

Indagini non distruttive per la caratterizzazione di mura storiche: il caso della parete sinistra del Chiostro del 1500 della Certosa di Bologna

S. BIGNARDI¹, N. ABU ZEID¹, G. SANTARATO¹

¹ Dipartimento di scienze della terra, Università Degli Studi di Ferrara

Bignardi Samuel: bgnsml@unife.it

Abstract

The cemetery of Bologna is home to many artifacts of great historical and artistic value. This legacy poses significant problems in terms of conservation and restoration and targeted design requires the proper characterization of the state of the artifacts. In this paper we present the results of three geophysical methods (acoustics, Georadar and electrical resistivity tomography) for non-invasive characterization of a portion of the left wall of the corridor to the Cloister of 1500. The analysis showed the presence of structural heterogeneity and localized anomalies. The heterogeneity is represented by macro-structures, such as the closure of an old gate and small abnormalities, such as plaques and likely presence of hidden voids containing small objects.

Finally, the results of acoustic and electric surveys confirmed the presence of loose/porous material behind some gravestones. These results are to underline the usefulness of using integrated geophysical techniques for the characterization of heterogeneity at different scales, leading to proper planning and limiting the number of invasive procedures.

Keywords: Georadar, ERT, Acoustic, Historical masonry.

Riassunto

Il cimitero monumentale di Bologna ospita un gran numero manufatti di valore artistico e storico. Tale patrimonio pone problemi non trascurabili in termini di conservazione ed una mirata progettazione delle opere di restauro necessita della corretta caratterizzazione dello stato dei manufatti. In questa nota si presentano i risultati dell'applicazione di tre metodi geofisici (Acustica, Georadar e Tomografia della Resistività Elettrica) per la caratterizzazione non invasiva di una porzione della parete sinistra del corridoio per il Chiostro del 1500. L'analisi ha evidenziato la presenza di eterogeneità a carattere strutturale ed alcune anomalie localizzate. Le

eterogeneità sono rappresentate da macro-strutture, quali la muratura di una antica apertura e altre anomalie, quali lapidi nascoste e probabile presenza di piccoli vuoti contenenti oggetti. Infine, i risultati delle indagini acustica ed elettrica confermano la presenza di materiale incoerente/poroso dietro alcune lapidi.

Con questi risultati si sottolinea l'utilità dell'utilizzo di tecniche geofisiche integrate per la caratterizzazione di eterogeneità a diversa scala, portando ad una corretta pianificazione e limitando il numero di indagini invasive.

Parole chiave: Georadar, ERT, Acustica, Murature storiche.

Introduzione

L'imponente patrimonio storico italiano e le difficoltà nel reperimento di fondi per la conservazione dei manufatti di pregio rendono necessaria un'oculata individuazione delle opere che presentano la maggiore urgenza in termini di restauro e conservazione. Inoltre, la valutazione dello stato di salute dei manufatti non può prescindere dal rispetto della loro integrità.

Il presente studio pone l'attenzione sull'applicazione di indagini geofisiche per la caratterizzazione non invasiva di tale classe di manufatti.

Il complesso cimiteriale di Bologna [1] si colloca ai piedi del Colle della Guardia, alla fine del colonnato che si diparte dal santuario della Madonna di S. Luca. Risalente al 1300 d.C., ha subito nel tempo numerosi ampliamenti. L'introduzione di elementi di pregio quali sculture, marmi e affreschi fanno del complesso un esteso museo a cielo aperto di incalcolabile valore. Tale contesto rende difficoltosa l'opera di conservazione dei manufatti, sia in termini di valutazione delle parti a rischio, sia di reperimento delle risorse economiche necessarie.

La valutazione dello stato di salute dei manufatti deve pertanto essere perseguita attraverso strumenti efficienti, non invasivi ed economici. Nel presente studio si discute l'approccio metodologico utilizzato per la caratterizzazione di una porzione della parete sinistra del corridoio per il Chiostro del 1500 (Fig. 1). Questa, lunga oltre 8 metri e spessa 0,5 m, ospita attualmente numerose lapidi. La porzione di parete in Fig. 2 è stata investigata con tre tecniche: la tomografia della resistività elettrica (ERT), il georadar (GPR) ed il metodo acustico a trasmissione (TA). L'impiego di queste tecniche ha permesso di caratterizzare la struttura interna della parete in base alla mappatura della variazione spaziale di tre differenti proprietà fisiche (resistività elettrica, permittività dielettrica e velocità delle onde acustiche). Queste variazioni possono essere a carattere globale, in relazione alla variabilità dei diversi materiali costitutivi, in particolar modo materiali di riempimento di tipo incoerente ed alla presenza di umidità. Tuttavia, in alcuni casi queste variazioni permettono di individuare anomalie locali corrispondenti a corpi

e/o oggetti di dimensioni ridotte. Ciascuna tecnica è maggiormente efficace ad una specifica scala ed è pertanto consigliabile l'utilizzo integrato di più tecniche d'indagine. Tale strategia si rivela un potente strumento diagnostico e si è infatti rivelata di particolare efficacia sia nel presente studio, sia in altri contesti monumentali [2].

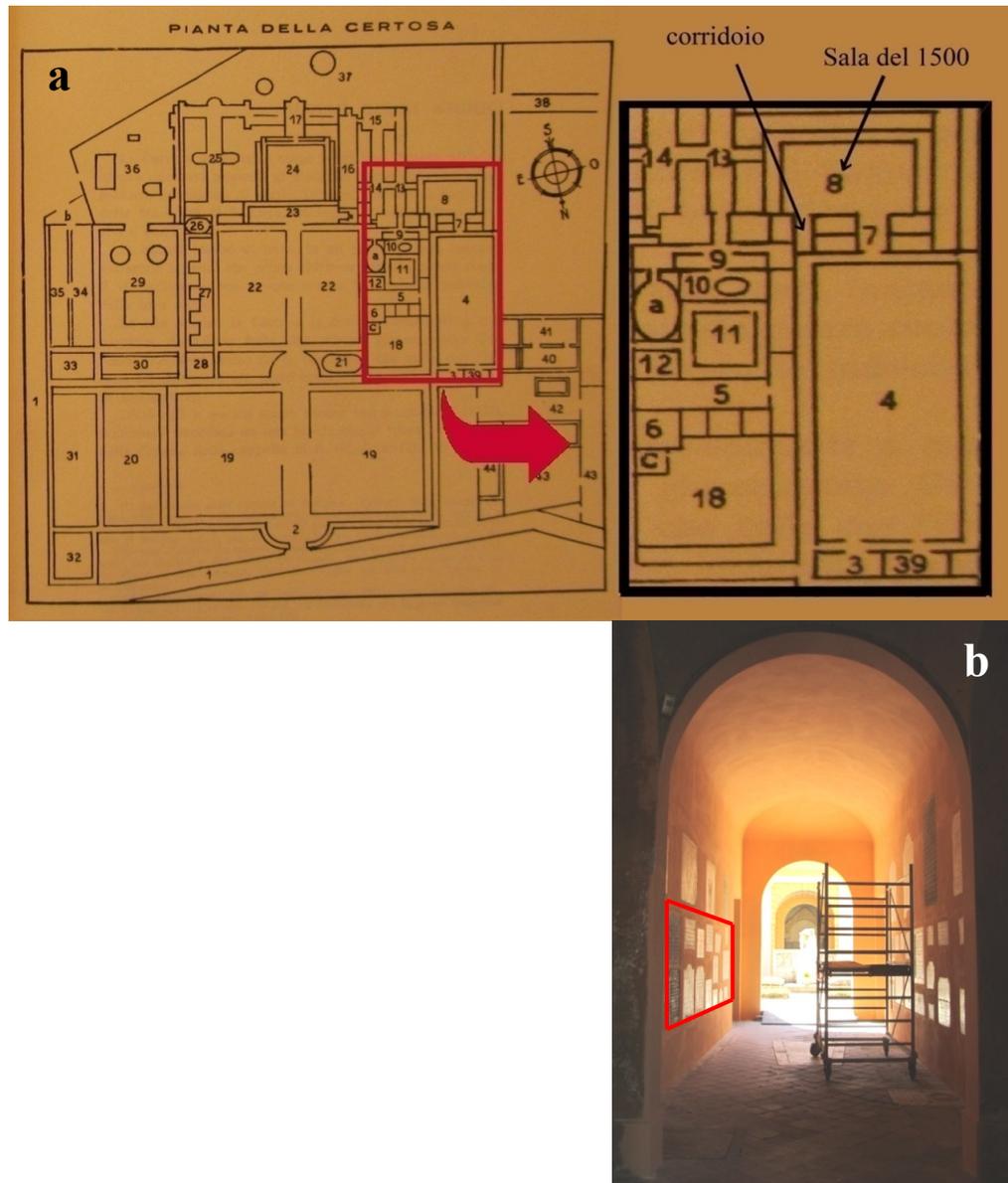


Fig. 1: (a) planimetria del cimitero monumentale di Bologna "Certosa" e (b) foto del corridoio per il chiostro del 1500. Rettangolo rosso indica l'area investigata.

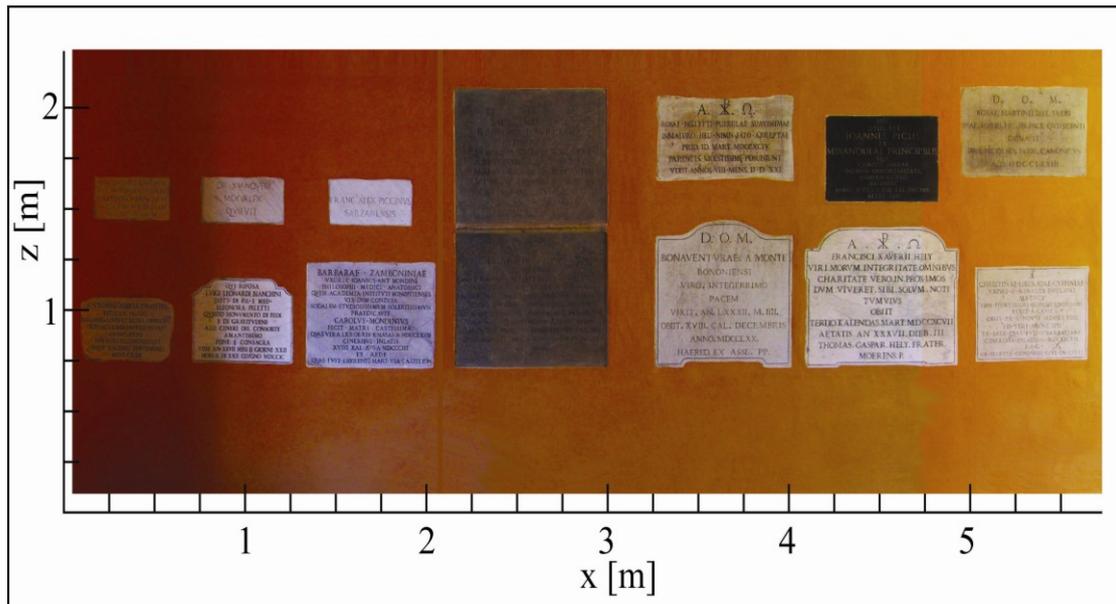


Fig. 2: particolare della porzione della parete sinistra del corridoio del 1500 della Certosa di Bologna.

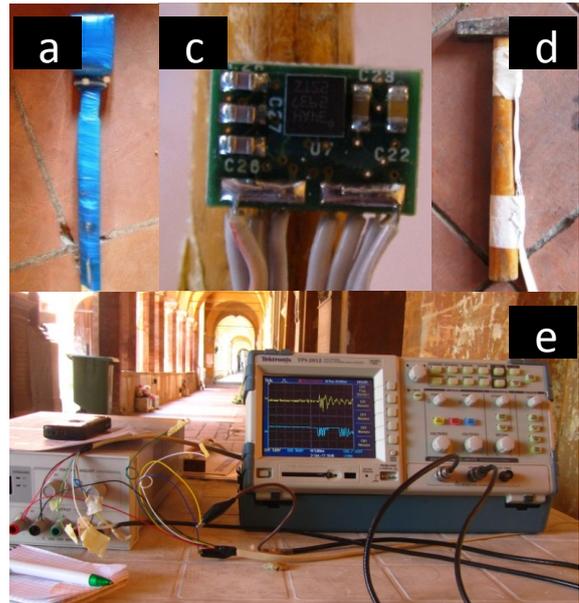
Le indagini non invasive

L'indagine è stata programmata in tre fasi consecutive: il georadar, acustica ed ERT.

Il georadar sfrutta la riflessione di onde elettro-magnetiche (E.M.) per individuare superfici di discontinuità della permittività dielettrica ed è pertanto particolarmente indicato nella individuazione delle geometrie. L'indagine, effettuata con modalità monostatica utilizzando un'antenna bipolare (TR2000 Bip da 2 GHz prodotta da IDS, PISA) si è svolta in due momenti distinti. Una prima acquisizione, durante la quale un totale di 40 profili radar verticali, equispaziati di 20 cm, sono stati utilizzati per determinare le geometrie del sistema, coprendo un'area sulla parete di 16 m² (8x2 m). Nella seconda fase sono stati nuovamente acquisiti i primi 4 metri con distanza tra i profili pari a 5 cm e l'area corrispondente alla lapide n. 17. Il tutto con campionamento di 1 cm sul profilo.

L'indagine acustica è stata effettuata utilizzando un martello strumentato e due accelerometri piezoelettrici (tipo LIS344ALH) con frequenza propria 1800 Hz, l'uno solidale con il martello per rilevare l'istante d'invio del segnale acustico, l'altro posto nella posizione corrispondente dietro alla muratura. Le prove sono state effettuate limitatamente al primo tratto di parete (circa 4 metri), in quanto parte della facciata retrostante era inaccessibile. I tempi di percorrenza, misurati tramite un oscilloscopio digitale (modello Tektronix2012), hanno permesso di ricavare la velocità di trasmissione del segnale acustico per ogni punto con un margine di errore relativo di $5 \cdot 10^{-3}$ (Fig. 3)

Fig. 3: strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati acustici.
a) accelerometro di ricezione, c) interno dell'accelerometro d) martello strumentato, e) oscilloscopio.



L'ERT [3,4] si basa sull'immissione di corrente elettrica ad una coppia di elettrodi, generando nel corpo investigato un campo elettrico che viene misurato come differenza di potenziale (d.d.p.) ad una seconda coppia di elettrodi. Variando la posizione dei punti di immissione e di misura si crea una matrice 3D di valori di resistività apparente. Tutte le misure vengono gestite da un georesistivimetro digitale secondo un protocollo predefinito. Il previsto rifacimento dell'intonaco ha permesso di materializzare gli elettrodi tramite l'utilizzo di 45 sottili chiodi in acciaio, disposti con passo di 20 cm e distribuiti su maglia regolare (Fig. 10a).

Tale approccio ha permesso un'efficiente trasmissione del segnale, tuttavia, in contesti meno favorevoli è possibile l'impiego di elettrodi alternativi, quali quelli a cerotto adesivo utilizzati nella diagnostica medica.

L'acquisizione è stata effettuata utilizzando il georesistivimetro Syscal Pro (Iris Instruments, Francia) sfruttando una strategia innovativa che permette di disporre gli elettrodi intorno agli oggetti investigati ed intervista solo le configurazioni quadripolari fisicamente significative [5]. L'indagine è stata effettuata solamente su una piccola porzione (2x2m) alla estremità sinistra della parete.

Elaborazione dei dati

I dati acquisiti sono stati sottoposti ad elaborazione. In particolar modo nei radargrammi sono stati apportati: la correzione per il tempo zero, il filtraggio 1D delle scansioni nella banda 1500 – 3000 MHz, l'amplificazione del segnale nel tempo e l'analisi delle iperboli di diffrazione. La prima indagine GPR ha permesso di valutare la velocità delle onde E.M. nel mezzo e di

individuare le porzioni di parete di interesse, sulle quali effettuare la seconda indagine. In particolare, l'analisi delle iperboli di diffrazione ha permesso di stabilire che la velocità di propagazione dell'onda E.M. è di circa 7 cm/ns nella parte interna, mentre sale a 13 cm/ns in prossimità della superficie, probabilmente per la maggiore velocità di propagazione nel marmo e per la minore umidità dei materiali esterni.

Per quanto concerne i dati acustici, sono state determinate le velocità medie di propagazione delle onde "P".

Le resistività apparenti, ottenute con ERT sono state invertite utilizzando il software RES3DINV [6] che implementa il metodo di regolarizzazione di Tikhonov [7] assumendo una variazione spaziale di resistività "smooth" (inversione di Occam [8]), ottenendo la stima dei valori della resistività reale.

Analisi dei risultati

L'indagine GPR ha permesso di investigare l'intero spessore della parete. In Fig. 4 sono riportati alcuni radargrammi dove sono messi in evidenza lo spessore e la regolarità di alcune superfici di riflessione ai bordi delle lapidi, evidenziate con linee rosse. La variabilità della velocità tra 7 cm/ns, nella parte interna e 13 cm/ns nella parte superficiale rende difficile determinare una relazione diretta tra tempi di arrivo e profondità; pertanto i valori stimati in seguito avranno scopo puramente indicativo.

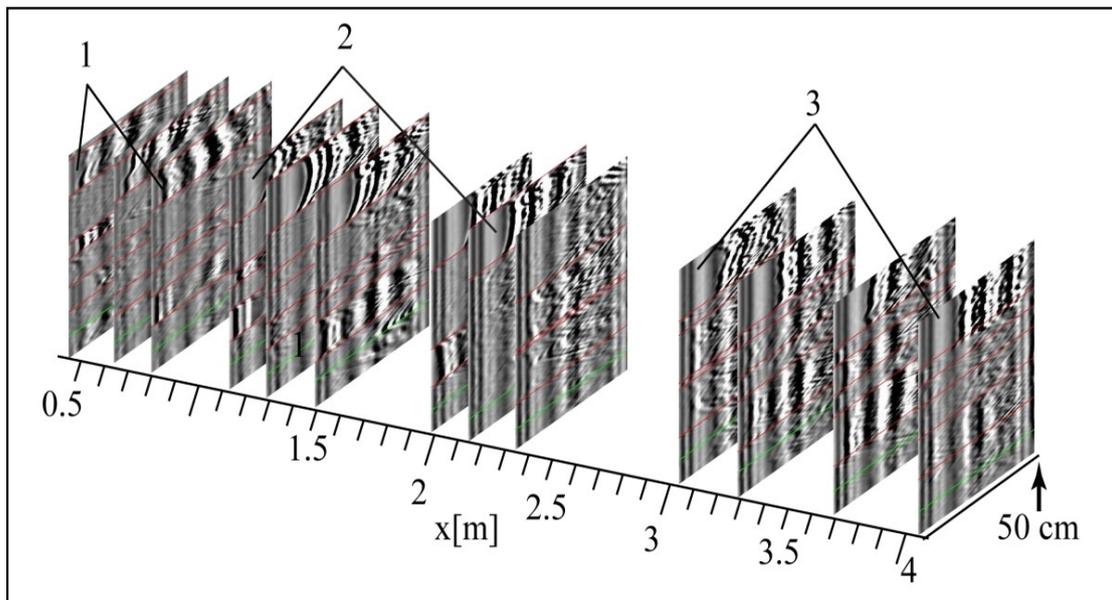


Fig. 4: Alcuni radargrammi verticali, ortogonali al muro. Le linee "markers" orizzontali sulle tracce indicano, rispettivamente dal basso verso l'alto, la quota di riferimento (30 cm dal suolo) e le quote a cui l'antenna attraversa i bordi delle lapidi. Linee continue con numero indicano esempi particolarmente significativi della parte interna delle rispettive lapidi.

L'analisi spaziale della distribuzione dell'energia è stata effettuata mediante la produzione di "C-scan", cioè sezioni riferite allo stesso tempo d'arrivo (quindi "parallele" alla superficie del muro) di ampiezza istantanea al quadrato. L'analisi di C-scan relativi a quattro istanti temporali corrispondenti alle profondità di 5, 13, 19 e 23 cm circa (fig. 5, 6, 7, 8), permette di evidenziare diversi aspetti:

- 1) Si individuano i contorni delle lapidi (fig. 5). La riflessione in corrispondenza alla lapide n. 12 è indicativa del minore spessore rispetto alle altre, mentre l'orlatura al n. 14 è da attribuirsi alla malta utilizzata per il fissaggio. Riflessioni di aspetto simile risultano evidenti alla profondità intorno a 13 cm (fig. 6, n. 4, 5, 6 e 15).
- 2) Un'anomalia (A in fig. 5) associata probabilmente alla modalità costruttiva percorre la parete a circa 30 cm dal suolo.
- 3) Si evidenziano anomalie (B, C e D in fig. 6, 7 ed 8) di forma regolare che possono essere associate alla presenza di lapidi murate. Le stesse immagini mostrano che oltre le lapidi n. 7 e 14 non appaiono riflessioni organizzate; si esclude dunque la presenza di caratteristiche di interesse al di sotto di queste. Un'analisi delle tracce radar (fig. 4) rivela infatti che il materiale sottostante appare disomogeneo.
- 4) Una forma regolare è stata riscontrata sotto la lapide n. 17 (fig. 6) che sembra suggerire la presenza di un oggetto murato (urna?).
- 5) La riflessione rilevata alla base della lapide n. 2 (fig. 7) indica lo spessore maggiore di questa parte di lapide e la riflessione che si estende sotto tutta la sua superficie in Fig. 8 conferma che tale spessore è irregolare.
- 6) Alla profondità di circa 23 cm (fig. 8), si perde traccia delle lapidi. C-scan a profondità maggiori, (qui non riportati) mostrano solo effetti dovuti all'interferenza costruttiva di diffrazioni legate a geometrie superficiali. Pertanto essa è la profondità limite per l'affidabilità dell'interpretazione.

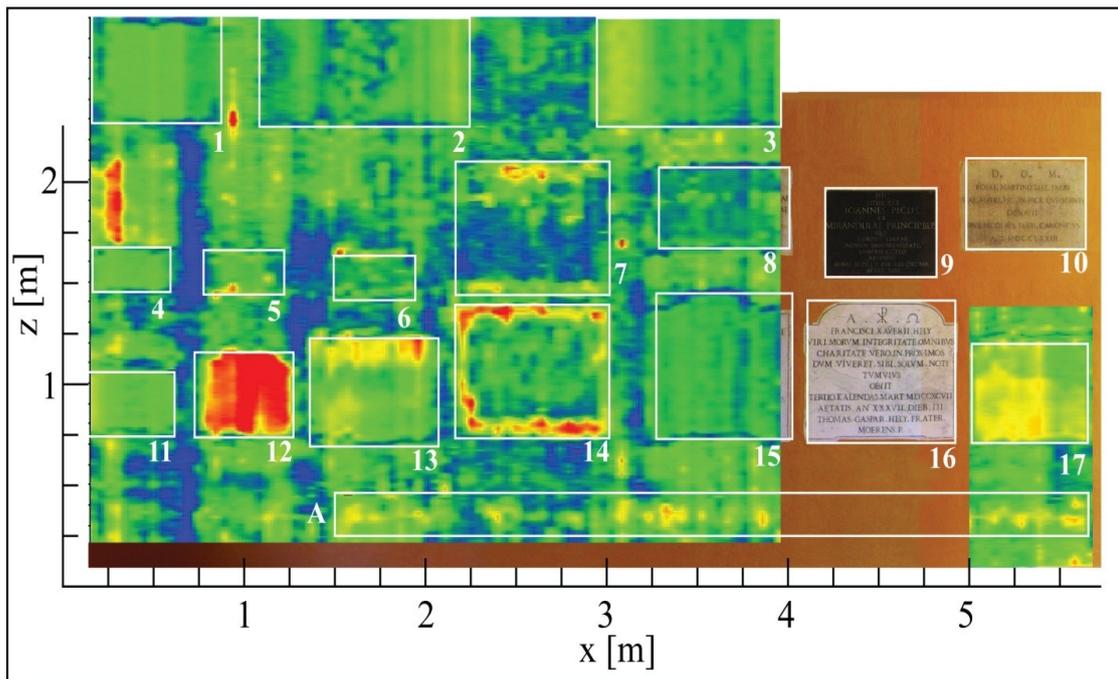


Fig. 5: C-scan a circa 5 cm di profondità.

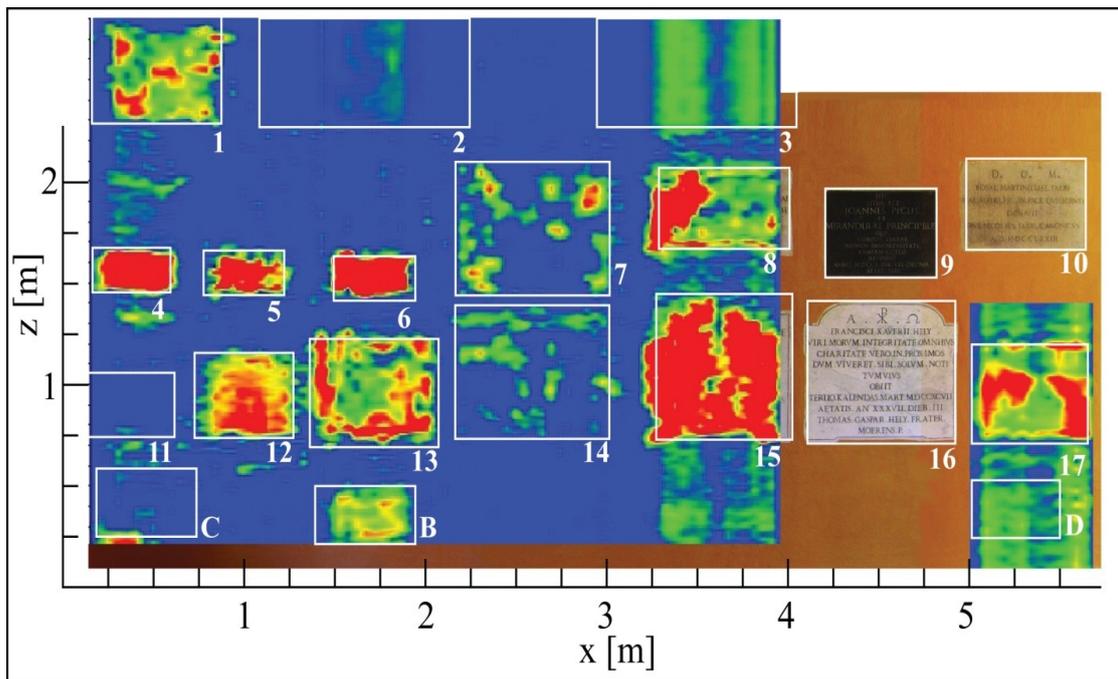


Fig. 6: C-scan a circa 13 cm di profondità.

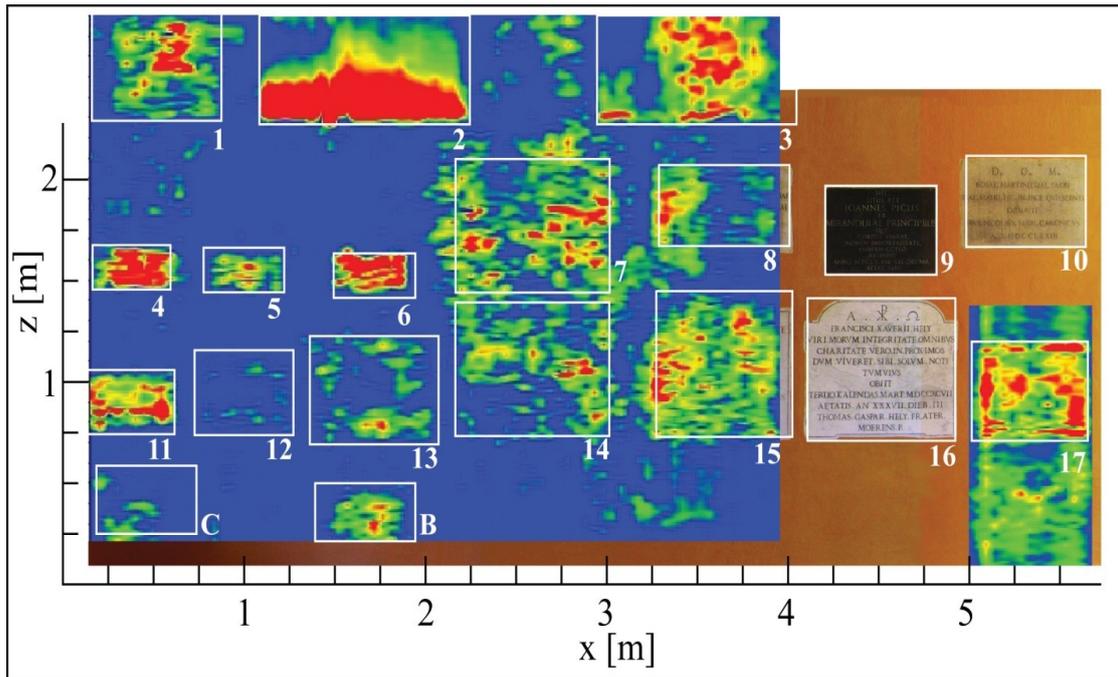


Fig. 7: C-scan a circa 19 cm di profondità.

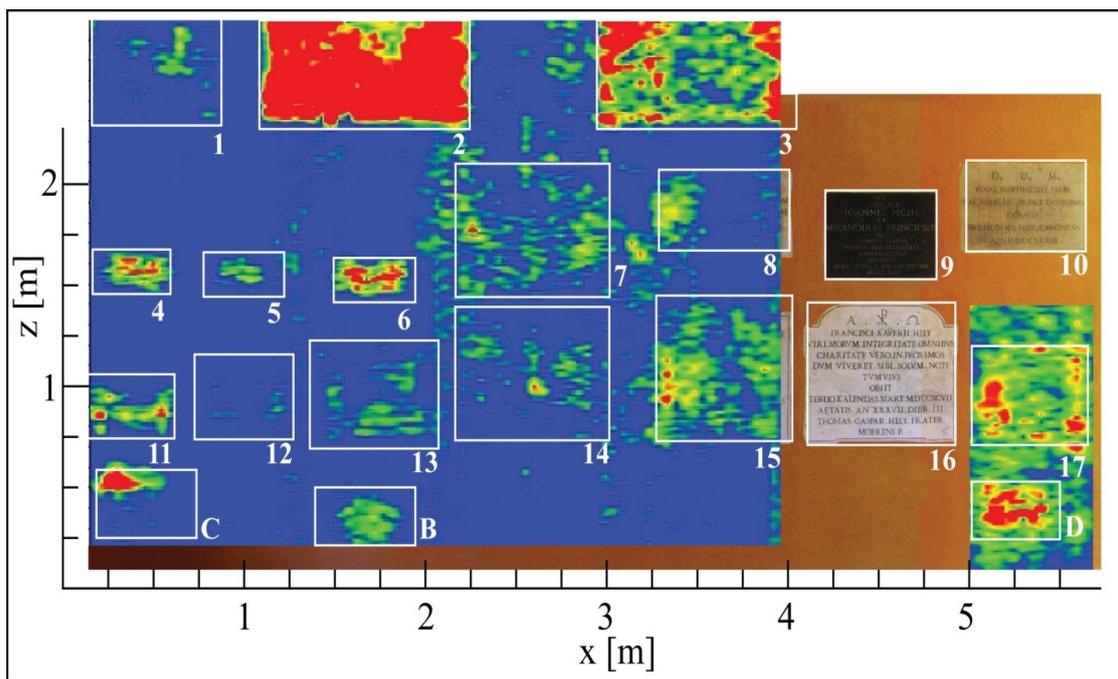


Fig. 8: C-scan a circa 23 cm di profondità.

L'indagine acustica ha permesso di mappare la variazione della velocità delle onde "P" (Fig. 9). L'intervallo di valori va da cifre molto basse, dell'ordine della velocità del suono in aria, a valori di 700-1000 m/s tipici di una parete di mattoni. È presumibile che basse velocità corrispondano alla presenza di materiale scadente dietro le lapidi (n. 4, 7 e n. 14 in Fig. 9) coerentemente con

l'indagine GPR, la quale mostrava la presenza di materiale sostanzialmente disomogeneo. Inoltre, si nota una zona ad alta velocità (lapidi n. 5 e n. 12 in Fig. 9). È probabile che si tratti di materiale che una volta rappresentava lo stipite di una sospetta apertura nella parete.

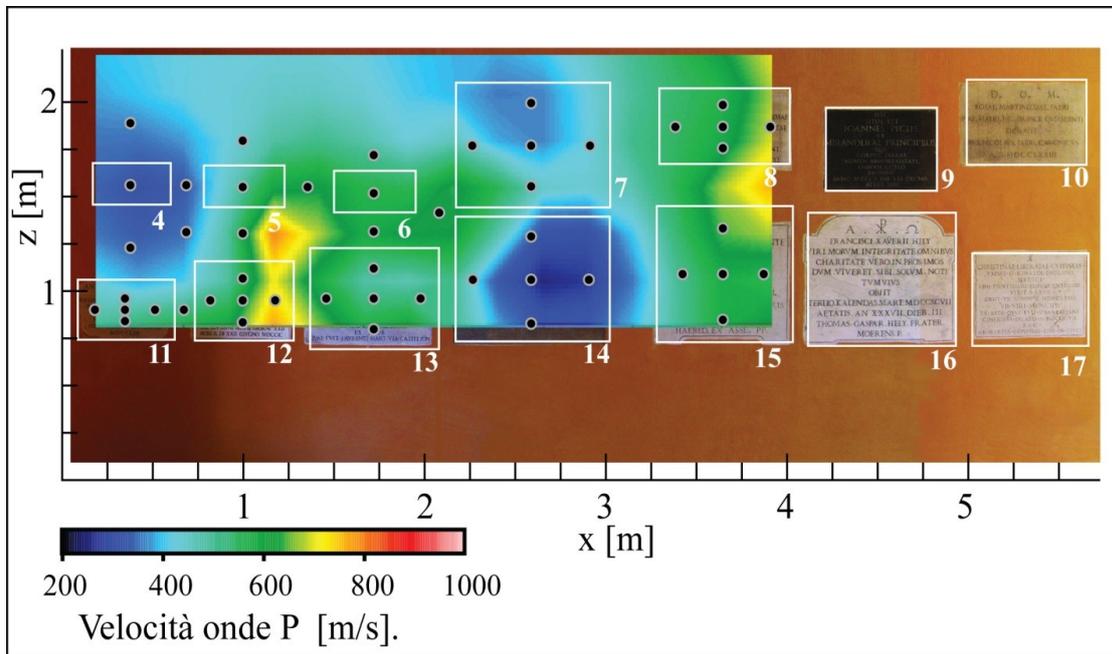


Fig. 9: distribuzione della velocità media delle onde acustiche nella muratura. I cerchietti pieni indicano i punti di misura.

L'indagine ERT ha fornito il modello 3D di distribuzione della resistività. Quattro sezioni orizzontali sono illustrate in Fig. 10b. Si evidenzia la presenza di strutture organizzate a piccola scala limitatamente a profondità fino a 14 cm.

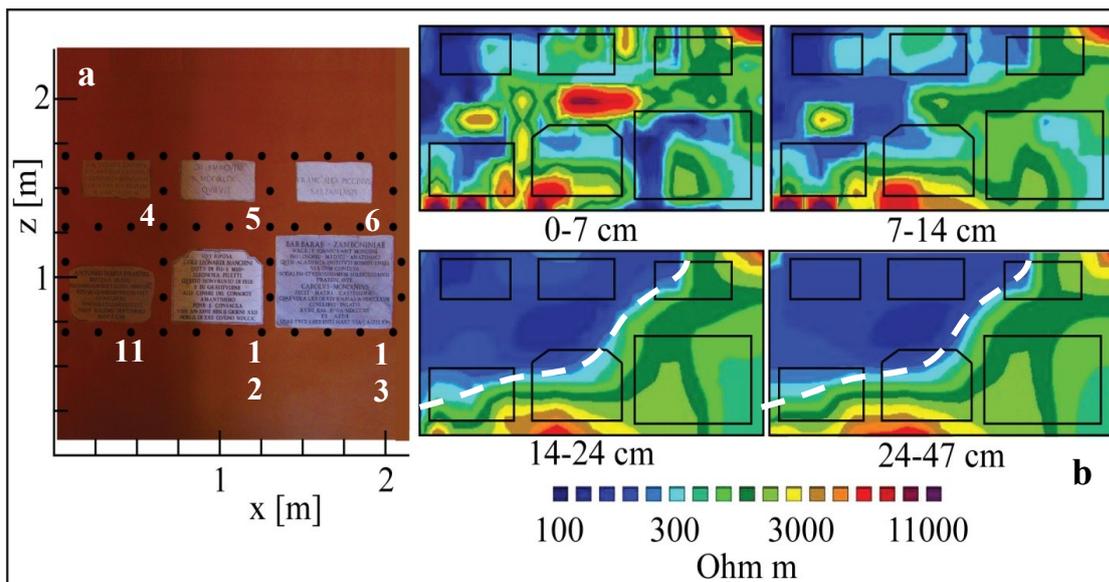


Fig. 10: a) posizione degli elettrodi, cerchietti pieni, intorno alle lapidi e b) quattro sezioni orizzontali della distribuzione della resistività reale. Curva tratteggiata: superficie di separazione tra due volumi di resistività.

I relativi valori di resistività escludono la presenza di vuoti e suggeriscono piuttosto la presenza di materiale incoerente (lapidi n. 11, 12, 13). Nelle sezioni più profonde si nota la presenza di due macro-strutture. La variazione netta in profondità verso destra sostiene l'ipotesi sulla presenza di una porta tamponata.

Conclusioni

Tre metodi d'indagine geofisica sono stati utilizzati per la caratterizzazione non-invasiva di una porzione della parete sinistra del corridoio per il Chiostro del 1500 della Certosa di Bologna. I risultati GPR hanno permesso di rilevare, a piccola scala, la struttura geometrica e la probabile estensione in profondità delle lapidi che risulta inferiore a 20 cm. Tre piccole anomalie (B,C,D) sono state scoperte e, ad una scala comparabile con le dimensioni della parete, è stato possibile evidenziare anomalie riferite alla modalità costruttiva della parete stessa (A, Fig. 5).

I risultati delle indagini acustica e di resistività sostanzialmente confermano l'assenza di vuoti ma non escludono la presenza di materiale incoerente all'interno di alcune celle. Il modello di resistività, infine, suggerisce la presenza di superfici di discontinuità che possono essere messe in relazione alle modalità costruttive o a modifiche successive della parete.

L'approccio integrato ha restituito informazioni sulla presenza di eventuali aree di riempimento ed escluso la presenza in altre zone. I risultati presentati sono indicativi per la pianificazione di indagini ad impatto trascurabile (impiego di micro-camere) per l'identificazione della natura delle anomalie.

Ringraziamenti

Si ringraziano la prof.ssa Carmela Vaccaro ed dott. Roberto Martorelli per aver suggerito il tema, le dott.sse M. Paola Marinelli e Novella Coviello ed il dott. Federico Ferrari per l'aiuto nell'acquisizione dei dati.

Riferimenti bibliografici

[1] MARTORELLI R., (a cura di), 2009 - *La certosa di Bologna: un libro aperto sulla storia*, Bologna Tipografia Moderna.

[2] CARDARELLI E., GODIO A., MORELLI G., SAMBUELLI L., SANTARATO G., SOCCO L. V., 2002 - *Integrated geophysical surveys to investigate the scarsella vault of St John's Baptistery in Florence*. The Leading Edge, 21, 467-470.

- [3] ABU ZEID N., BARTOCCI F., BALDUCCI M., REGNI R., SANTARATO G., 2010 - *Indirect estimation of injected mortar volume in historical walls using the electrical resistivity tomography*. Journal of Cultural Heritage, 11, 220-227.
- [4] BARKER R.D., 1981 - *Offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable*. Geophysical Prospecting, 29, 128-143.
- [5] SANTARATO G., RANIERI G., OCCHI M., MORELLI G., FISCHANGER F., GUALERZI D., 2011 - *Three-dimensional Electrical Resistivity Tomography to control the injection of expanding resins for the treatment and stabilization of foundation soils*. Engineering Geology, 119, 18-30.
- [6] LOKE M.H., BARKER R.D., 1996 - *Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion*. Geophysical Prospecting, 44, 499-523.
- [7] TIKHONOV A.N., ARSENIN V.Y., 1977 - *Solutions of ill-posed problems*. Winston and Sons. Washington (DC).
- [8] CONSTABLE, S.C., PARKER R.L., CONSTABLE C.G., 1987 - *Occam's Inversion: a practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data*, Geophysics, 52, 289-300.