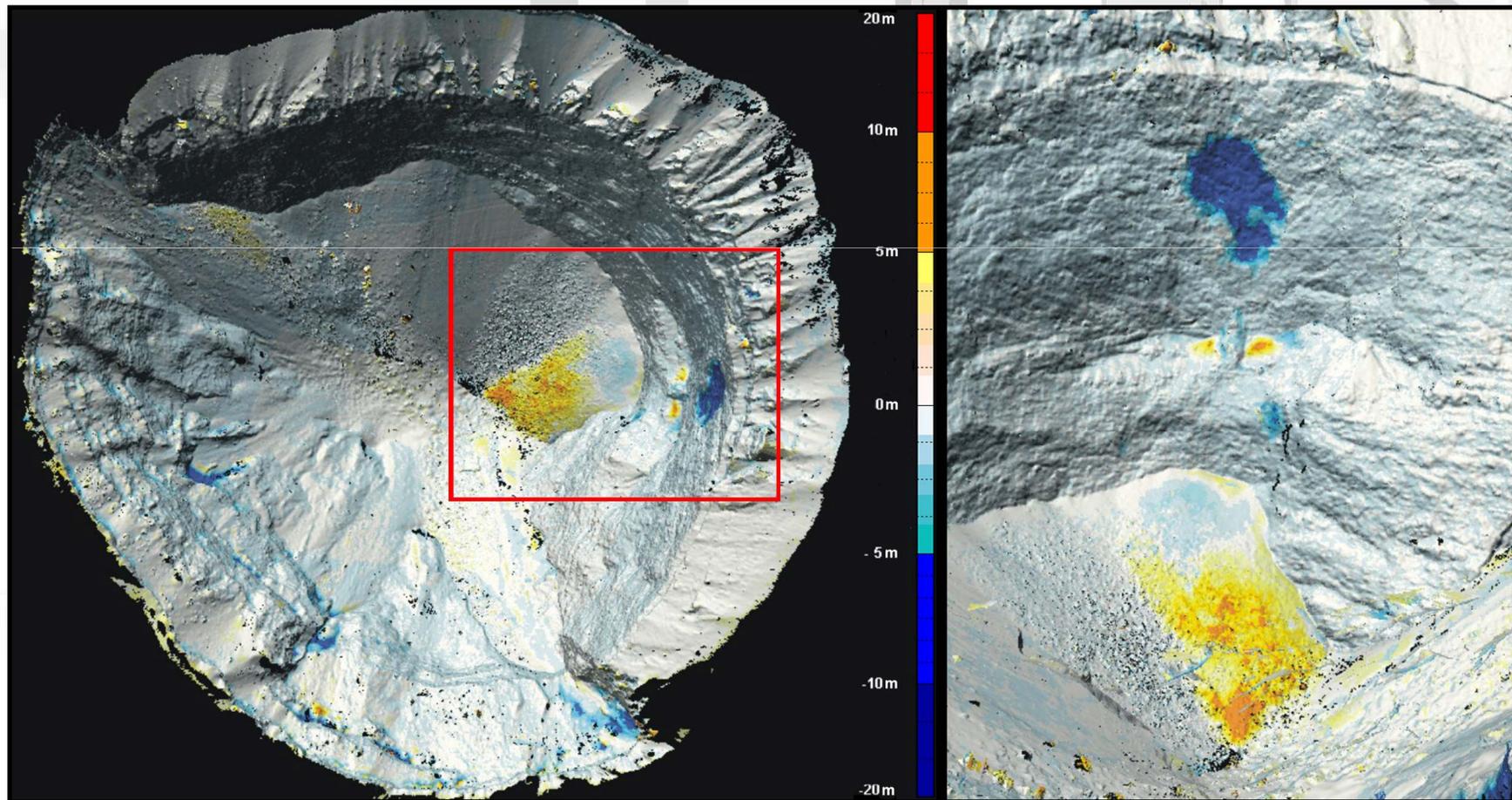
$$D(r) = 0.17 \cdot 10^{-3} \cdot r + 0.012$$

$$ss(r) = 0.02 \cdot 10^{-3} \cdot r$$



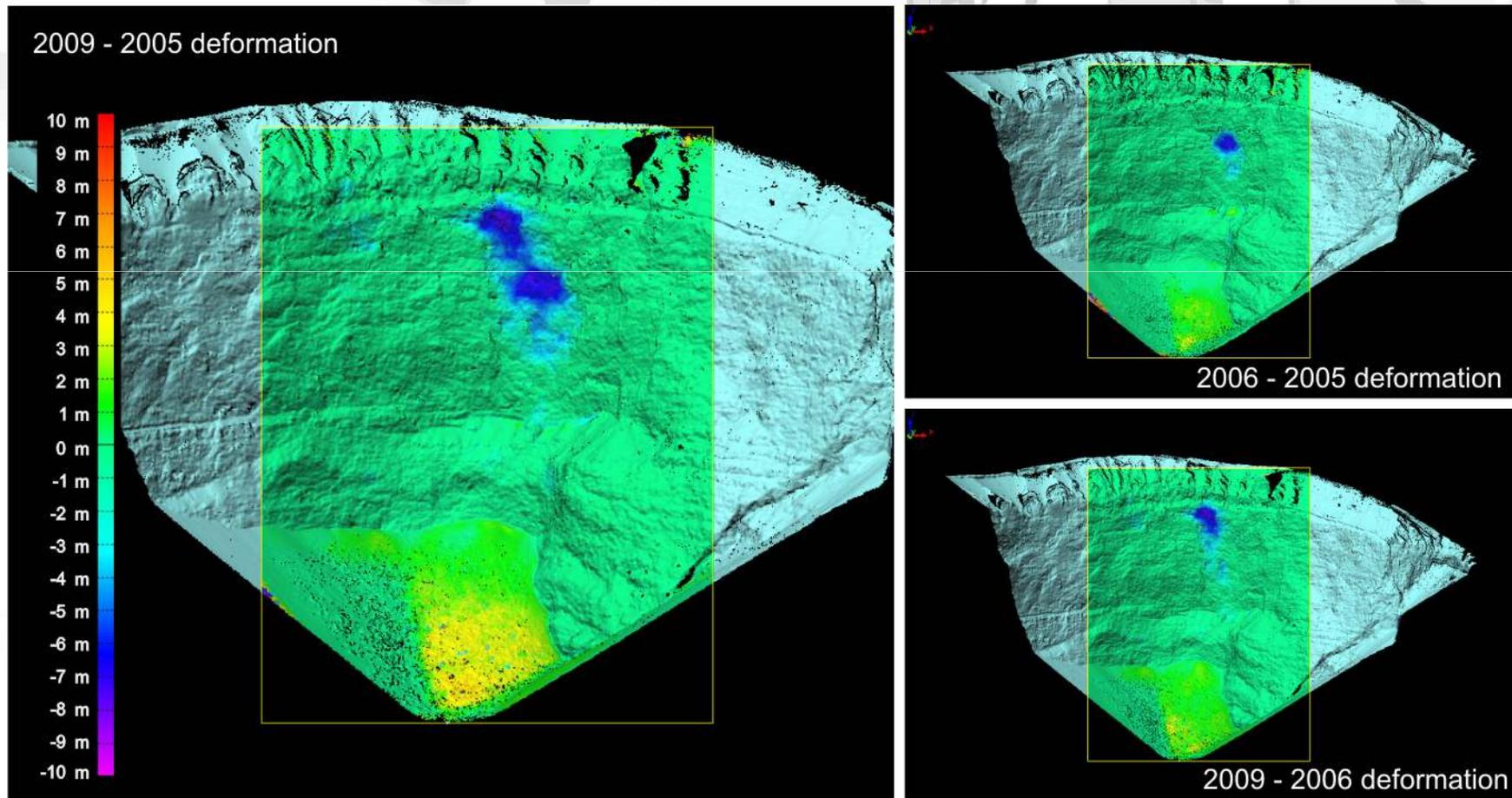
## MONITORAGGIO CRATERE VESUVIO

La sezione di Bologna dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) si occupa del monitoraggio delle aree vulcaniche attive, mediante sistemi laser scanning. Si utilizza un **approccio classico** basato sul **confronto di modelli multi-temporali** per monitorare le aree in deformazione.



## MONITORAGGIO CRATERE VESUVIO

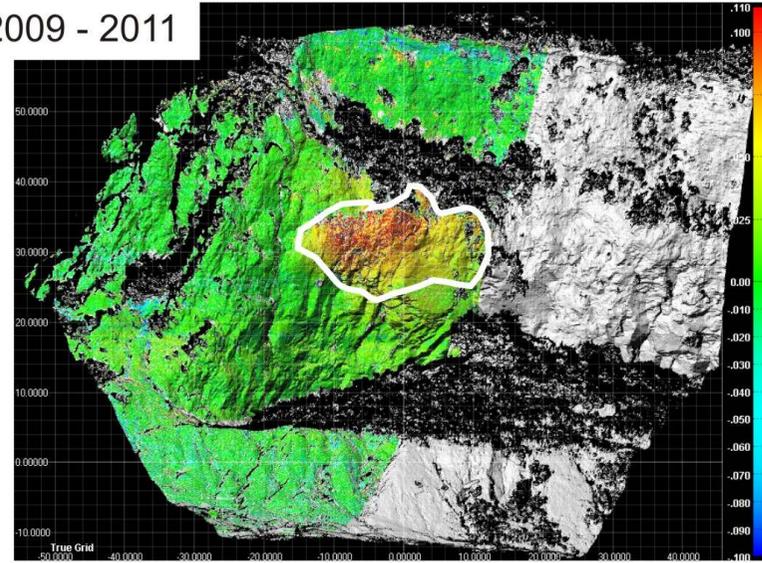
La sezione di Bologna dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) si occupa del monitoraggio delle aree vulcaniche attive, mediante sistemi laser scanning. Si utilizza un **approccio classico** basato sul **confronto di modelli multi-temporali** per monitorare le aree in deformazione.



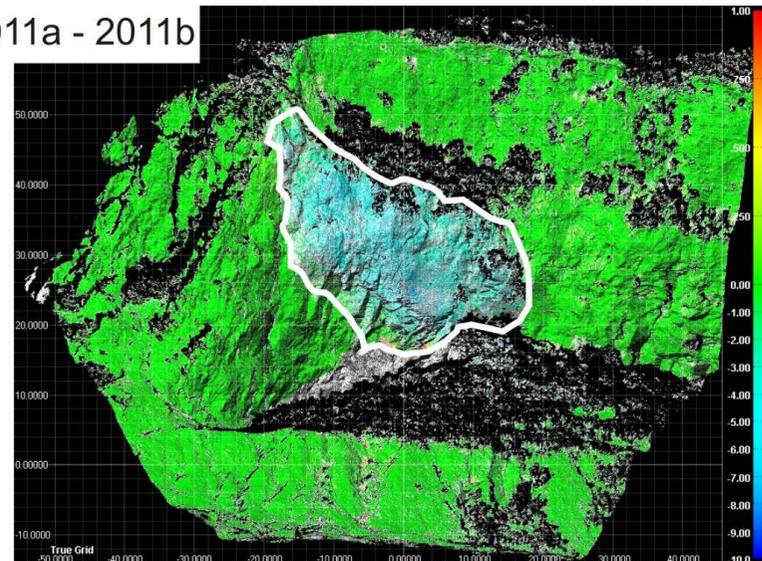
# MONITORAGGIO CRATERE SOLFATARA



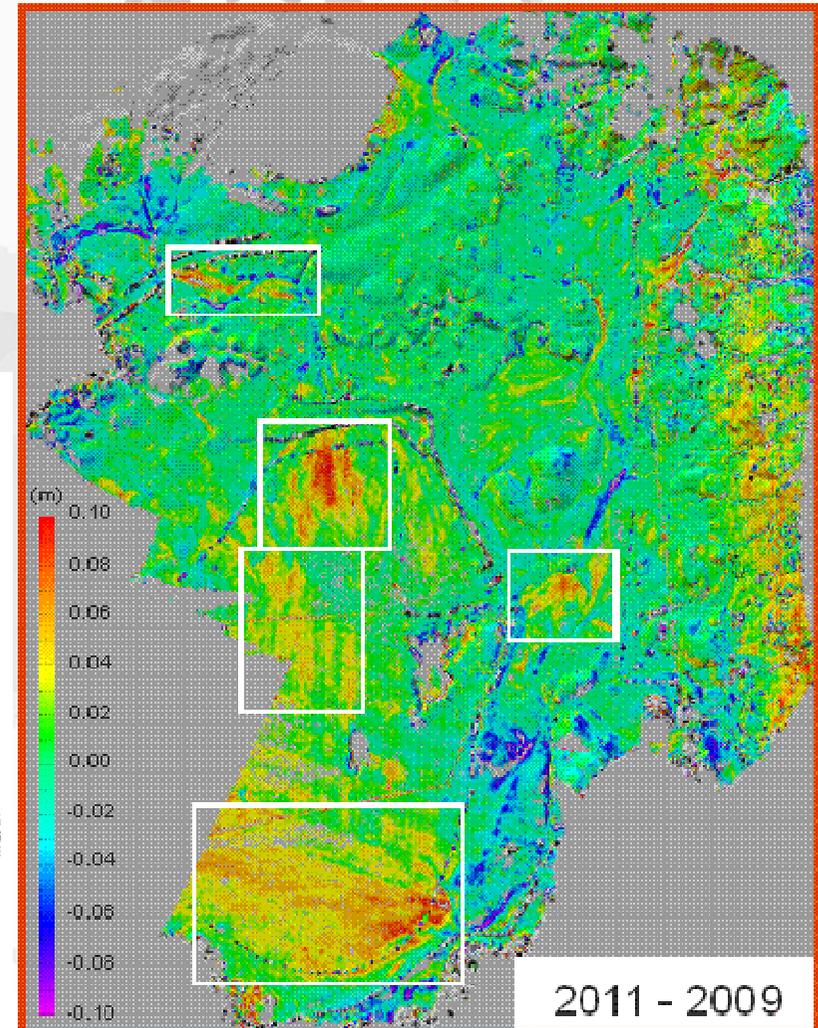
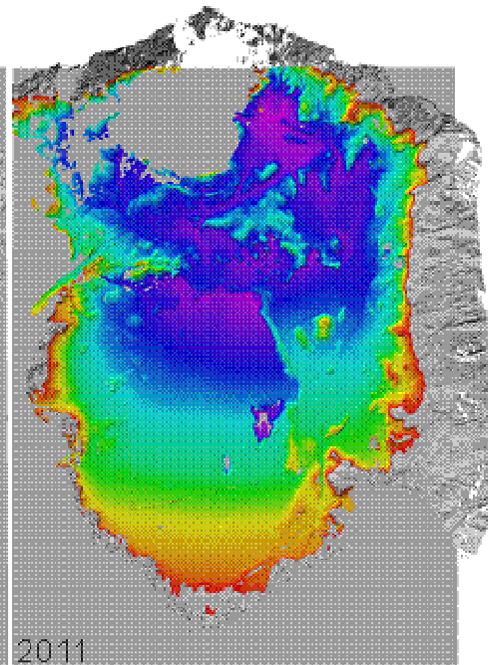
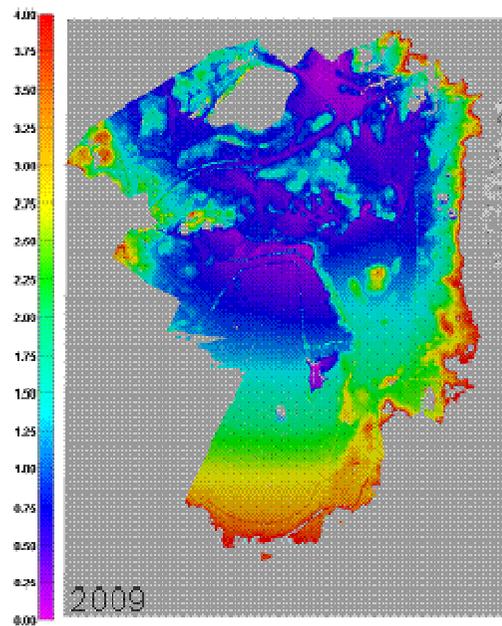
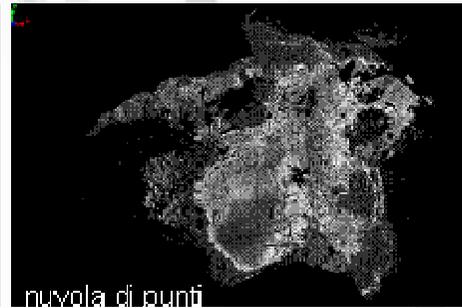
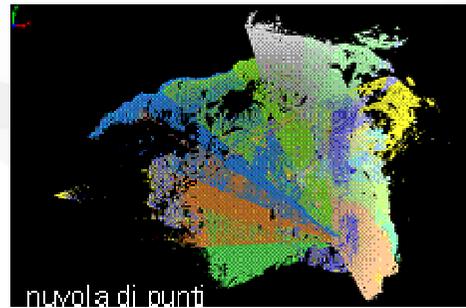
2009 - 2011



2011a - 2011b



# MONITORAGGIO FONDO SOLFATARA



## ***IL SISTEMA VLR-TLS PER RILIEVI IN EMERGENZA***

Nel 2010 inizia una fitta collaborazione con il Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale dell'Università di Bologna mirata inizialmente a comprendere quanto siano efficaci i sistemi VLR-TLS nel rilievo architettonico e urbanistico che ben presto si traduce nel tentativo di mettere appunto protocollo di lavoro per intervenire in caso di emergenza.

- ❑ **misurare i monumenti in modo veloce e indipendente, in modo completamente svincolato da ogni supporto di appoggio per le misure**
- ❑ **conoscere le risoluzioni effettive ottenibili per comprendere la significatività dei punti misurati**
- ❑ **capire l'effetto di distorsione indotto nei modelli da osservazioni realizzate in condizioni non ottimali, specialmente con angoli di incidenza sfavorevoli e fenomeno di sparpagliamento dello spot**
- ❑ **mettere a punto un protocollo di misura di semplice ed efficace attuazione (anche per operatori non esperti)**
- ❑ **definire una procedura, standard e veloce, per l'analisi dei dati basata sia sul confronto di modelli multi-temporali ma, soprattutto, sull'analisi morfologica dei prospetti in esame**

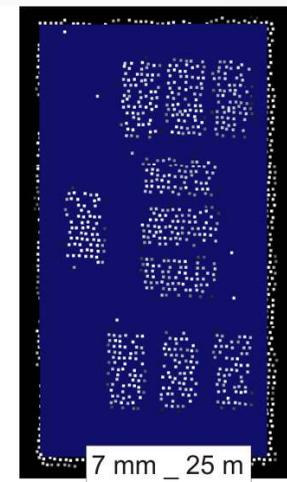
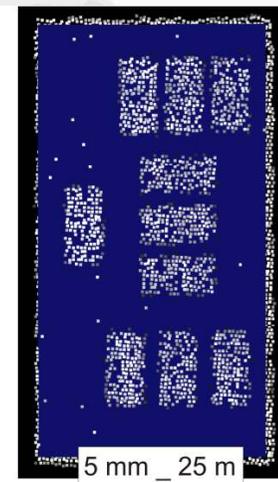
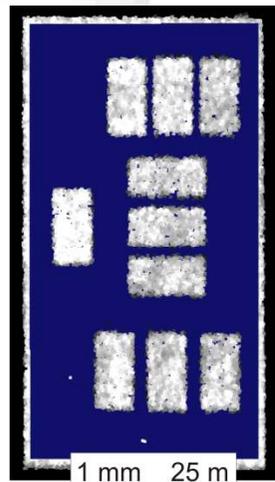
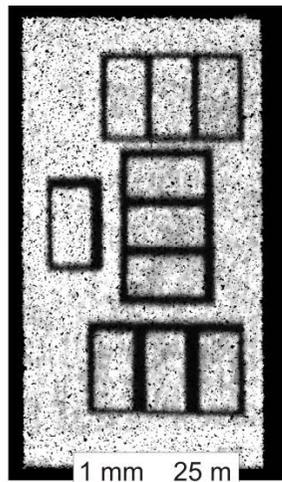
Un VLR-TLS (portata elevata, segnale stabile, fase coerente su distanze di chilometri e monocromatico, piccola dispersione in frequenza) può essere concepito come strumento adatto per uso in condizioni di emergenza, quando sia necessario fornire informazioni sul potenziale stato deformativo degli edifici ai tecnici di ingegneria strutturale.

## ESPERIMENTO PER LA RISOLUZIONE

L'esperimento è stato attuato utilizzando uno speciale target artificiale, composto da un pannello in legno su cui sono state applicate 9 mattonelle di lato 5 cm x 10 cm e di 1 cm di profondità a formare 3 file di oggetti paralleli: la differenza è nelle differenti **fughe** tra le mattonelle (1 cm, 1.5 cm e 2 cm) considerate per determinare la risoluzione della scansione.

Il target è stato fissato in posizione pressoché verticale su un supporto e rilevato da 4 **distanze** di riferimento cioè 25 m, 50 m, 75 m e 100 m.

Su ogni posizione (distanza) sono state effettuate numerose scansioni selezionando la zona da scandire e scegliendo **differenti passi di campionamento**, dal più stretto al più largo al fine di capire quali nuvole di punti avrebbero in seguito restituito una immagine fedele all'originale.

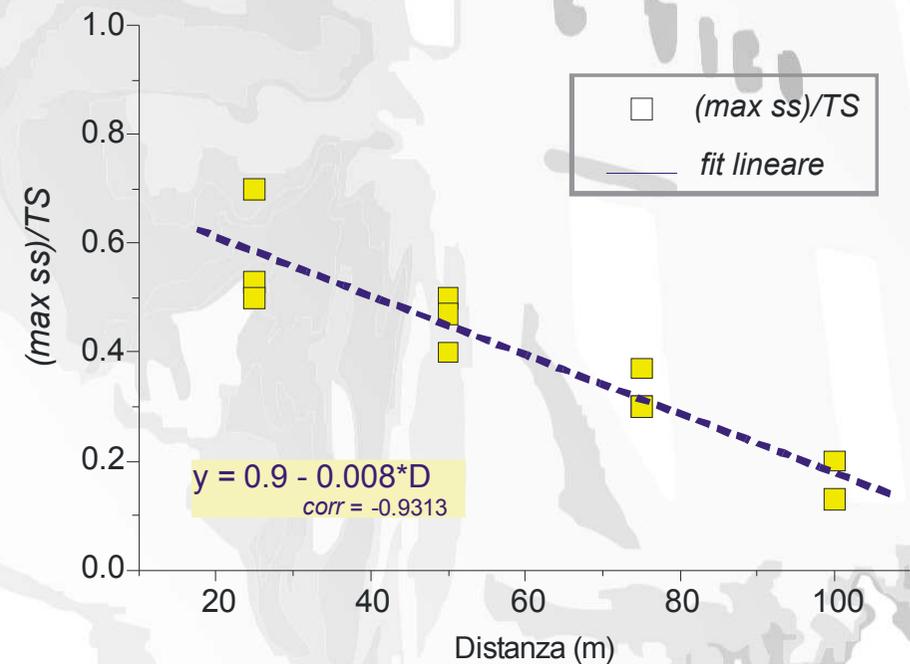
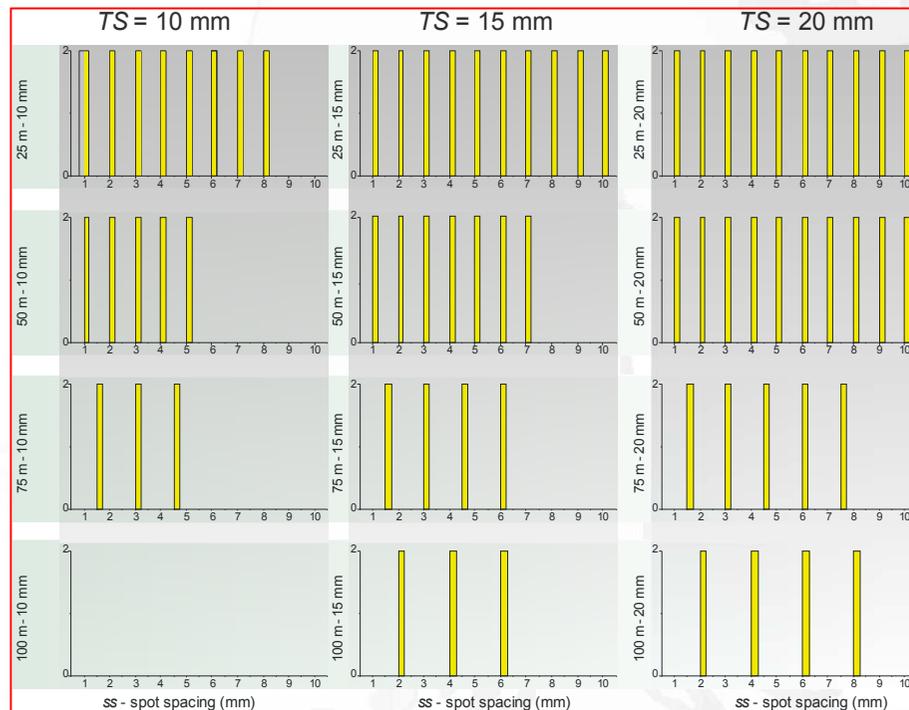


## ESPERIMENTO PER LA RISOLUZIONE

La prova è considerata superata se le fughe sono visibili e misurabili dalle nuvole di punti

E' stato possibile mettere in stretta relazione il rapporto tra il passo di campionamento più largo utile a riconoscere la fuga con la distanza

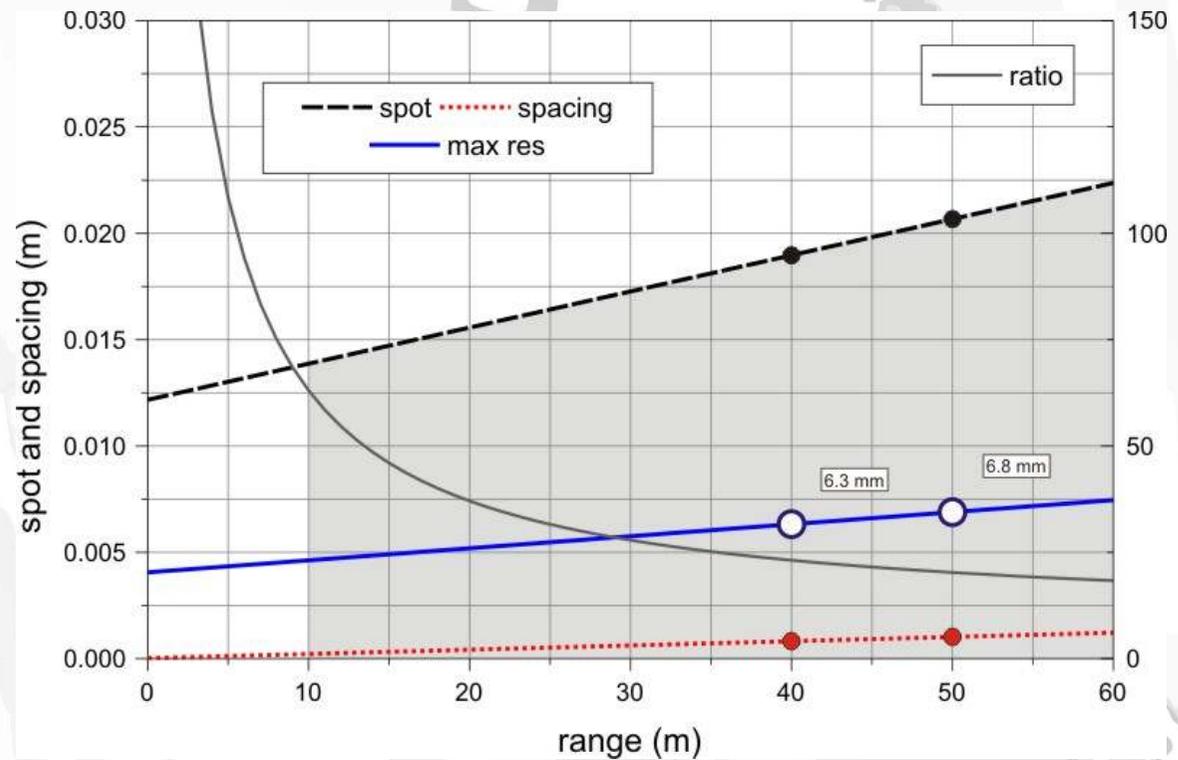
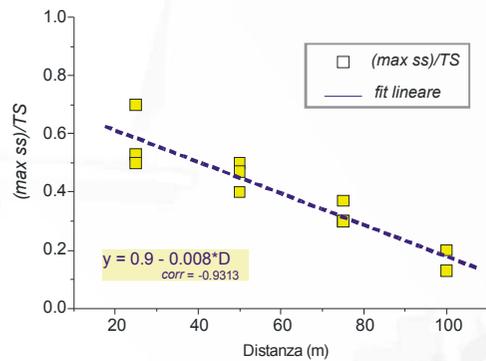
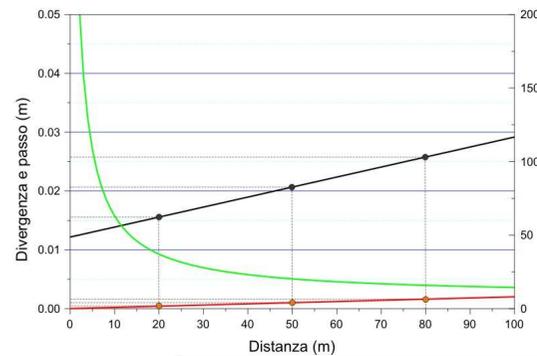
L'interpolazione dei dati ci permette di ottenere dei valori tabulati rappresentativi di vari casi di interesse per una pianificazione rapida delle campagne di misura.



## ESPERIMENTO PER LA RISOLUZIONE

L'esperimento ha permesso di ottenere due importanti informazioni:

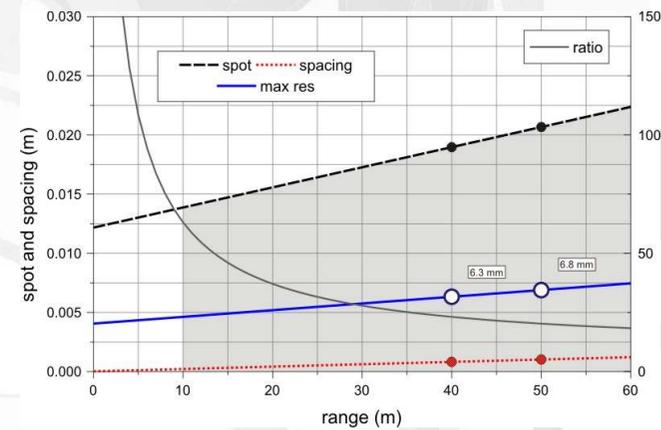
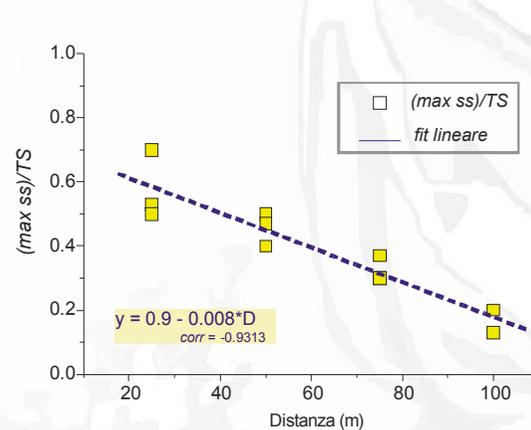
- E' possibile ridurre al massimo i tempi necessari al rilievo ottimizzando la scelta del passo di campionamento senza perdere risoluzione
- La risoluzione raggiungibile con un VLR-TLS è decisamente inferiore alla grandezza dello spot e, in linea di massima, vale circa 1/3



## ESPERIMENTO PER LA RISOLUZIONE

L'esperimento ha permesso di ottenere due importanti informazioni:

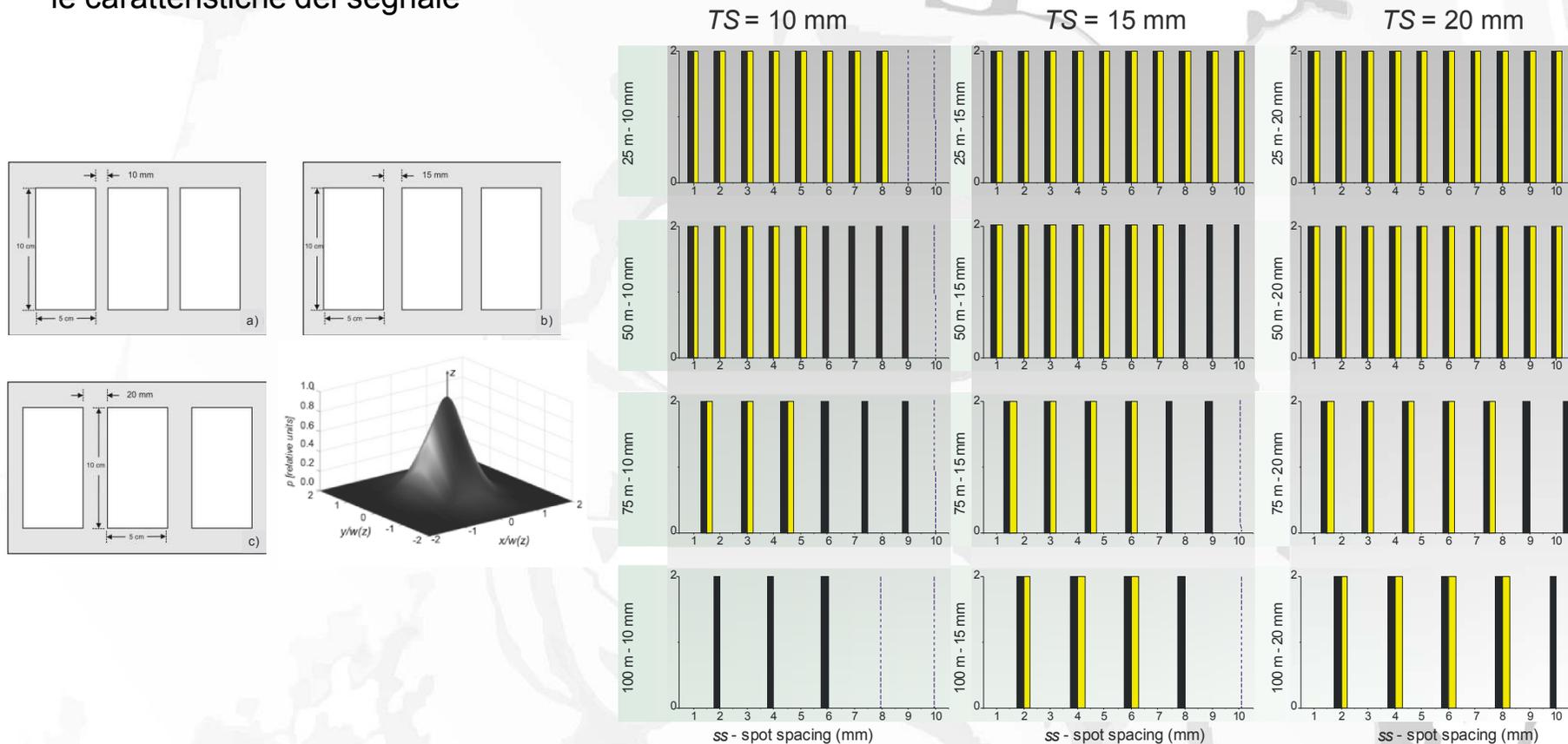
- 1) La risoluzione raggiungibile con un VLR-TLS è decisamente inferiore alla grandezza dello spot e, in linea di massima, vale circa 1/3
- 2) E' possibile ridurre al massimo i tempi necessari al rilievo ottimizzando la scelta del passo di campionamento senza perdere risoluzione



# ESPERIMENTO PER LA RISOLUZIONE

Parallelamente, sono stati creati i dati sintetici delle osservazioni del target mediante la convoluzione della funzione oggetto con la funzione laser scanning: la prima è stata ottenuta semplicemente creando il modello digitale del bersaglio, la seconda considerando un fascio di divergenza nota nella quale l'energia sia distribuita secondo un profilo gaussiano.

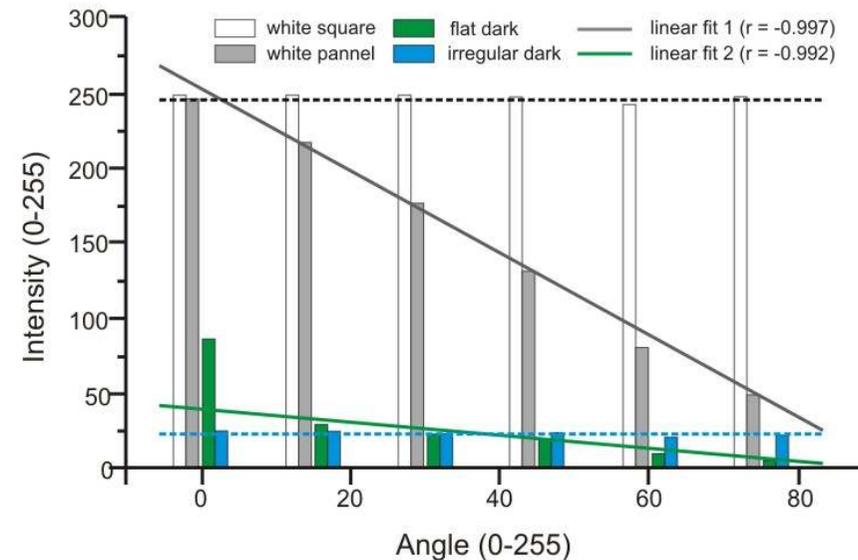
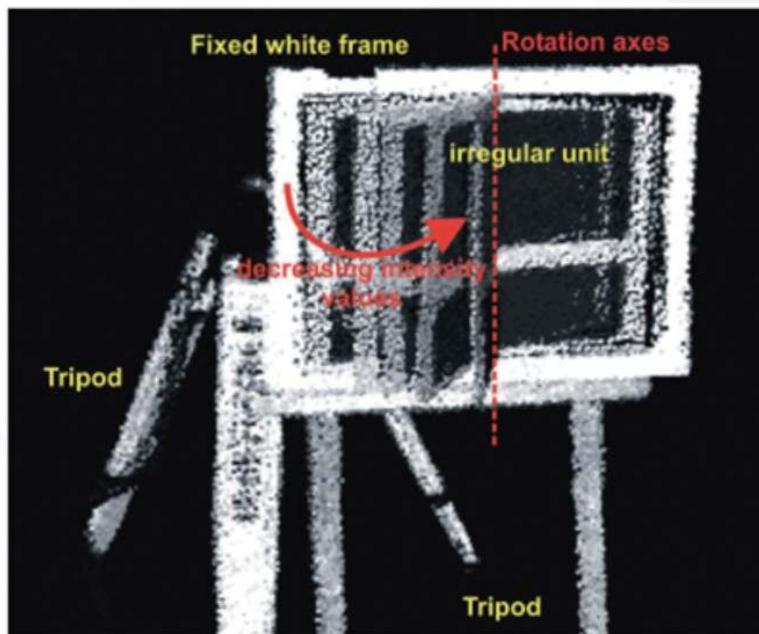
**I risultati sono un po' più ottimistici rispetto a quelli reali, ma hanno il pregio di essere ampiamente coerenti e, in qualche modo, permettono di esprimersi con certezza su quelle che sono le caratteristiche del segnale**



## ESPERIMENTO PER ANGOLI DI INCIDENZA

Il problema di capire come e quanto l'angolo di incidenza incide sulla bontà delle misure è stato affrontato considerando due aspetti: **intensità** del segnale di ritorno e l'errore nel calcolo della distanza responsabile di eventuali **distorsioni** dei modelli finali.

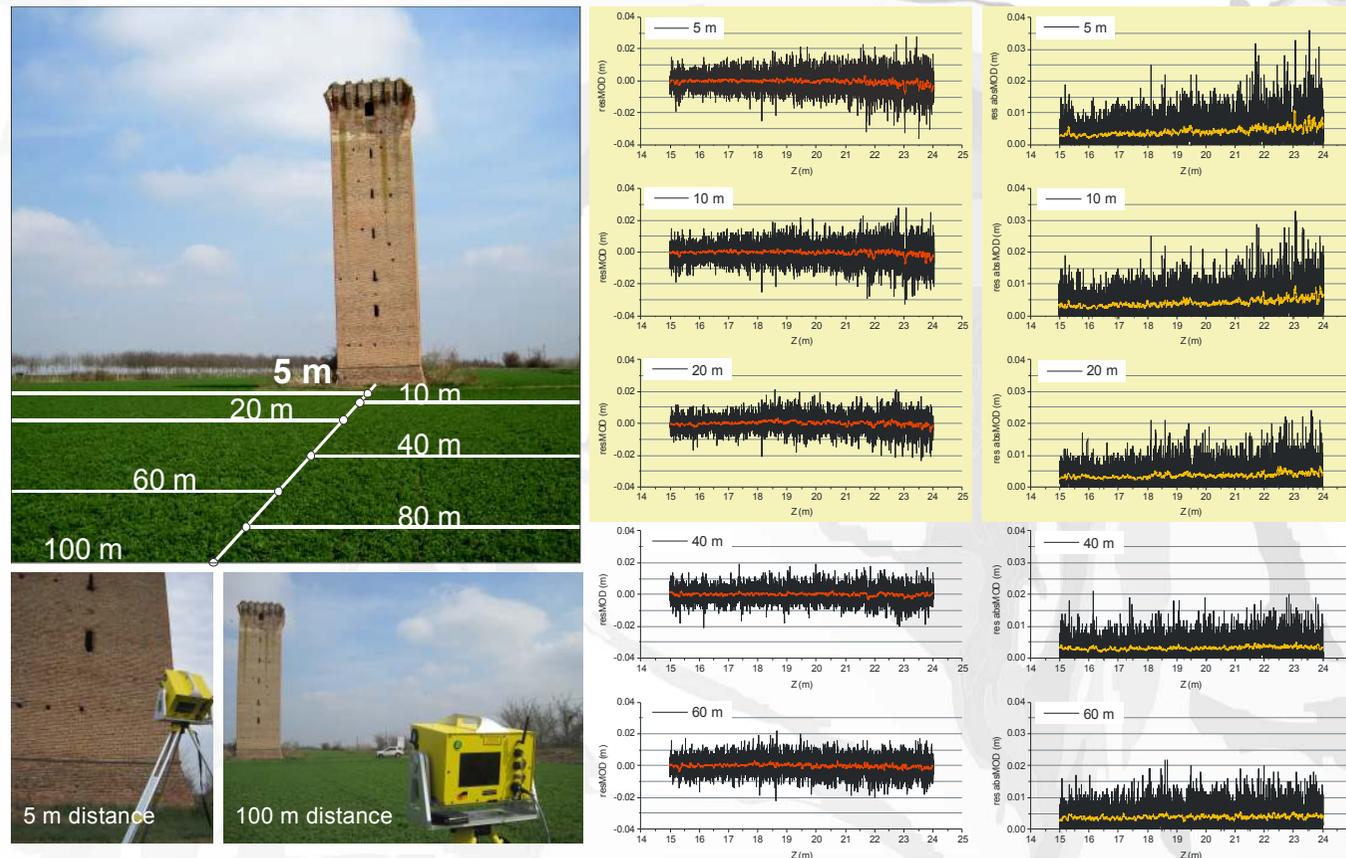
i sistemi attivi di telerilevamento funzionano in quanto capaci di rilevare un segnale di ritorno sulla stessa direzione dell'invio per le proprietà chimico-fisiche delle superfici osservate che ne determinano la rugosità. Di fatto, lo stesso principio vale in senso macroscopico quando l'irregolarità della superficie è confrontabile con l'impronta laser.



## ESPERIMENTO PER ANGOLI DI INCIDENZA

Il problema di capire come e quanto l'angolo di incidenza incide sulla bontà delle misure è stato affrontato considerando due aspetti: **intensità** del segnale di ritorno e l'errore nel calcolo della distanza responsabile di eventuali **distorsioni** dei modelli finali.

Nell'ambito del rilievo architettonico, specialmente in presenza di monumenti storici o antichi, il deterioramento e talvolta anche lo sporco forniscono quei criteri di irregolarità sufficienti a garantire una buona tenuta delle misure anche in condizioni sfavorevoli di rilievo. Torre di tieni rappresentativa delle costruzioni medievali in laterizio.

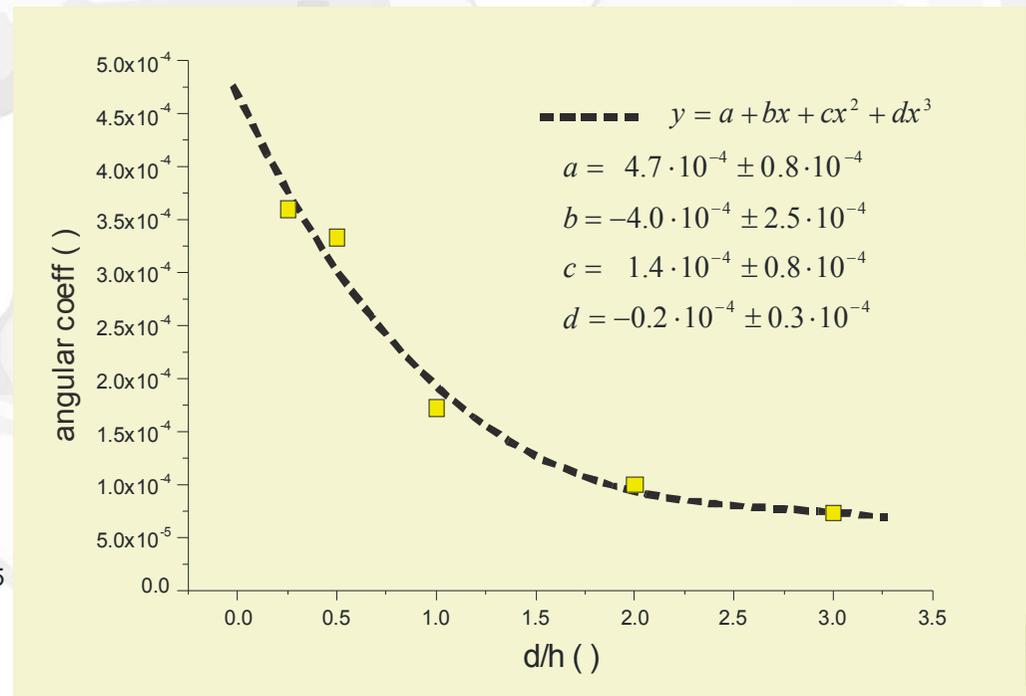
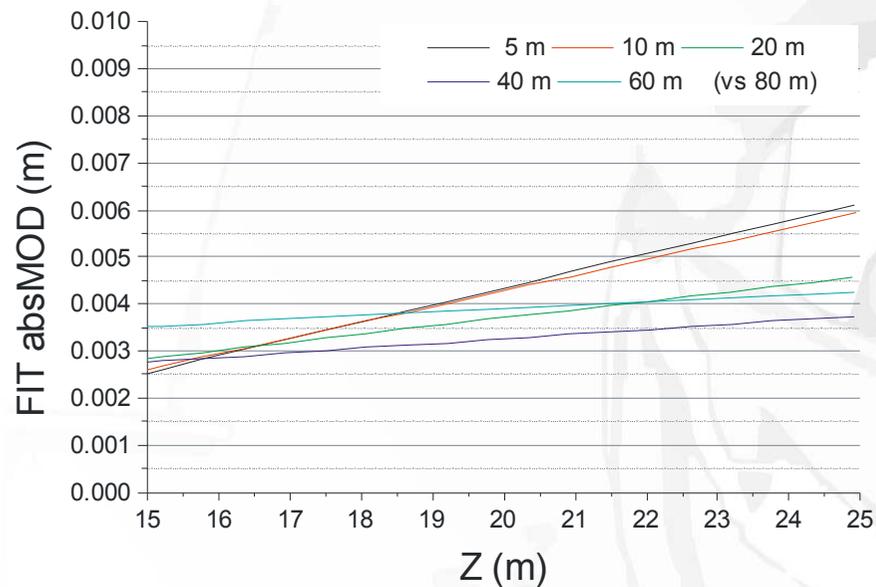


## ESPERIMENTO PER ANGOLI DI INCIDENZA

Il rilievo effettuato a distanze variabili tra i 100 m e i 5 m dalla base della torre mostrano, nel confronto con la scansione di riferimento, un netto aumento delle differenze tra punti con la quota.

Il tasso di crescita è stato messo in riferimento al rapporto tra la distanza di osservazione planimetrica e l'altezza della torre fornendo una conoscenza specifica sulla distorsione delle misure indotta da una non buona geometria di acquisizione.

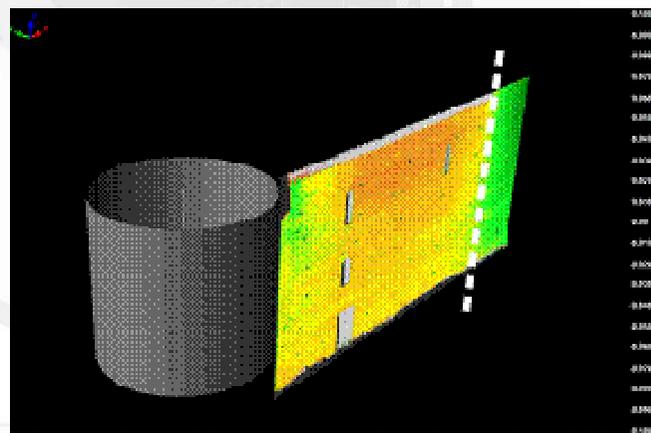
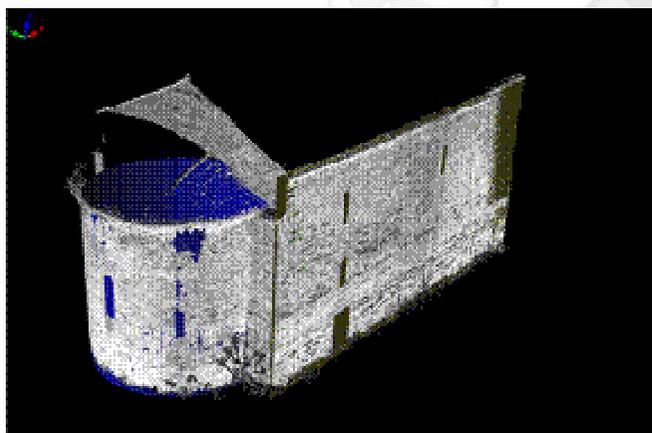
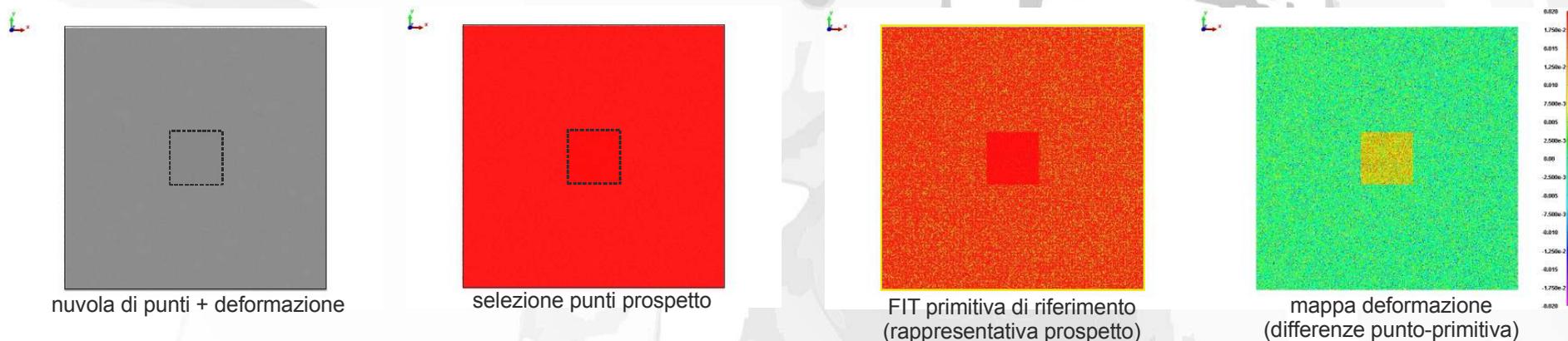
I valori possono essere tabulati per capire il grado di affidabilità delle misure in sede di interpretazione dei risultati.



## ANALISI MORFOLOGICA

Il tipo di analisi proposta per il controllo degli edifici che hanno subito gli effetti del terremoto è basata principalmente sullo studio morfologico dei prospetti in esame. Non si tratta di un passo indietro nella strategia di analisi dati ma, di fatto, in ambito architettonico e con le precisioni considerate (5-7 mm) risulta essere un modo vincente per interpretare lo stato deformativo dell'edificio data l'elevata quantità di punti ottenibili.

### Primitive di riferimento da interpolazione dati e creazione mappe punto-primitiva



## ANALISI MORFOLOGICA

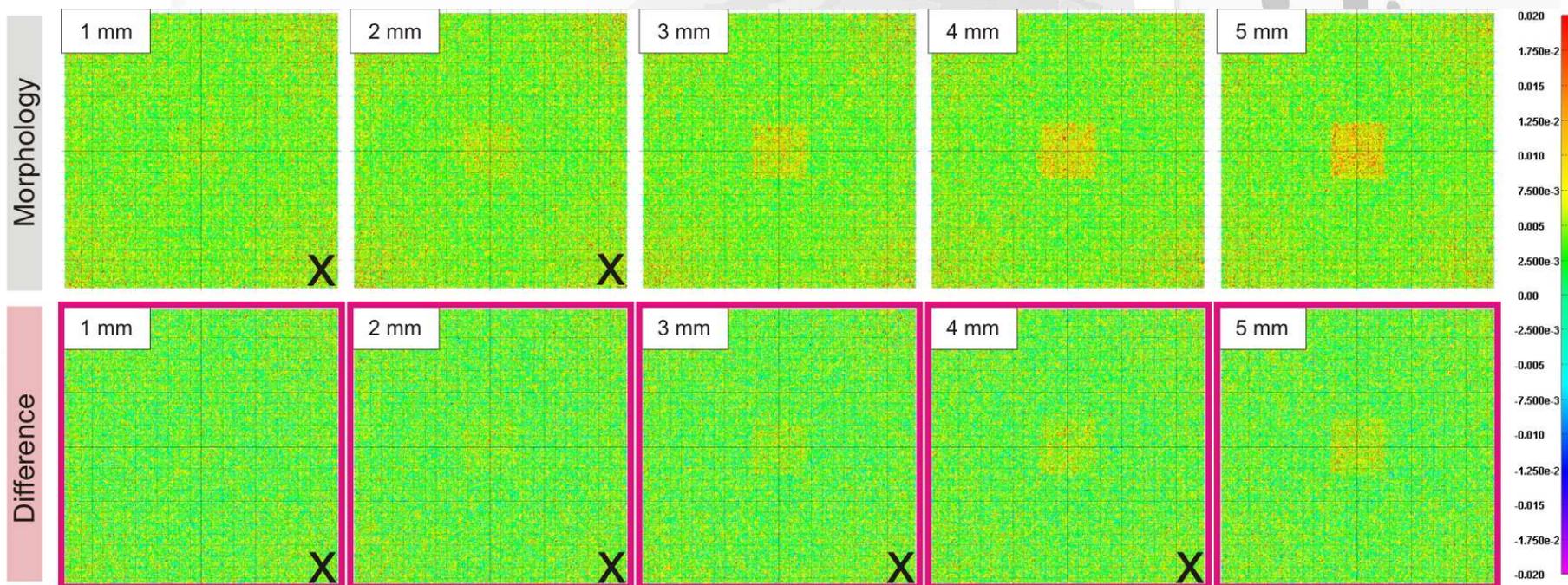
Il tipo di analisi proposta per il controllo degli edifici che hanno subito gli effetti del terremoto è basata principalmente sullo studio morfologico dei prospetti in esame. Non si tratta di un passo indietro nella strategia di analisi dati ma, di fatto, in ambito architettonico e con le precisioni considerate (5 mm) risulta essere un modo vincente per interpretare lo stato deformativo dell'edificio data l'elevata quantità di punti ottenibili.

Simulazione con nuvole di punti sintetiche

Rumore dati TLS → [5 : 10] mm

Deformazione → [1: 10] mm

**Primitive di riferimento da interpolazione dati e creazione mappe punto-primitiva**



## ANALISI MORFOLOGICA

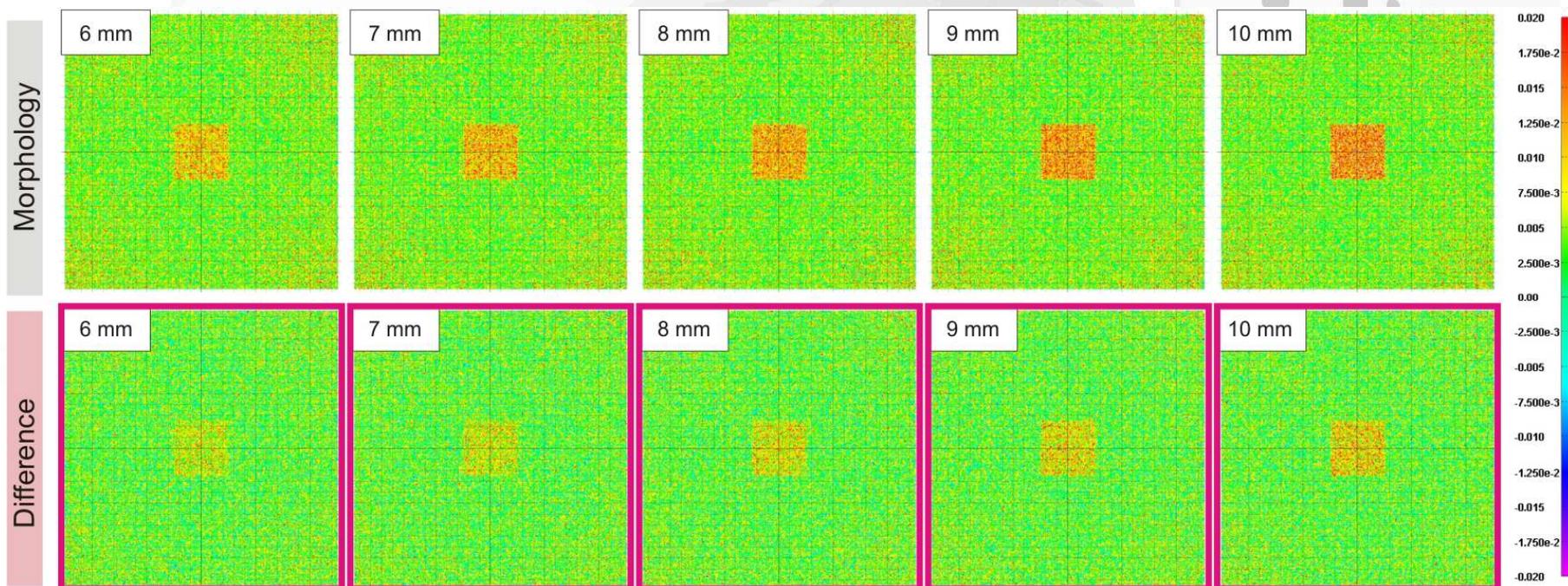
Il tipo di analisi proposta per il controllo degli edifici che hanno subito gli effetti del terremoto è basata principalmente sullo studio morfologico dei prospetti in esame. Non si tratta di un passo indietro nella strategia di analisi dati ma, di fatto, in ambito architettonico e con le precisioni considerate (5 mm) risulta essere un modo vincente per interpretare lo stato deformativo dell'edificio data l'elevata quantità di punti ottenibili.

Simulazione con nuvole di punti sintetiche

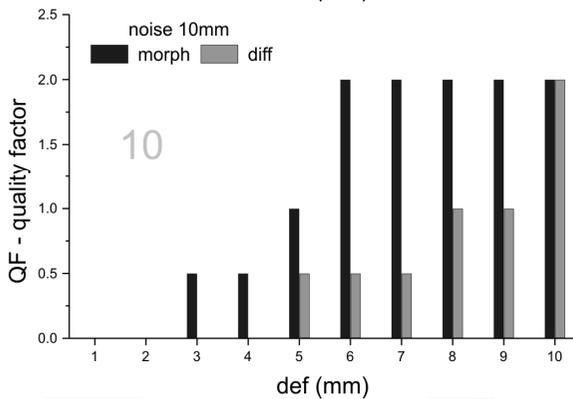
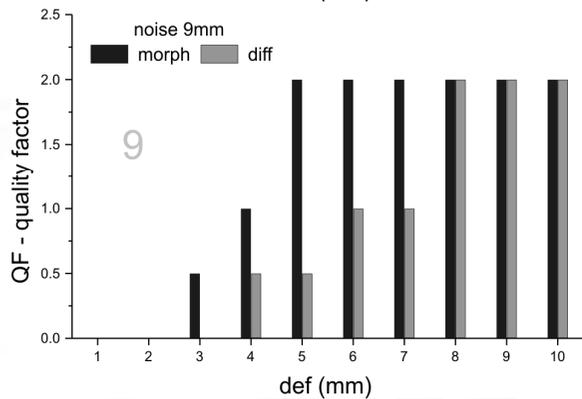
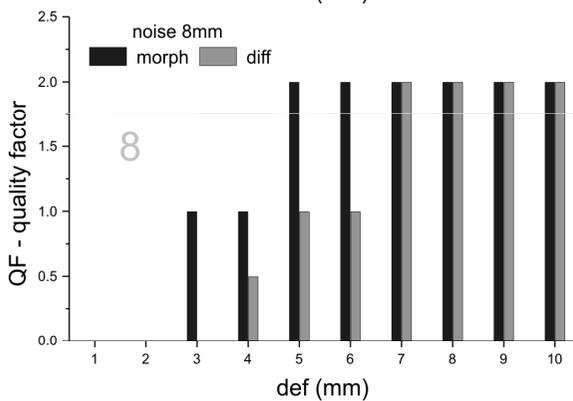
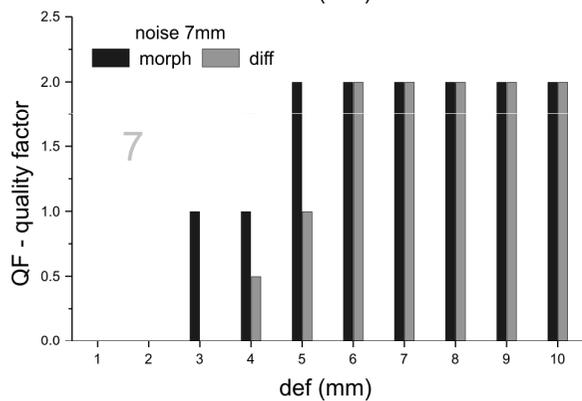
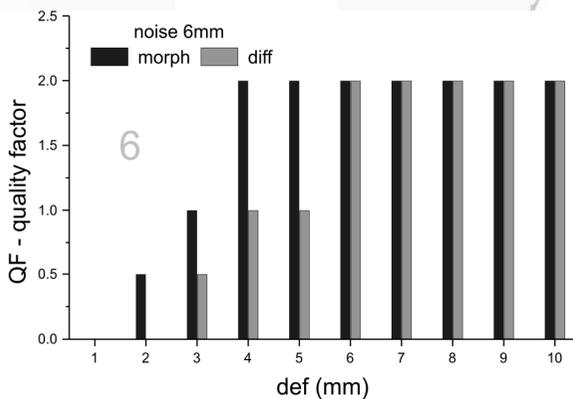
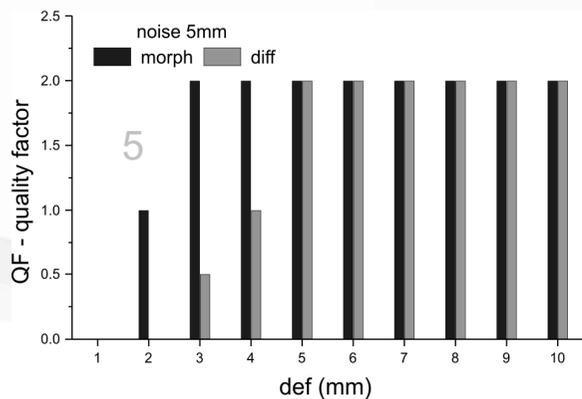
Rumore dati TLS → [5 : 10] mm

Deformazione → [1: 10] mm

**Primitive di riferimento da interpolazione dati e creazione mappe punto-primitiva**



# ANALISI MORFOLOGICA



## Test qualità risultati

Rumore dati TLS → [5 : 10] mm

Deformazione → [1: 10] mm

**0.5 → poco visibile e non misurabile**

**1.0 → visibile ma non misurabile**

**2.0 → visibile e misurabile**

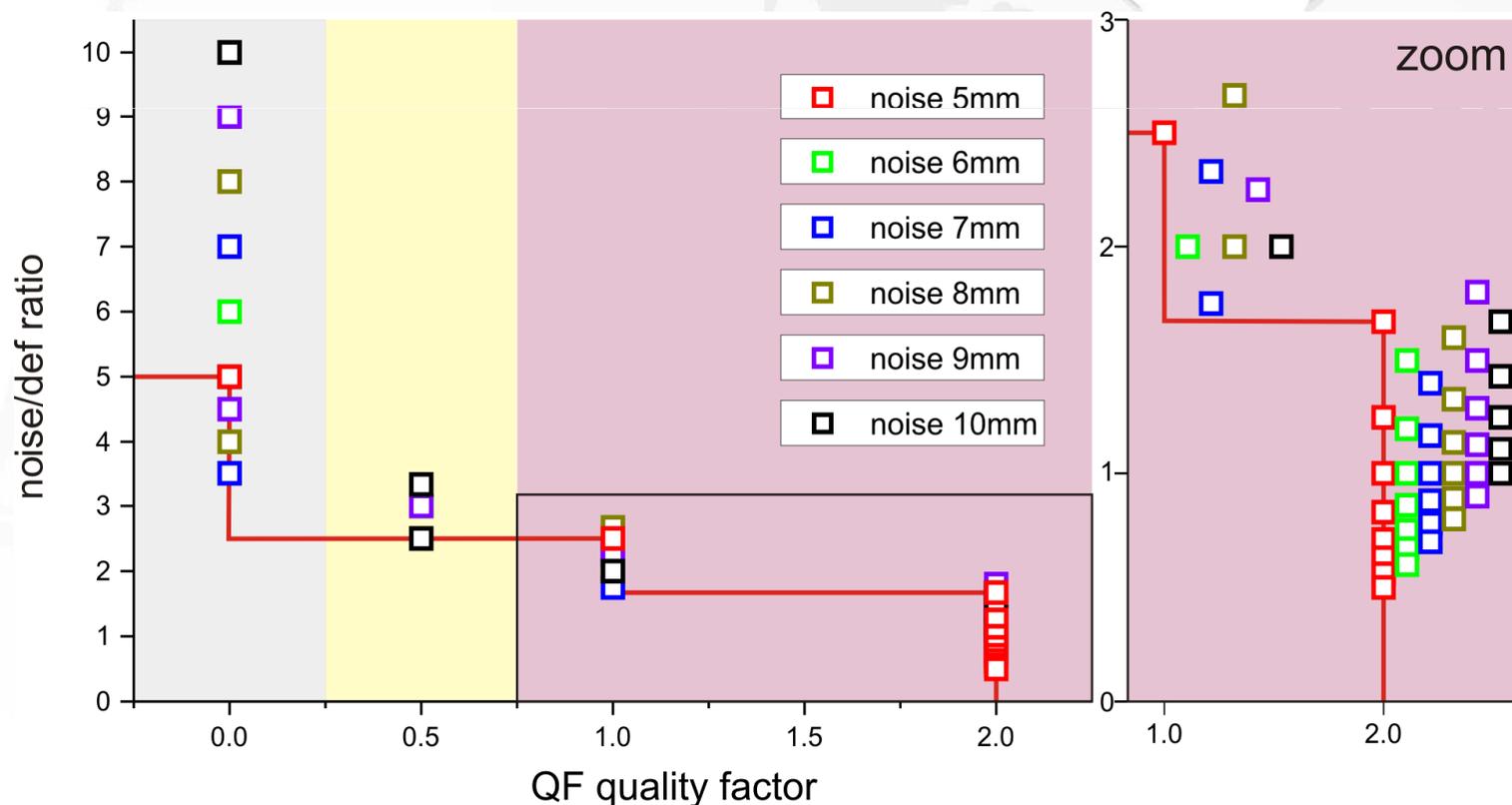
## ANALISI MORFOLOGICA

Il tipo di analisi proposta per il controllo degli edifici che hanno subito gli effetti del terremoto è basata principalmente sullo studio morfologico dei prospetti in esame. Non si tratta di un passo indietro nella strategia di analisi dati ma, di fatto, in ambito architettonico e con le precisioni considerate (5 mm) risulta essere un modo vincente per interpretare lo stato deformativo dell'edificio data l'elevata quantità di punti ottenibili.

Simulazione con nuvole di punti sintetiche

Rumore dati TLS → [5 : 10] mm

Deformazione → [1: 10] mm



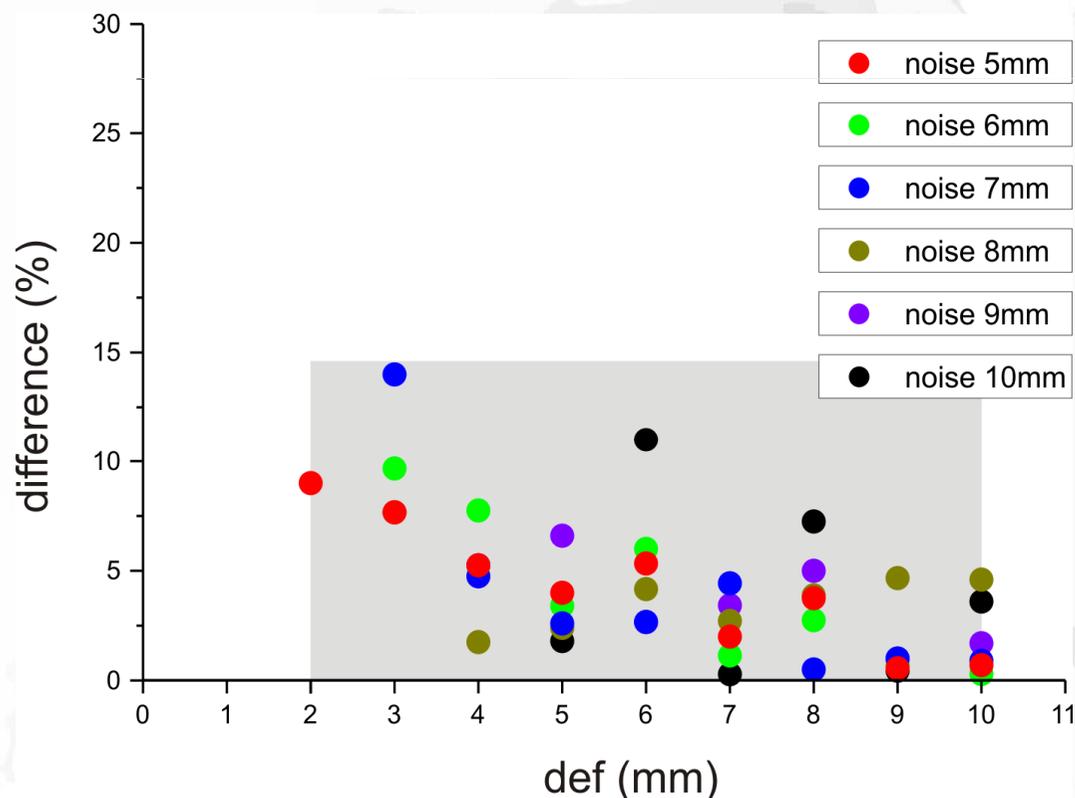
## ANALISI MORFOLOGICA

Il tipo di analisi proposta per il controllo degli edifici che hanno subito gli effetti del terremoto è basata principalmente sullo studio morfologico dei prospetti in esame. Non si tratta di un passo indietro nella strategia di analisi dati ma, di fatto, in ambito architettonico e con le precisioni considerate (5 mm) risulta essere un modo vincente per interpretare lo stato deformativo dell'edificio data l'elevata quantità di punti ottenibili.

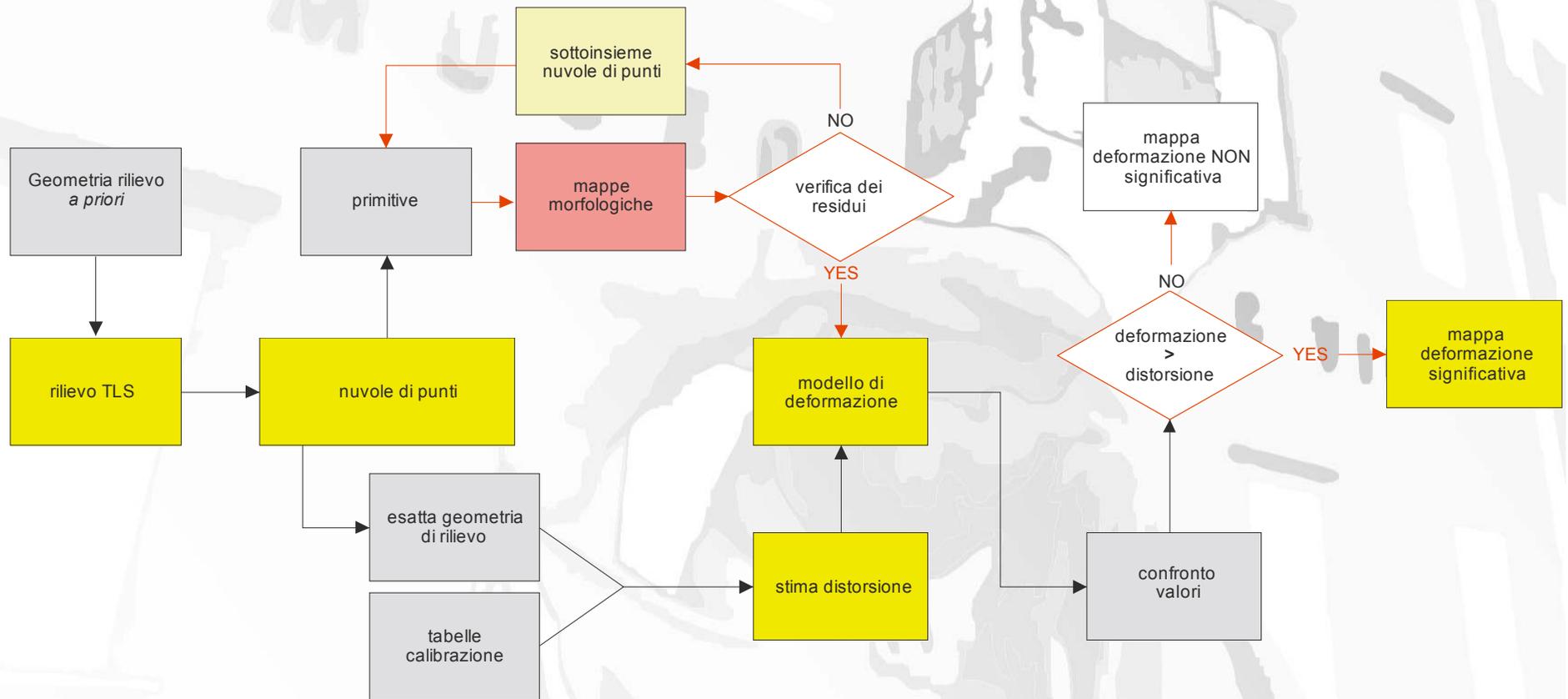
Errore nella stima < 10% (da dati sintetici)

Rumore dati TLS → [5 : 10] mm

Deformazione → [1: 10] mm



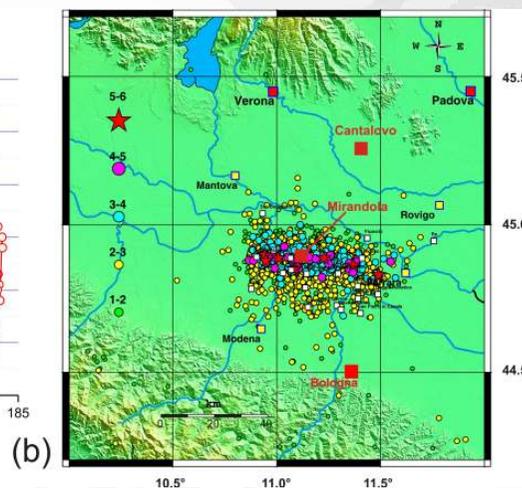
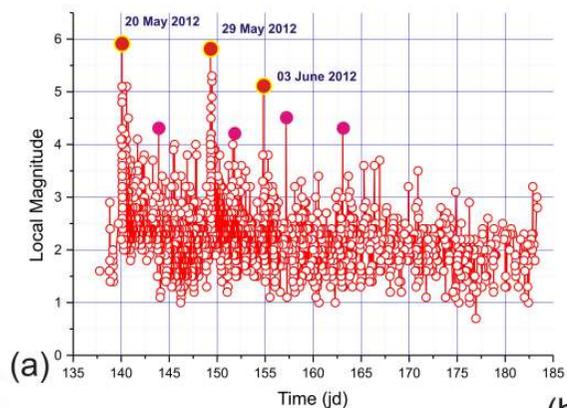
## PROCEDURA OPERATIVA



La possibilità di operare in maniera completamente indipendente, sicura e affidabile permette di mettere a punto 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.

## APPLICAZIONI

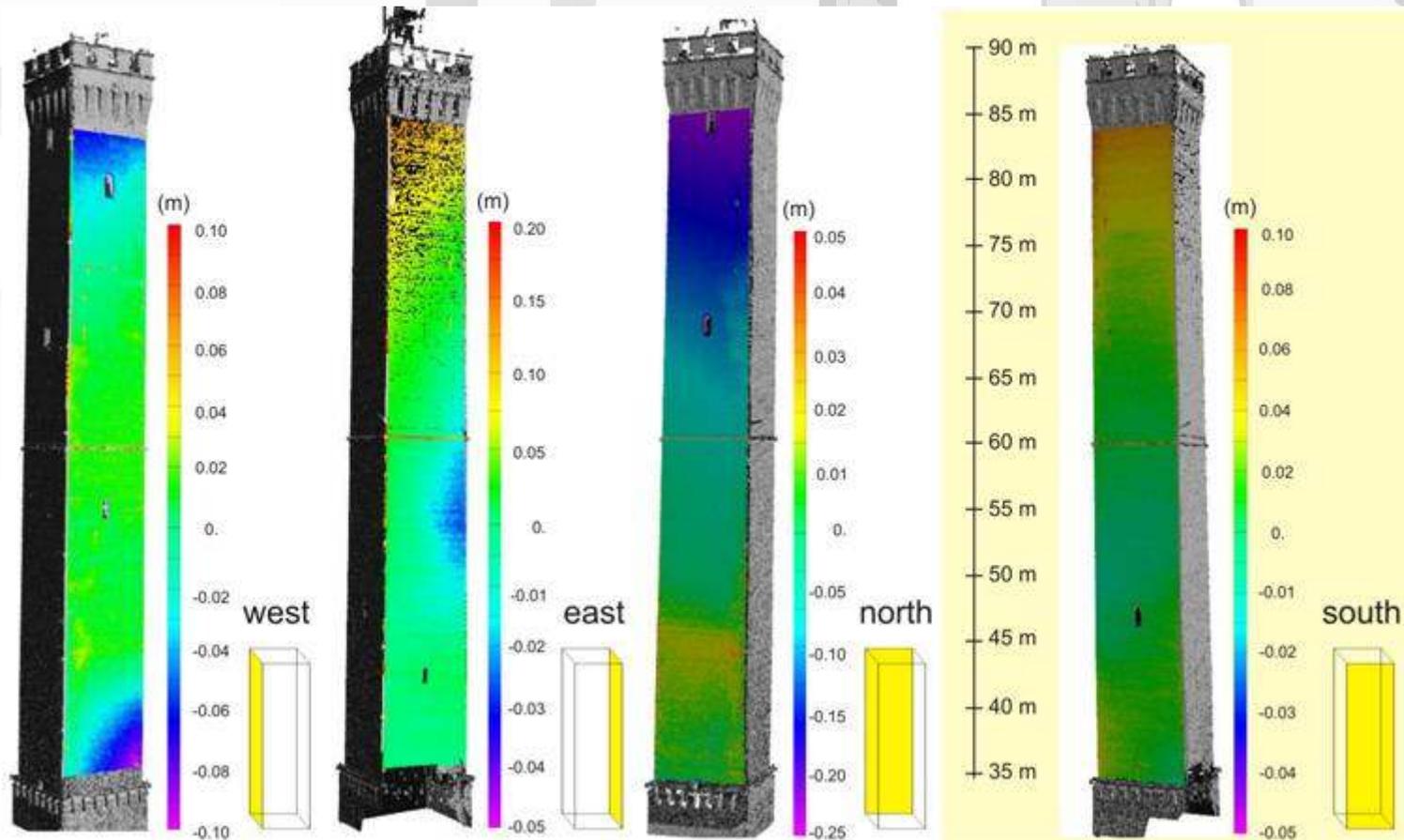
Il terremoto dell'Emilia Romagna ha coinvolto moltissimi paesi nelle province di Bologna, Modena, Ferrara, Rovigo e Verona, con gravi danni sia alle abitazioni civili che, soprattutto, agli edifici storici quali chiese, torri e campanili. I tre eventi principali avvenuti nelle prime tre settimane e la lunga coda di scosse di assestamento hanno provocato la chiusura di molti centri storici, catalogati tuttora come zone rosse e quindi considerati inaccessibili per la popolazione civile, e la necessità di verifiche scrupolose da parte dei tecnici di ingegneria strutturale sia per stimare i danni sia per stabilire se le strutture esaminate sono o meno agibili. In questo contesto è stato possibile offrire il un contributo al fine di aiutare, dove possibile, i comuni terremotati nel controllo dei numerosissimi campanili potenzialmente danneggiati



- Torre degli Asinelli (BO)
- Campanile del Duomo di Mirandola (MO)
- Campanile di Quarantoli (MO)
- Campanile San Giacomo Roncole (MO)
- Campanile di Sant'Agostino (FE)
- Campanile di Ficarolo (RO)
- Pieve di Cantalovo (VR)

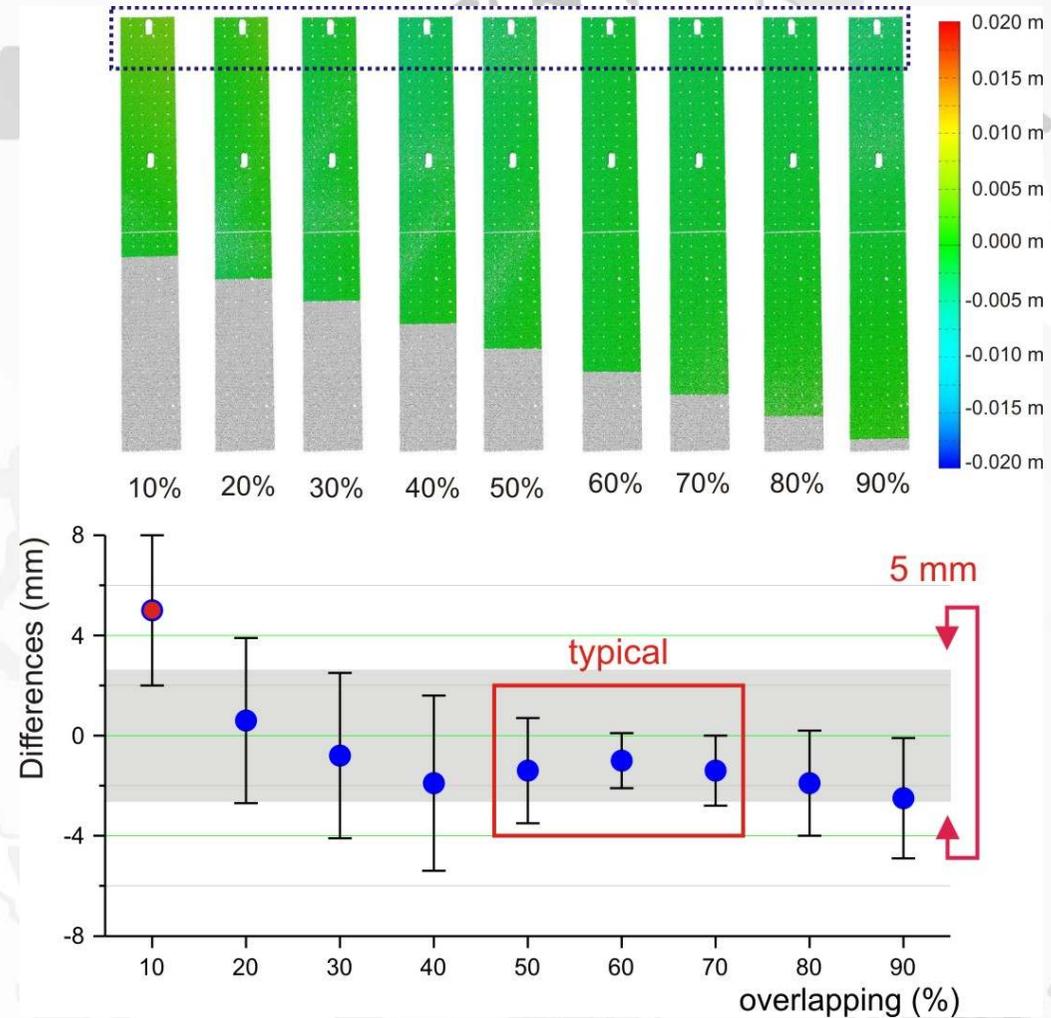
## TORRE DEGLI ASINELLI

Il rilievo delle Due Torri è stato realizzato, la prima volta, nel settembre 2010 e, per ottenere la massima copertura, sono state effettuate 19 scansioni da 6 punti di stazione distribuiti nelle vicinanze delle Torri a qualche decina di metri. Le scansioni sono state unite ed allineate per ricostruire tutta la scena utilizzando algoritmi di surface matching iterativo, che garantiscono di non introdurre errori e distorsioni apprezzabili nel risultato finale.



## TORRE DEGLI ASINELLI

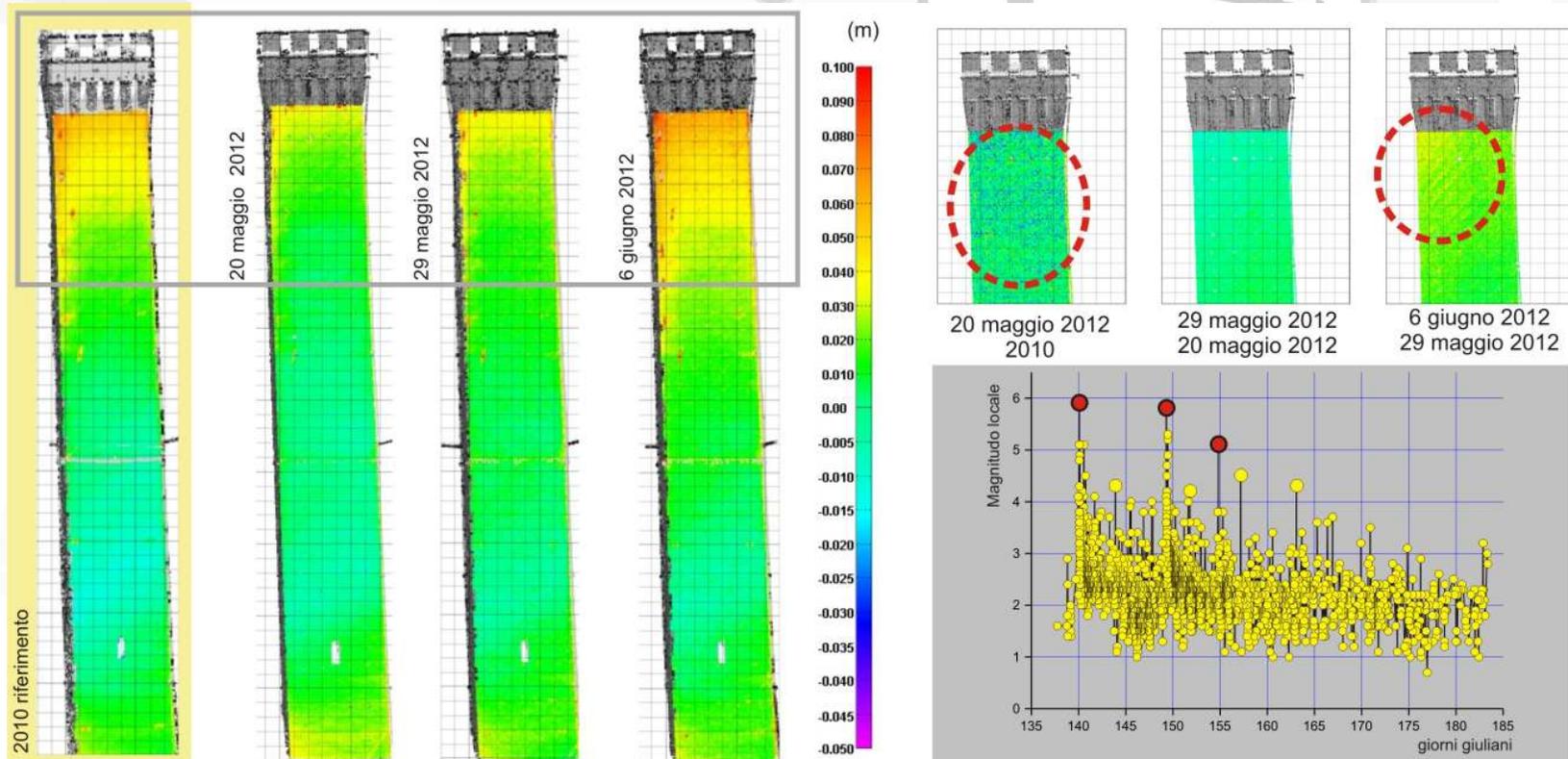
Inizialmente, per controllare se gli allineamenti fossero efficaci nonostante le difficili condizioni di acquisizione, è stato usato un procedimento di buon senso: sono state utilizzate due scansioni acquisite da due punti di stazione differenti (SA e SB); SA è stata bloccata ed utilizzata come scansione di riferimento ed SB è stata prima allineata utilizzando tutta la parte comune e poi, via via ridotta e ri-allineata con percentuali di area variabili tra 10% e 90%.



Verifica allineamento

## TORRE DEGLI ASINELLI

La torre degli Asinelli è stata ri-misurata nel 2012 con 3 campagne di misura speditive realizzate nelle prime ore del mattino, osservando i prospetti da 3 punti di stazione ad una distanza di circa 30 m dalla base della torre. I dati sono poi stati analizzati sia in termini di mappe morfologiche che in termini di confronto diretto tra le scansioni relative ad epoche diverse. Come atteso, le mappe morfologiche permettono di osservare con chiaro dettaglio una variazione dall'assetto del 2010 in seguito alle prime scosse per poi, dopo l'ultima scossa, riportarsi nelle condizioni iniziali ma con una deformazione più accentuata rispetto all'originale (2010).



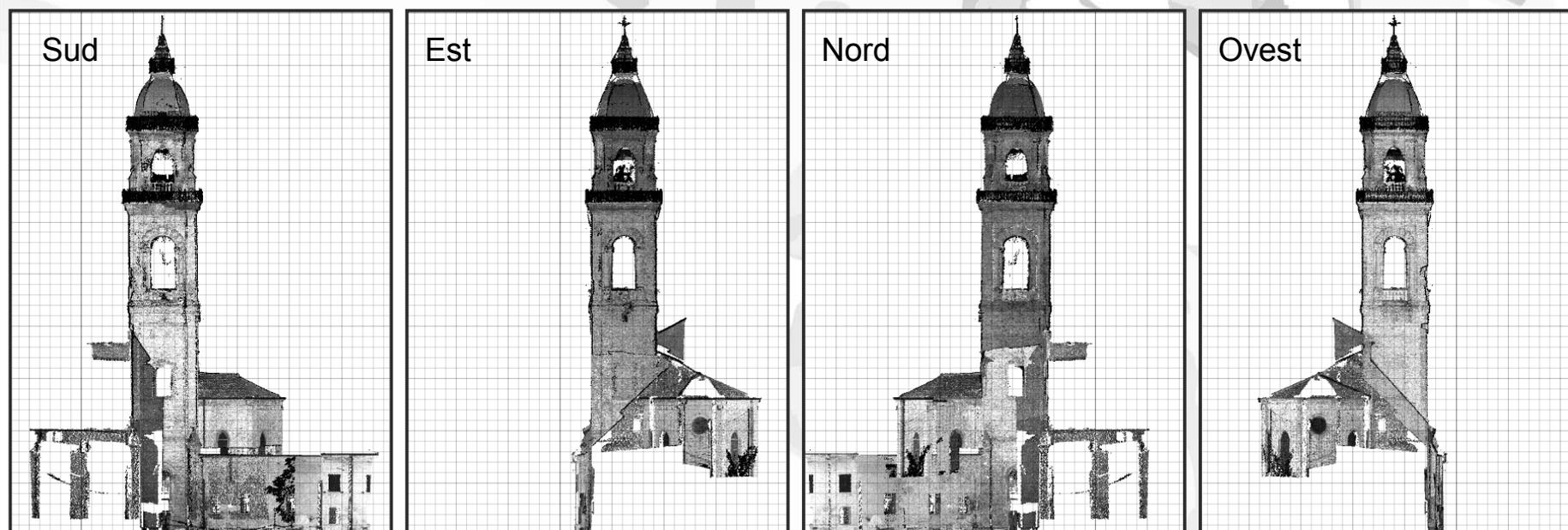
Variazione della morfologia in seguito alle principali scosse

## CAMPANILE MIRANDOLA



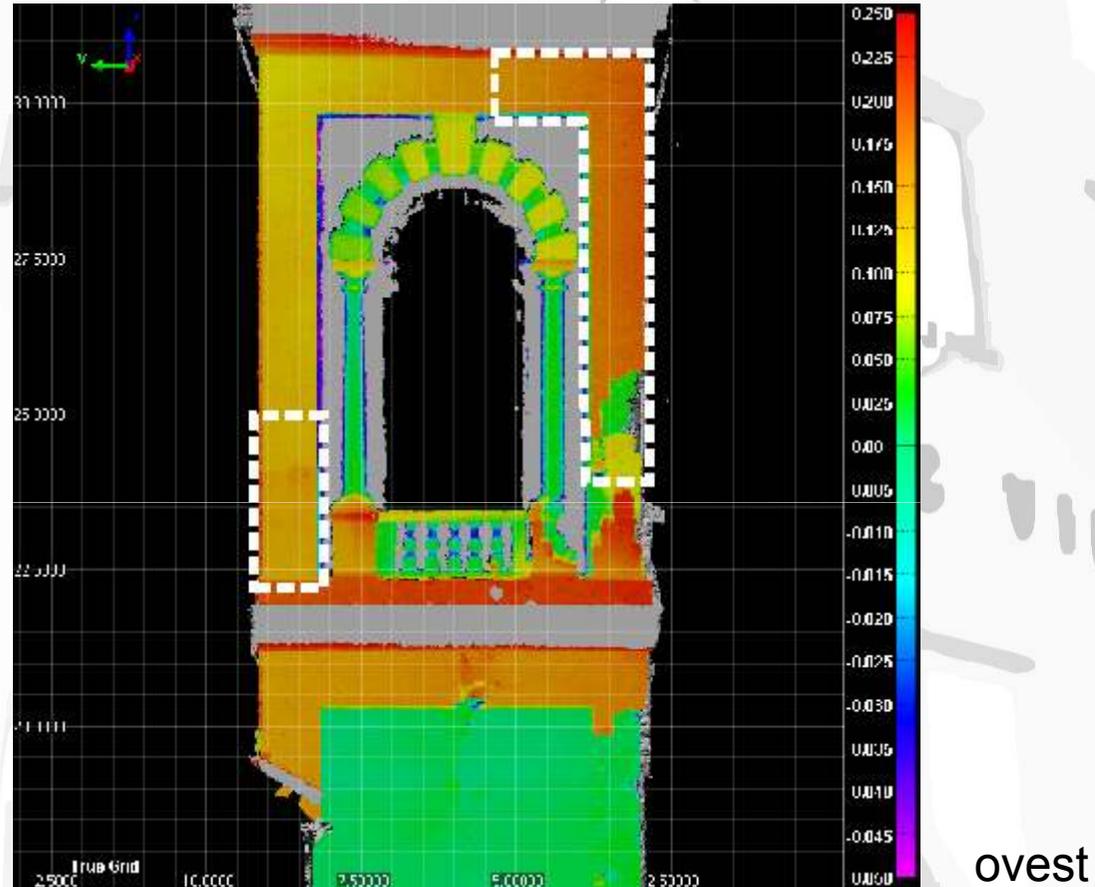
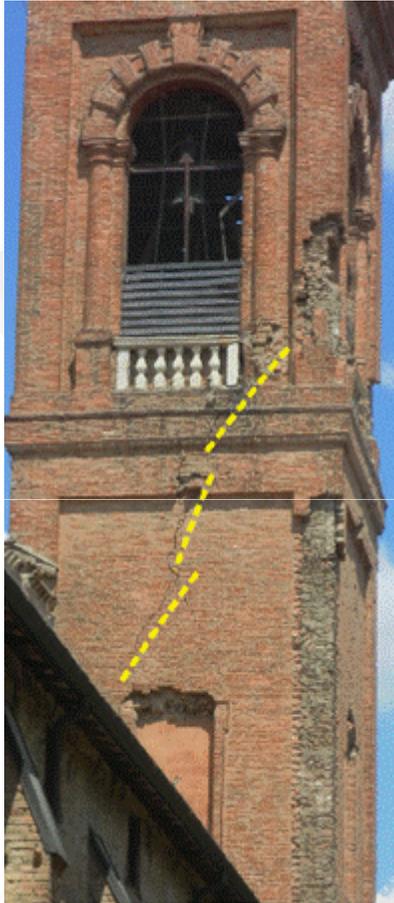
L'integrazione tra i risultati ottenuti dalle analisi TLS e le informazioni fotografiche e visive rilevate sul campo ha mostrato chiaramente effetti riconducibili ad una torsione dovuta alle numerose scosse di terremoto. In particolare la parte compresa tra quota 20 m e quota 32 m (circa) è evidentemente ruotata (in torsione) rispetto alle zone sottostanti con differenze sui 10 cm che, intese su una larghezza di circa 6.5 m corrispondono a circa 1° di rotazione

## CAMPANILE MIRANDOLA



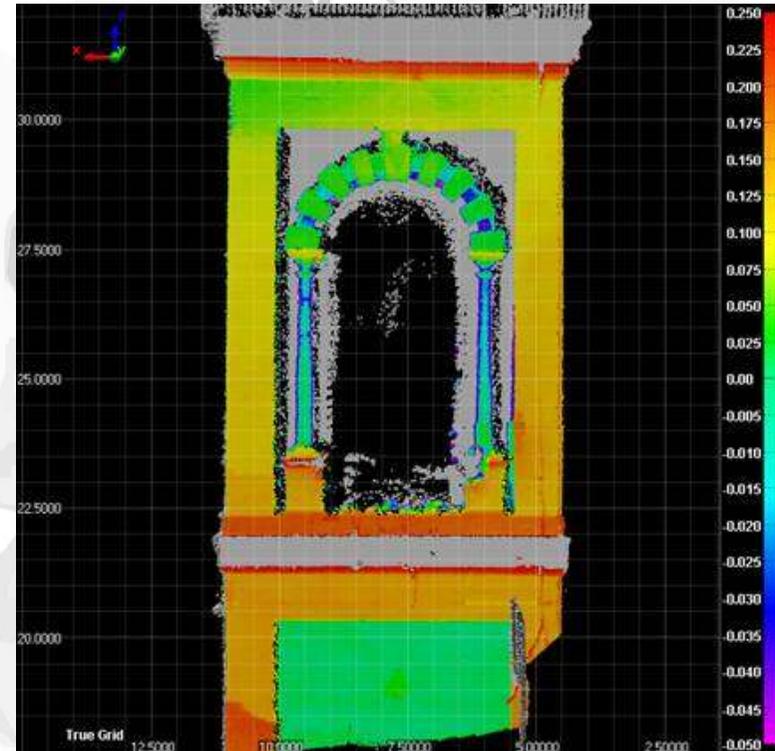
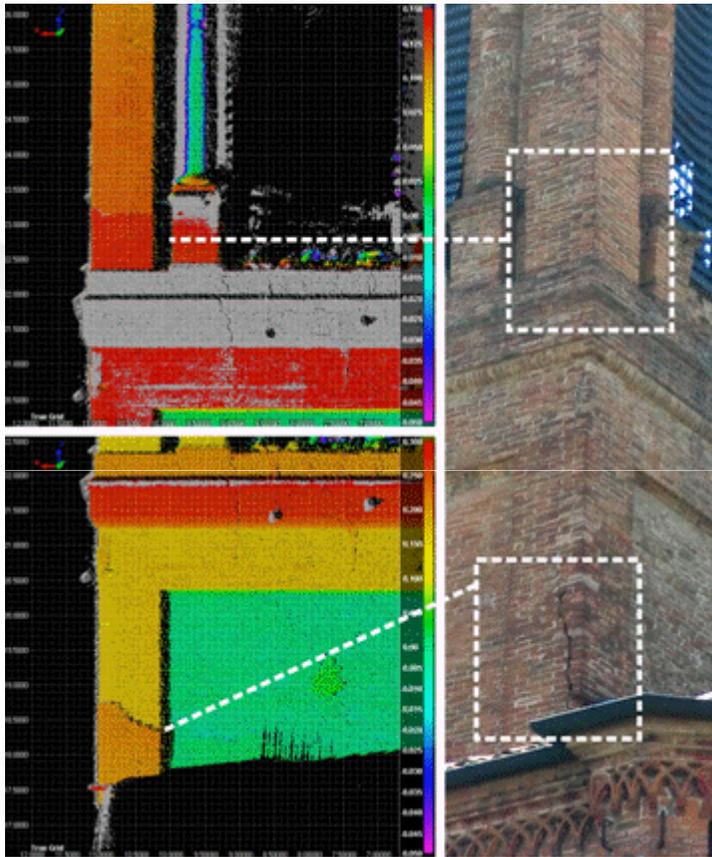
L'integrazione tra i risultati ottenuti dalle analisi TLS e le informazioni fotografiche e visive rilevate sul campo ha mostrato chiaramente effetti riconducibili ad una torsione dovuta alle numerose scosse di terremoto. In particolare la parte compresa tra quota 20 m e quota 32 m (circa) è evidentemente ruotata (in torsione) rispetto alle zone sottostanti con differenze sui 10 cm che, intese su una larghezza di circa 6.5 m corrispondono a circa 1° di rotazione

## CAMPANILE MIRANDOLA



L'integrazione tra i risultati ottenuti dalle analisi TLS e le informazioni fotografiche e visive rilevate sul campo ha mostrato chiaramente effetti riconducibili ad una torsione dovuta alle numerose scosse di terremoto. In particolare la parte compresa tra quota 20 m e quota 32 m (circa) è evidentemente ruotata (in torsione) rispetto alle zone sottostanti con differenze sui 10 cm che, intese su una larghezza di circa 6.5 m corrispondono a circa 1° di rotazione

## CAMPANILE MIRANDOLA



nord

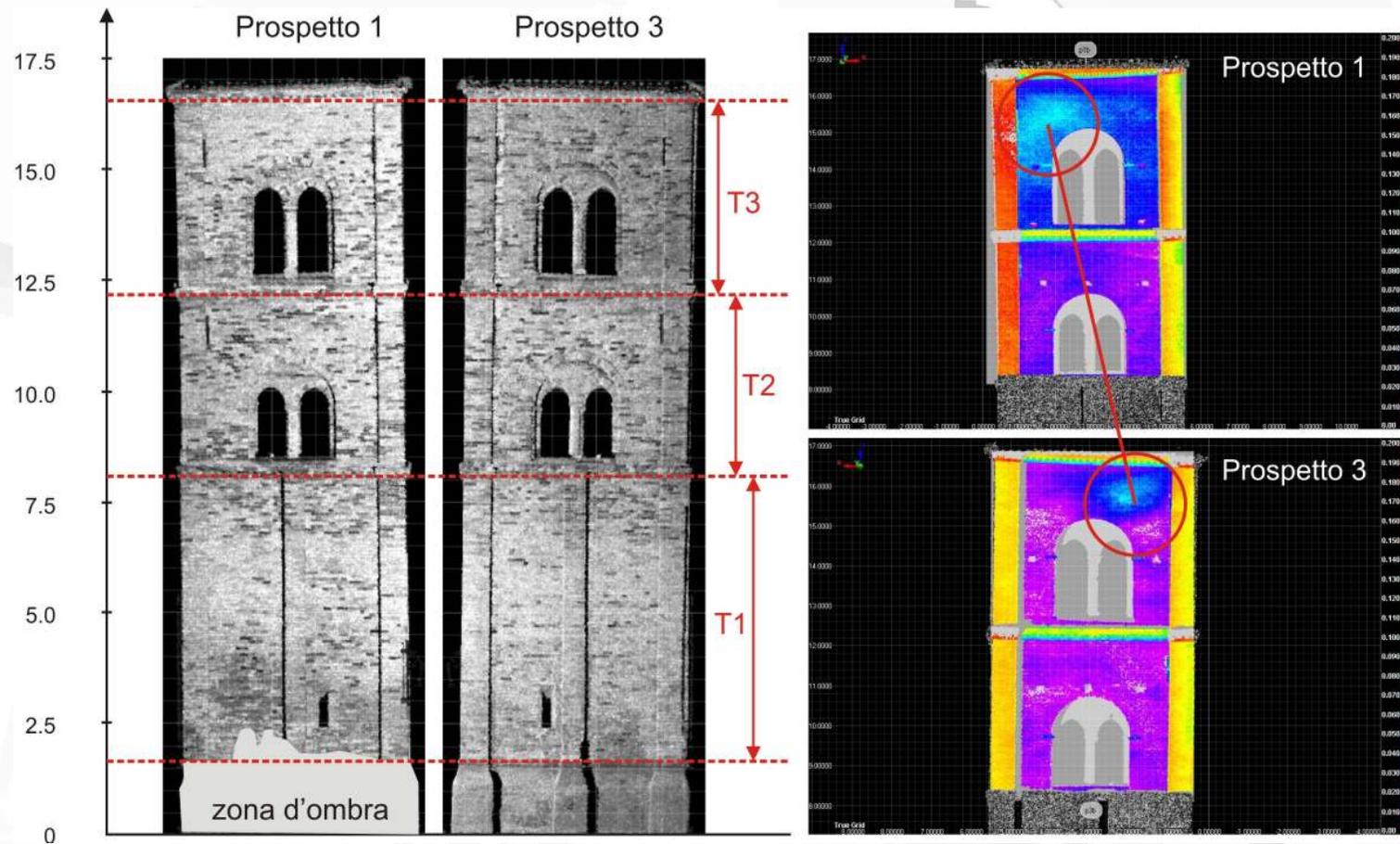
L'integrazione tra i risultati ottenuti dalle analisi TLS e le informazioni fotografiche e visive rilevate sul campo ha mostrato chiaramente effetti riconducibili ad una torsione dovuta alle numerose scosse di terremoto. In particolare la parte compresa tra quota 20 m e quota 32 m (circa) è evidentemente ruotata (in torsione) rispetto alle zone sottostanti con differenze sui 10 cm che, intese su una larghezza di circa 6.5 m corrispondono a circa 1° di rotazione

## **CAMPANILE QUARANTOLI**



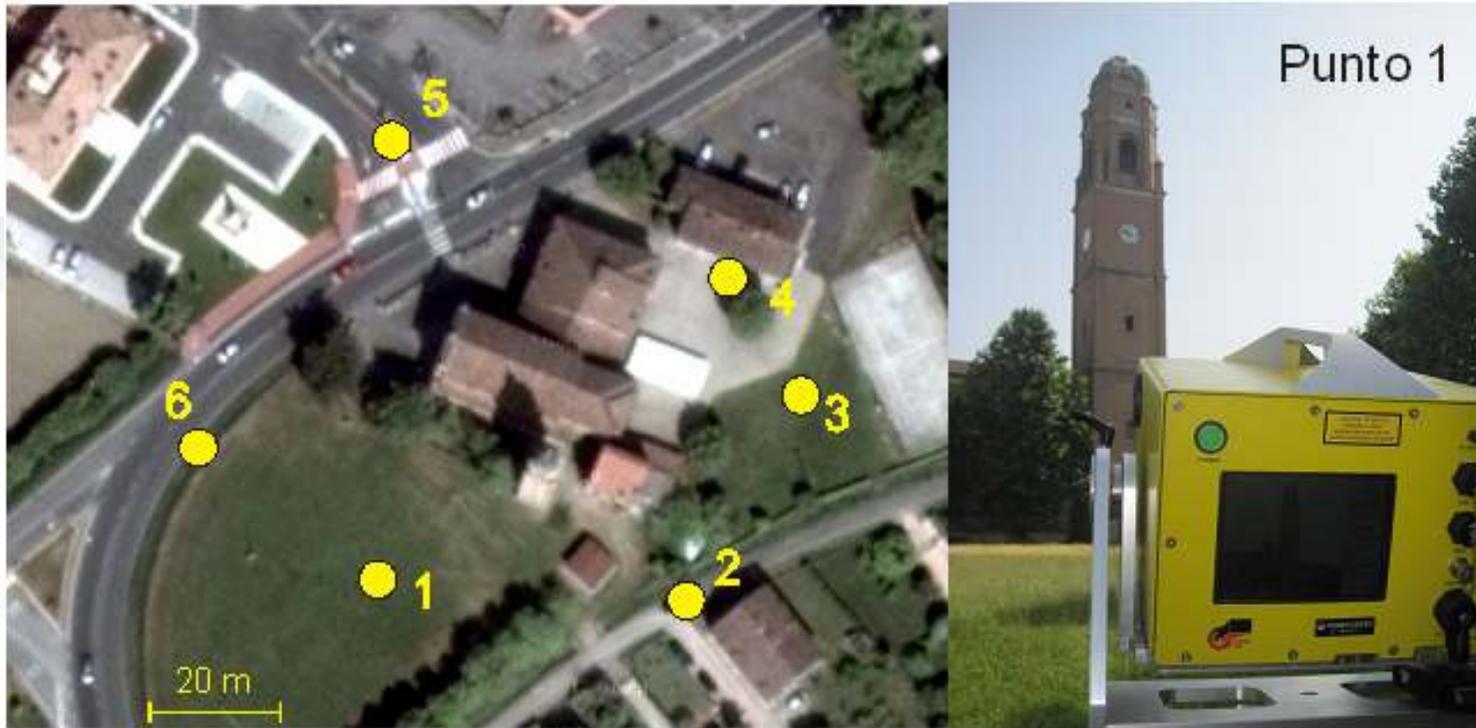
I risultati mostrano, in particolare, una deformazione nella parte alta del campanile presumibilmente dovuta all'interazione tra la struttura della cella campanaria e l'apparecchio murario, la rottura dei conci di chiave e una sorta di rotazione dell'ultima sezione rispetto alla parte sottostante.

## CAMPANILE QUARANTOLI



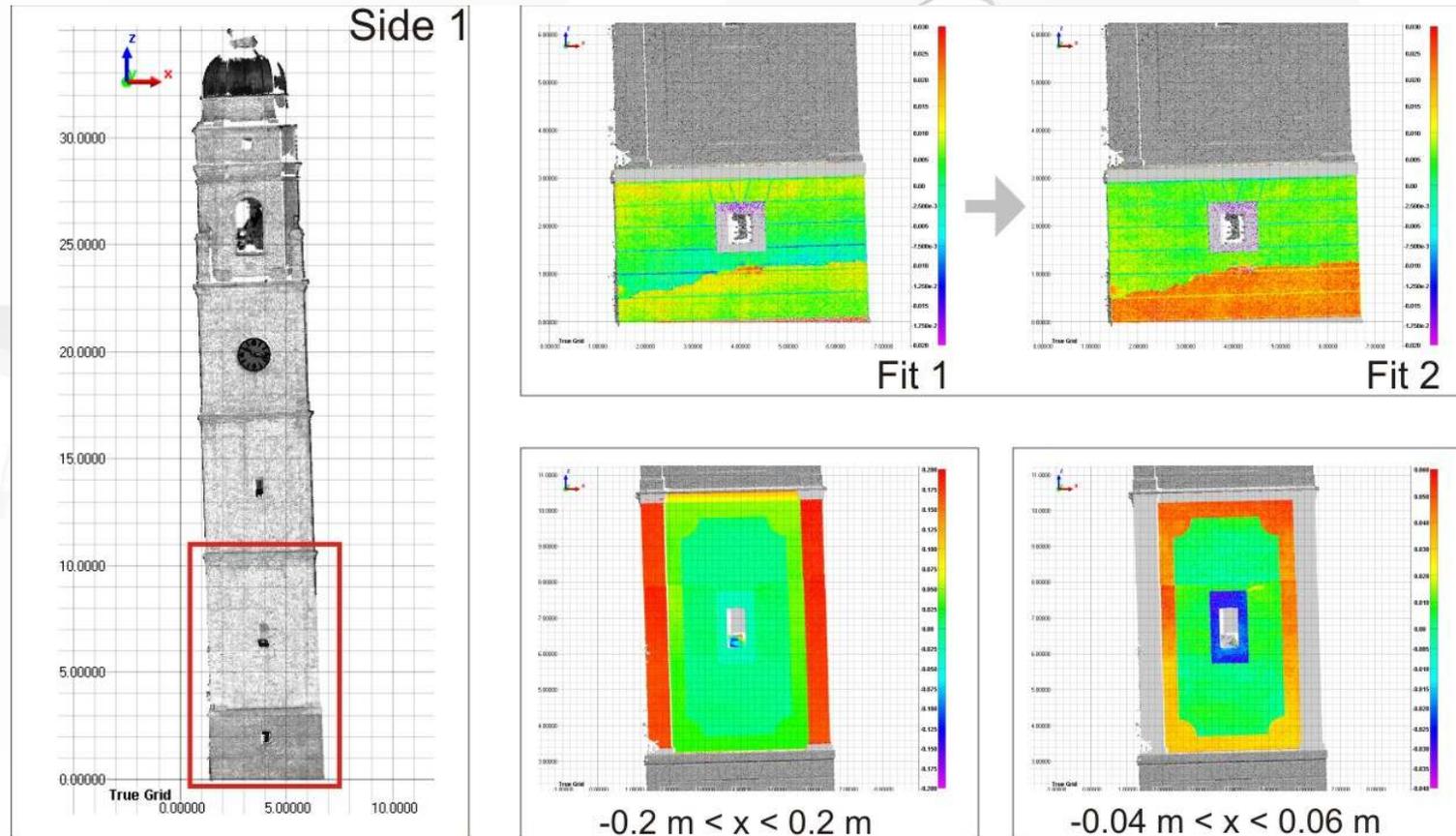
I risultati mostrano, in particolare, una deformazione nella parte alta del campanile presumibilmente dovuta all'interazione tra la struttura della cella campanaria e l'apparecchio murario, la rottura dei conci di chiave e una sorta di rotazione dell'ultima sezione rispetto alla parte sottostante.

## CAMPANILE SAN GIACOMO RONCOLE



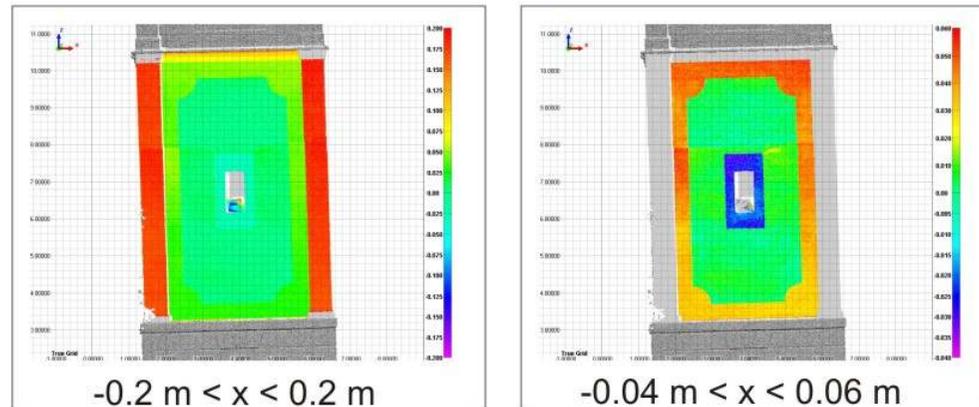
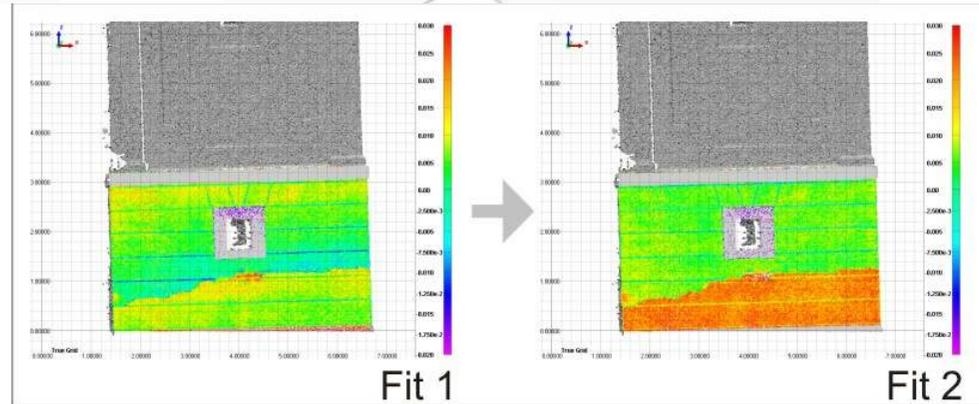
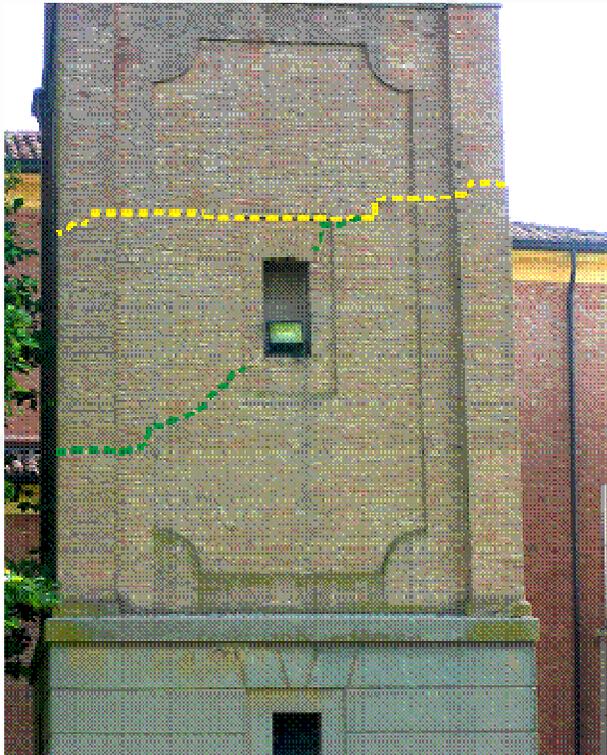
Spostamenti alla base del campanile (2 cm), risultanti dallo scorrimento sul piano di frattura osservato con una disposizione orizzontale che taglia la struttura in tutta la sua sezione. Si individuano e misurano anche fratture orizzontali sul primo tronco che, in maniera analoga, tagliano sia orizzontalmente sia in modo diagonale le pareti osservate. Infine, sono state individuate almeno tre cerniere di rotazione formatesi a causa delle oscillazioni del campanile durante le scosse che, nel suo stato attuale, mostra un fuori piombo di 1 m in direzione ovest e di 0.5 m in direzione nord, calcolato dall'altezza della cornice a metri 23-24 (circa).

## CAMPANILE SAN GIACOMO RONCOLE



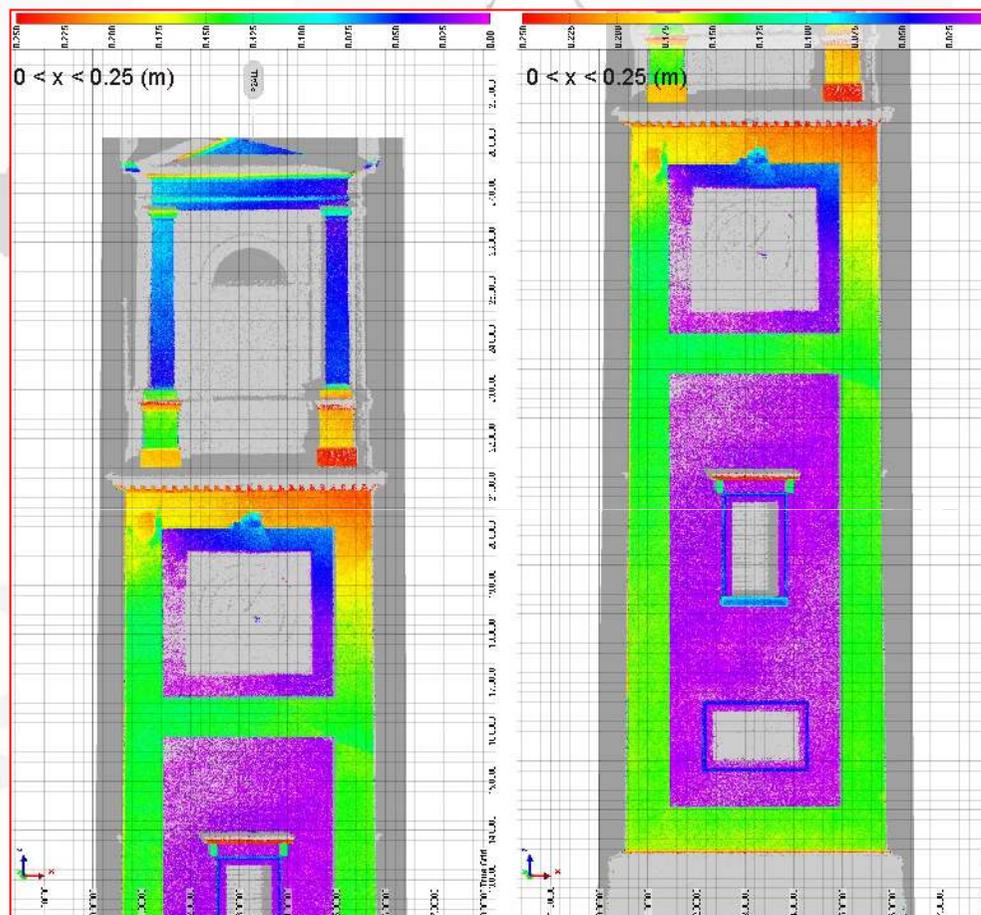
Spostamenti alla base del campanile (2 cm), risultanti dallo scorrimento sul piano di frattura osservato con una disposizione orizzontale che taglia la struttura in tutta la sua sezione. Si individuano e misurano anche fratture orizzontali sul primo tronco che, in maniera analoga, tagliano sia orizzontalmente sia in modo diagonale le pareti osservate. Infine, sono state individuate almeno tre cerniere di rotazione formatesi a causa delle oscillazioni del campanile durante le scosse che, nel suo stato attuale, mostra un fuori piombo di 1 m in direzione ovest e di 0.5 m in direzione nord, calcolato dall'altezza della cornice a metri 23-24 (circa).

## CAMPANILE SAN GIACOMO RONCOLE



Spostamenti alla base del campanile (2 cm), risultanti dallo scorrimento sul piano di frattura osservato con una disposizione orizzontale che taglia la struttura in tutta la sua sezione. Si individuano e misurano anche fratture orizzontali sul primo tronco che, in maniera analoga, tagliano sia orizzontalmente sia in modo diagonale le pareti osservate. Infine, sono state individuate almeno tre cerniere di rotazione formatesi a causa delle oscillazioni del campanile durante le scosse che, nel suo stato attuale, mostra un fuori piombo di 1 m in direzione ovest e di 0.5 m in direzione nord, calcolato dall'altezza della cornice a metri 23-24 (circa).

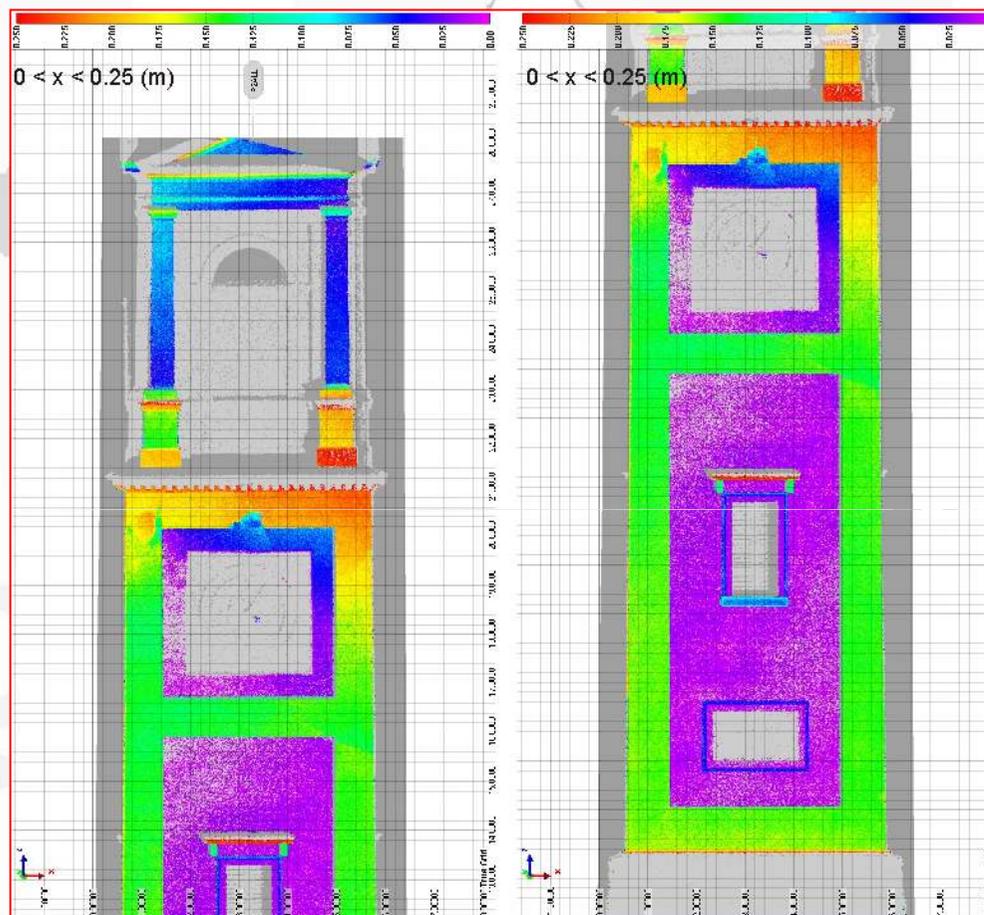
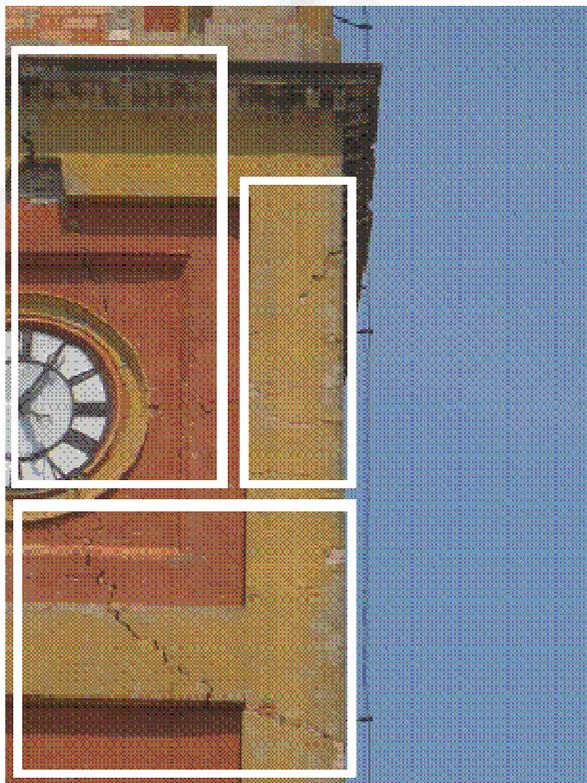
## CAMPANILE SANT'AGOSTINO



sud

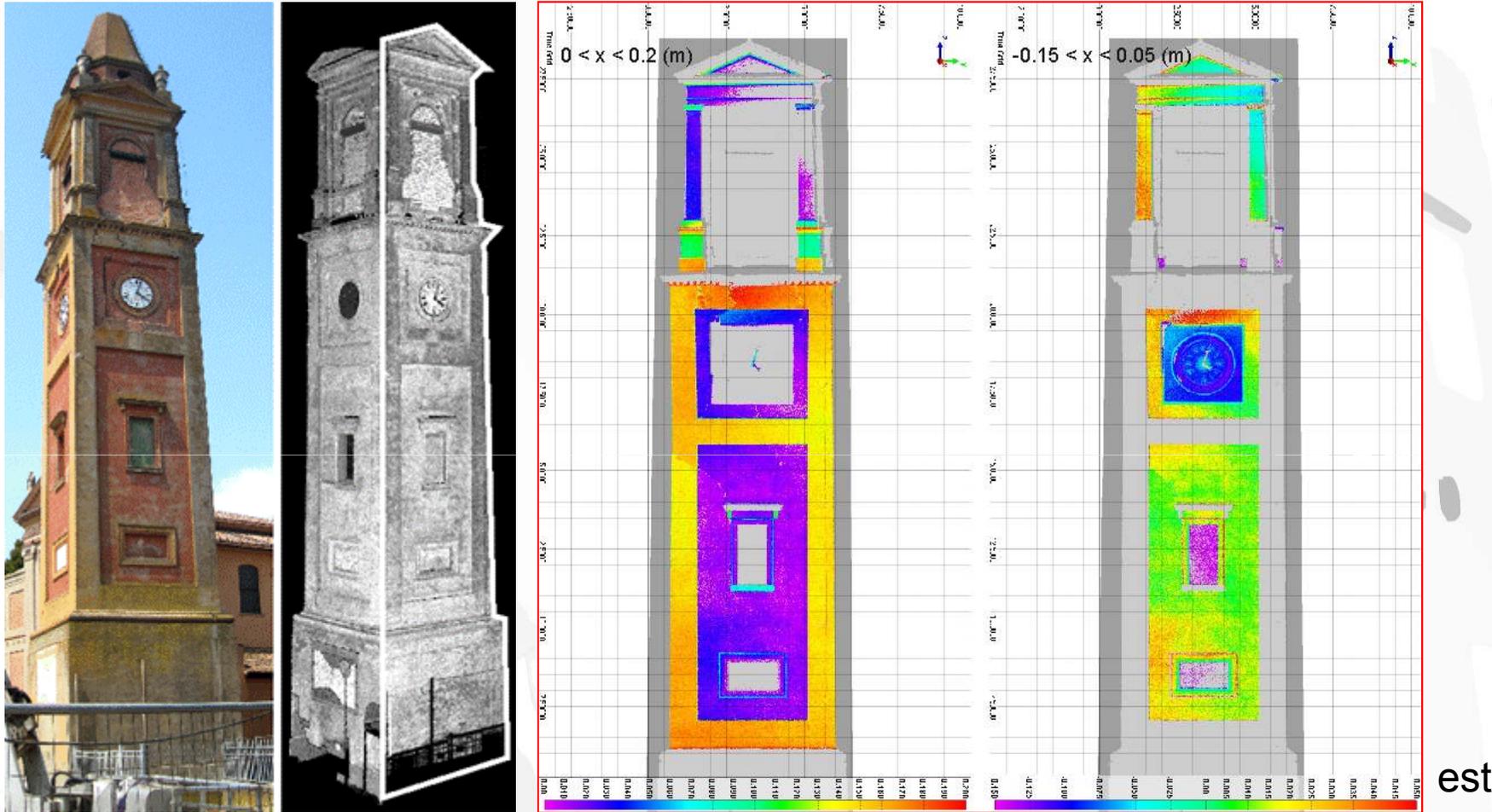
L'integrazione tra i risultati ottenuti dalle analisi laser scanning e le informazioni fotografiche hanno permesso di valutare le deformazioni nelle fasce di quota superiore ai 15 m (da terra). La parte più alta del corpo del campanile, sottostante la cella campanaria, è stata interessata da effetti di torsione o comunque di rotazione. I prospetti Ovest e Sud mostrano differenze positive nella zona sopra ai 17 m con un allineamento diagonale. Il prospetto Est, risulta molto danneggiato con fratture estese su più livelli (fino a 10 m).

## CAMPANILE SANT'AGOSTINO



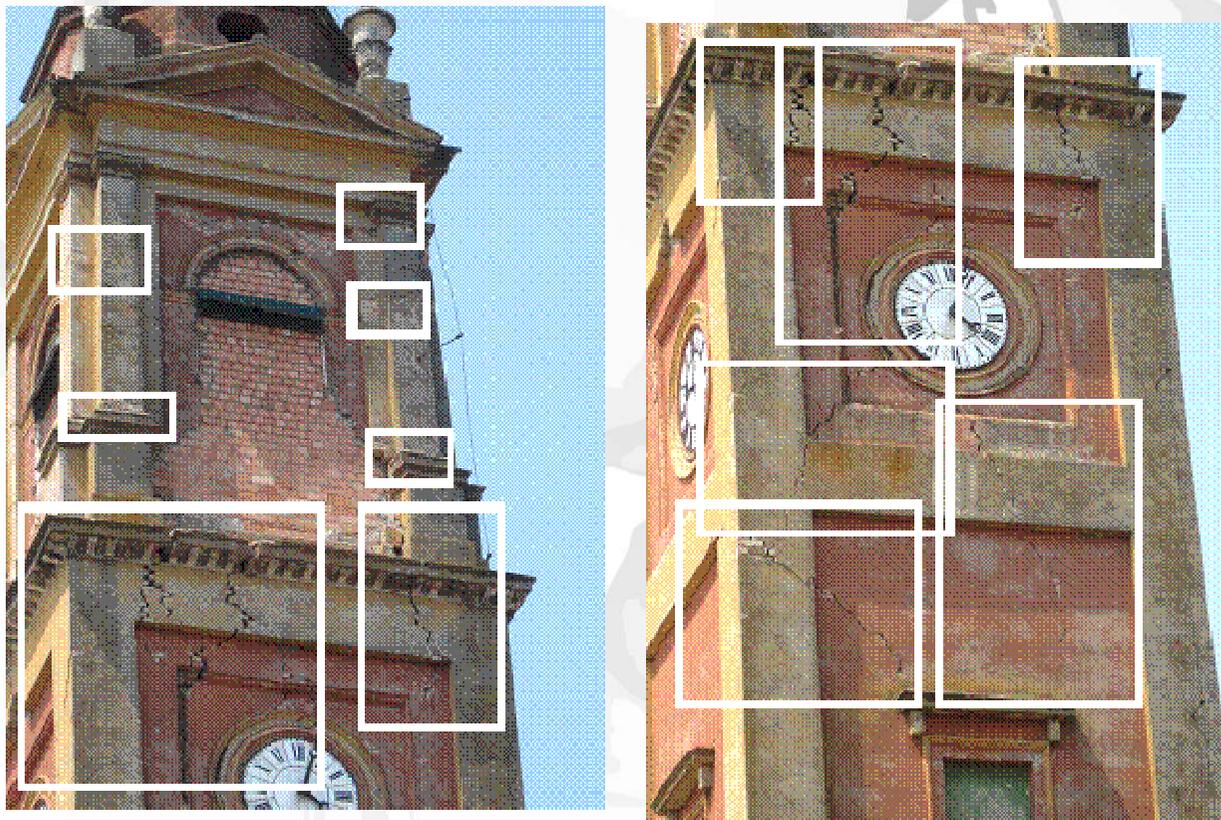
L'integrazione tra i risultati ottenuti dalle analisi laser scanning e le informazioni fotografiche hanno permesso di valutare le deformazioni nelle fasce di quota superiore ai 15 m (da terra). La parte più alta del corpo del campanile, sottostante la cella campanaria, è stata interessata da effetti di torsione o comunque di rotazione. I prospetti Ovest e Sud mostrano differenze positive nella zona sopra ai 17 m con un allineamento diagonale. Il prospetto Est, risulta molto danneggiato con fratture estese su più livelli (fino a 10 m).

## CAMPANILE SANT'AGOSTINO



L'integrazione tra i risultati ottenuti dalle analisi laser scanning e le informazioni fotografiche hanno permesso di valutare le deformazioni nelle fasce di quota superiore ai 15 m (da terra). La parte più alta del corpo del campanile, sottostante la cella campanaria, è stata interessata da effetti di torsione o comunque di rotazione. I prospetti Ovest e Sud mostrano differenze positive nella zona sopra ai 17 m con un allineamento diagonale. Il prospetto Est, risulta molto danneggiato con fratture estese su più livelli (fino a 10 m).

## CAMPANILE SANT'AGOSTINO

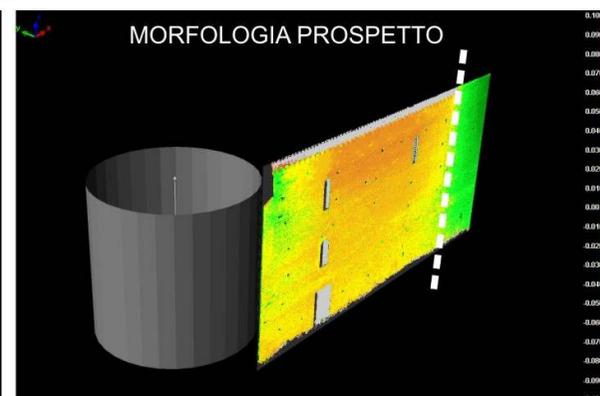
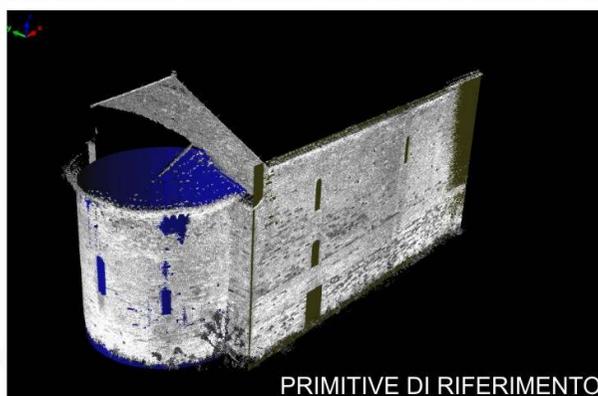
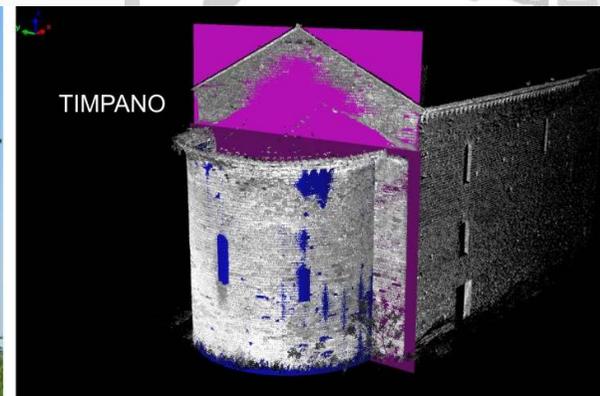


est

L'integrazione tra i risultati ottenuti dalle analisi laser scanning e le informazioni fotografiche hanno permesso di valutare le deformazioni nelle fasce di quota superiore ai 15 m (da terra). La parte più alta del corpo del campanile, sottostante la cella campanaria, è stata interessata da effetti di torsione o comunque di rotazione. I prospetti Ovest e Sud mostrano differenze positive nella zona sopra ai 17 m con un allineamento diagonale. Il prospetto Est, risulta molto danneggiato con fratture estese su più livelli (fino a 10 m).

## PIEVE DI CANTALOVO

La pieve di Cantalovo è stata rilevata a mezzo TLS per la prima volta nel 2011 con lo scopo di studiarne l'assetto al fine di riconoscere nei prospetti potenziali segni di terremoti storici, nonostante gli evidenti interventi di restauro eseguiti in varie epoche. La fase centrale di studio si è sviluppata attraverso il confronto delle nuvole di punti di macro-elementi individuati con primitive (piani e cilindro nel caso dell'abside) convenientemente scelte ed il calcolo della deviazione standard delle distanze punto-piano

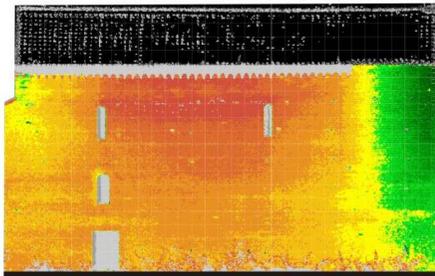


Misurata nel 2011

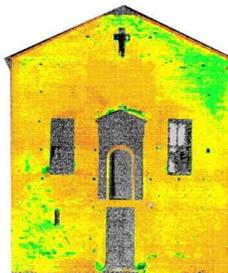
## PIEVE DI CANTALOVO

Il macro-elemento timpano, confrontato con il suo piano interpolatore mette in evidenza una zona centrale di deformazione che è riconducibile ad un classico meccanismo di "battitura" della copertura dell'abside. Il prospetto settentrionale presenta un'area di apparecchiatura muraria dai contorni netti (zona verde) dove, con ogni probabilità, si trovava il campanile ed una zona centrale di fuori piano riconducibile anche questa ad un classico meccanismo di danno dovuto alla spinta della copertura non ancorata alla muratura. Anche le cross-section realizzate a diverse altezze su tale prospetto mostrano una lenta deformazione dovuta al carico prolungato rappresentato dal campanile mentre, laddove si era ipotizzata la presenza della casa parrocchiale, un brusco mutamento che suggerisce un intervento antropico

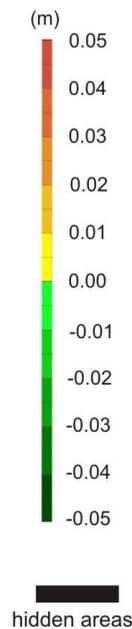
North side



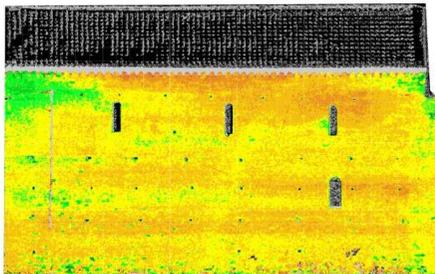
West side



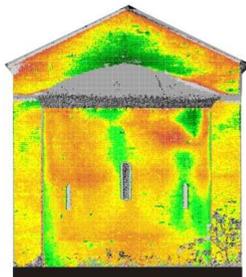
Legenda



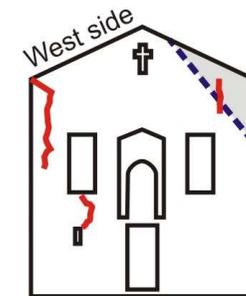
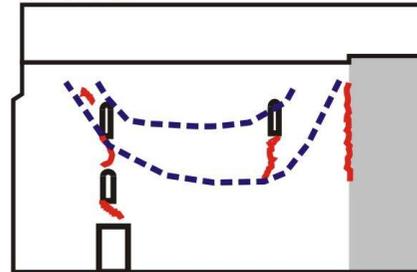
South side



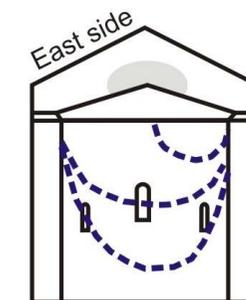
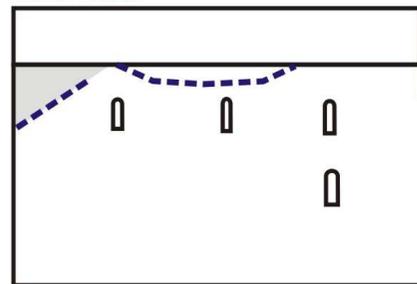
East side



North side



South side



cracks



sliding lines

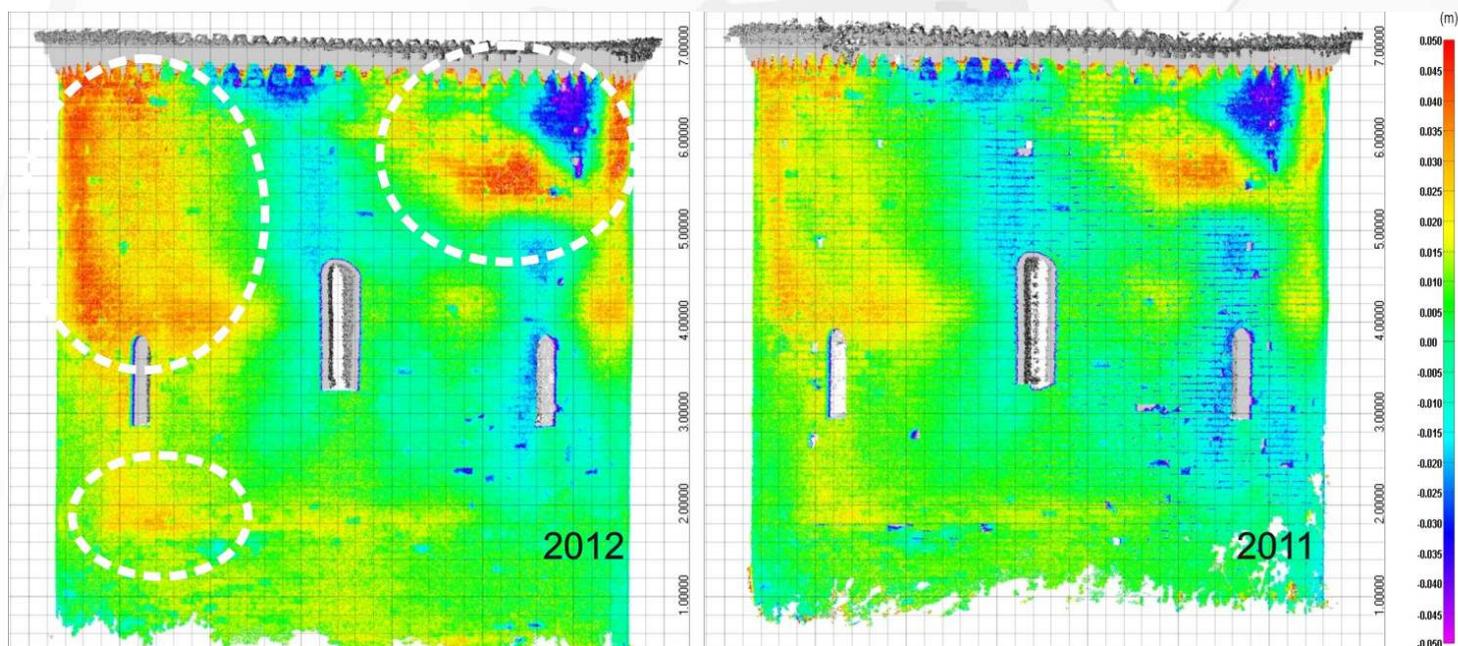
uniform difference

Mappa di deformazione dell'abside (2011)

## PIEVE DI CANTALOVO

Tra il 2011 ed il 2012 la pieve è stata consolidata ma, dopo la prima scossa di terremoto (Maggio 2012) è stato fatto un secondo rilievo che ha messo in evidenza l'accentuarsi delle deformazioni già riconosciute nell'abside. Gli altri prospetti, invece, non hanno mostrato variazioni significative.

La disponibilità di un rilievo precedente ha permesso di operare sia in termini di studio morfologico sia in termini di confronto di modelli multi-temporali. I risultati mostrano che, nonostante il rumore assai più elevato renda più difficile la lettura della mappa delle differenze tra scansioni, le evidenze di un peggioramento dello stato deformativo dell'elemento abside sono evidenti.



Confronto morfologia 2012 e 2011 e mappa delle differenze

## ***Conclusioni***

La metodologia proposta, basata sui sistemi VLR-TLS permette di ottenere:

- 1) Dati significativi e facilmente leggibili da ogni tipo di figura professionale
- 2) Informazioni precise sullo stato di deformazione degli edifici e guidare gli interventi per il monitoraggio e di consolidamento
- 3) Risposta tempestiva (12-24 h)
- 4) Sicurezza per gli operatori
- 5) Assicurare **efficienza efficacia ed economicità**



**Grazie per l'attenzione!**

