

Il rilievo laser scanner delle Due Torri

La città FRAGILE



Arianna Pesci - Enzo Boschi

Elena Bonali

Giuseppe Casula

Emanuela Guidoboni

INGV Sezione di Bologna

DAPT, Università Bologna

INGV Roma



Il rilievo laser scanner delle Due Torri

La città **FRAGILE**



Osservazione del territorio
Subsidenza
Misure GPS
Informazioni storiche

Rilievo Laser Scanner



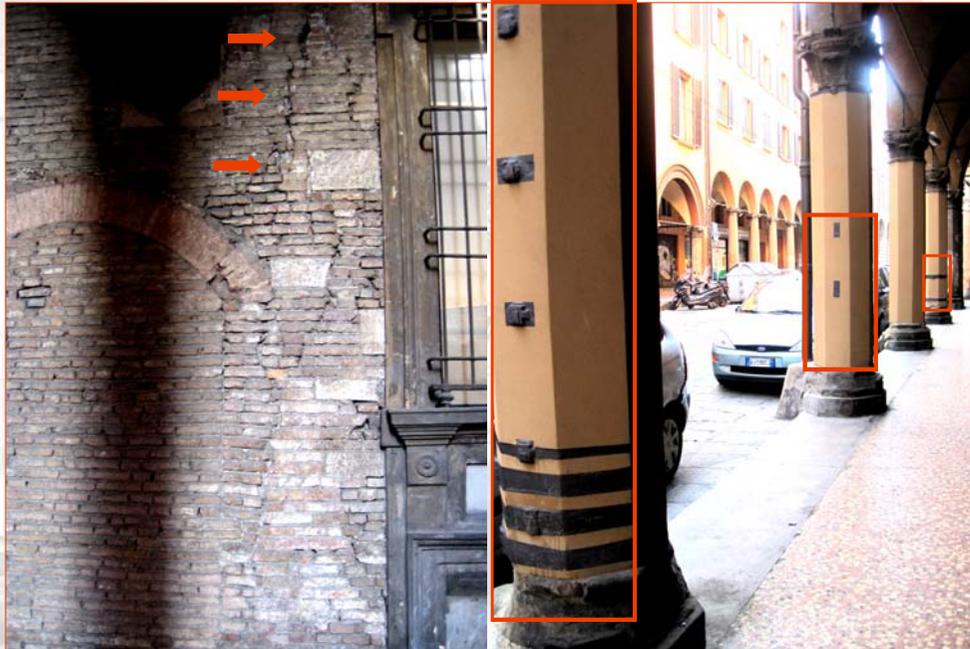
Osservazioni dirette sul territorio - Via Zamboni



Osservazioni dirette sul territorio – Piazza Verdi



Osservazioni dirette sul territorio – Strada Maggiore



Osservazioni dirette sul territorio – Piazza della Mercanzia



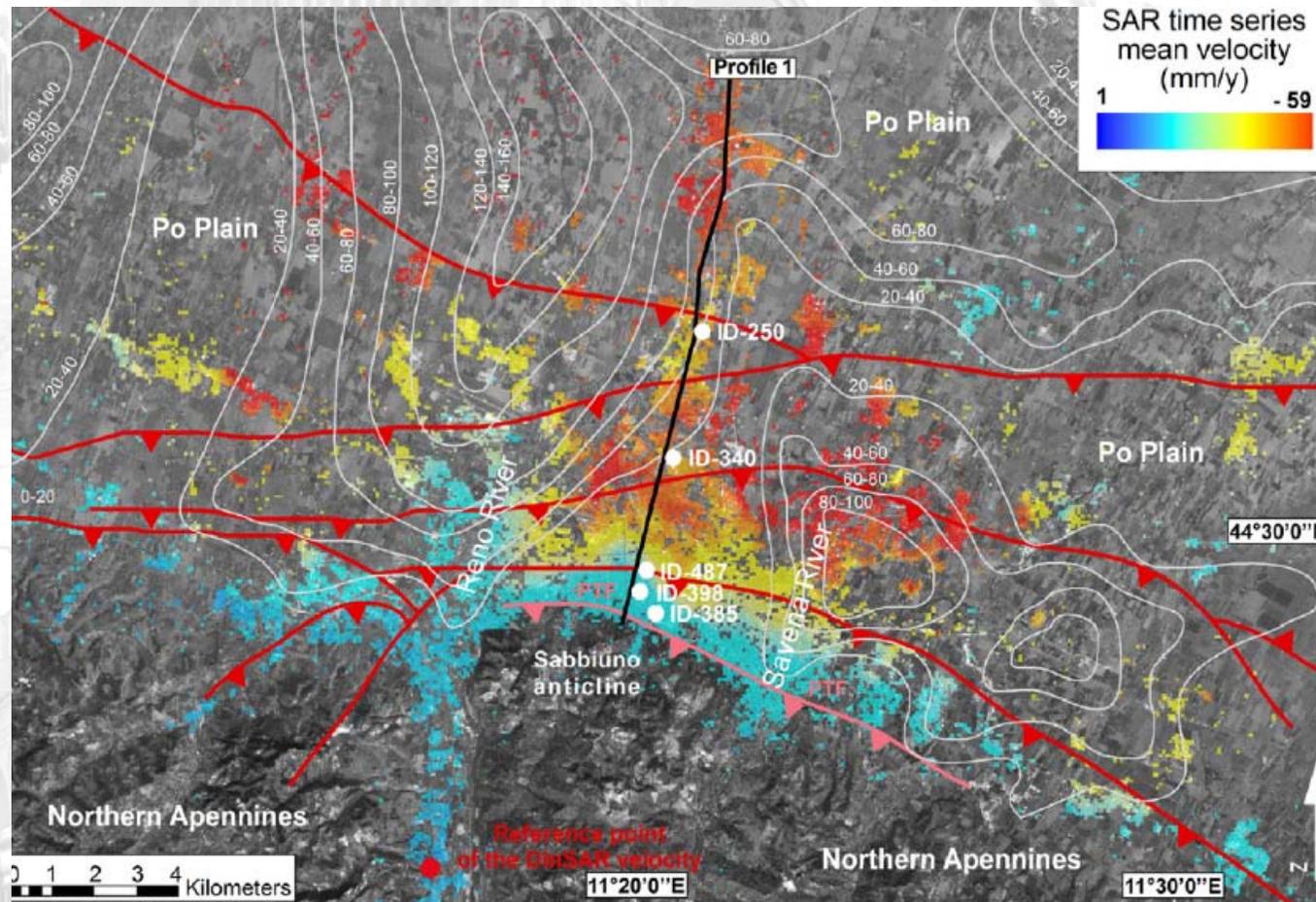
Osservazioni dirette sul territorio – Le Due Torri



SUBSIDENZA di BOLOGNA

ELABORAZIONE IMMAGINI SATELLITARI - Tecnica: InSAR/SBAS 1992-2000

Tassi di abbassamento da 0 a -6 cm/y



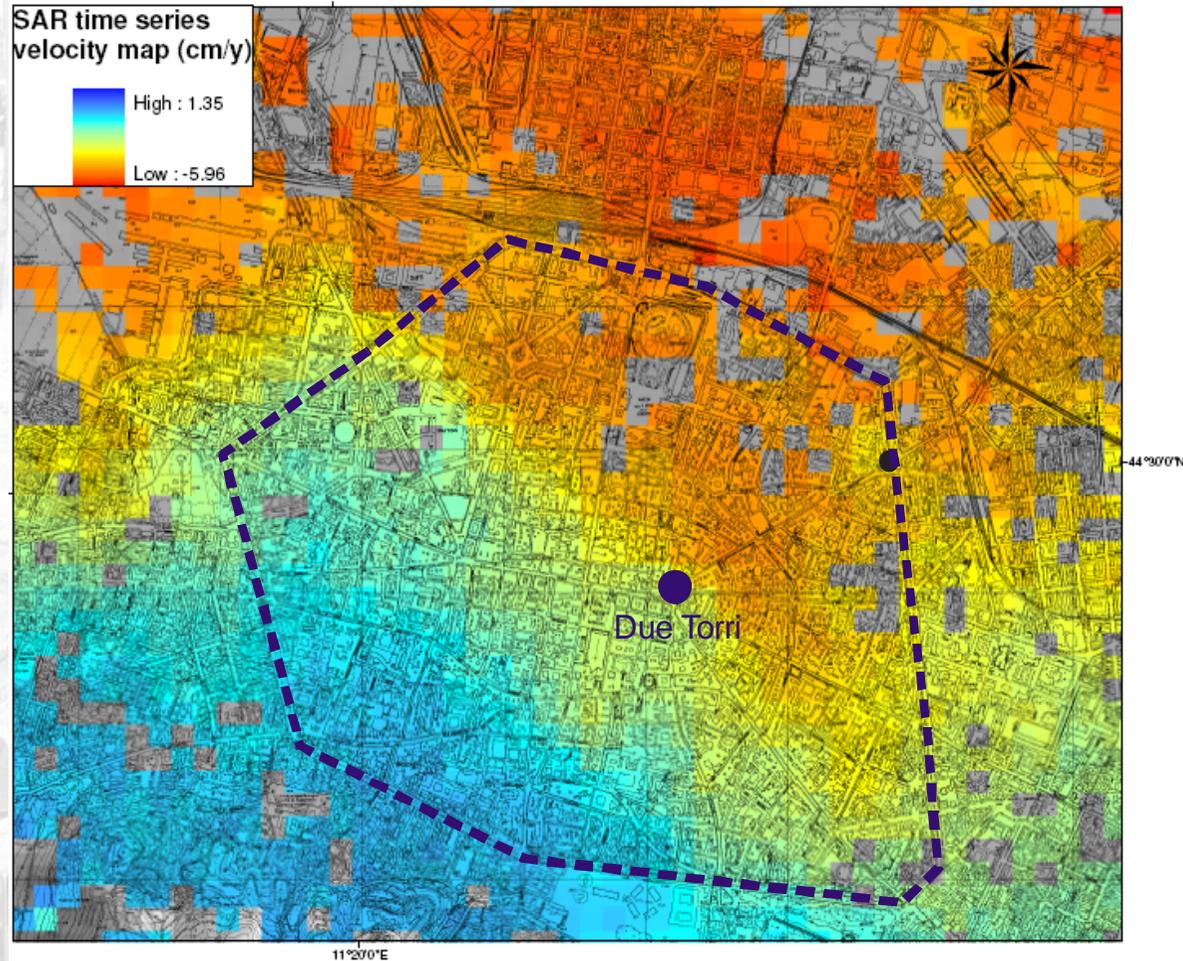
Stramondo, S., Saroli, M., Tolomei, C., Moro, M., Doumaz, F., Pesci, A., Loddo, F., Baldi, P., Boschi, E., 2007. **SURFACE MOVEMENTS in Bologna (Po Plain - Italy) and in the detected from multitemporal DINSAR**. Remote Sensing of Environment, 110, 304-316.



SUBSIDENZA di BOLOGNA

ELABORAZIONE IMMAGINI SATELLITARI - Tecnica: InSAR/SBAS 1992-2000

Forte gradiente – Variazioni relative da 0 a -3 cm/y



Stramondo, S., Saroli, M., Tolomei, C., Moro, M., Doumaz, F., Pesci, A., Loddo, F., Baldi, P., Boschi, E., 2007. **SURFACE MOVEMENTS in Bologna (Po Plain - Italy) and in the detected from multitemporal DINSAR.** Remote Sensing of Environment, 110, 304-316.

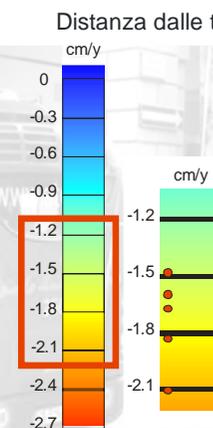
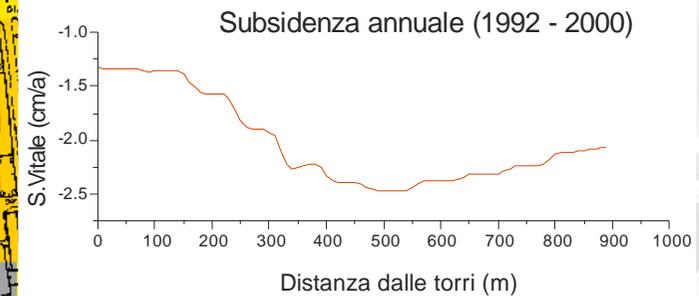
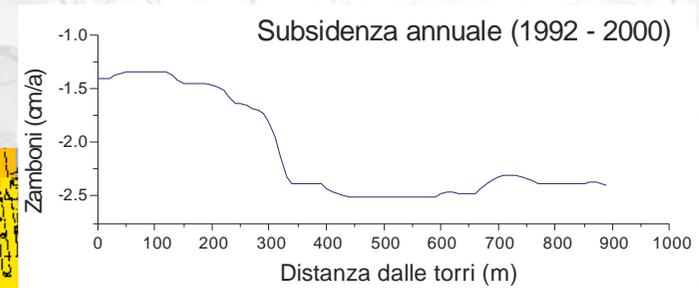
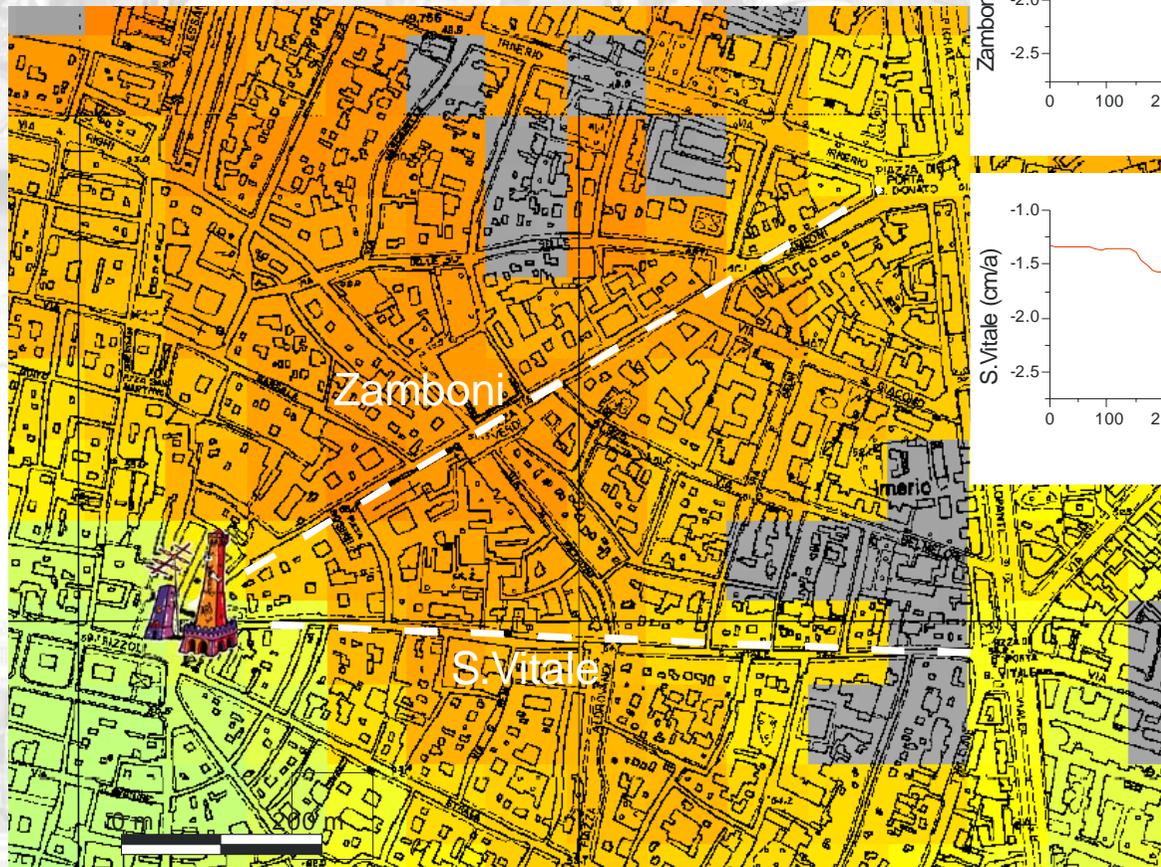


SUBSIDENZA di BOLOGNA

ELABORAZIONE IMMAGINI SATELLITARI - Tecnica: InSAR/SBAS 1992-2000

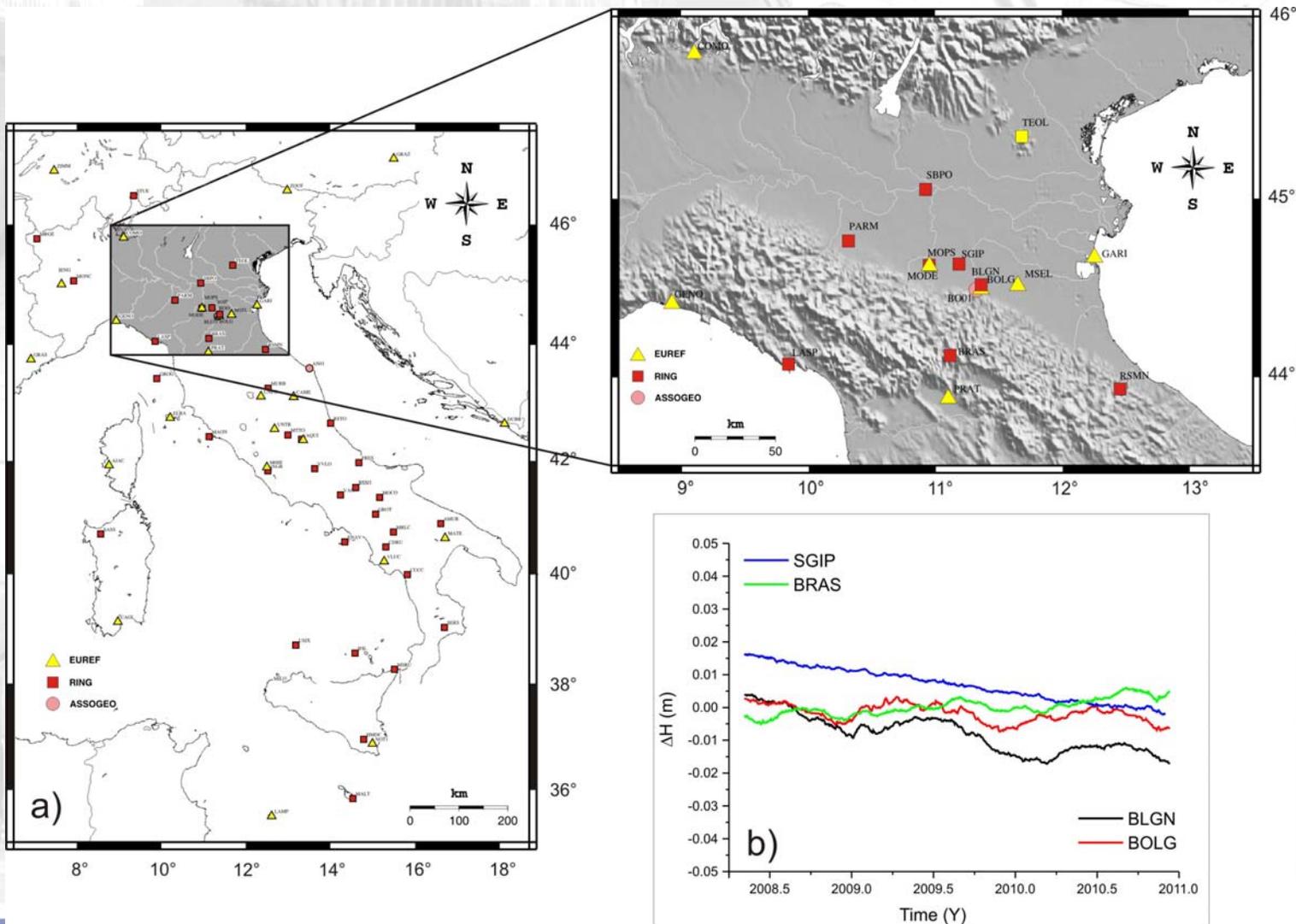
Forte gradiente – Variazioni relative da 0 a -3 cm/y

Abbassamento lungo via Zamboni e S.Vitale:
da -1.3 a -2.5 cm/y



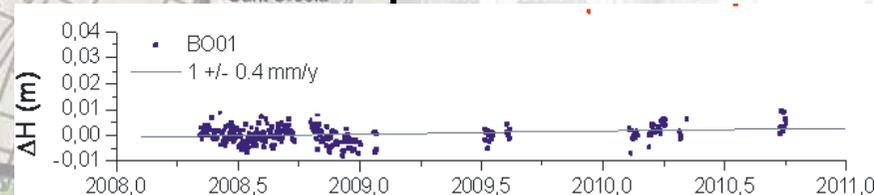
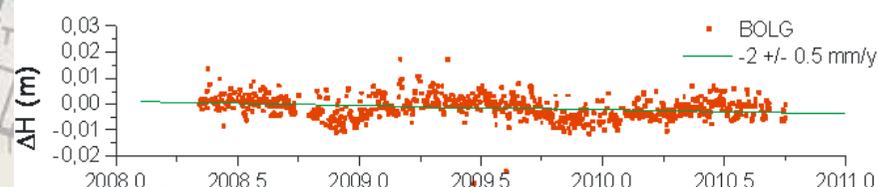
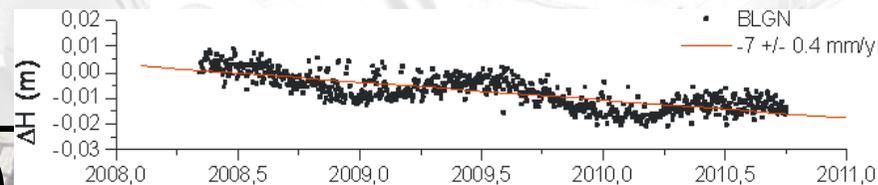
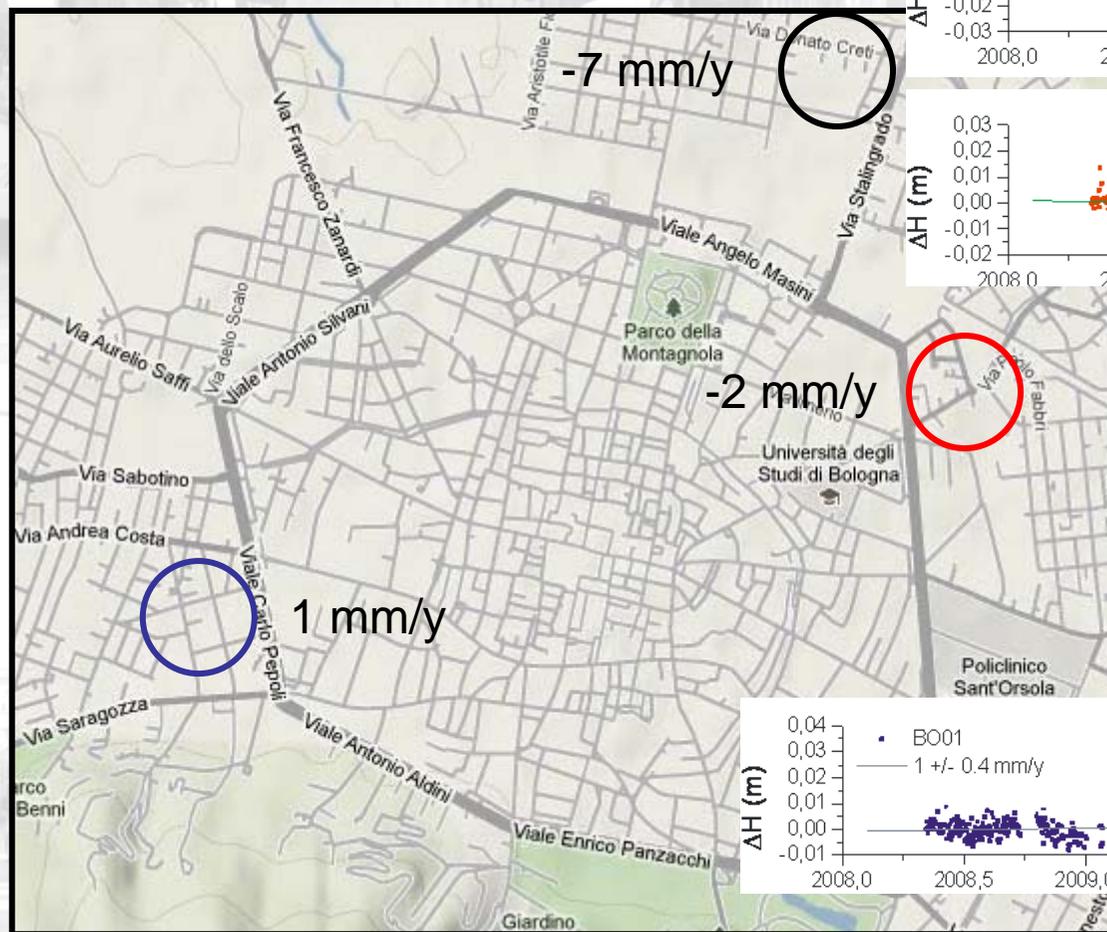
ELABORAZIONE DATI GPS 2008-2011

Eterogeneità della regione ER



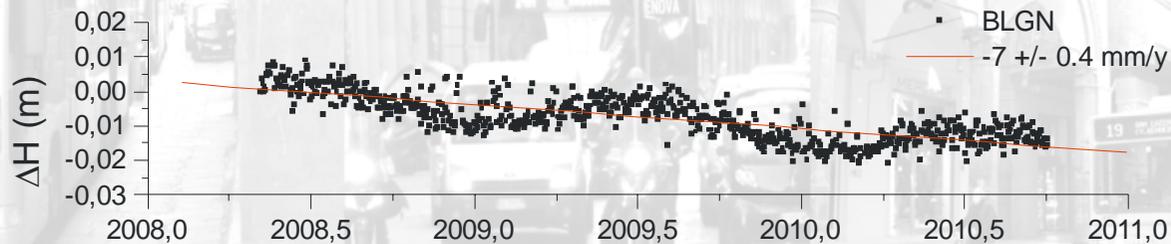
ELABORAZIONE DATI GPS 2008-2011

Si osservano riduzioni rispetto ai valori del decennio precedente.



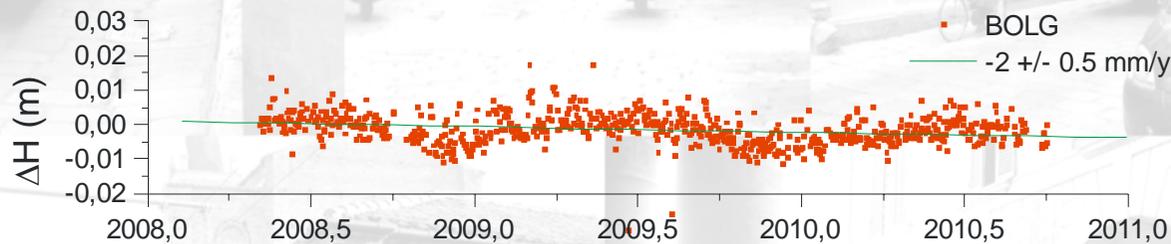
ELABORAZIONE DATI GPS 2008-2011

Si osservano riduzioni rispetto ai valori del decennio precedente.



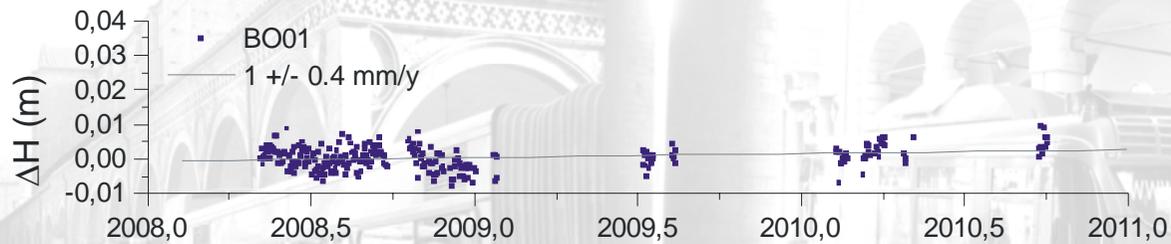
-7 mm/y

P.zza Unità
INGV



-2 mm/y

P.ta S.Donato
UNIBO



1 mm/y

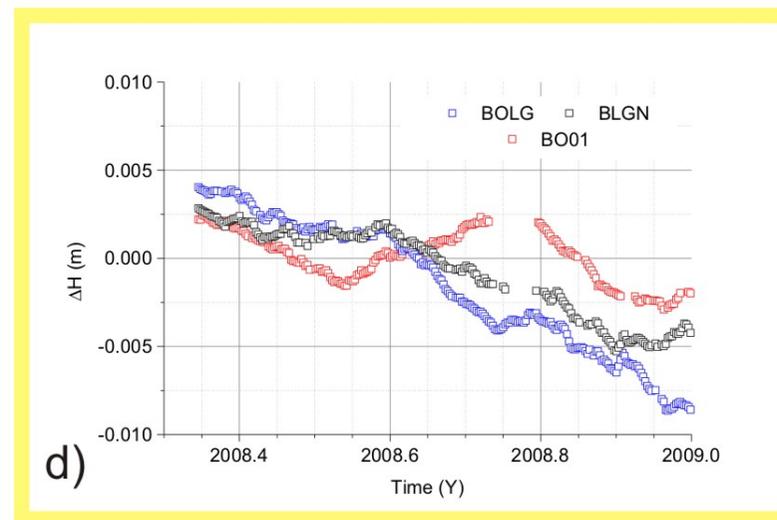
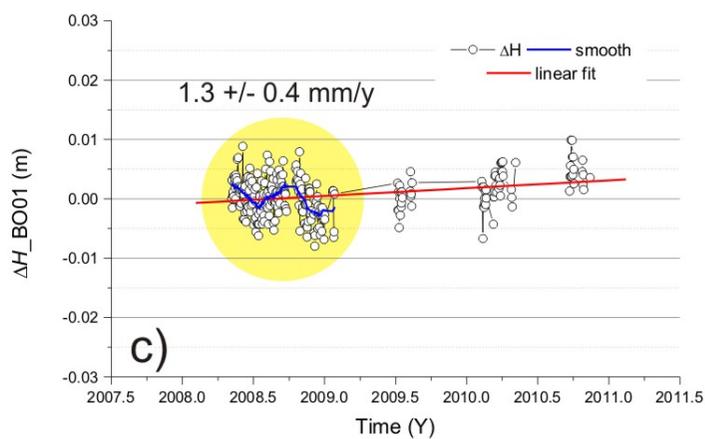
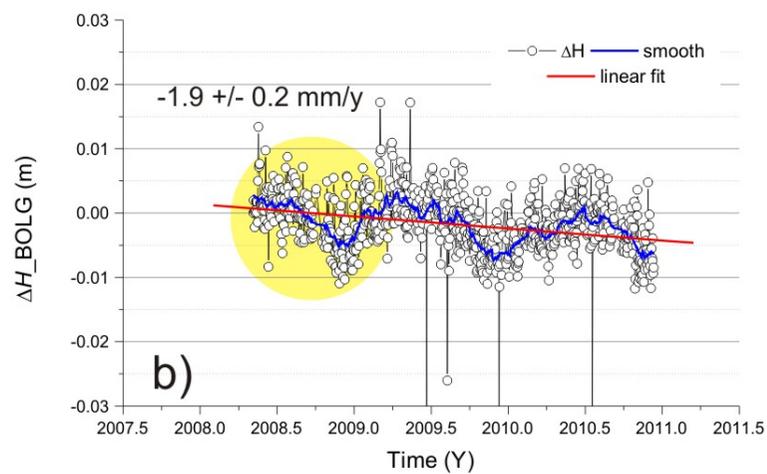
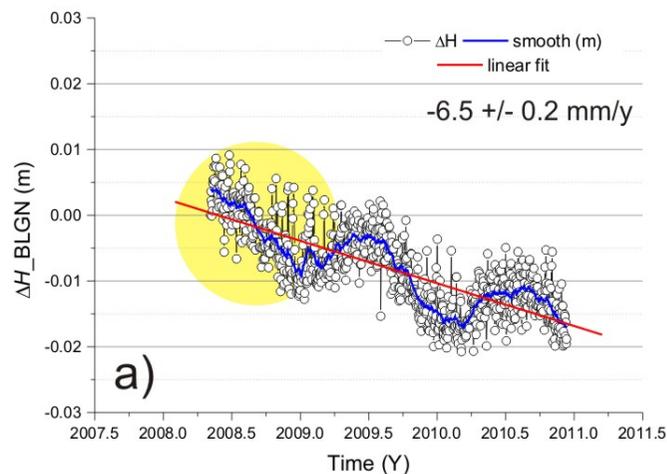
P.ta Saragozza
ASSOGEO

Baldi, P., Casula, B., Cenni, N., Loddo, F., Pesci, A., 2009. **GPS-based monitoring of land subsidence in the Po Plain (Northern Italy)**. Earth and Planetary Science Letters. 288, 1-2, 204-212.



ELABORAZIONE DATI GPS 2008-2011

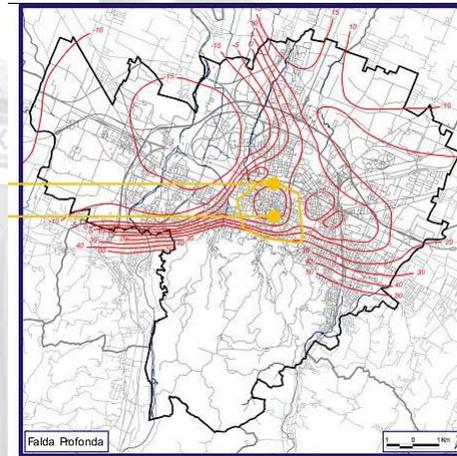
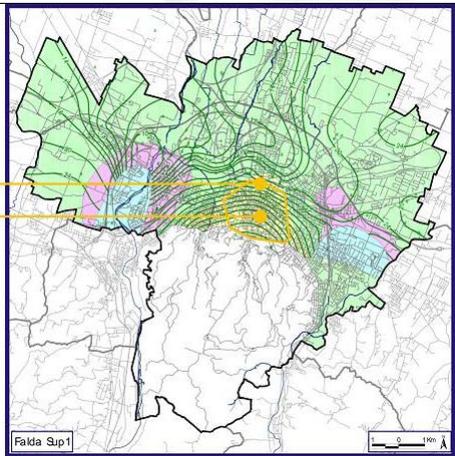
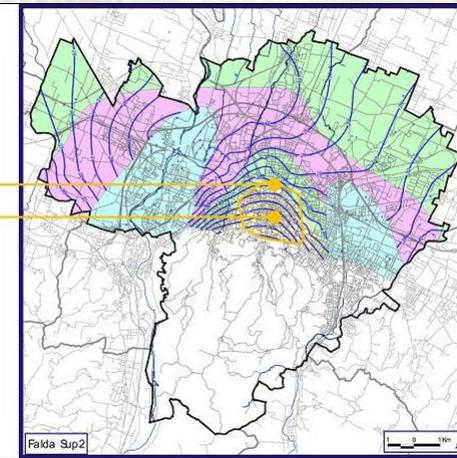
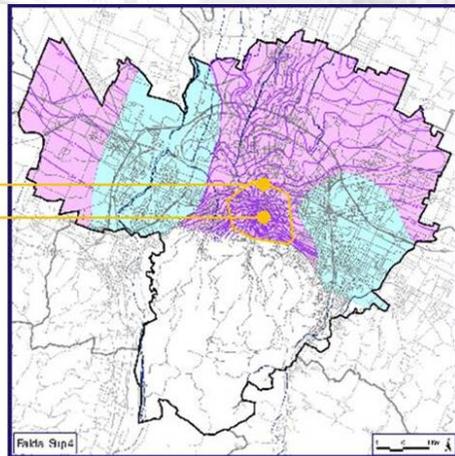
Si osservano riduzioni rispetto ai valori del decennio precedente.



ATLANTE ACQUIFERI

Sistema complesso multi falda

50 m
72 m



Falde acquifere

Struttura del sistema acquifero

- Isopieze falda Sup4
- Isopieze falda Sup2
- Isopieze falda Sup1
- Isopieze falda Profonda
- Punti di misura

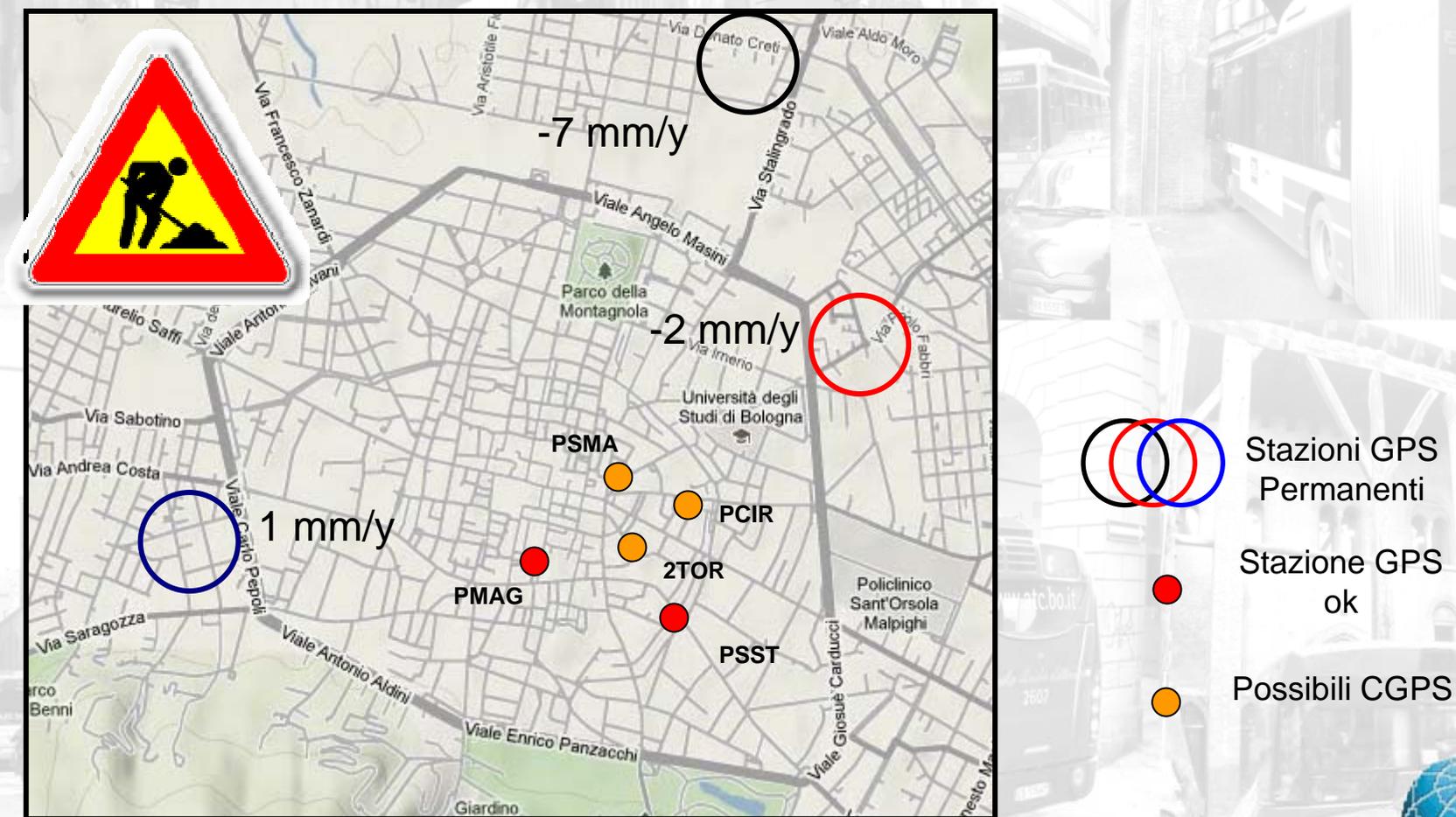
Caratteristiche idrogeologiche

- Acquifero insaturo
- Falda in pressione
- Falda libera
- Settore d'interconoide
- Confine comunale



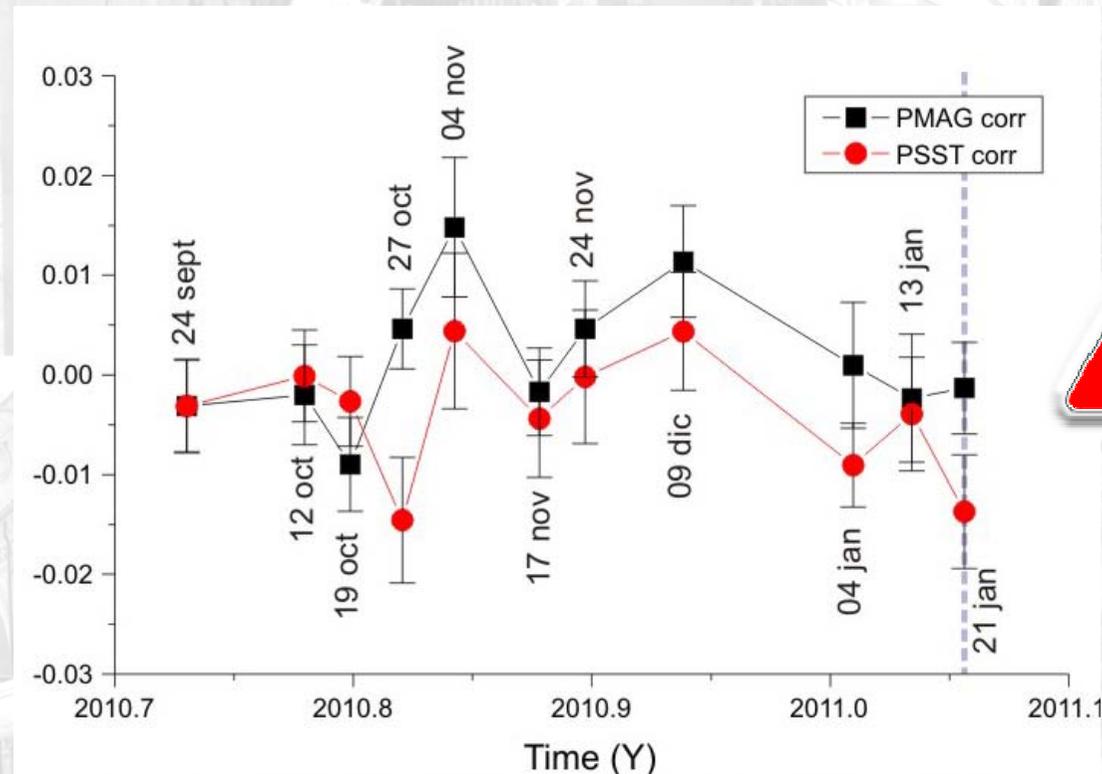
ELABORAZIONE DATI GPS 2010 - 2011

SPERIMENTAZIONE METODI GPS AD ALTA PRECISIONE PER STAZIONI NON PERMANENTI (CENTRO CITTÀ)



ELABORAZIONE DATI GPS 2010 - 2011

SPERIMENTAZIONE METODI GPS AD ALTA PRECISIONE
PER STAZIONI NON PERMANENTI (CENTRO CITTÀ)



Pesci A., Casula G., Teza G., Bonali E., Boschi E., 2011. **A new method for the high-accuracy GPS-based detection of vertical movements.** GPS Solutions, Accepted in minor revision.



FONTI STORICHE: LETTERA DI SALVANINI 1957

Le condizioni idriche del terreno sottostante le fondazioni delle torri Asinelli e Garisenda

“Le 2 Torri sorgono in un’isola nella quale si trovano falde acquifere, ma prive di correnti d’acqua”

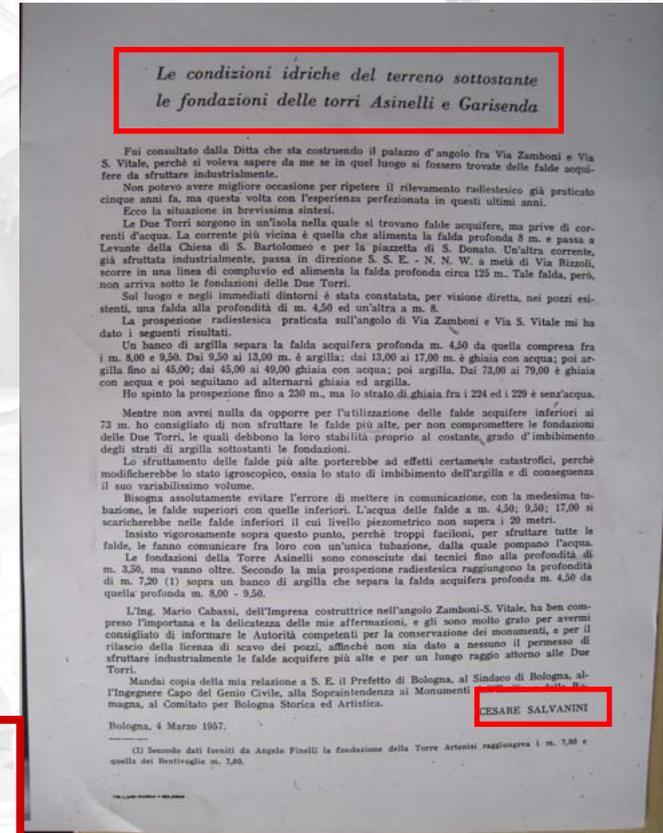
“Lo sfruttamento delle falde più alte porterebbe ad effetti certamente catastrofici, alterando lo stato di imbibimento dell’argilla e di conseguenza il suo variabilissimo volume”

“Bisogna assolutamente evitare l’errore di mettere in comunicazione, con la medesima tubazione, le falde superiori con quelle inferiori”

“L’acqua delle falde a m. 4.5, 9.5 e 17, si scaricherebbe nelle falde inferiori, il cui livello piezometrico non supera i 20 m”

“Secondo la mia mia prospezione (le fondazioni) raggiungono la profondità di m. 7.2, sopra un banco di argilla che separa la falda acquifera profonda m. 4.5 da quella profonda m. 8-9.5”

“Le fondazioni delle 2 Torri debbono la loro stabilità proprio al costante grado di imbibimento degli strati di argilla sottostanti le fondazioni”



FONTI STORICHE: LETTERA DI SALVANINI 1957

Le condizioni idriche del terreno sottostante le fondazioni delle torri Asinelli e Garisenda



ANNO XI N.3 MARZO 1957: SALVANINI

“...sul luogo e negli immediati dintorni è stata constatata, per visione diretta NEI POZZI ESISTENTI una falda alla profondità di m 4.5 ed un'altra a m 8”.



Corriere di Bologna. 1 Maggio 2011

Rilevamento Lo hanno trovato i tecnici di Ingegneria che comparivano in «Report»

E sottoterra, fra le Due Torri, spuntò un pozzo medievale...

Domani i primi dati sulla stabilità di Asinelli e Garisenda

I primi risultati sullo stato di salute delle Due Torri verranno svelati domani sera durante il convegno «La città fragile», alle 20 nella sacrestia di San Giacomo Maggiore, in via Zamboni 15. Dati al momento non allarmanti, ma siamo solo all'inizio, frutto del sistema di monitoraggio realizzato attraverso l'applicazione di 50 sensori su entrambe le torri. Oltre all'analisi di questo sistema, nel corso della serata si darà conto anche del ritrovamento di un pozzo, di probabili origini medievali, posto alla base delle Due Torri. Un pozzo sconosciuto anche in Comune, ma del quale si parla in antichi documenti storici. Pozzo scoperto in seguito a uno studio sulla circolazione delle acque sottostanti alle torri ed esattamente durante le riprese effettuate dalla troupe di Report e conseguente diverbio (dentro e fuori onda) col giornalista della Gabanelli e col professor Lombetti.

del patrimonio cittadino, a partire dalle Due Torri, intervengono nell'ordine il professor Tommaso Trombetti, docente di Tecniche delle Costruzioni e afferente del Dicam (cioè del Dipartimento di Ingegneria che, grazie al finanziamento della Fondazione del Monte, interpreterà i dati dei sensori installati dalla Tecnoin di Napoli su progetto dello Studio Cecconi e Associati, consegnando un report semestrale al Comune), il professor Boschi e la dottoressa Arianna Pesci dell'Igv, che illustreranno la morfologia delle torri dopo l'esame col Laser scanner, e l'ingegnere Gilberto Dallavalle dello Studio Cecconi. La novità, di una settimana fa, è che il sistema di sensori (6 tipi diversi) funziona ed è affidabile. Ogni 15 minuti arrivano dati sensibili (per ora solo 7 giorni di rilevamento).

sulla Garisenda sono fondamentali e forse ne avrebbe bisogno anche l'Asinelli. Ma, per dire, sono molto più forti le sollecitazioni dovute alle raffiche di vento rispetto a quelle degli autobus», dice Trombetti.

L'osservazione costante è dunque necessaria. Ne avrebbe bisogno anche la torre di San Giacomo, così come il portico dei Servi e altri monumenti. Sarebbe forse utile anche istituire un comitato scientifico multidisciplinare, come è stato fatto per il Duomo di Modena. I dati sulle Due Torri, sulla cui cima ci sono ora due webcam, si potranno vedere su un sito web, forse anche con le analisi degli specialisti che stanno cercando di informatizzare tutti gli studi (e le notizie) realizzati in questi anni e nel passato.

Fernando Pellerano



La «botola»
La grande lastra di pietra in piazza di Porta Ravennana sotto la quale è stato trovato un pozzo, molto probabilmente risalente al periodo medievale, profondo 10 metri (vedi foto torrida). La profondità dell'acqua, limpidissima, è di 4,5 metri. Le pareti della zona più vicina alla superficie della piazza è intonacata, la parte sottostante è in cocci e mattoni



“ritrovamento di un pozzo nascosto sotto un tombino”

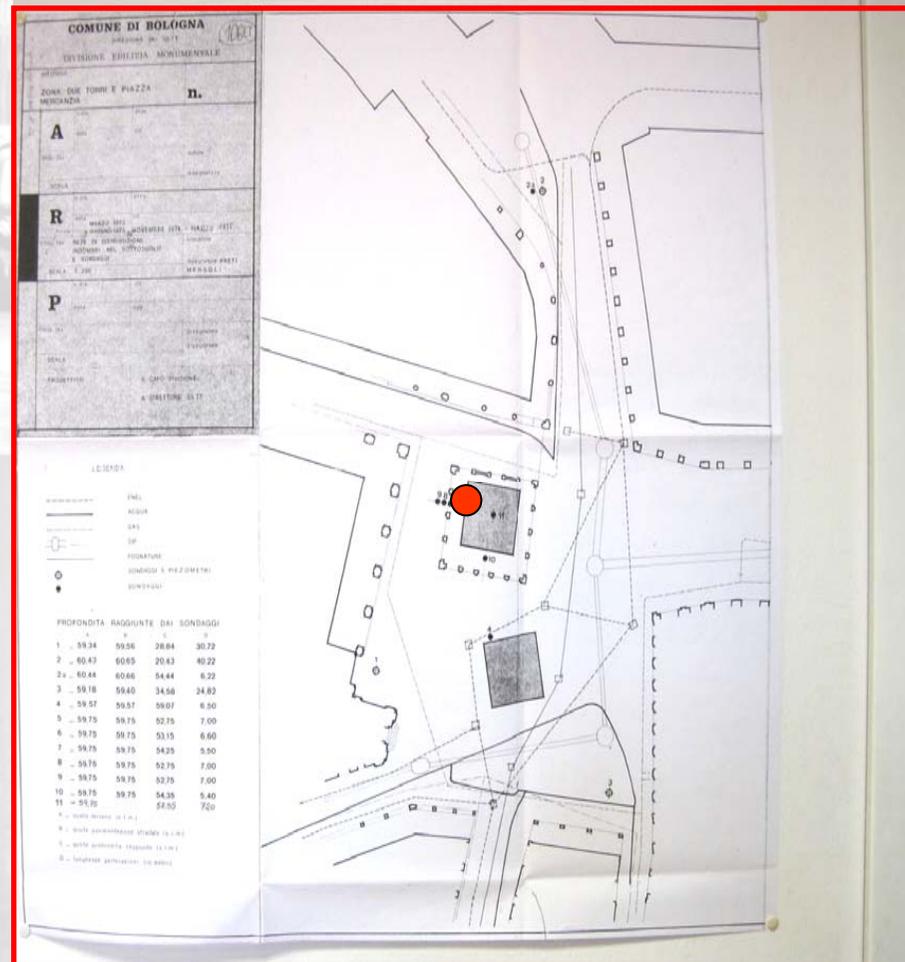


Informazioni sulla Torre degli Asinelli

COMUNE di BOLOGNA – SONDAGGI (trivellazioni)

Asinelli Gennaio 1974

EDILPALI 40127 BOLOGNA Viale della Repubblica 25 Tel. 51.63.52		SONDAGGIO N. 5 Quota iniziale: Tipo avanzamento: trivellazione a secco Data: Gennaio 74		SEZIONE GEOTECNICA Dr. P. L. Barattella Dr. A. Ronchi geologi	
COMMITTENTE: COMUNE DI BOLOGNA			LOCALITA': Torre Asinelli		
Colonna stratigrafica	DESCRIZIONE TERRENI	OSSERVAZIONI	P.P. Kg/cm ³	Torva Kg/cm	
	Gesse selenitiche con cristalli di media dimensione.	Parecchio compatto.			
	Breccia calcarea molto cementata e calcareniti, presenti inoltre ciottoli di medie dimensioni inglobati con calce.	Probabilmente in blocchi dimensionati - legante usato, calce.			
	Calcareniti e calcilutiti talora seleifere di colore grigiastro con venatura di calcite secondaria.	Molto compatto.			
	Argilla limosa grigio nerastra.	Scarsamente imbibite - consistenza molto dura.			

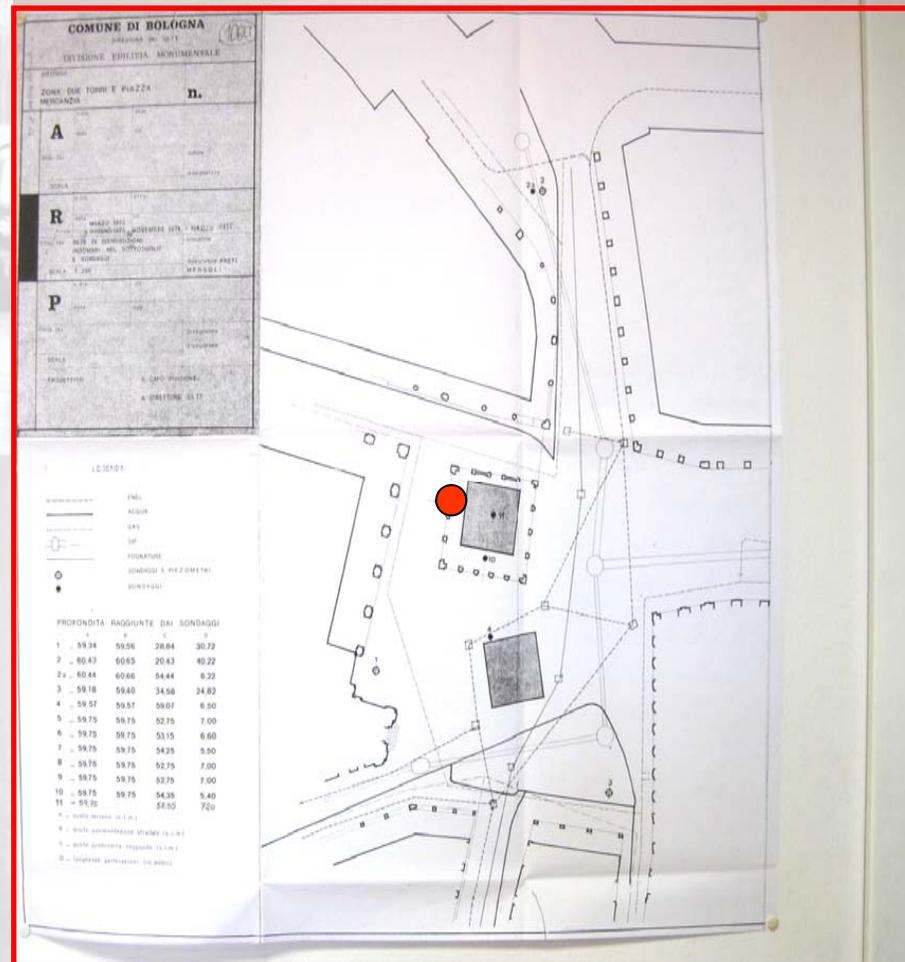


Informazioni sulla Torre degli Asinelli

COMUNE di BOLOGNA – SONDAGGI (trivellazioni)

Asinelli Novembre 1974

EDILPALI 40127 BOLOGNA Viale Italia Repubblica 25 Tel. 051.63.52		SONDAGGIO N. 8 Quota iniziale: Tipo avanzamento: trivellazione a secco Data: Novembre 74	SEZIONE GEOTECNICA Dr. P. L. Baratella Dr. A. Ronchi GEOLOGI
COMMITTENTE COMUNE DI BOLOGNA		LOCALITA': Torre Asinelli	
DESCRIZIONE TERRENI	OSSERVAZIONI		
Pavimentazione. Argilla limosa sabbiosa grigio nerastro - ciot- toli e frammenti lapidei eterogenei.	Terreno mediamente imbi- bito - consistenza da tenera a plastico tenera.		
Argilla limosa beige con frequenti intercalazioni grigio nerastre alla ba- se.	Terreno discretamente imbibito - consistenza plastica.		

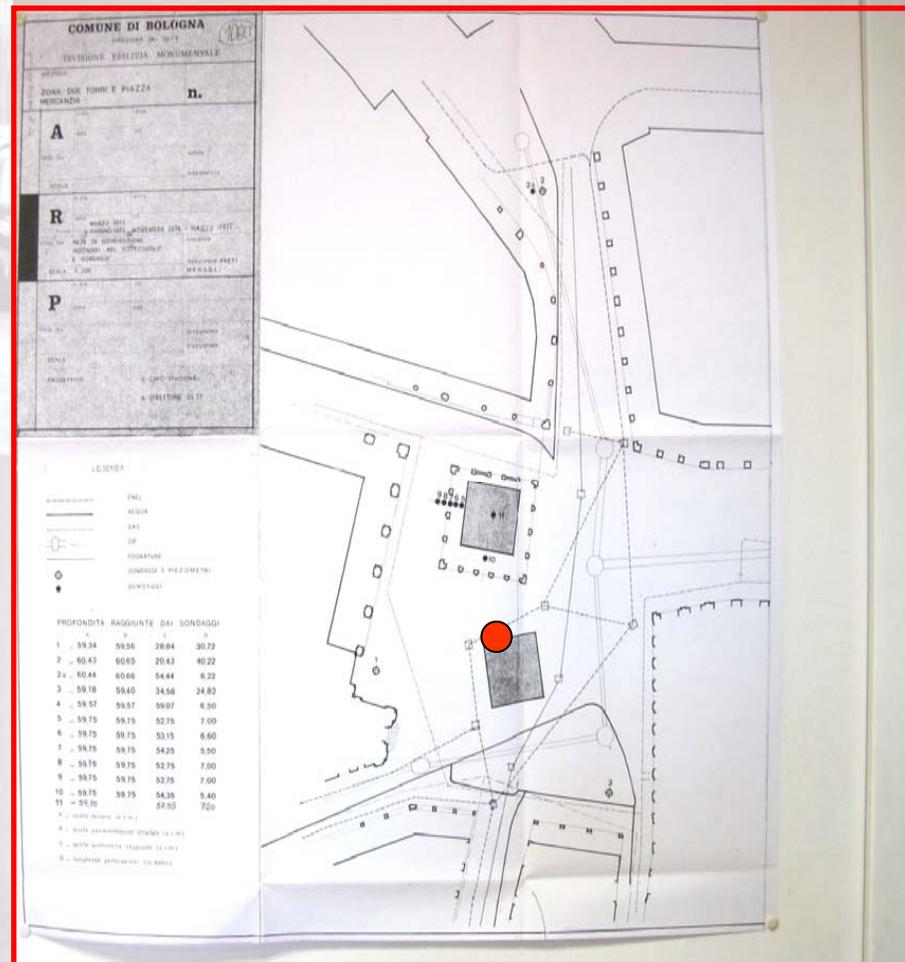


Informazioni sulla Torre degli Asinelli

COMUNE di BOLOGNA – SONDAGGI (trivellazioni)

Garisenda Gennaio 1974

C.C.I.A.A. 125249 EDILPALI 40127 BOLOGNA Viale della Repubblica 25 Tel. 51.63.52		SONDAGGIO N. 4 Quota iniziale: Tipo avanzamento: trivellazione a secco Data: Gennaio 74		SEZIONE GEOTECNICA Dr. P. L. Barattella Dr. A. Ronchi GEOLOGI	
COMMITTENTE: COMUNE DI BOLOGNA			LOCALITA': Torre Garisenda		
Profondità (m)	Idrologia Colonna stratigrafica	DESCRIZIONE TERRENI	OSSERVAZIONI	P.P. Kg/tonn	Terzar Kg/tonn
100		Gesso selenitico con cristalli di media grandezza.	Parecchio compatto.		
		Calcareniti e calcilutiti talora selcifere di colore grigio con venature di calcite secondaria.	Probabilmente in blocchi dimensionati - legante usate, calce.		
600 650		Argilla limosa nerastra.	Soarsamente imbibito - consistenza molto dura.		



G. C. BORGIA
G. FOLLONI
A. GUBELLINI

Istituto di Topografia,
Geodesia e Geofisica Mineraria
Università di Bologna

MOVIMENTI ATTUALI DELLE FONDAZIONI DELLA TORRE DEGLI ASINELLI

INARCOS nr. 374 Febbraio 1977

Istituto di Topografia, Geodesia e Geofisica Mineraria - UniBo

“L’entità dei movimenti riscontrati dal 1947 al 1976 [...] rendono a nostro avviso il fenomeno estremamente preoccupante non solo per la stabilità futura della torre ma anche dei principali edifici monumentali, soprattutto di quelli appartenenti alla zona nord della città.”

“Probabilmente a movimenti del suolo sono da attribuirsi le lesioni manifestatesi recentemente in alcuni edifici cittadini [...] come la chiesa di San Giacomo Maggiore.”



NONOSTANTE LA NOTA FRAGILITA' DEL CENTRO STORICO...



San Vitale – Torresotto

INGV - Sezione di Bologna



NONOSTANTE LA NOTA FRAGILITA' DEL CENTRO STORICO...



Strada Maggiore – Basilica dei Servi

INGV - Sezione di Bologna



NONOSTANTE LA NOTA FRAGILITA' DEL CENTRO STORICO...



Autobus – passaggi continui



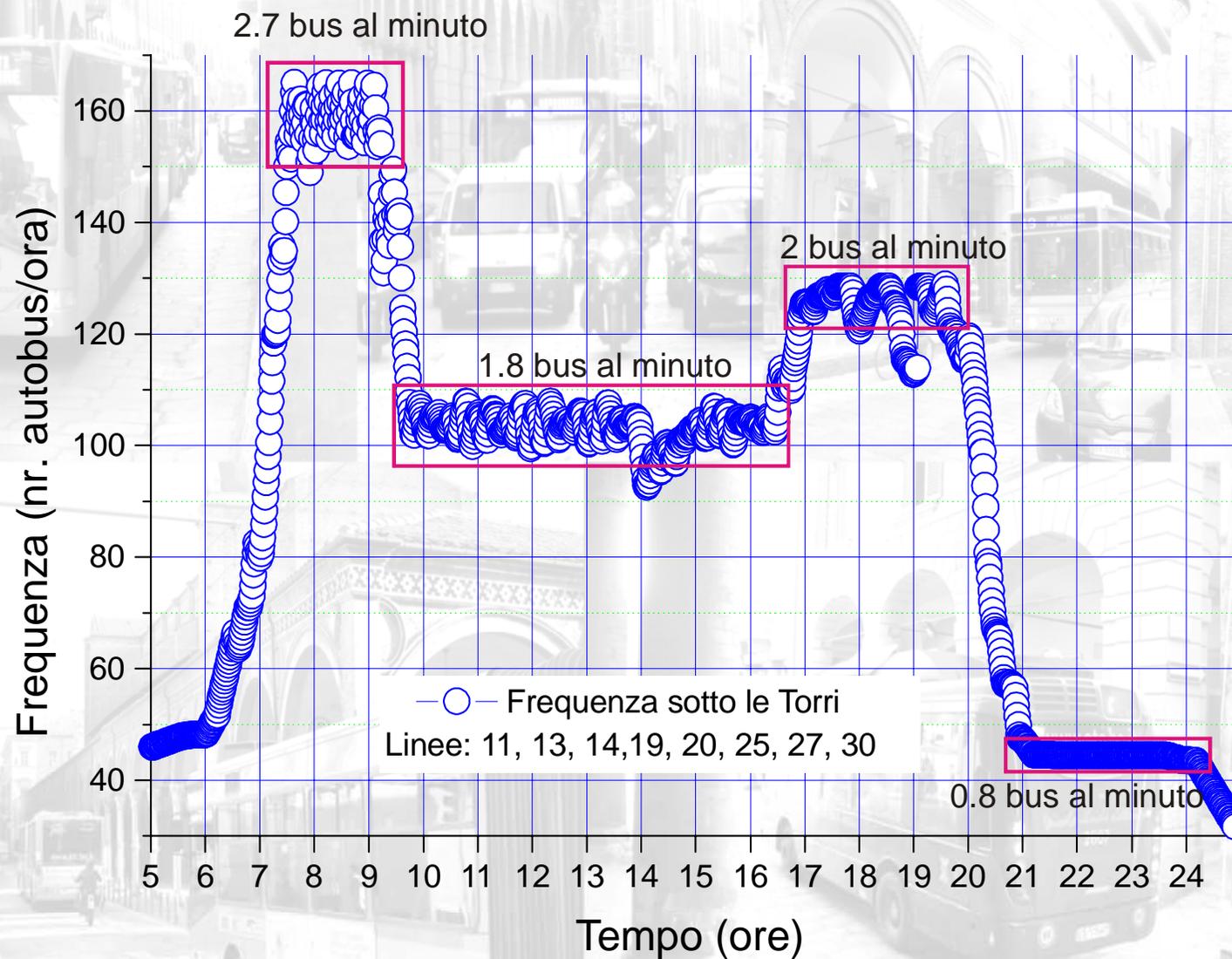
NONOSTANTE LA NOTA FRAGILITA' DEL CENTRO STORICO...



2Torri – spartitraffico medievale



FREQUENZA DI PASSAGGIO SOTTO LE TORRI



**Dati ufficiali
ATC**





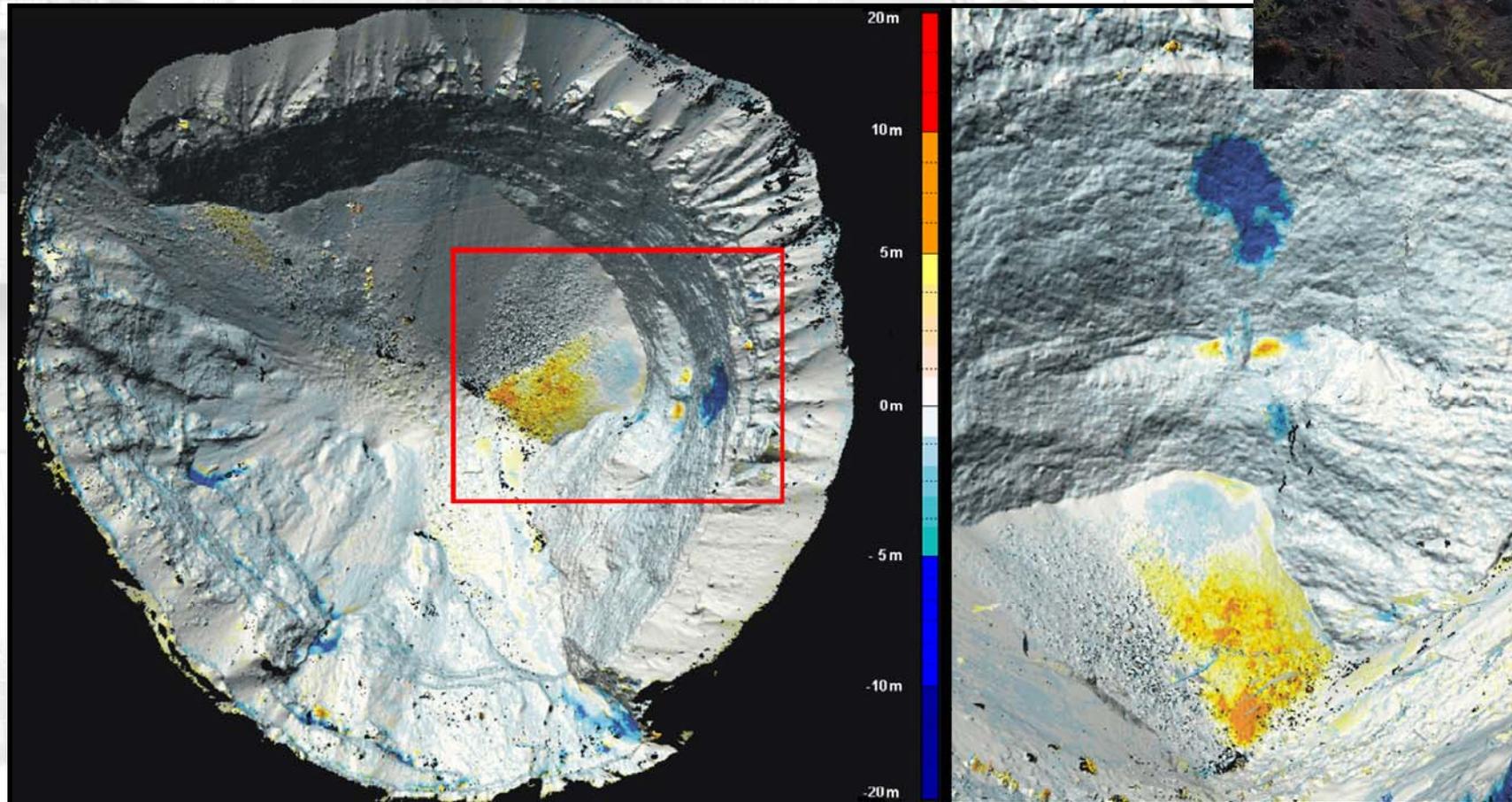
IL RILIEVO con LASER SCANNER



LASER SCANNER

Rilievi in aree vulcaniche

VARIAZIONI CRATERE VESUVIO

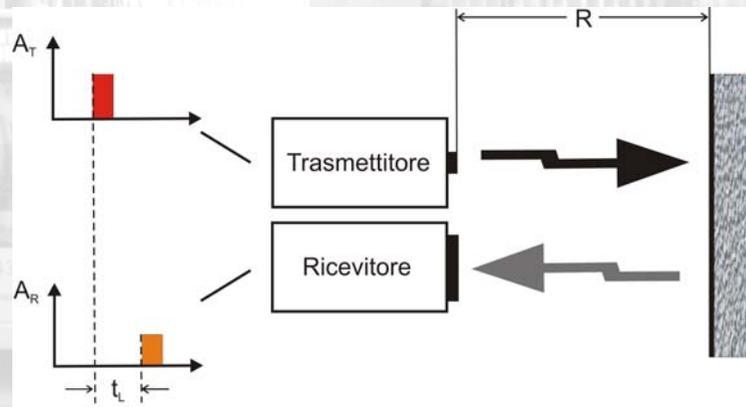


Pesci, A., Teza, G., Casula, G., Loddo, F., De Martino, P., Dolce, M., Obrizzo, F., Pingue, F., 2011. **Multitemporal laser scanner-based observation of Mt. Vesuvius crater: characterization of overall geometry and recognition of landslide events.** Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66 (3), 327-336.



LASER SCANNER

PRINCIPIO di FUNZIONAMENTO



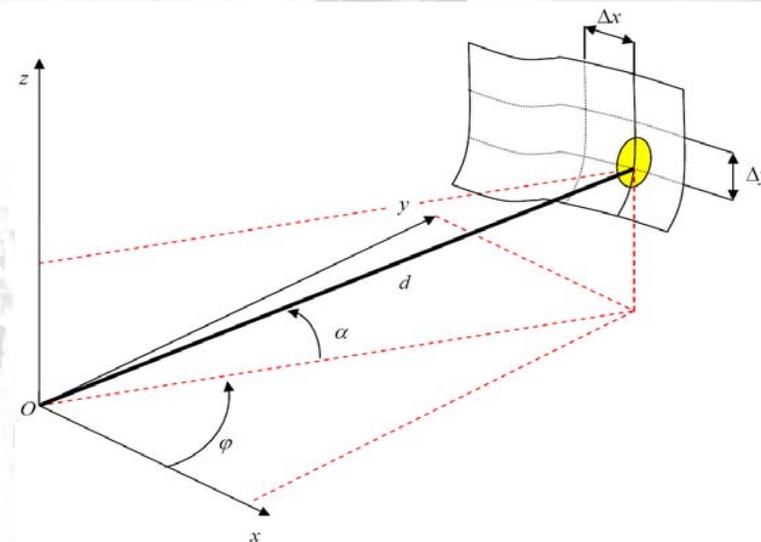
Il principio di funzionamento del laser scanner è basato sull'invio e la ricezione di impulsi laser e sulla misura del tempo

$$R = \frac{1}{2} c \cdot t_L$$

Il raggio spazza in modo ordinato lo spazio di scansione

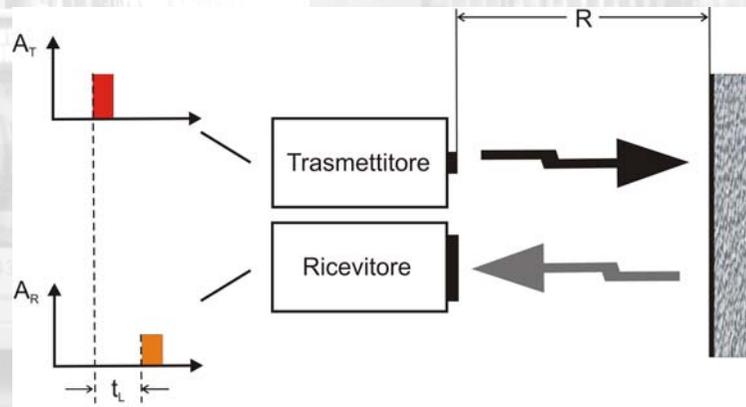
Il raggio laser viene deflesso secondo una griglia angolare calibrata e molto precisa

I punti vengono quindi geometricamente collocati in un sistema di riferimento locale il cui centro è quello dello strumento



LASER SCANNER

PRINCIPIO di FUNZIONAMENTO



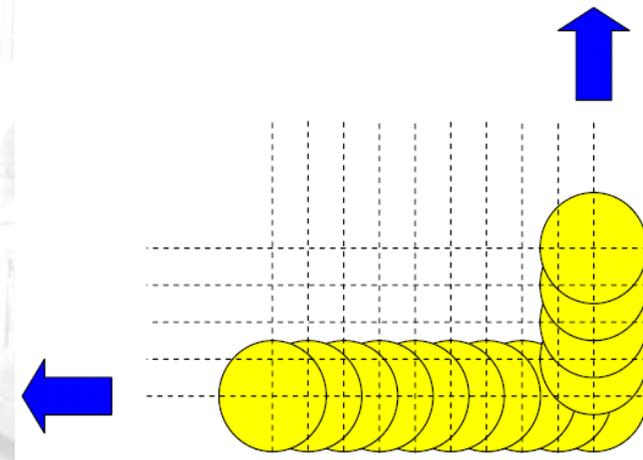
Il principio di funzionamento del laser scanner è basato sull'invio e la ricezione di impulsi laser e sulla misura del tempo

$$R = \frac{1}{2} c \cdot t_L$$

Il raggio spazza in modo ordinato lo spazio di scansione

Il raggio laser viene deflesso secondo una griglia angolare calibrata e molto precisa

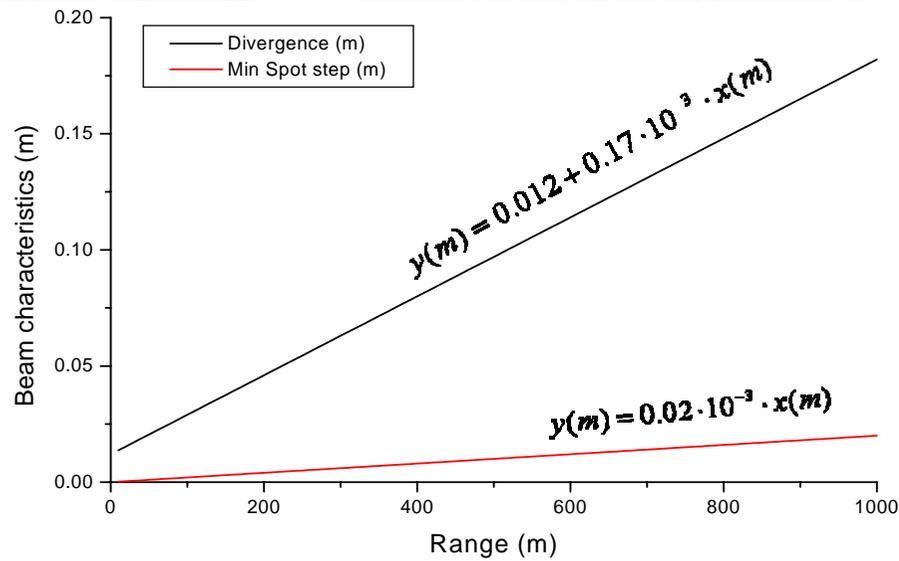
I punti vengono quindi geometricamente collocati in un sistema di riferimento locale il cui centro è quello dello strumento



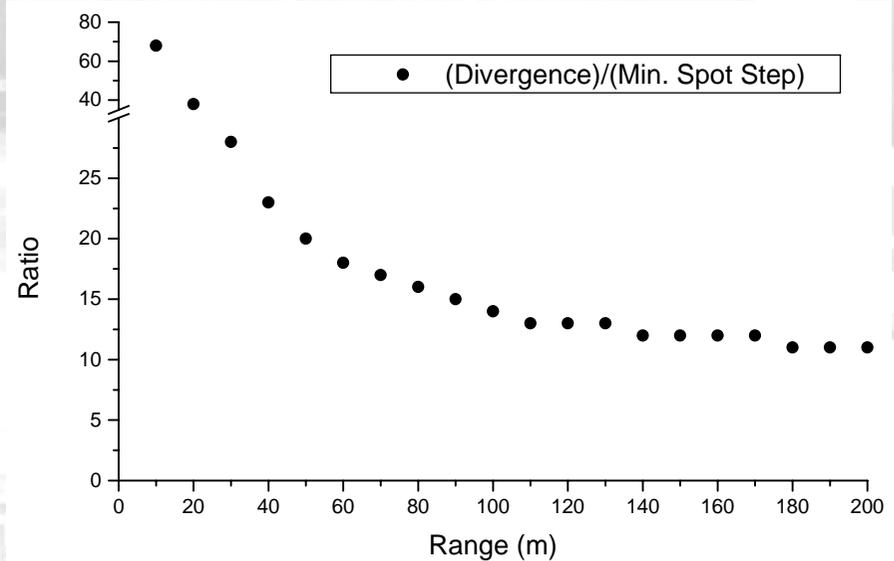
LASER SCANNER

Divergenza e passo di campionamento

Divergenza (R) e passo (R)



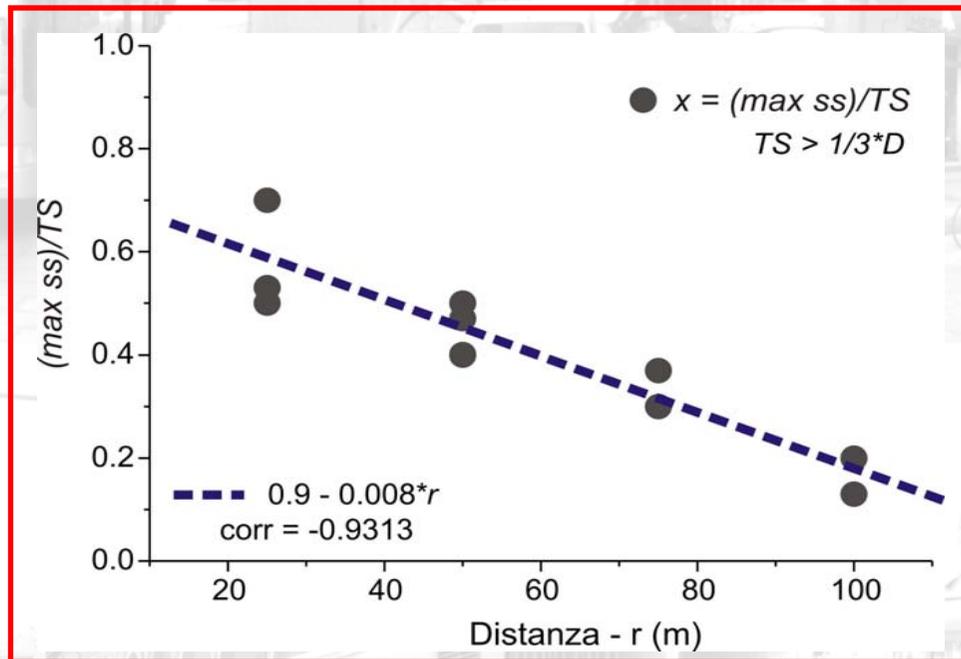
Rapporto Divergenza/Passo (R)



LASER SCANNER

Reale risoluzione

DATI SPERIMENTALI



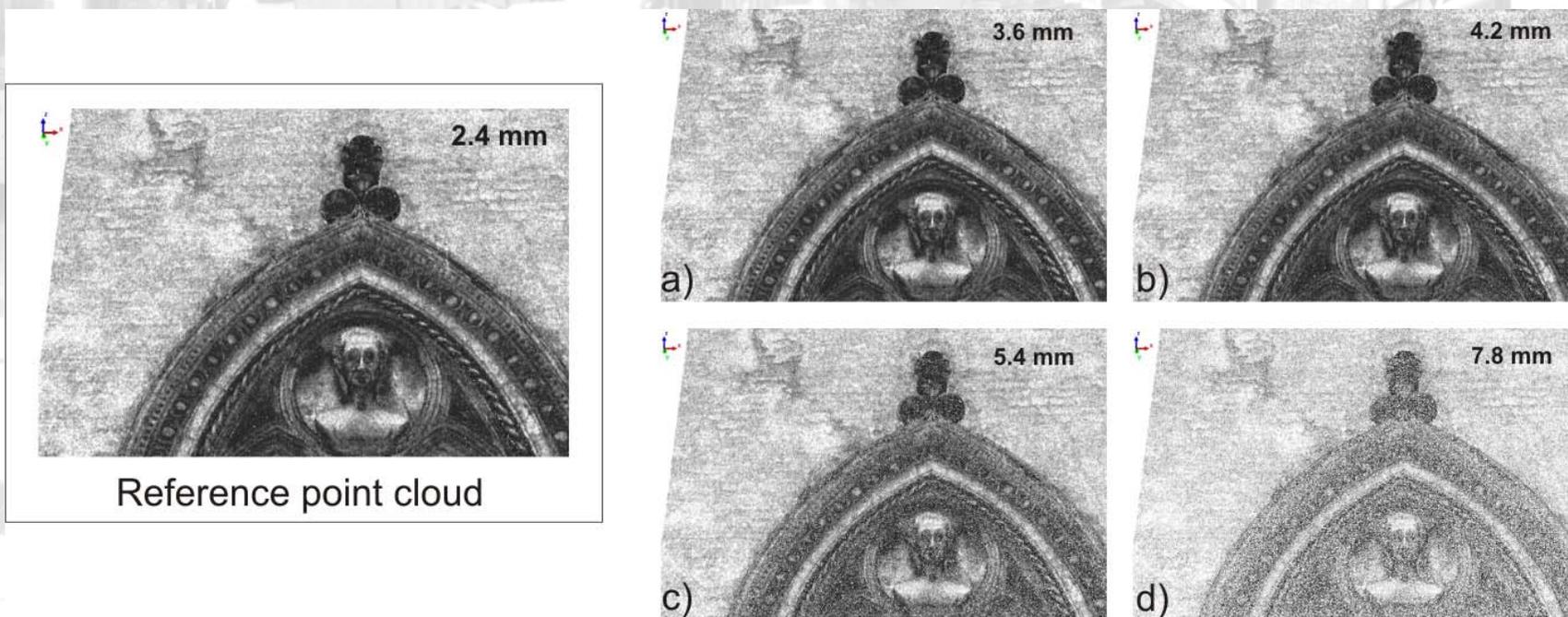
Pesci, A., Teza, G., Bonali, E., 2011. **Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization.** Remote Sensing, 3, 167-184



LASER SCANNER

Reale risoluzione

APPLICAZIONE A CASI REALI



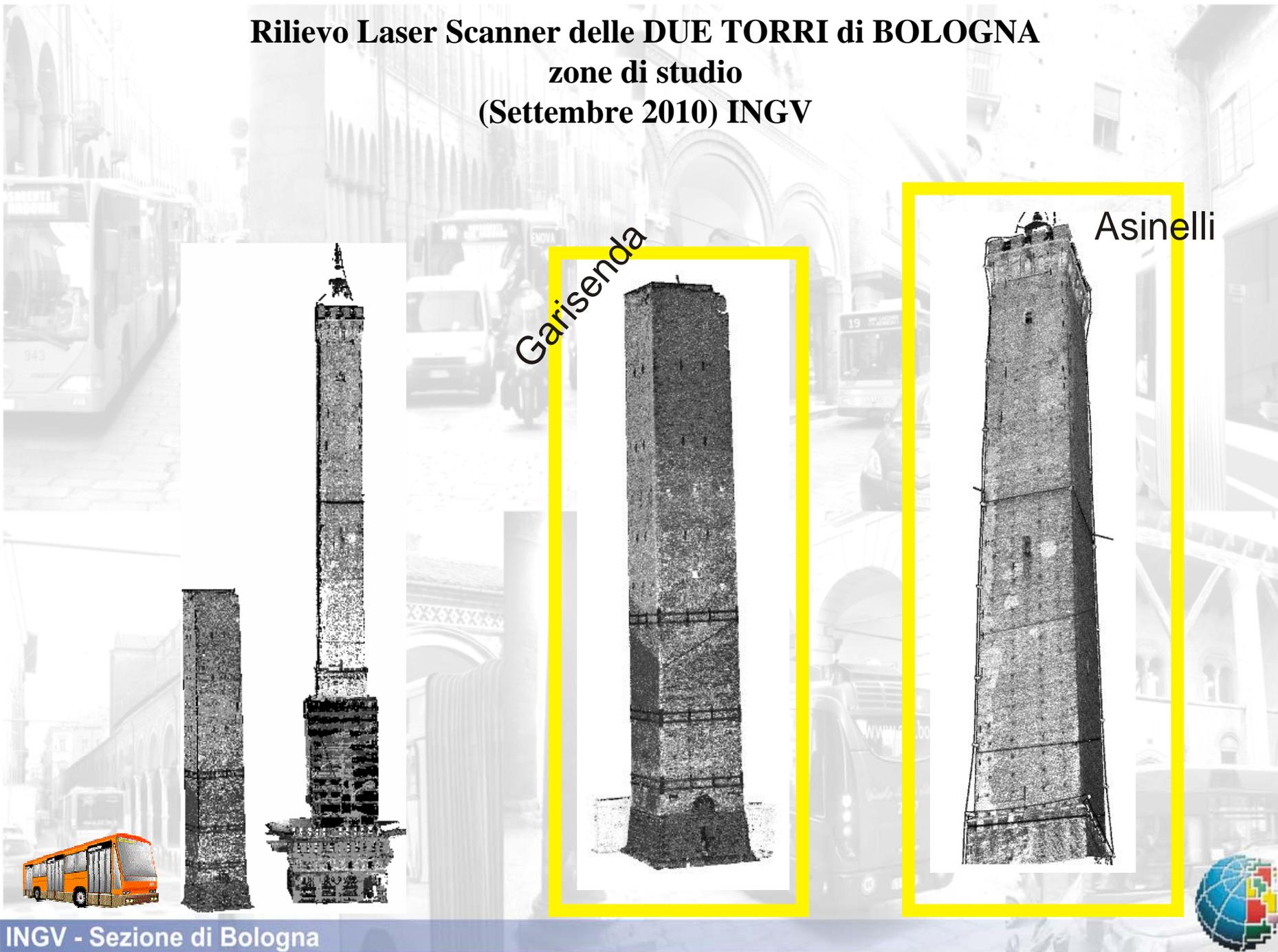
Pesci, A., Teza, G., Bonali, E., 2011. **Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization.** Remote Sensing, 3, 167-184



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA
zone di studio
(Settembre 2010) INGV

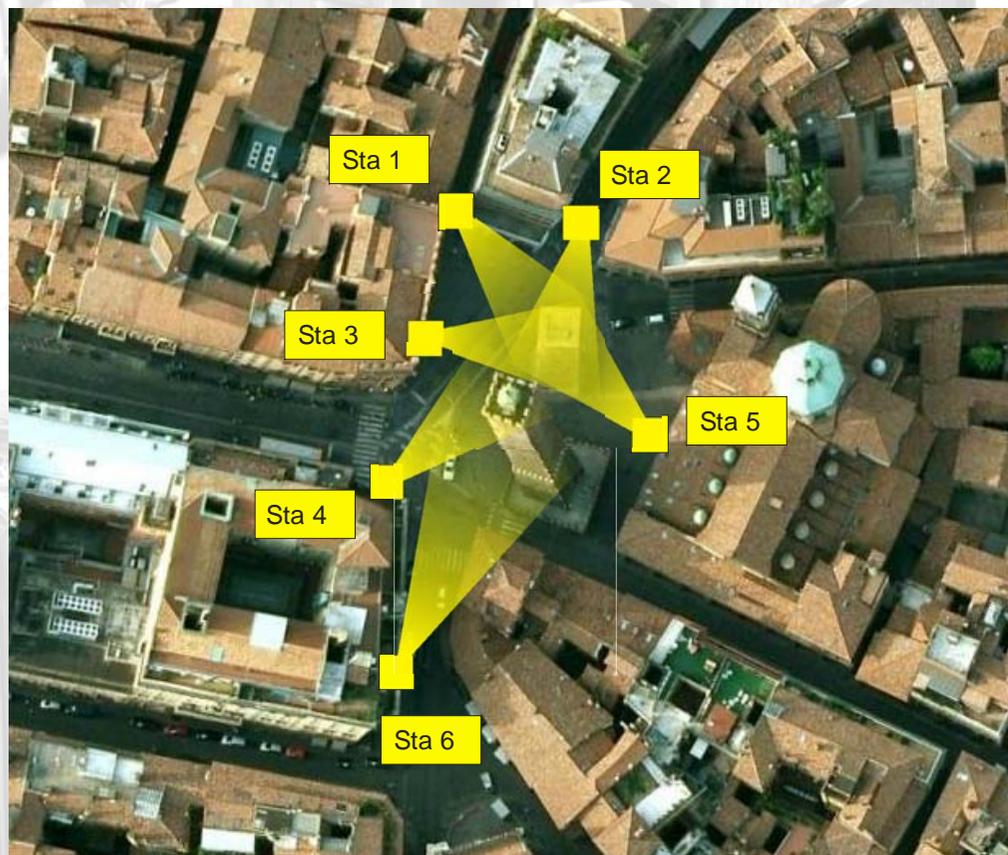
Garisenda

Asinelli



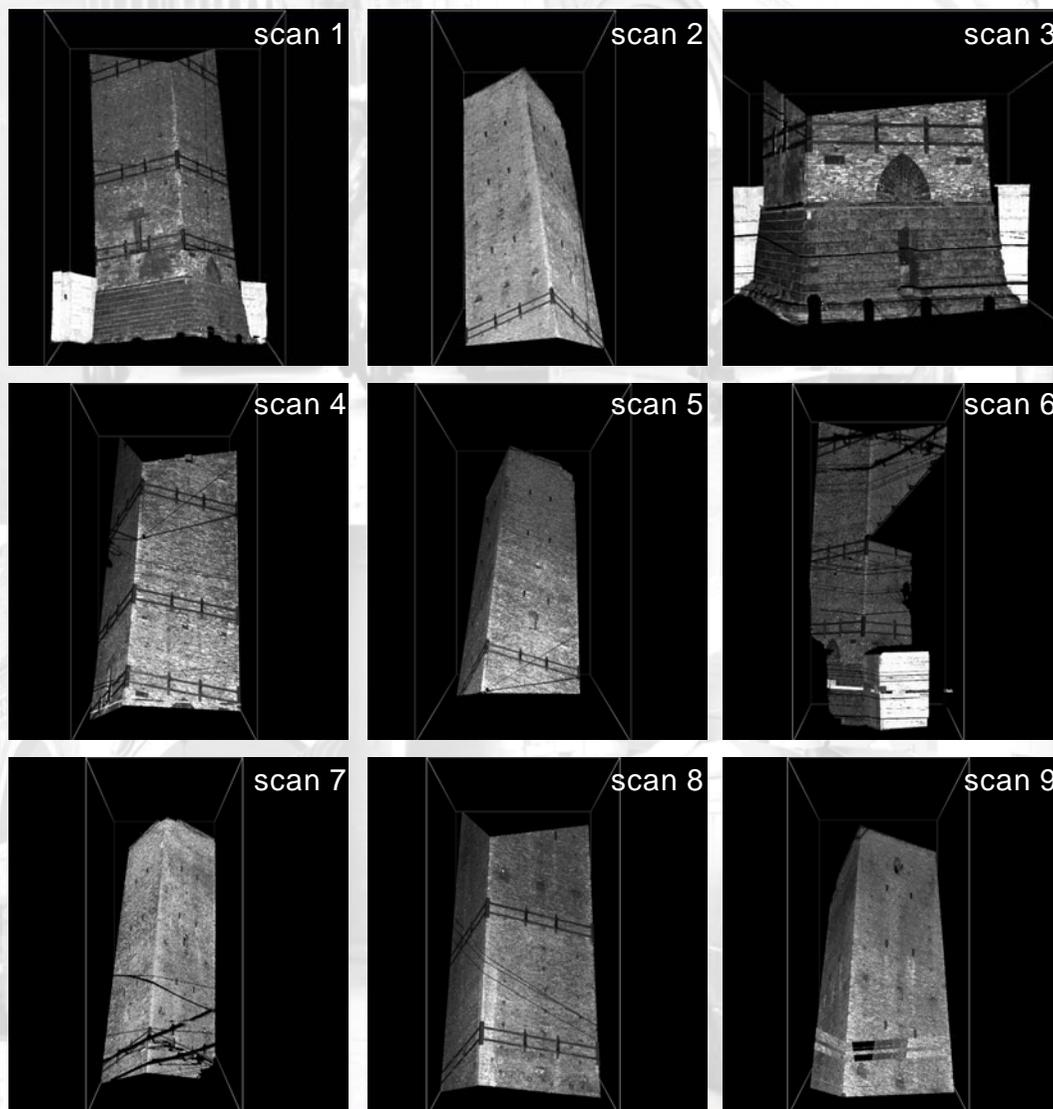
Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

6 punti di stazione – 19 scansioni effettuate



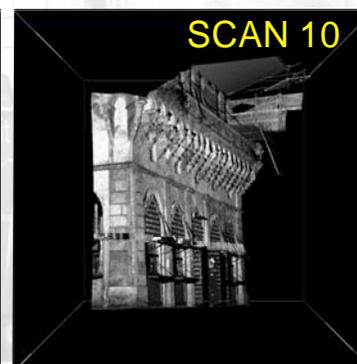
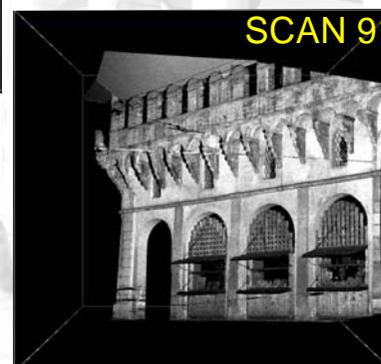
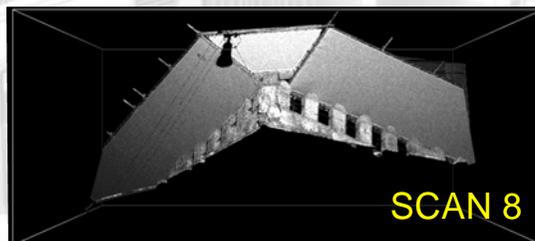
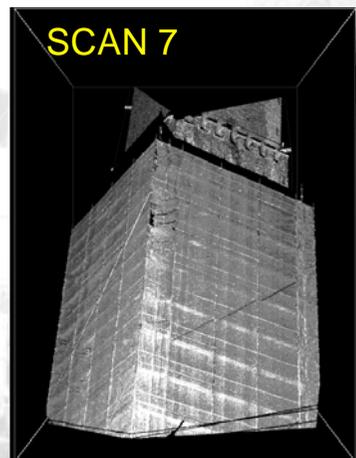
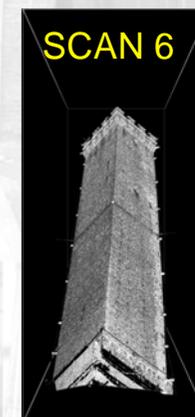
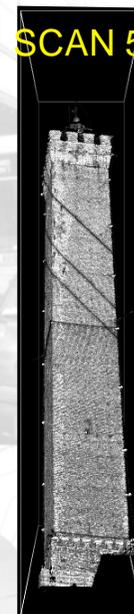
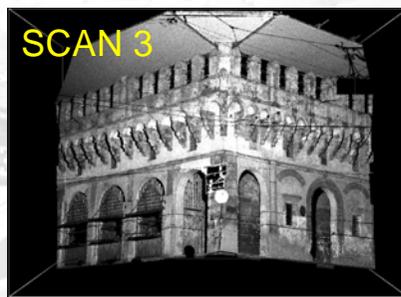
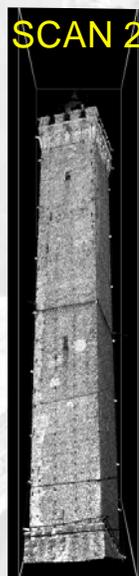
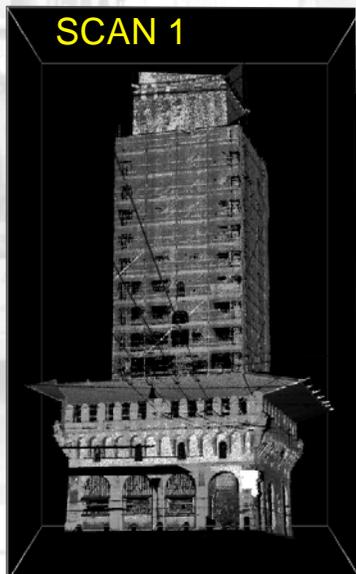
Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

Garisenda - 9 scansioni effettuate



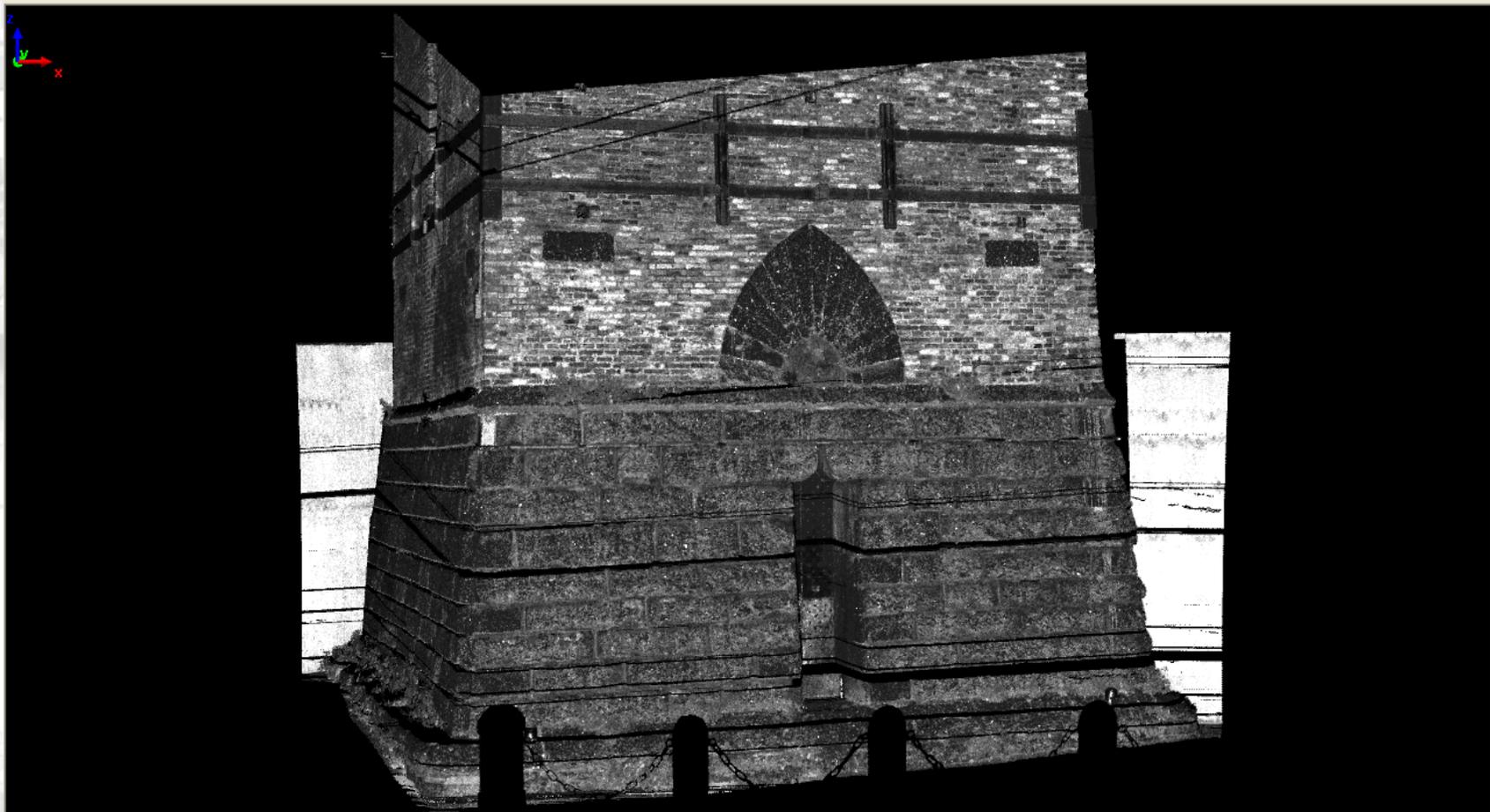
Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

Asinelli - 10 scansioni effettuate



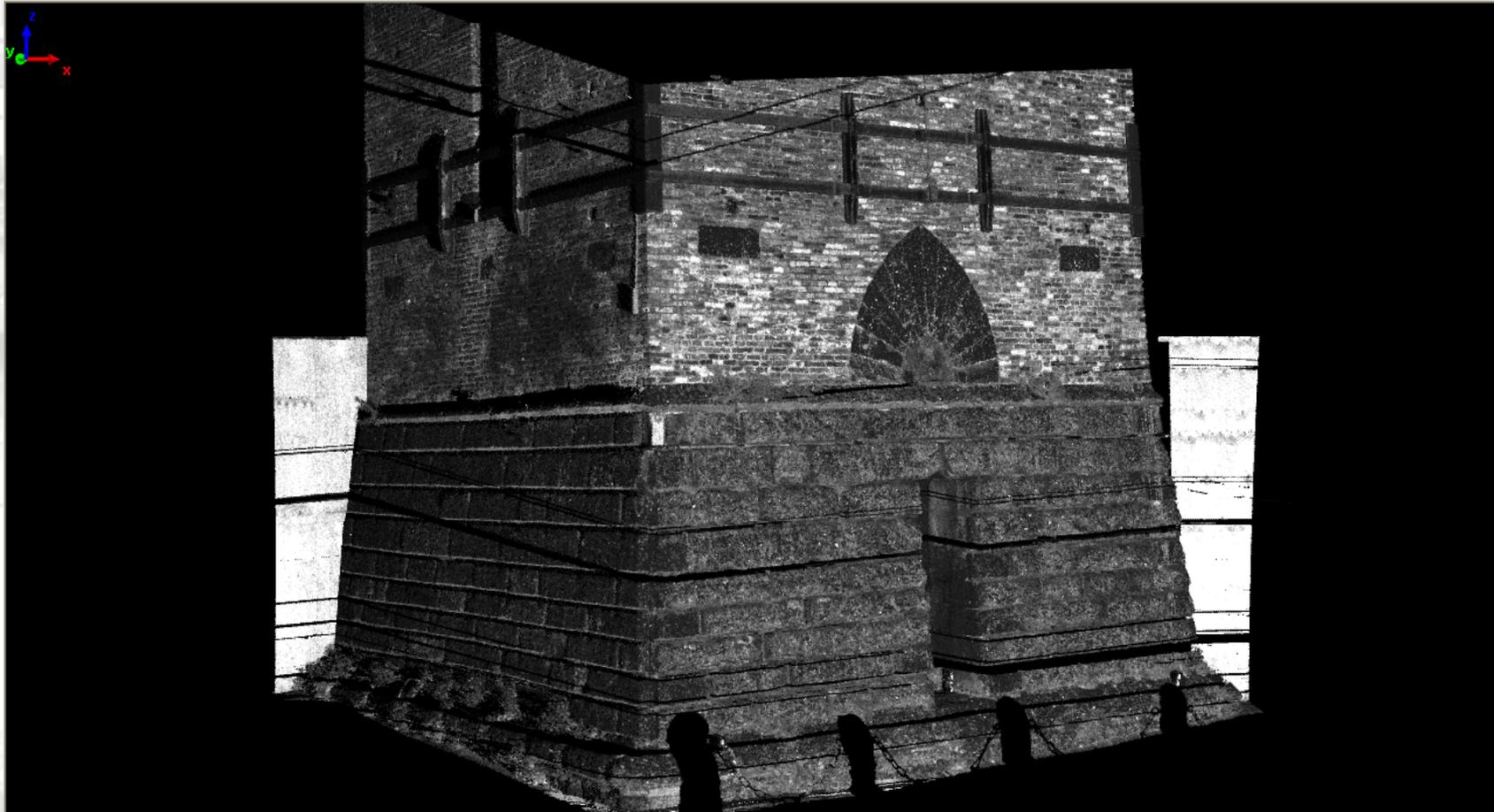
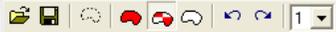
PIFEdit - D:\2T0rr\20100915\3 RIF edited.pf

File View Select Edit Config Undo Window Help



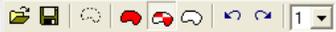
PIFEdit - D:\2T0rr\20100915\3 RIF edited.pf

File View Select Edit Config Undo Window Help



PIFEdit - D:\2T0rriv\20100915\3 RIF edited.pf

File View Select Edit Config Undo Window Help

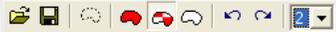


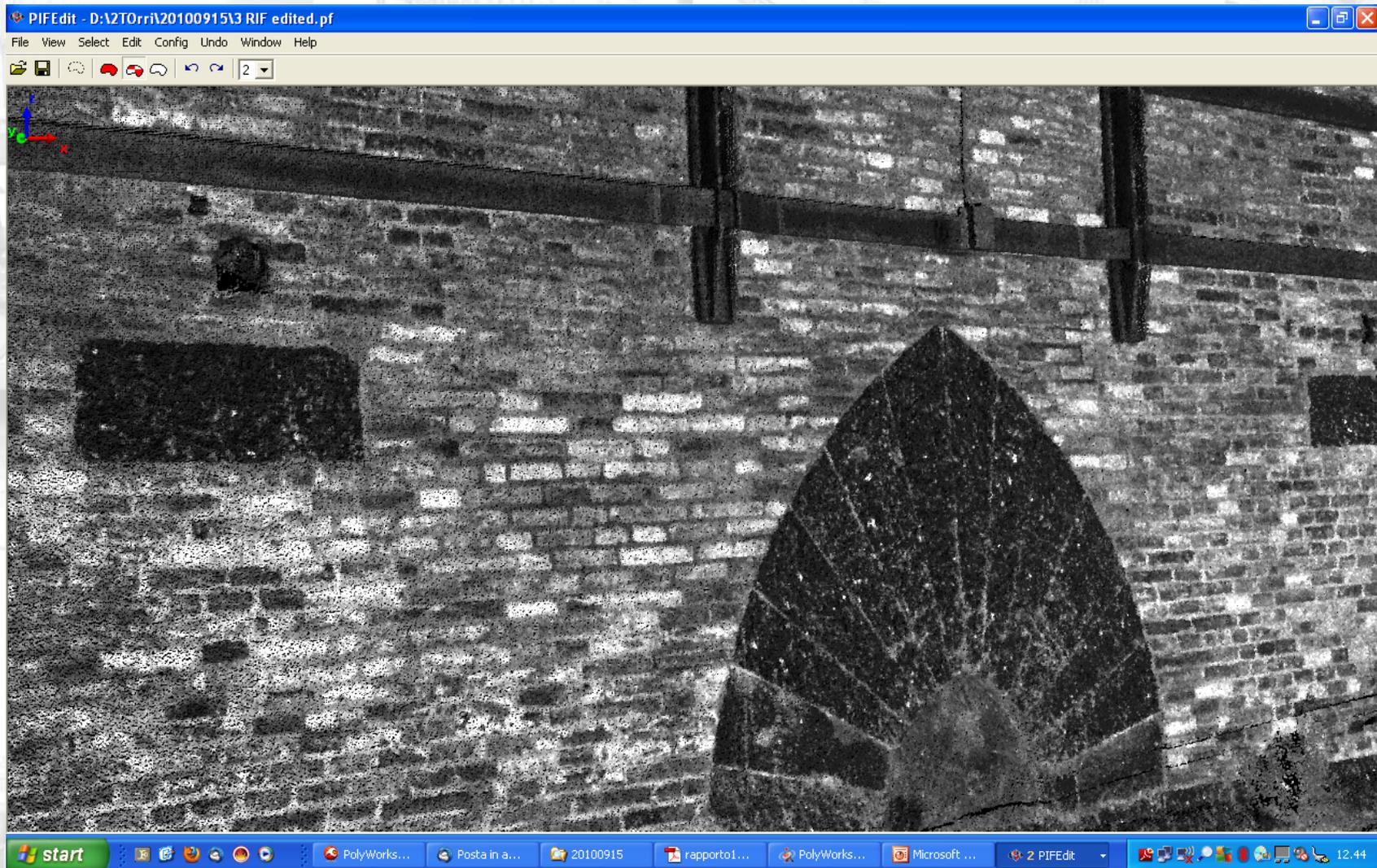
start PolyWorks... Posta in a... 20100915 rapporto1... PolyWorks... Microsoft ... 2 PIFEdit 12.42



PIFEdit - D:\2T0rr\20100915\3 RIF edited.pf

File View Select Edit Config Undo Window Help





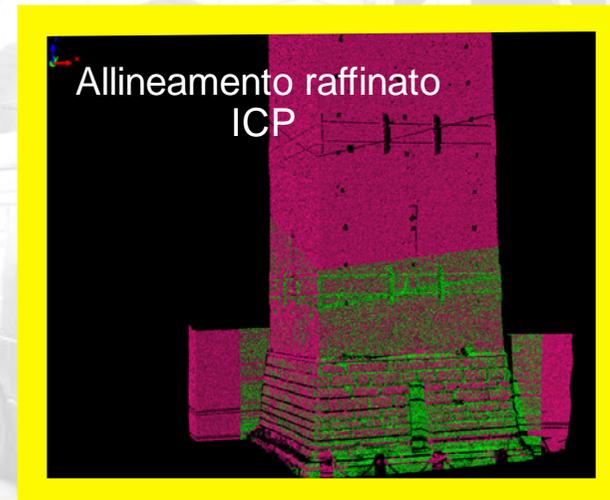
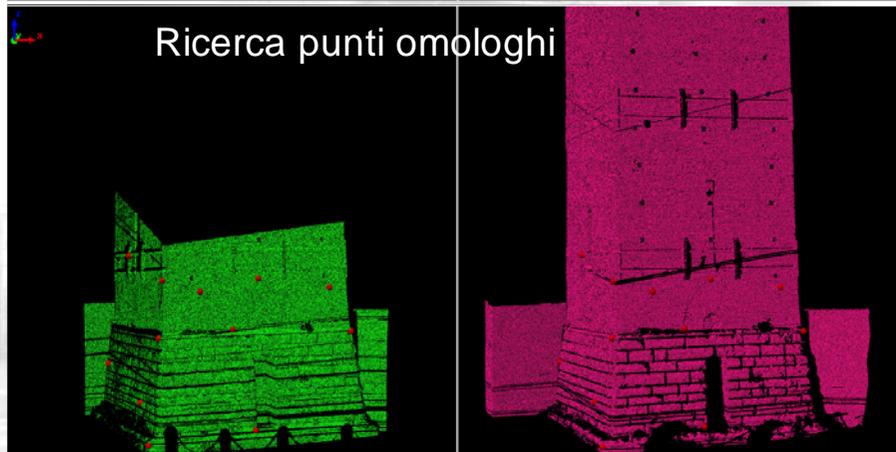
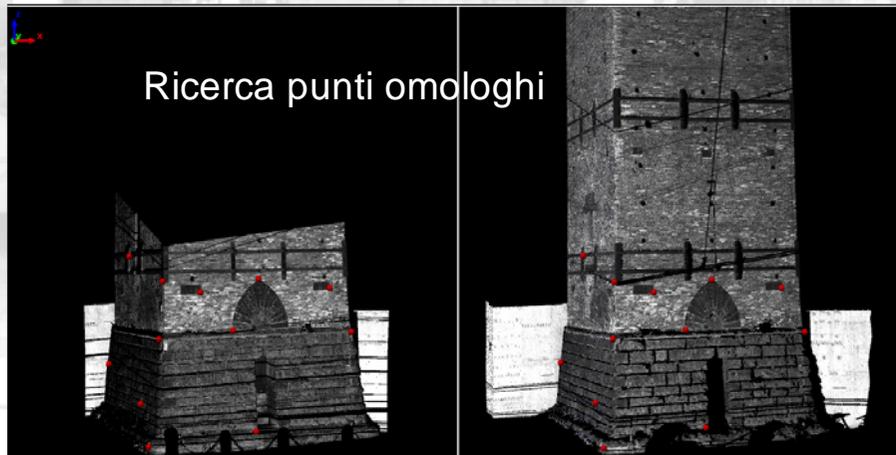
La colorazione (scala di grigi) è l'intensità del segnale, correlato alla rugosità e quindi alle caratteristiche fisiche dei materiali.



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

Allineamento delle scansioni mediante algoritmi ICP di "Surface Matching"

Minimizzazione distanza tra i punti delle zone in comune e curvatures delle superfici



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

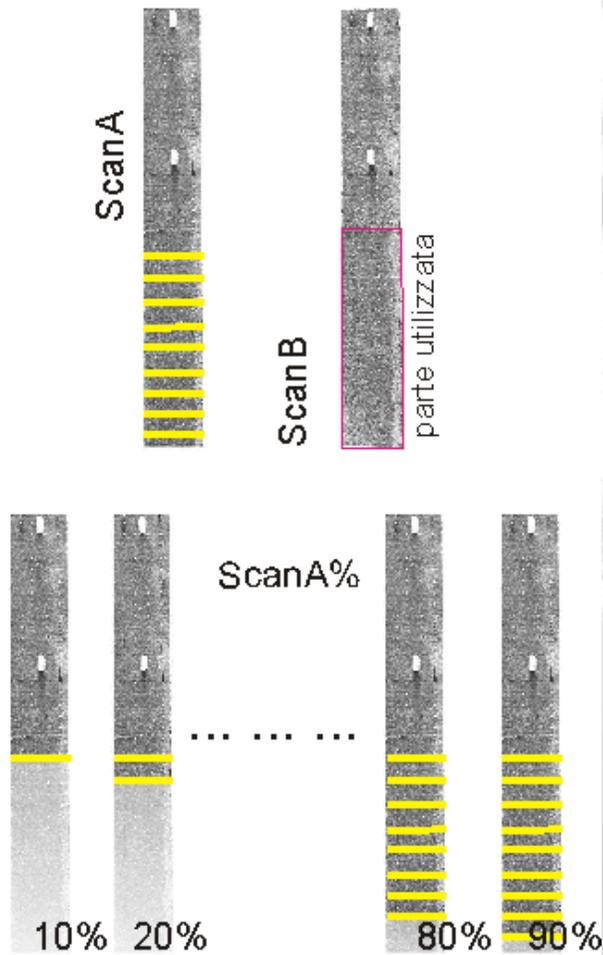
TEST: allineamento delle scansioni acquisite con geometria "critica"

VERIFICA DELLA PRECISIONE
DI ALLINEAMENTO

Schema della procedura

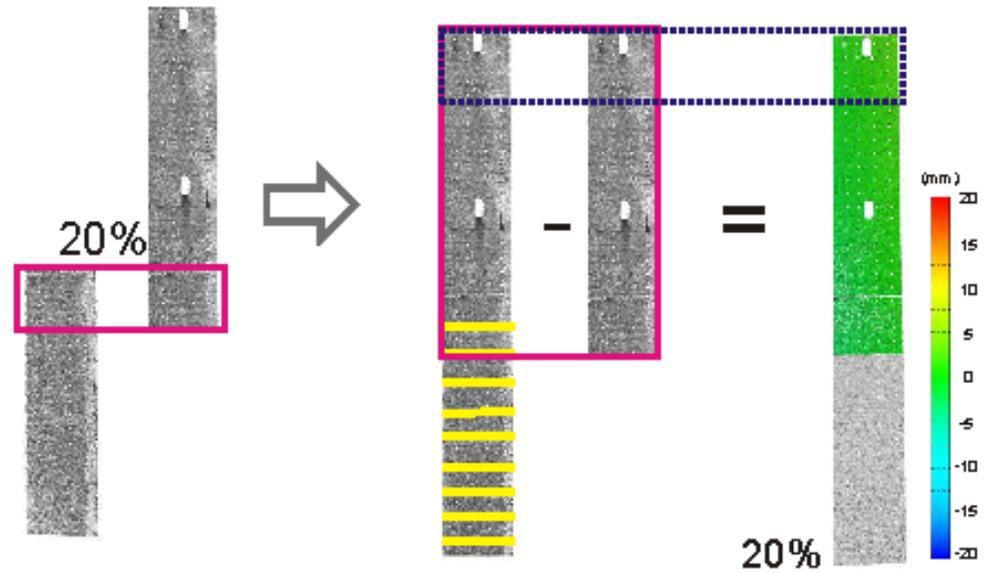
1)

Creazione delle sottoscansioni della scansione A



Calcolo delle differenze tra le sottoscansioni di A allineate su B e la scansione originale A.

Allineamento sulla scansione B delle sottoscansioni



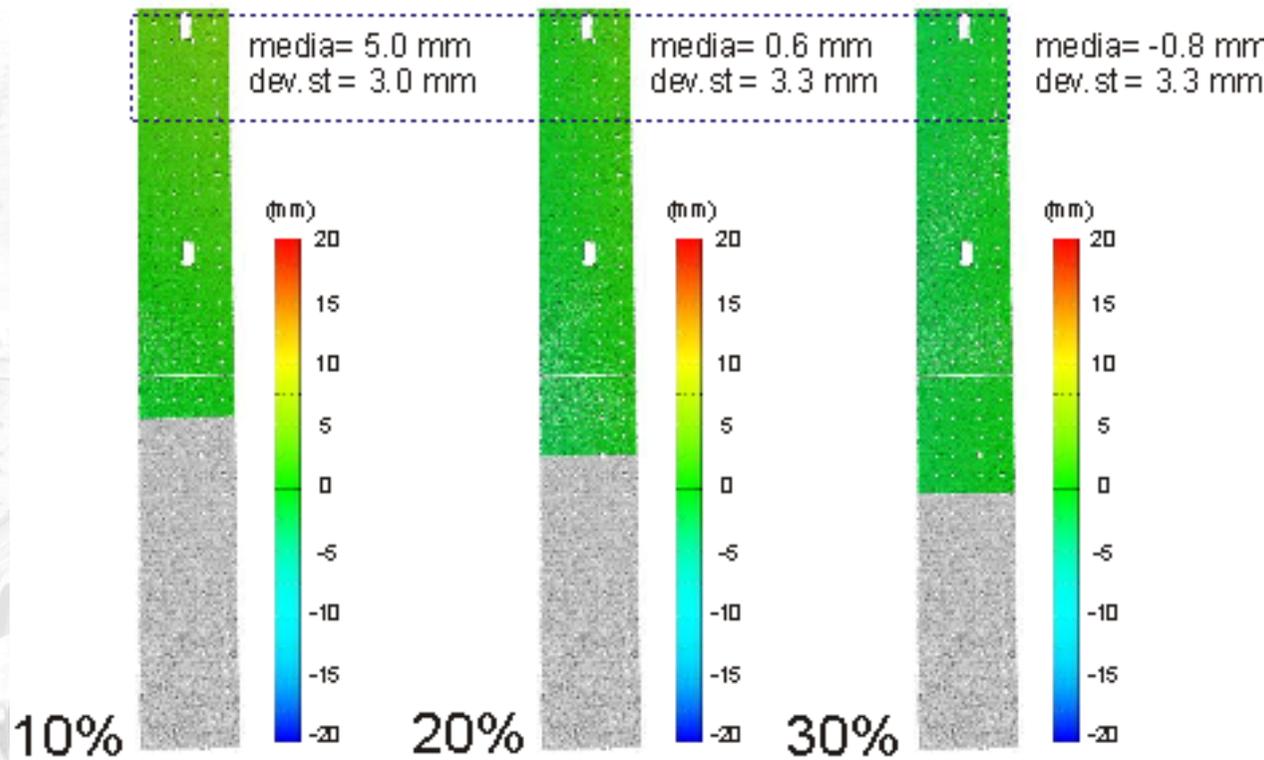
2)



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

TEST: allineamento delle scansioni acquisite con geometria "critica"

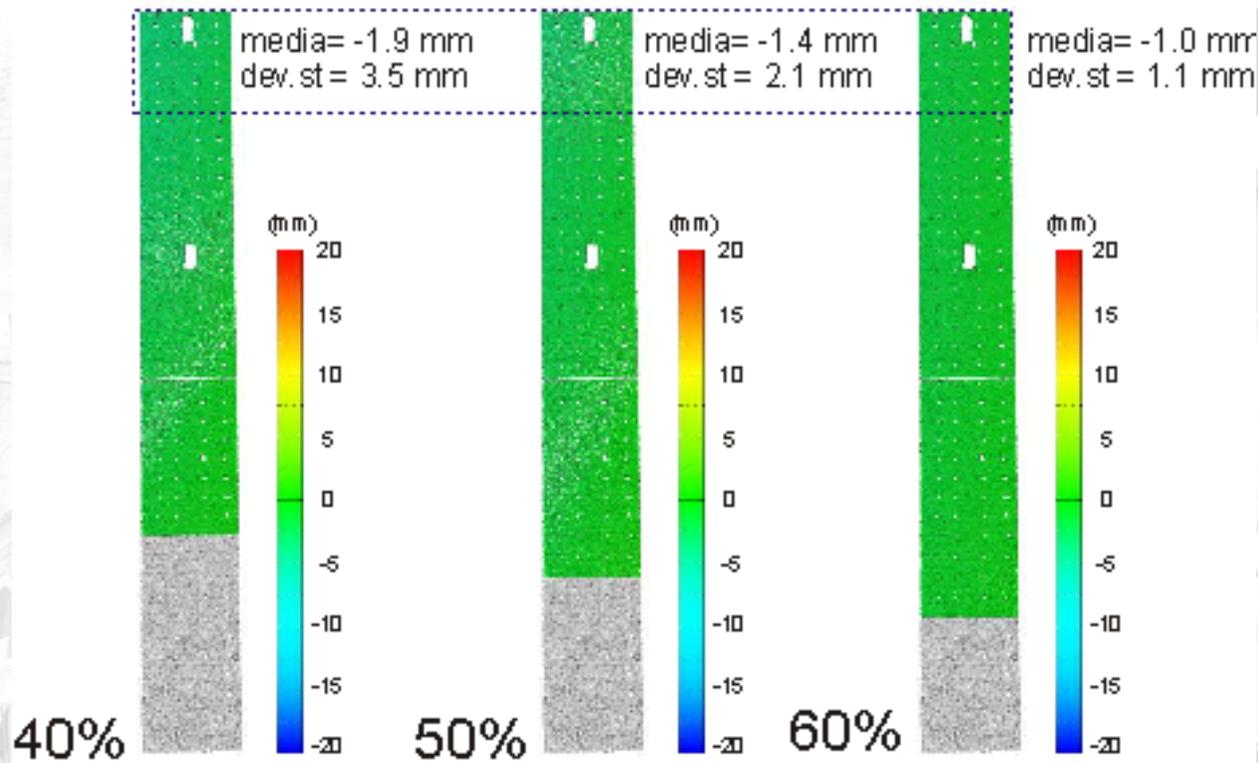
**VERIFICA DELLA PRECISIONE
DI ALLINEAMENTO**



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

TEST: allineamento delle scansioni acquisite con geometria "critica"

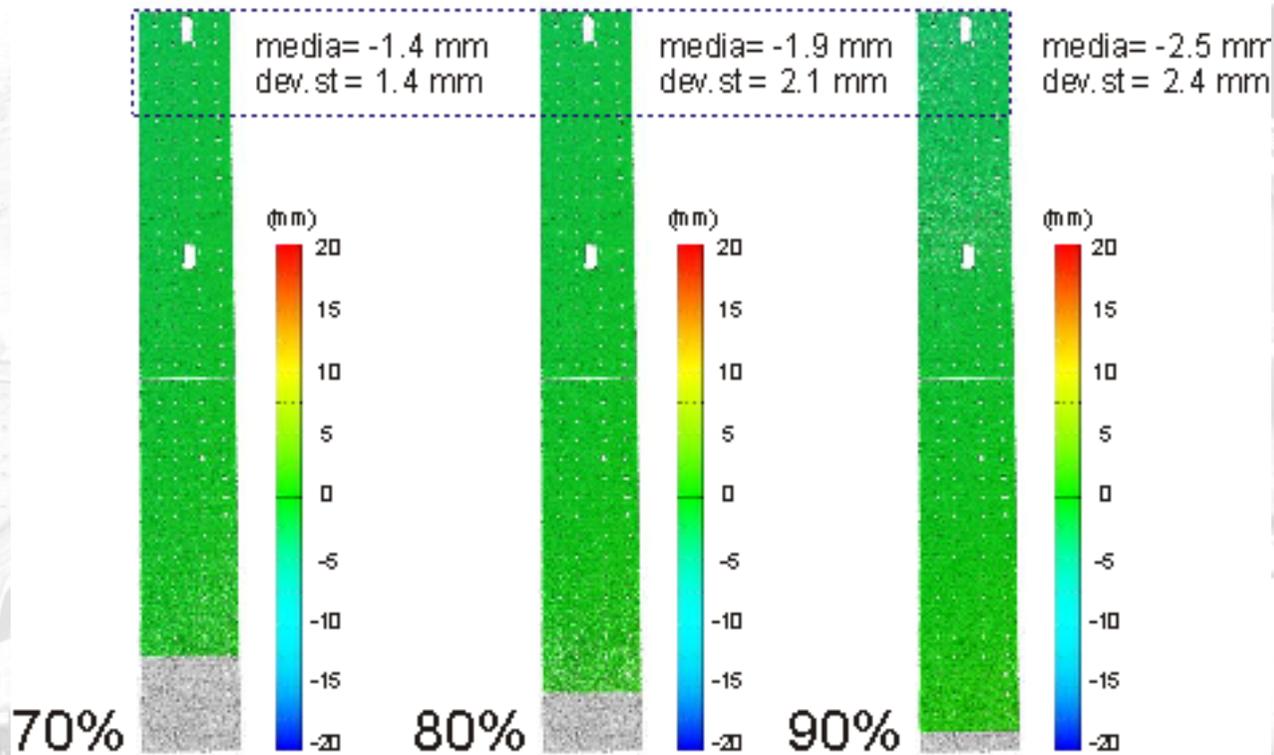
**VERIFICA DELLA PRECISIONE
DI ALLINEAMENTO**



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

TEST: allineamento delle scansioni acquisite con geometria "critica"

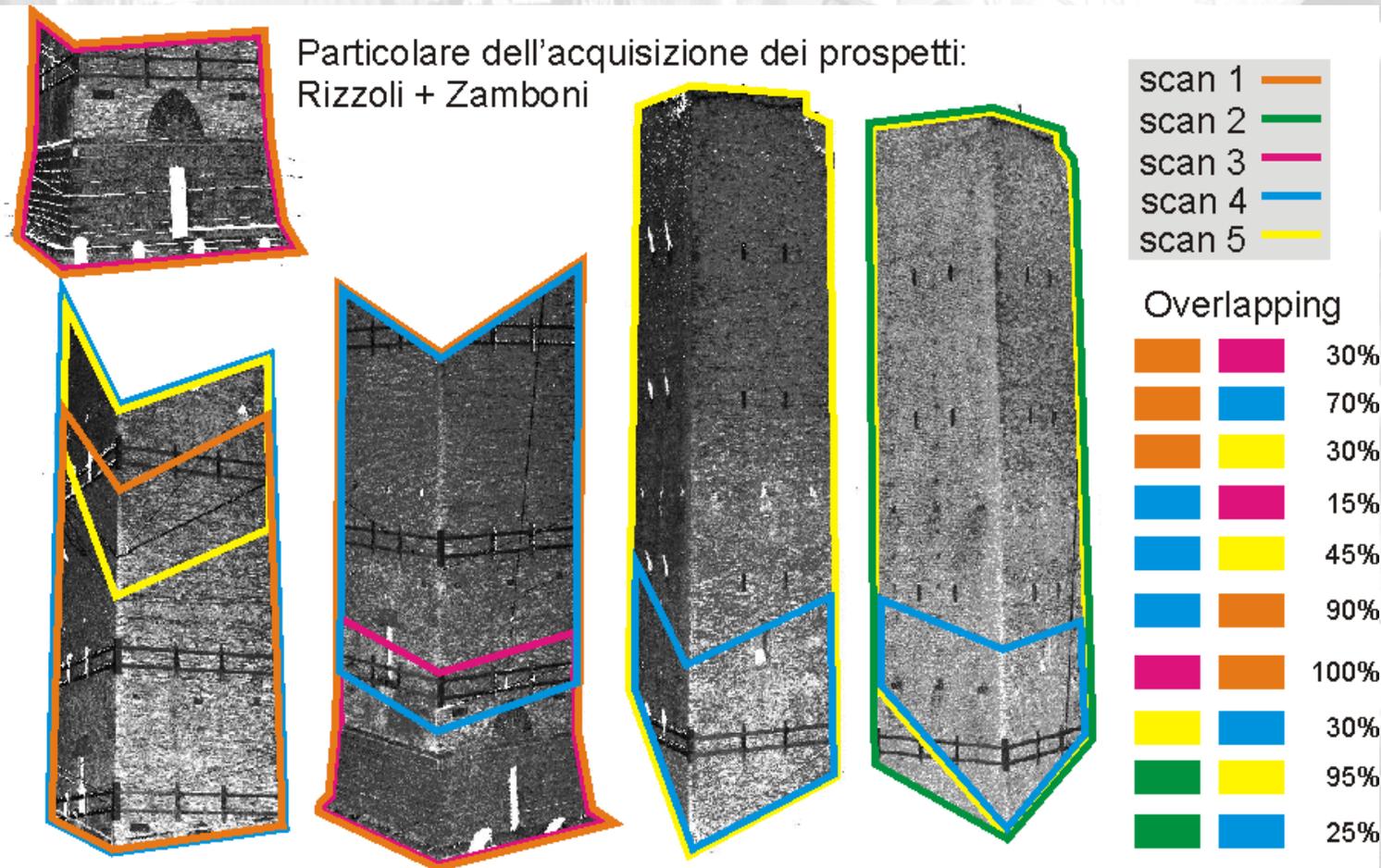
**VERIFICA DELLA PRECISIONE
DI ALLINEAMENTO**



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

Allineamento delle scansioni mediante algoritmi ICP di "Surface Matching"

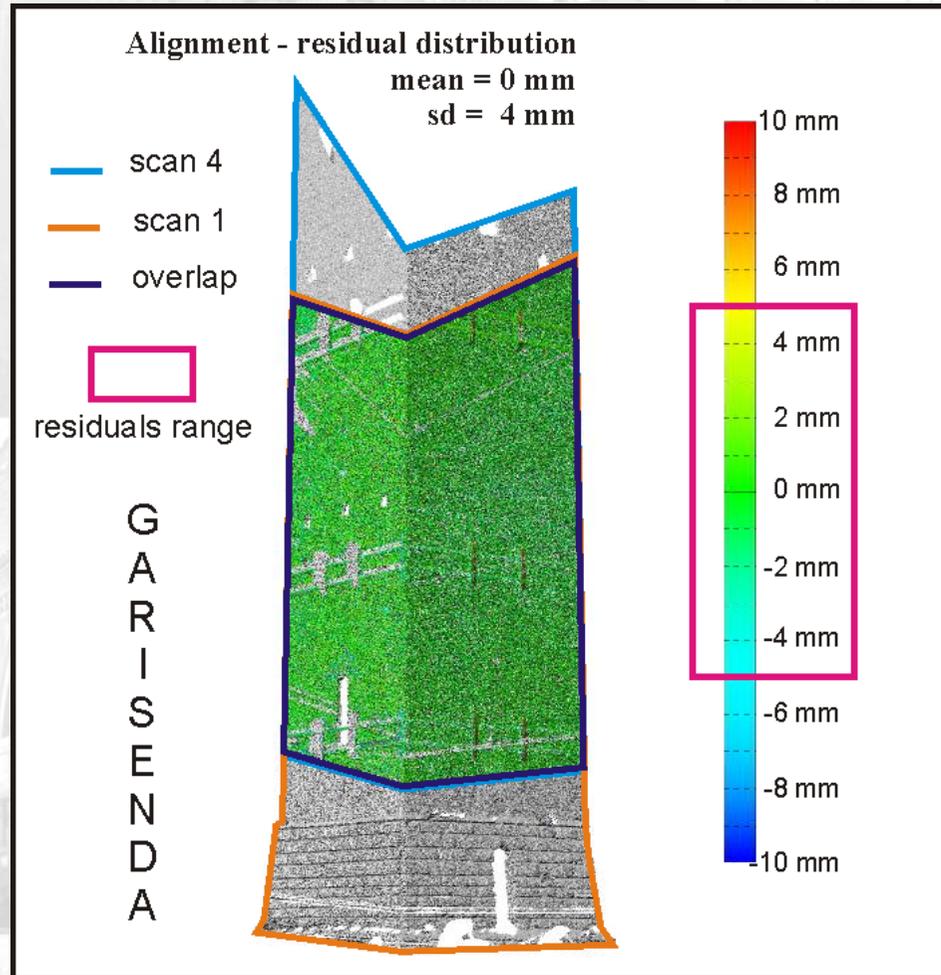
CONDIZIONI DI RILIEVO



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

Allineamento delle scansioni mediante algoritmi ICP di "Surface Matching"

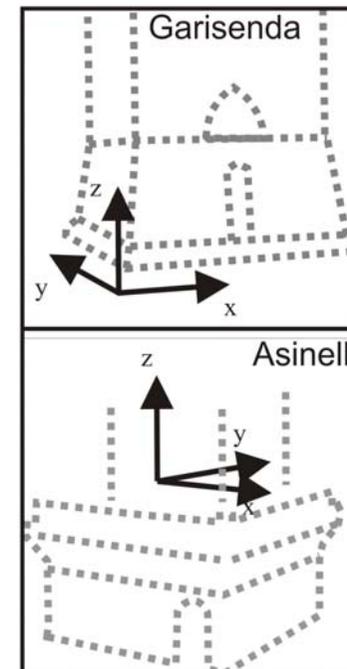
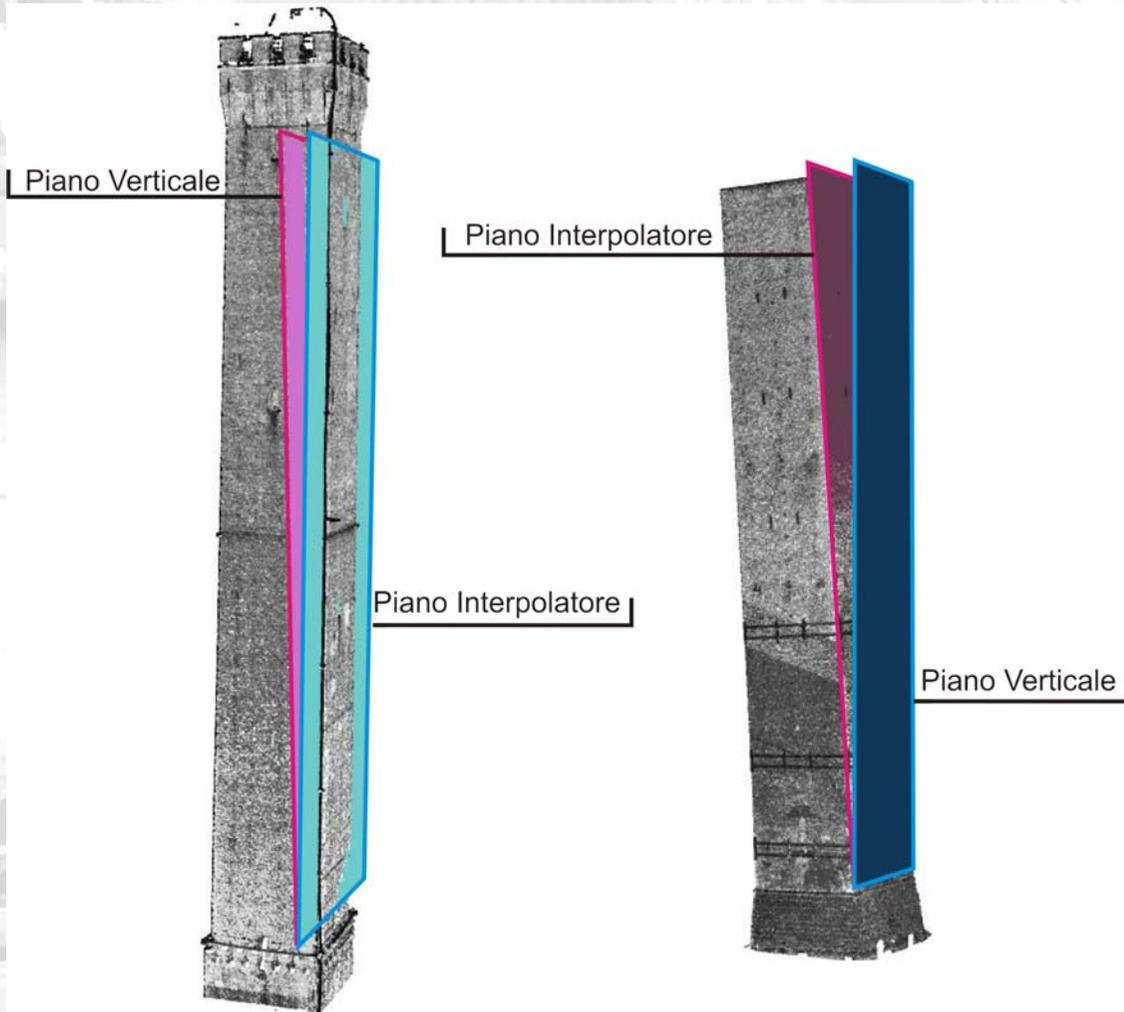
CONDIZIONI DI RILIEVO



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

ANALISI DELLA MORFOLOGIA DELLA TORRE MEDIANTE PIANI DI RIFERIMENTO

Piano VERTICALE
Piano INTERPOLATORE



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

ANALISI DELLA MORFOLOGIA DELLA TORRE MEDIANTE PIANI DI RIFERIMENTO

Piano VERTICALE
Piano INTERPOLATORE

Il **piano verticale** passa per la base della torre ed è utilizzato per mettere in rilievo l'inclinazione della facciata della torre.

Il **piano interpolatore** viene calcolato matematicamente e risulta essere il piano che meglio approssima la superficie in esame.

Le **differenze tra i punti** che giacciono su un prospetto ed il **piano verticale** permettono di osservare le grandi deviazioni della torre, principalmente dovute alla accentuata **inclinazione**.

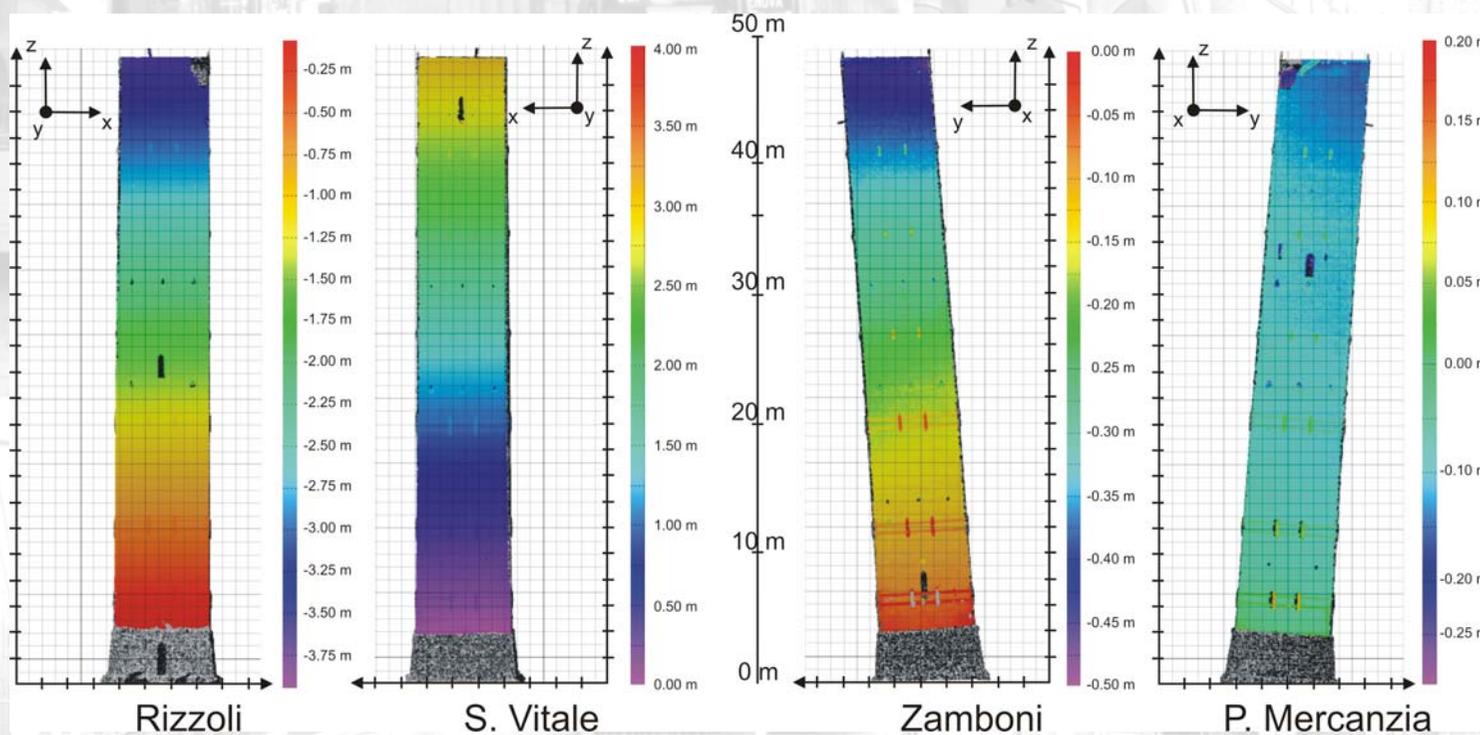
Le **differenze con il piano interpolatore** mettono in evidenza le irregolarità e le **deformazioni** rispetto ad una situazione non alterata.



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

ANALISI DELLA MORFOLOGIA DELLA TORRE MEDIANTE PIANI DI RIFERIMENTO

Piano VERTICALE



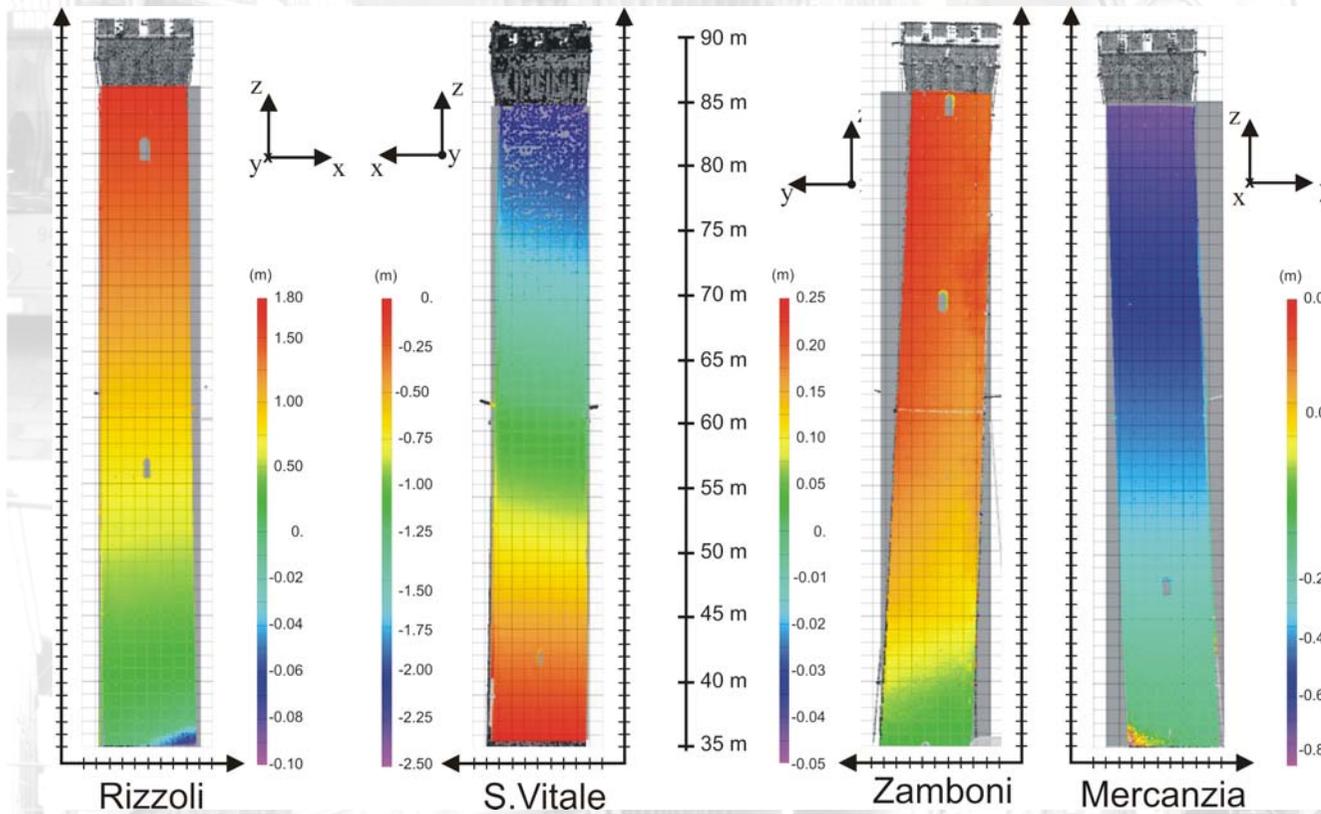
Le **differenze tra i punti** che giacciono su un prospetto ed il **piano verticale** permettono di osservare le grandi deviazioni della torre, principalmente dovute alla accentuata **inclinazione**.



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

ANALISI DELLA MORFOLOGIA DELLA TORRE MEDIANTE PIANI DI RIFERIMENTO

Piano VERTICALE



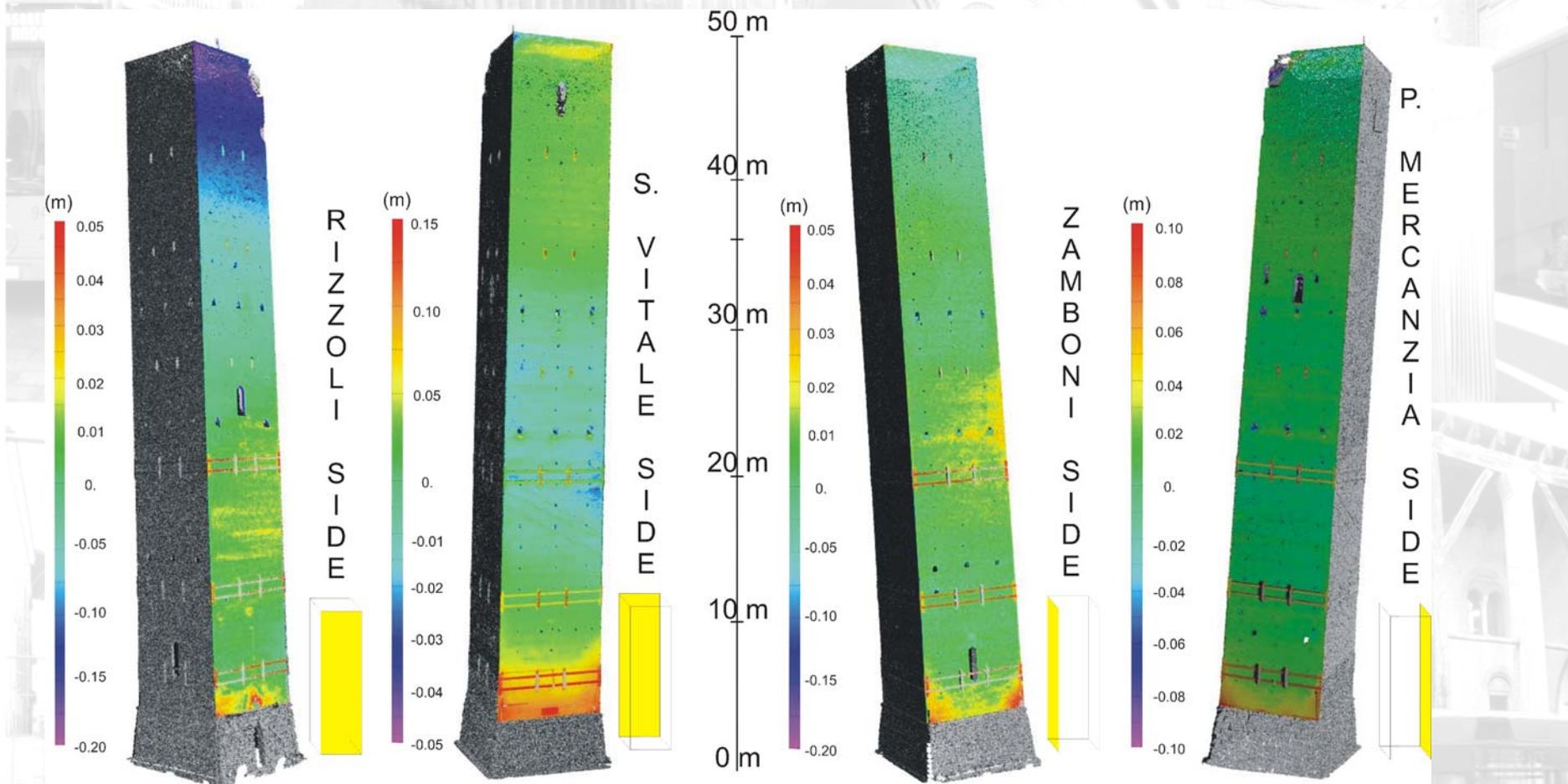
Le **differenze tra i punti** che giacciono su un prospetto ed il **piano verticale** permettono di osservare le grandi deviazioni della torre, principalmente dovute alla accentuata **inclinazione**.



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

ANALISI DELLA MORFOLOGIA – “DEFORMAZIONI” GARISENDA

Piano INTERPOLATORE



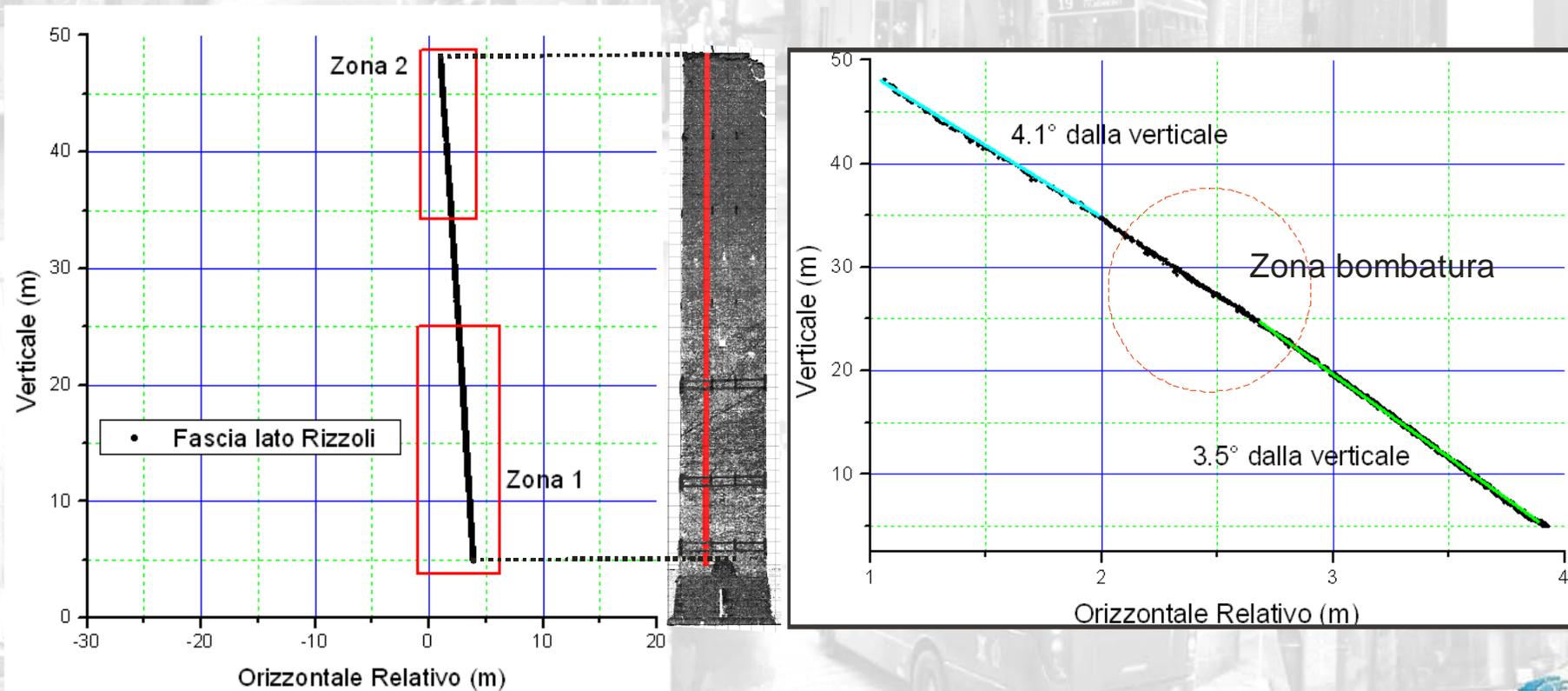
Pesci A., Casula G., Boschi E., 2011. Laser scanning the Garisenda and Asinelli towers in Bologna (Italy): detailed deformation patterns of two ancient leaning buildings, Journal of Cultural Heritage. In press. doi:10.1016/j.culher.2011.01.002



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

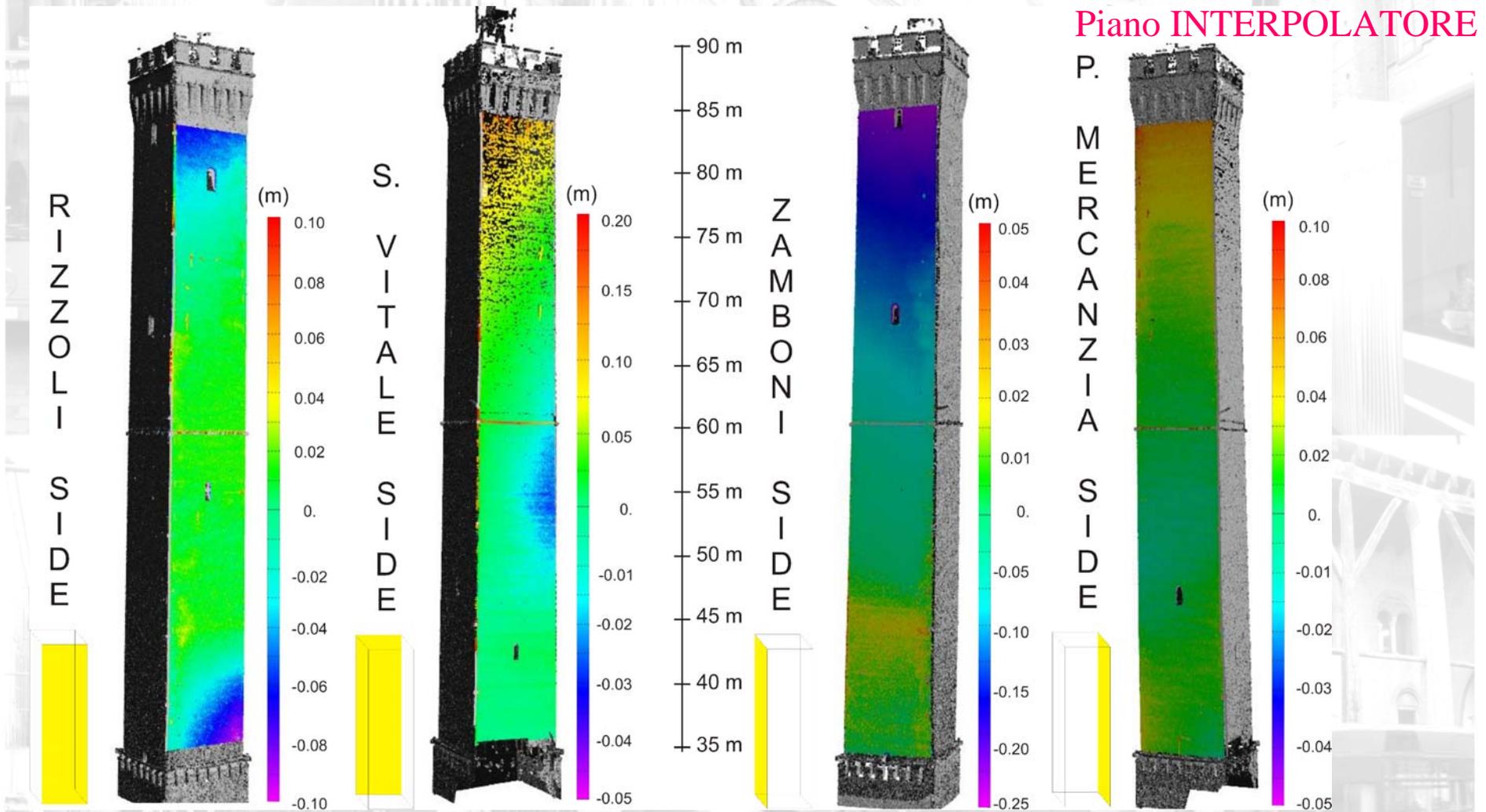
Garisenda RIZZOLI – Estrazione dei profili

Si riconoscono chiaramente due inclinazioni di 3.5° nella parte inferiore (5 – 25 m) e di 4.1° nella parte superiore (35 – 48 m)



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

ANALISI DELLA MORFOLOGIA – “DEFORMAZIONI” ASINELLI



Pesci A., Casula G., Boschi E., 2011. Laser scanning the Garisenda and Asinelli towers in Bologna (Italy): detailed deformation patterns of two ancient leaning buildings, Journal of Cultural Heritage. In press. doi:10.1016/j.culher.2011.01.002



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

ANALISI DELLA MORFOLOGIA – “DEFORMAZIONI” ASINELLI

Piano INTERPOLATORE

Salvanini, 1953 sulla vibrazione della torre sottoposta a raffiche di vento, parla chiaramente di torsione! “Quando la sommità della torre è in movimento rotatorio, al sopraggiungere di una raffica di vento, la forza orizzontale della raffica si combina con quella rotatoria della torre generando la torsione”

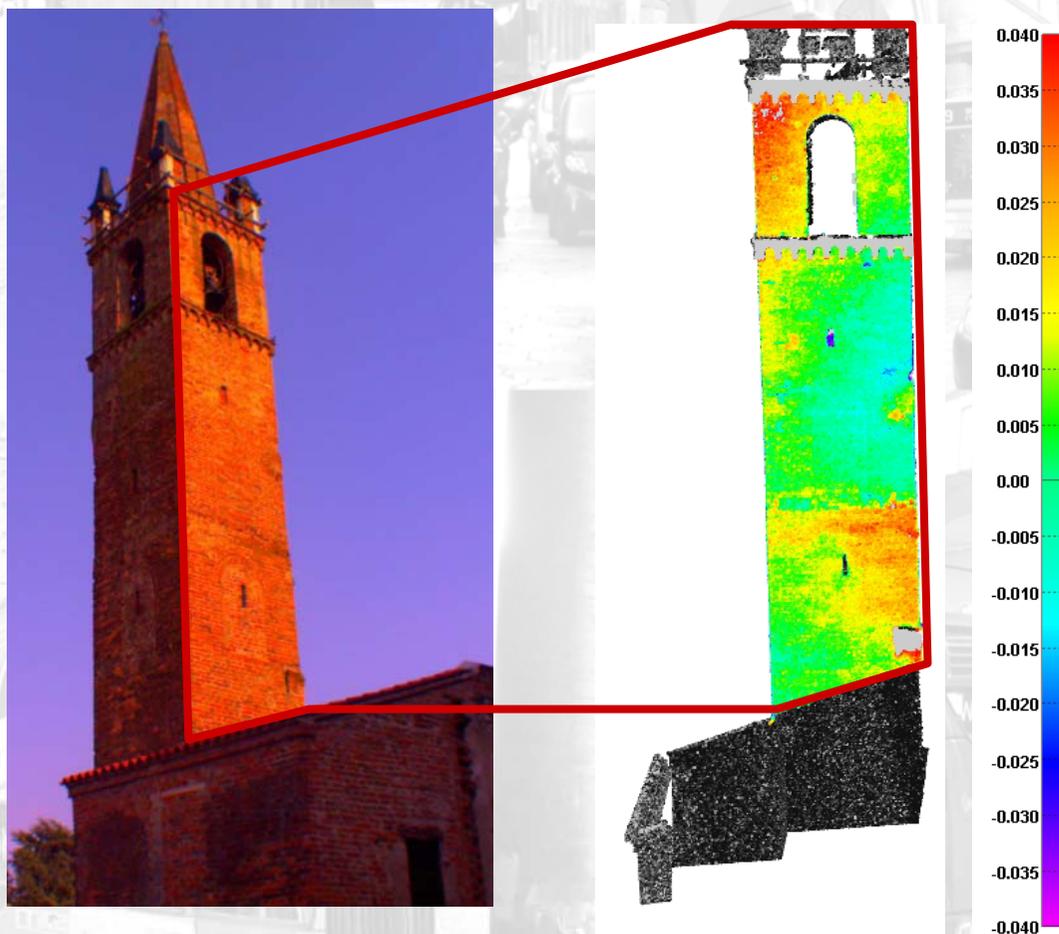
L'Avvenire d'Italia 12 Gennaio 1955

“Nel 1468 un terribile vento facendola oscillare determinò la caduta della campana che portava in cima. Tale caduta provocò un urto sussultorio; così pure un urto sussultorio ebbe a subire l'edificio nel 1398 quando per un incendio la campana di 795 kg cadde fondendosi poi per il gran fuoco in fondo alla torre.”



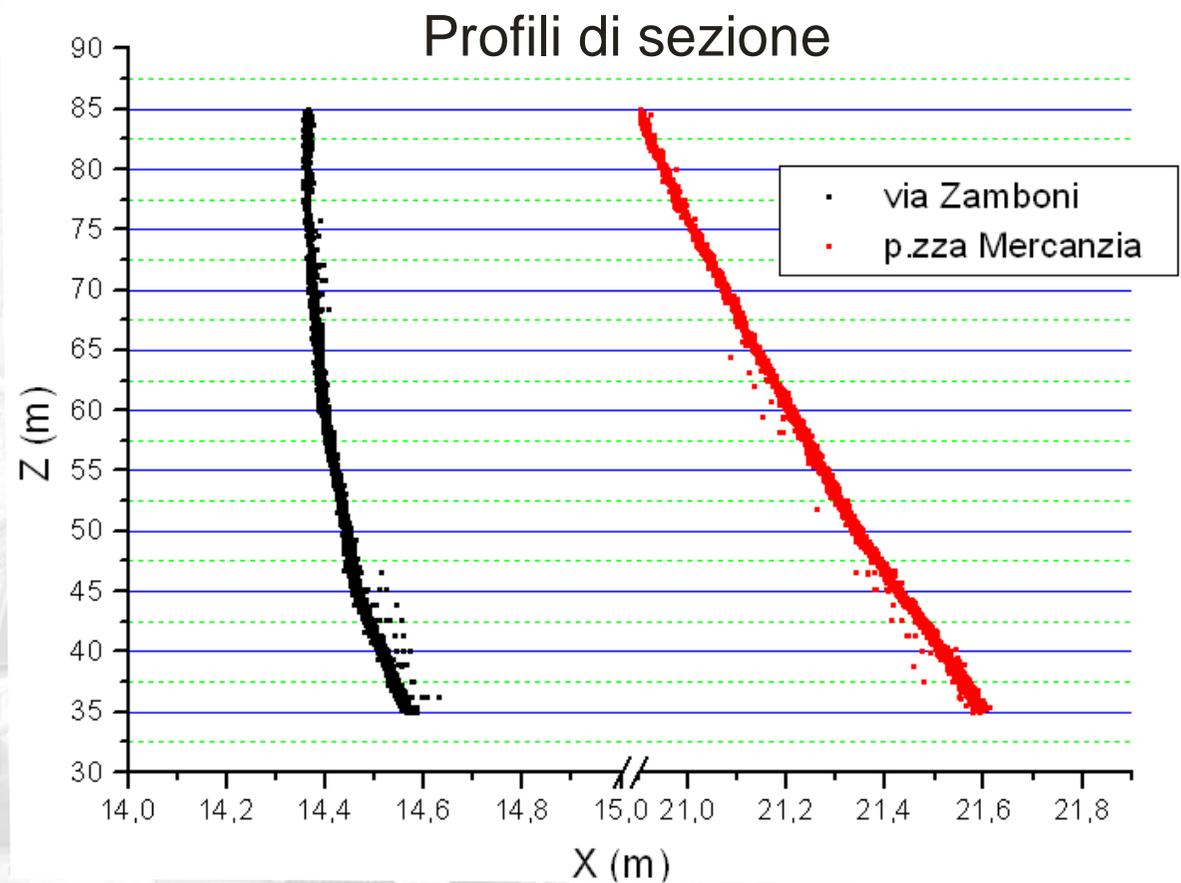
Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA
ANALISI DELLA MORFOLOGIA – ESEMPIO
CAMPANILE BEVILACUQA (VR): TORSIONE
IN SEGUITO A FORTE PERTURBAZIONE
(da testimonianze su documentazioni curia)

Piano INTERPOLATORE



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

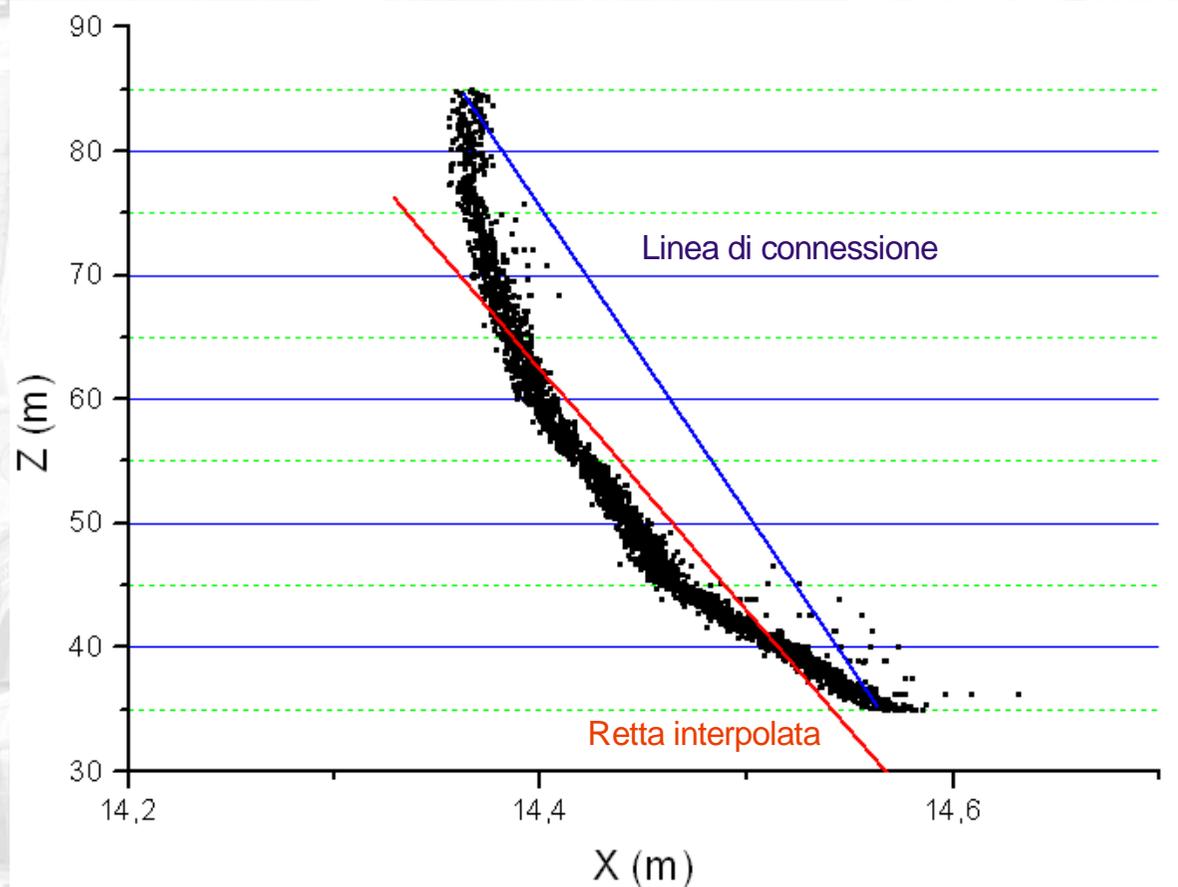
Asinelli – Estrazione profili su Zamboni e Mercanzia



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

Asinelli – Zoom profili su Zamboni

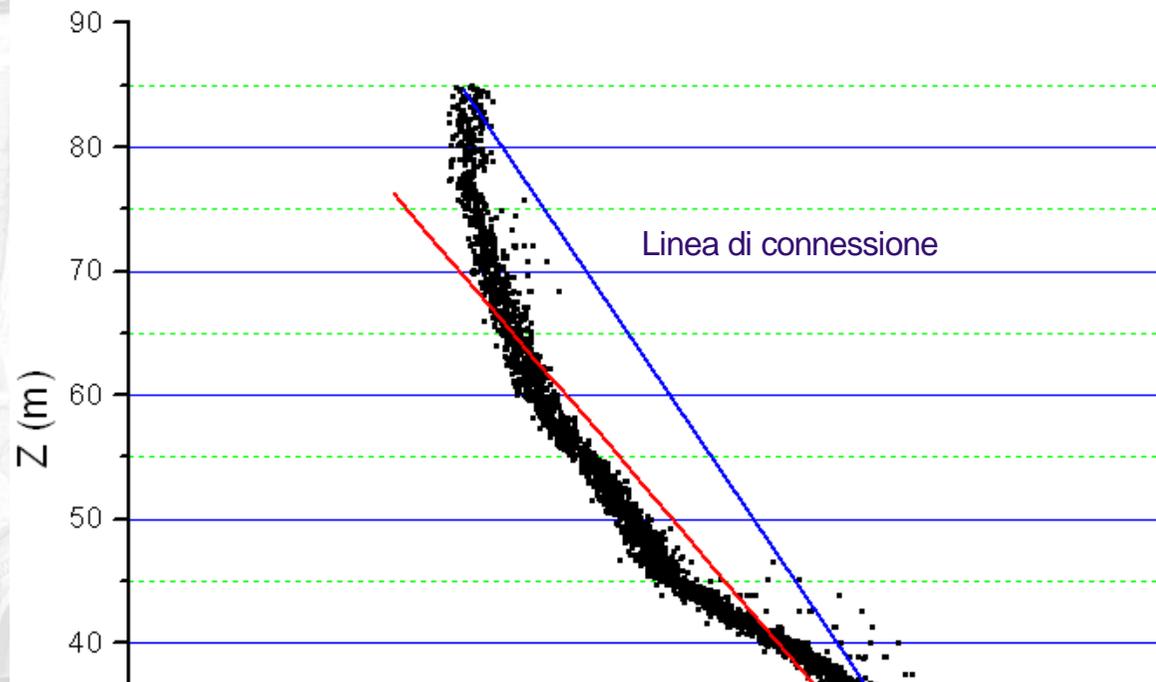
Evidente curvatura (segmentazione). Inclinazione media 0.3°



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

Asinelli – Zoom profili su Zamboni

Evidente curvatura (segmentazione). Inclinazione media 0.3°

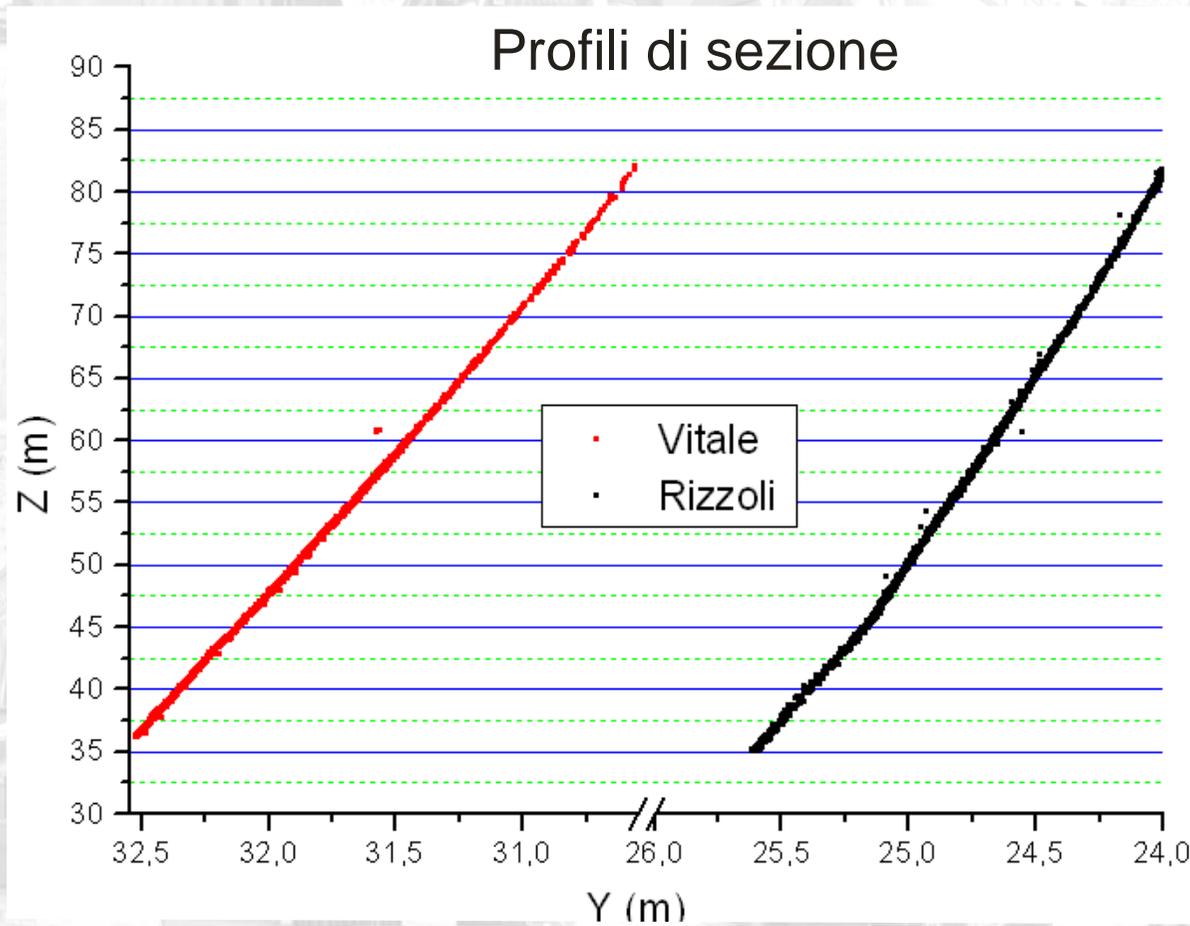


Cavani 1918: “...delle cause delle pendenze, che non sono da ricercarsi nei capricci dei costruttori, come vogliono alcuni i quali dichiarano che le torri furono innalzate pendenti a bella posta, ma bensì nei cedimenti del terreno sottostante ed in altre cause naturali”.



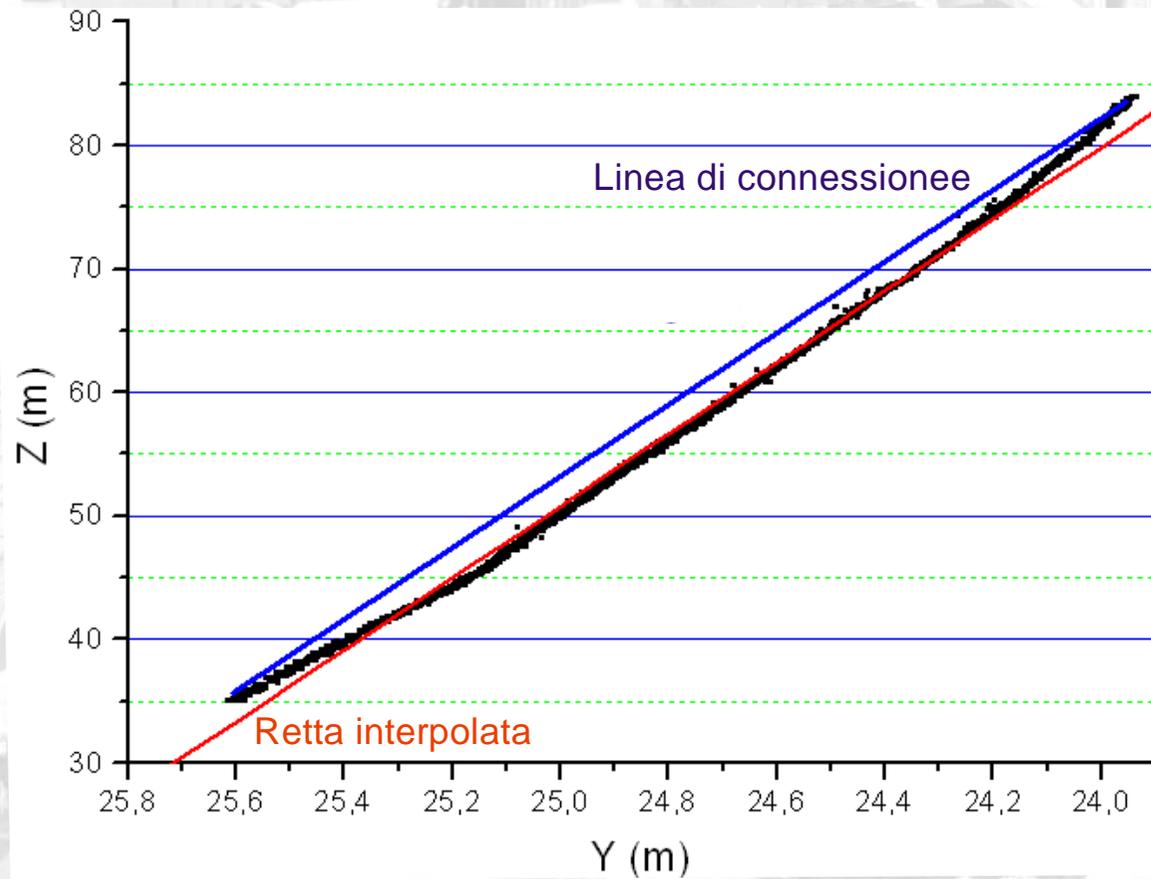
Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

Asinelli – Estrazione profili su Rizzoli e S.Vitale



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

Asinelli – Estrazione profili su Rizzoli
Netta rientranza tra 35 e 45 m e segmentazione.
Inclinazione mediamente 1.7°



Informazioni sulla Torre degli Asinelli

SCHEMA DELLA COSTRUZIONE

CORPO:

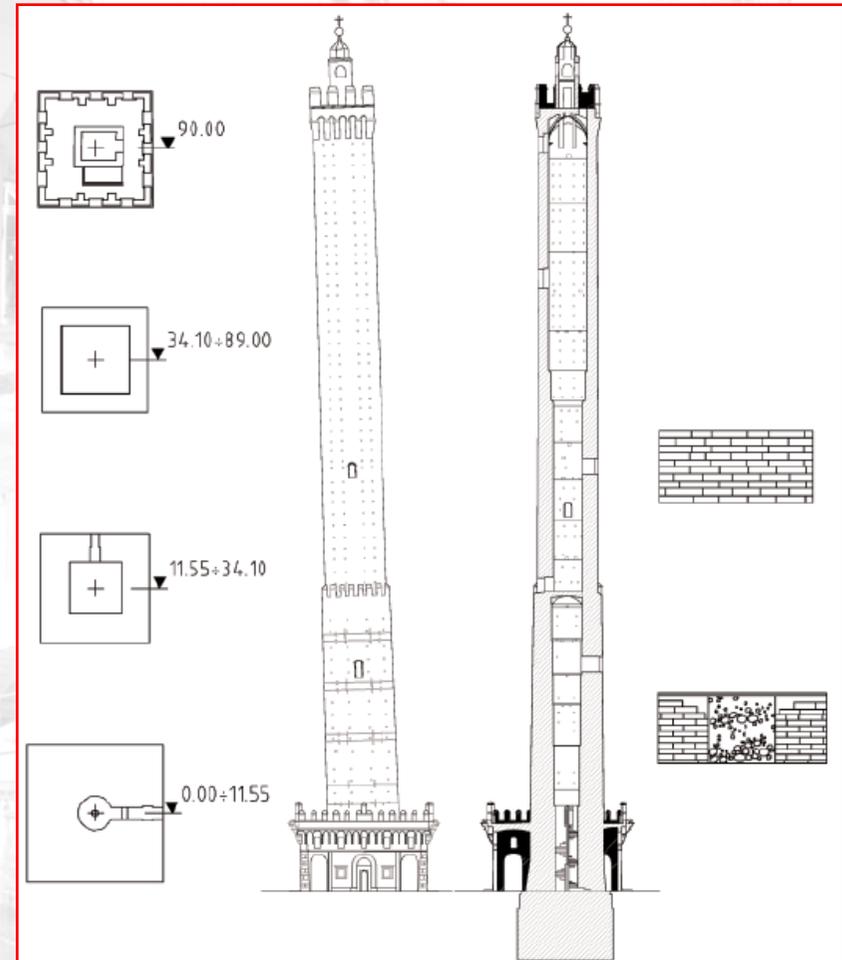
- Muratura a sacco fino a 60 m
- Muratura in mattoni pieni per alleggerire fino alla cima

BASAMENTO:

Blocchi di selenite

SUOLO:

Argille di varia qualità (anche limose), miste a ciottoli e frammenti nella zona superficiale fino a circa 5.50 m sotto il piano campagna.



Informazioni sulla Torre degli Asinelli

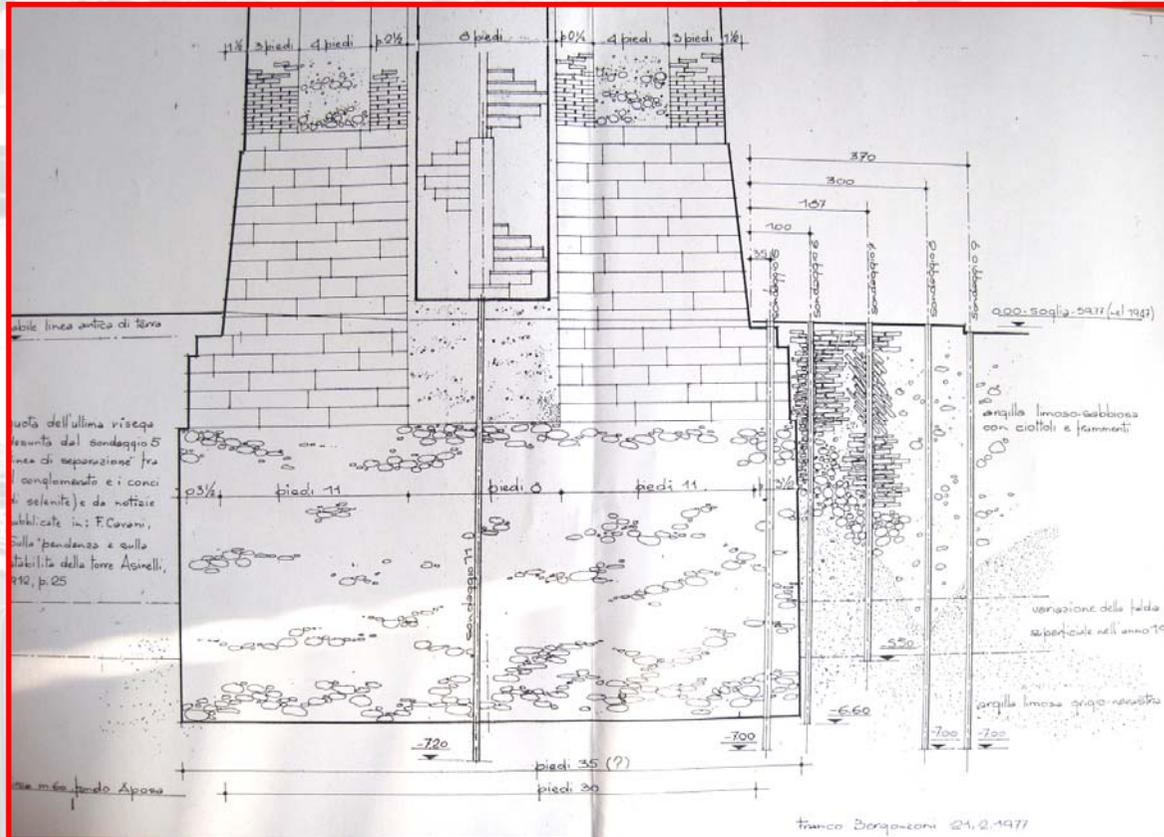
SCHEMA DELLA COSTRUZIONE

BASAMENTO:

Blocchi di selenite

SUOLO:

Argille di varia qualità (anche limose), miste a ciottoli e frammenti nella zona superficiale fino a circa 5.50 m sotto il piano campagna.



Franco Bergonzoni 21 2 1977

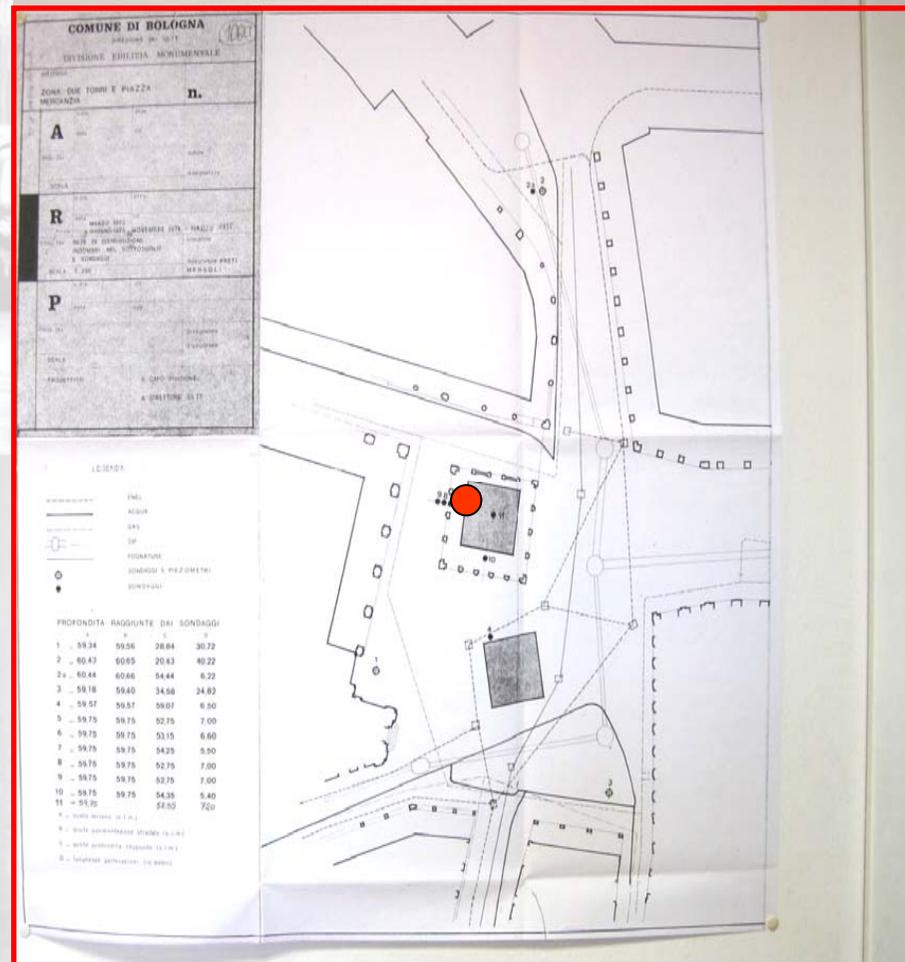


Informazioni sulla Torre degli Asinelli

COMUNE di BOLOGNA – SONDAGGI (trivellazioni)

Asinelli Gennaio 1974

EDILPALI 40127 BOLOGNA Viale della Repubblica 25 Tel. 51.63.52		SONDAGGIO N. 5 Quota iniziale : Tipo avanzamento : trivellazione a secco Data : Gennaio 74		SEZIONE GEOTECNICA Dr. P. L. Barattella Dr. A. Ronchi	
COMMITTENTE : COMUNE DI BOLOGNA			LOCALITA' : Torre Asinelli		
Colonna stratigrafica	DESCRIZIONE TERRENI	OSSERVAZIONI	P.P. Kg/cm ³	Torva Kg/cm	
	Gesse selenitiche con cristalli di media dimensione.	Parecchio compatto.			
	Breccia calcarea molto cementata e calcareniti, presenti inoltre ciottoli di medie dimensioni inglobati con calce.	Probabilmente in blocchi dimensionati - legante usato, calce.			
	Calcareniti e calcilutiti talora seleifere di colore grigiastro con venatura di calcite secondaria.	Molto compatto.			
	Argilla limosa grigio nerastra.	Scarsamente imbibite - consistenza molto dura.			



Informazioni sulla Torre degli Asinelli

DANNEGGIAMENTI SUBITI NEI SECOLI

Nei secoli la Torre ha subito incendi e terremoti, raffiche di vento di notevole entità e le vibrazioni dovute a due bombardamenti. A questi eventi sono spesso seguiti restauri compiuti in tempi brevi. Da ricordare in particolare:

- **l'incendio del 1398** che distrusse tutte le strutture lignee interne, la cui combustione ridusse in polvere uno strato non trascurabile dei blocchi in gesso crudo alla base della Torre;
- **il violento terremoto del 1505** che fece nuovamente crollare il cupolino e un merlo;
- **la saetta del 1754** che colpì la Torre danneggiando lo spigolo nordovest: furono demoliti o danneggiati 32 m di Torre, per una larghezza di 80 cm da entrambi i lati e per una profondità di 30 cm;
- **un altro fulmine che, nel 1763**, danneggiò lo spigolo sudovest appena sotto la cima per 4,5 m di lunghezza e 1 m per parte.

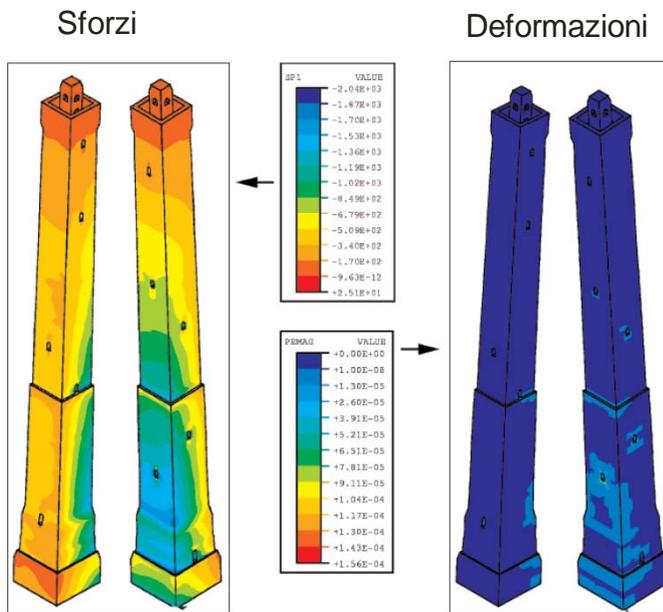
I fulmini continuarono a colpire la Torre fino al 1824, anno in cui fu posto in opera un parafulmine; nel 1906 inoltre furono collocate cinture di ferro lungo il primo tronco della Torre, fino a circa 30 m di altezza (Bergonzoni 1989).



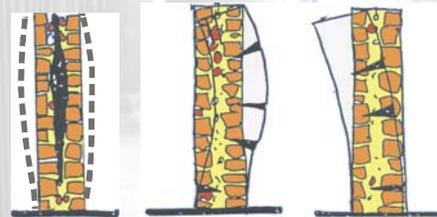
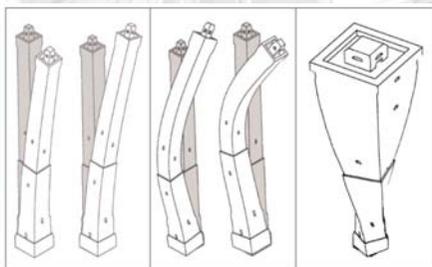
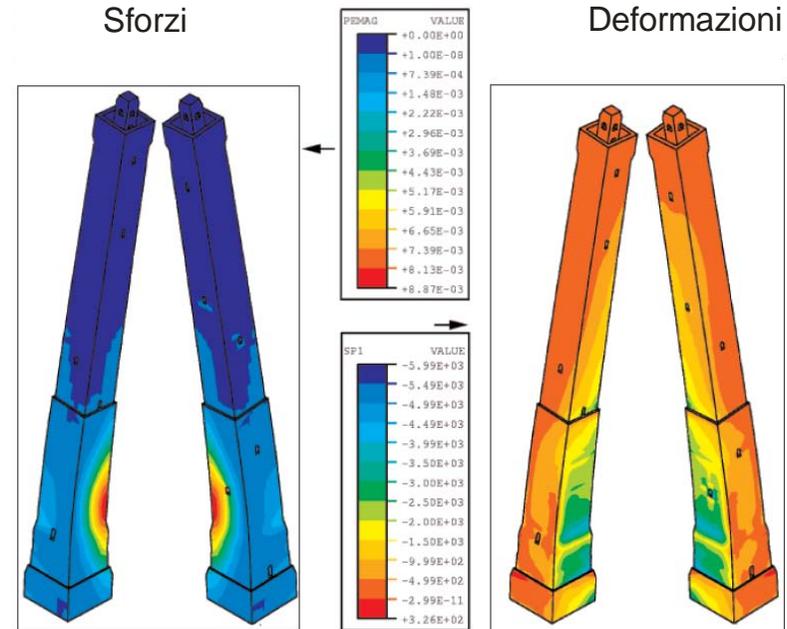
Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI (1998) EFFETTO DEL CARICO STATICO e SOLLECITAZIONI SISMICHE

Carico STATICO



Carico DINAMICO



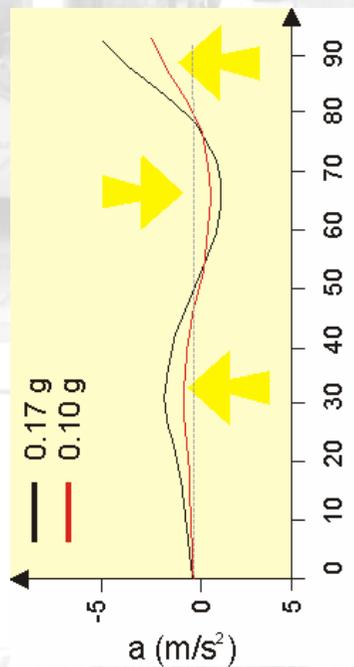
Riva, P., Perotti, F., Guidoboni, E., Boschi, E., 1998. Sesimic analysis of the Asinelli Tower and earthquakes in Bologna. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 17, 525-550.



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI (1998)
EFFETTO SOLLECITAZIONE SISMICA
Corrispondenza con le deformazioni misurate

Picchi di accelerazione



Limite compressione:

34 m

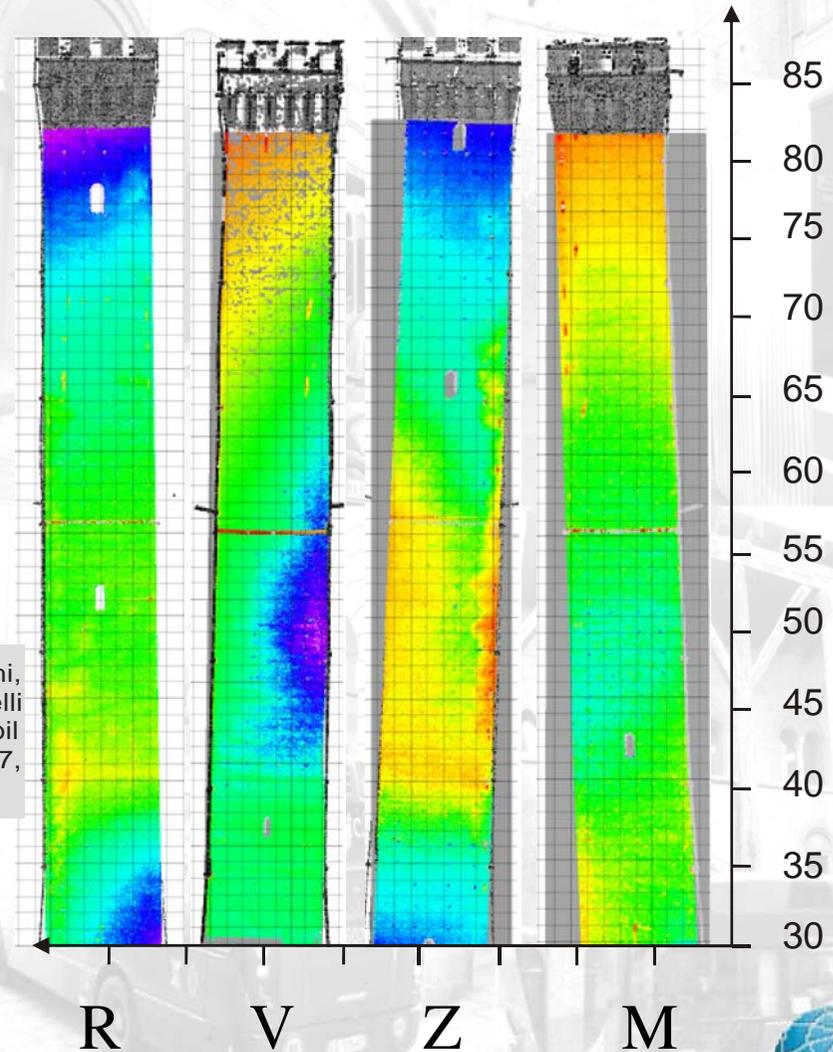
**Danneggiamenti zona di
transizione muratura:**

60 m

Riva, P., Perotti, F., Guidoboni, E., Boschi, E., 1998. Sesimic analysis of the Asinelli Tower and earthquakes in Bologna. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 17, 525-550.

Raggiunto carico statico (compressione)

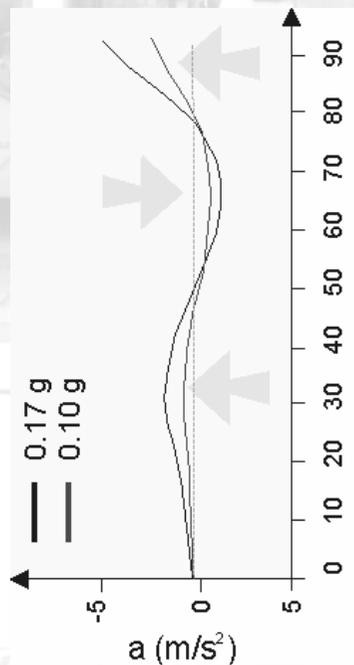
massimo tollerabile: N-O (Rizz-Zamb).



Rilievo Laser Scanner delle DUE TORRI di BOLOGNA

**ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI (1998)
EFFETTO SOLLECITAZIONE SISMICA
Corrispondenza con le deformazioni misurate**

Picchi di accelerazione



Limite compressione:

34 m

**Danneggiamenti zona di
transizione muratura:**

60 m

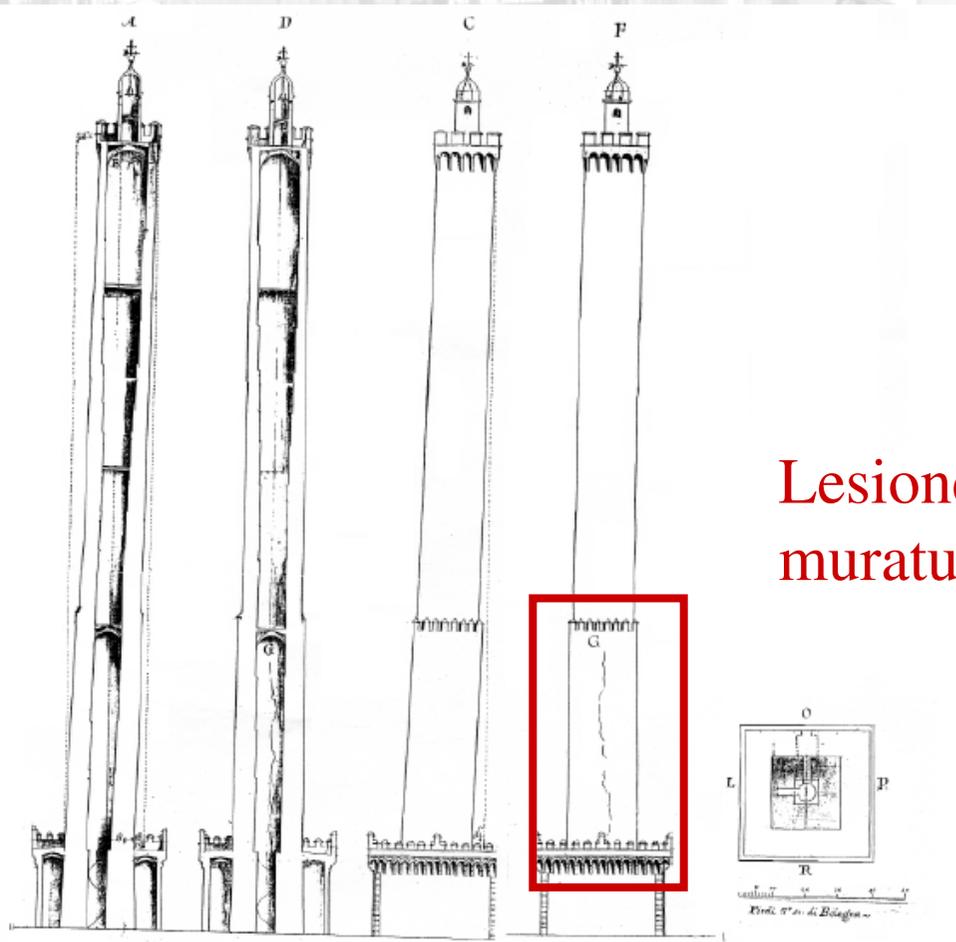
Riva, P., Perotti, F., Guidoboni, E., Boschi, E., 1998. Sesimic analysis of the Asinelli Tower and earthquakes in Bologna. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 17, 525-550.

**Salvanini (sismologo) sulla
sconnessione conci selenite
del basamento sul lato nord 1953:
sottolinea l'importanza di
comprendere se siano dovute a
fenomeni naturali o alla spinta
interna della muratura in stato di
schiacciamento.
Salvanini conclude che, citando una
perizia del 1774, che la lesione fosse
già stata stuccata in passato e che
quindi la stessa non dipenda da
fenomeni naturali ma da effetti di
carico.**

**Raggiunto carico statico (compressione)
massimo tollerabile: N-O (Rizz-Zamb).**



DISEGNO REALIZZATO NEL 1774 DAGLI ARCHITETTI: GIAN GIACOMO DOTTI E FRANCESCO TADOLINI.

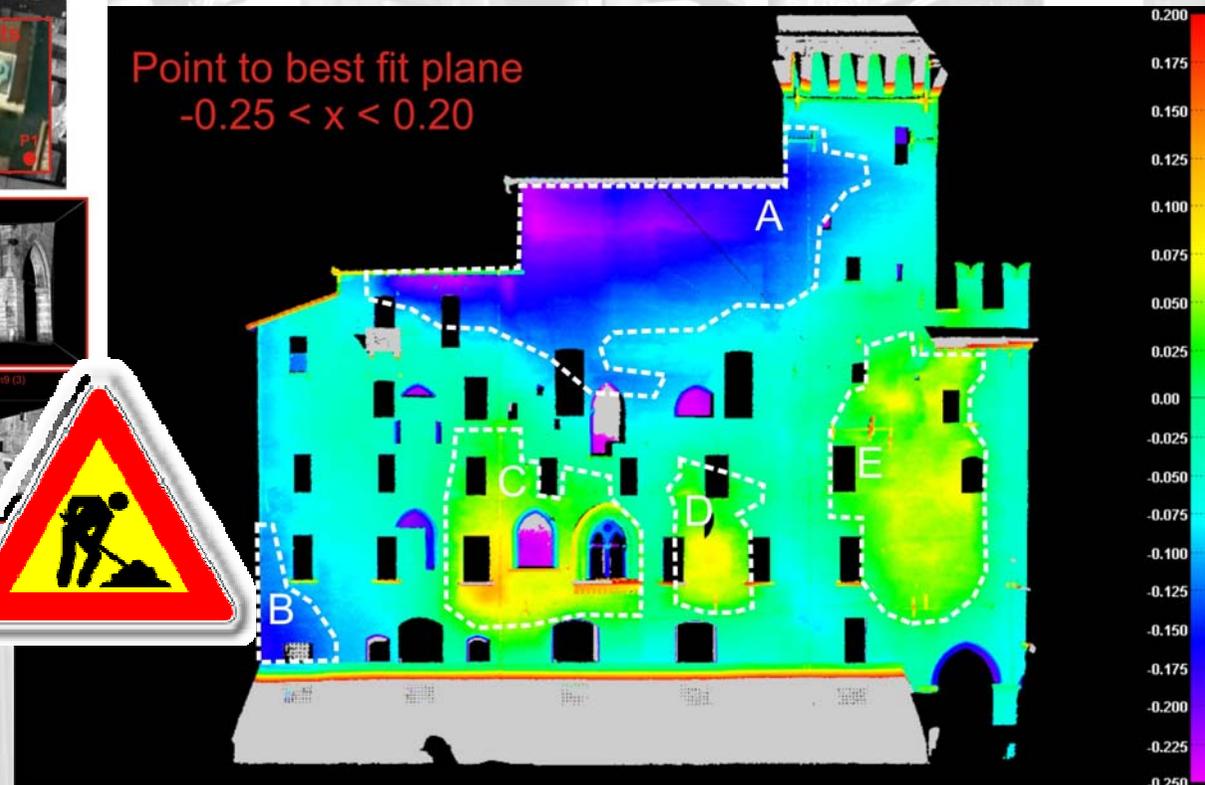
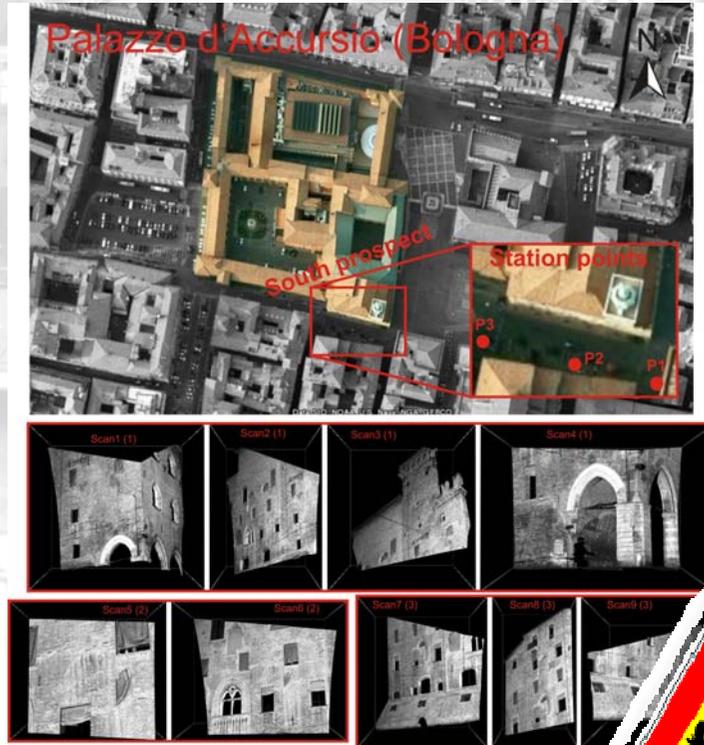


Lesione della muratura



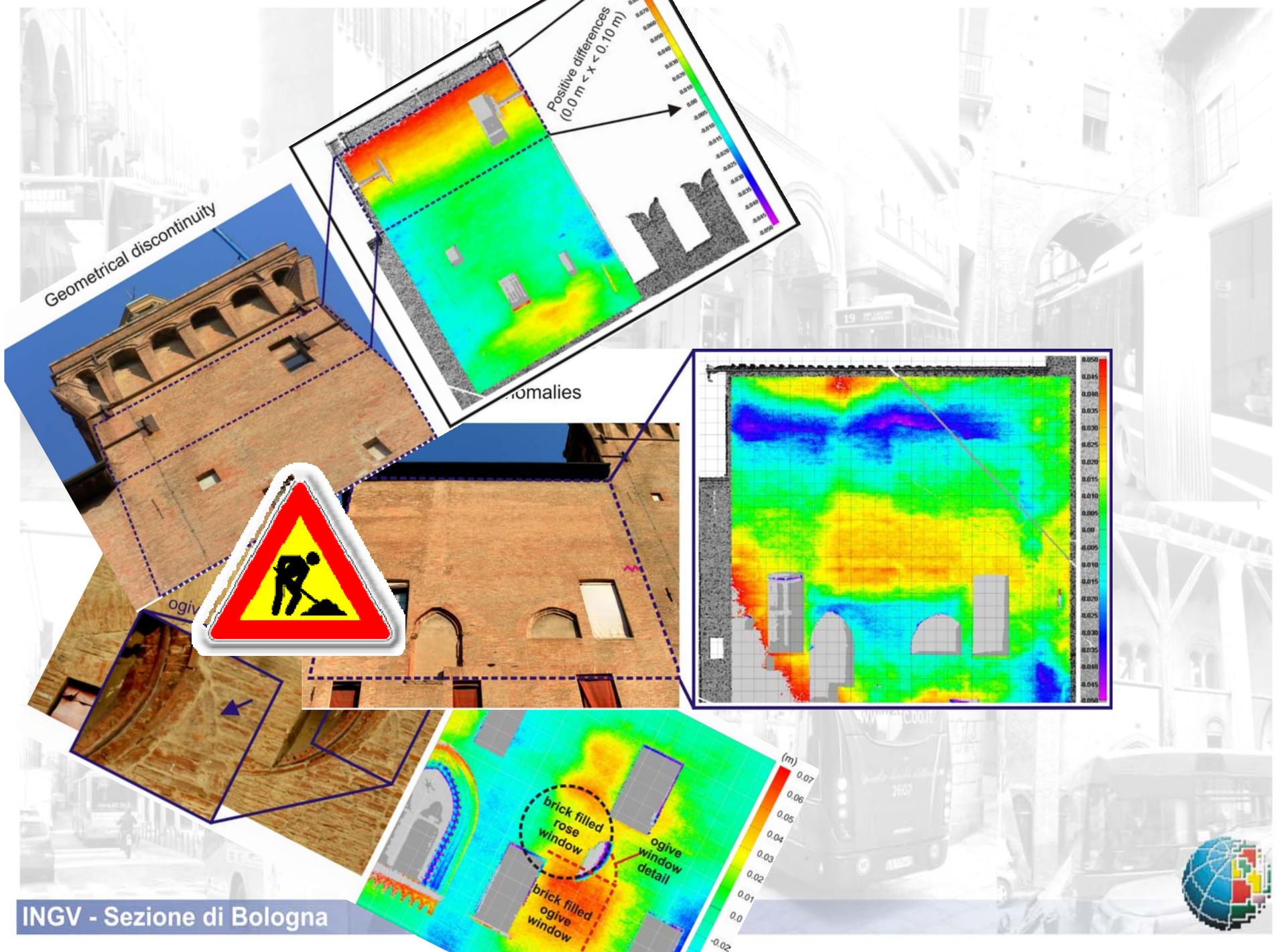
Rilievo Laser Scanner di Palazzo Accursio (su via IV Novembre)

Pesci A., Bonali E., Galli C., Boschi E.



Sottomesso a Journal of Cultural Heritage





Geometrical discontinuity

Positive differences
(0.0 m < x < 0.10 m)

Anomalies



ogive

brick filled
rose window

ogive
window detail

brick filled
ogive
window

(m)





GRAZIE PER L'ATTENZIONE!!!

Grazie agli storici INGV per il materiale prezioso

