

Applicazioni del GPR per l'analisi degli intonaci di supporto a pitture murali: il caso studio della cappella Bardi a Firenze

Emanuele Marchetti

emanuele.marchetti@unifi.it

Dipartimento di Scienze della
Terra (DST), Università degli
Studi di Firenze

pagina a fronte

Fig. 1
Firenze, Basilica di Santa
Croce, Cappella Bardi.

Abstract

In the framework of the Heritage Ground Penetrating Radar (HGPR) project, the Department of Earth Sciences of the University of Florence (DST) performed GPR measurements to investigate plasters supporting mural paintings. This study presents an acquisition approach of GPR data adapted to detect the subtle (cm) thickness of plasters, well below the standard GPR application. In order to increase the signal-to-noise ratio of GPR data we performed punctual measurements, with acquisition lasting at least 10 seconds in each point. Moreover the interpolation of 4 cm thick polystyrene level between the antenna and the wall, transparent to electromagnetic waves, allows to increase the time difference between subsequent reflections from the different levels, therefore improving our ability to identify shallow discontinuity positioned at depth well below the wavelength of the adopted signal. The methodology has been experimented in the Bardi Chapel in Florence, currently undergoing restoration activity.

Key-words

Georadar, Mural painting, Plaster, Non Destructive Testing.

Introduzione

Le attività di manutenzione e restauro delle pitture murarie è strettamente connessa alla conoscenza delle murature ed intonaci di supporto in termini di spessore e disomogeneità. Numerose tipologie di indagine sono state sperimentate per questo scopo sfruttando tecniche termometriche (per identificare differenze nell'emissività termica dei materiali) (Mouhoubi K. et al. 2019), interferometriche, per individuare differenze modalità di vibrazione, fluorescenza a raggi X e spettroscopia Raman (Freire-Lista D.M. et al. 2023; Sfarra S. et al. 2016) oltre ad indagini con GPR (Ground Penetrating Radar) (Ortega-Ramírez J. et al. 2021) dove si sfrutta la capacità delle onde elettromagnetiche di propagarsi in un mezzo ed essere riflessa da stratificazioni e/o irregolarità (Jol H.M., 2009). In questo studio presentiamo un nuovo approccio di indagine GPR per studiare lo spessore e l'andamento degli intonaci di supporto alle pitture murarie e mostriamo un caso studio della Cappella Bardi a Firenze.



Le indagini Georadar

Sviluppato a partire dagli anni 1960 per le indagini nel sottosuolo, la tecnica di GPR sfrutta la capacità di un'onda elettromagnetica di propagarsi all'interno di un mezzo e di essere riflessa in corrispondenza di variazione di materiale (discontinuità) e/o disomogeneità nel mezzo (Jol H.M., 2009). Il GPR si compone di quindi di un'antenna trasmittente, che emette in modalità pulsata un'onda elettromagnetica, e di un'antenna ricevente che registrando il segnale di ritorno permette di identificare eventuali impulsi riflessi e di definire così la geometria del materiale in cui si è verificata la trasmissione dell'onda (Seyfried D., Schoebel J., 2015). Per passare dal ritardo con cui si registrano i segnali riflessi alla geometria dei riflettori è necessari conoscere la velocità di propagazione dell'onda del mezzo che varia tipicamente tra 10 a 15 cm/ns (Tillard S., Dubois J.C., 1995), decisamente più bassa di quella in aria (30 cm/ns). In modo analogo alle tecniche di sismica a riflessione, il calcolo della velocità di propagazione del mezzo può essere ottenuto dall'identificazione di iperboli che si originano in corrispondenza di elementi riflettenti puntiformi come conseguenza della modalità di acquisizione standard, che prevede una scansione lungo la superficie del materiale da indagare volta a definire un radar-gramma (Figura 2).

Un altro aspetto essenziale che deve essere considerato nell'applicazione di tecniche GPR è la risoluzione che viene comunemente considerata pari a un quarto della durata dell'impulso emesso (W). Impulsi riflessi che differiscono meno di questa grandezza sono generalmente indistinguibili. Dato che la durata dell'impulso diminuisce all'aumentare della frequenza, si prediligono antenne ad alta frequenza per indagare discontinuità molto vicine tra loro, a scapito di una riduzione dello spessore totale investigato.

In questo studio abbiamo utilizzato un C-Thru XS prodotto da IDS Georadar s.r.l. (part of Hexagon), con una frequenza pari a 2 GHz con due coppie di antenne polarizzate. Considerando la frequenza tipica dello strumento la durata dell'impulso prodotto è pari a 0.25 nsec (Figura 3).

Risultati

Le procedure di acquisizione standard prevedono di effettuare scansioni lineari, anche secondo una griglia predefinita, che poi combinate forniscono un'immagine tridimensionale del corpo analizzato. La Figura 4 mostra un esempio di indagine tomografica effettuata su una porzione di pittura muraria della cappella Bardi interessata da una lacuna realizzata durante i restauri del XX secolo (Frosinini C., Monciatti A., 2011)¹. L'analisi evidenzia perfettamente la lacuna senza però fornire indicazioni sull'eventuale eterogeneità dello spessore dell'intonaco, e poi permette di caratterizzare la muratura nel suo insieme in accordo con le attività consolidate di analisi delle murature (Maierhofer C., Leipold S., 2001).

Sebbene l'analisi fornisca indicazioni sull'estensione in profondità della lacuna, preclude la possibilità di investigare la porzione più superficiale dell'intonaco perché prevede, come primo passo, la rimozione dell'impulso trasmesso (Figura 3), identificata con il termine "Dewow" (Sferra S. et al. 2016) per rimuovere appunto tale effetto dal segnale riflesso rappresentativo del mezzo investigato. Considerando infatti una velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nella muratura di circa 12 cm/ns, rimuovere l'impulso diretto, che ha una durata di circa 0,5 ns (Figura 3), corrisponde ad una distanza percorsa dall'onda trasmessa e riflessa (Figura 2a) di 6 nsec e preclude di registrare riflessioni da parte di elementi/superfici posizionate nei primi 3 centimetri di profondità, dove invece ci attendiamo eventuali informazioni relative agli intonaci di supporto alle pitture murarie.

¹ <https://opificiodellepietredure.cultura.gov.it/wp-content/uploads/2024/09/2-Bardi-la-storia-e-i-restauri.pdf>

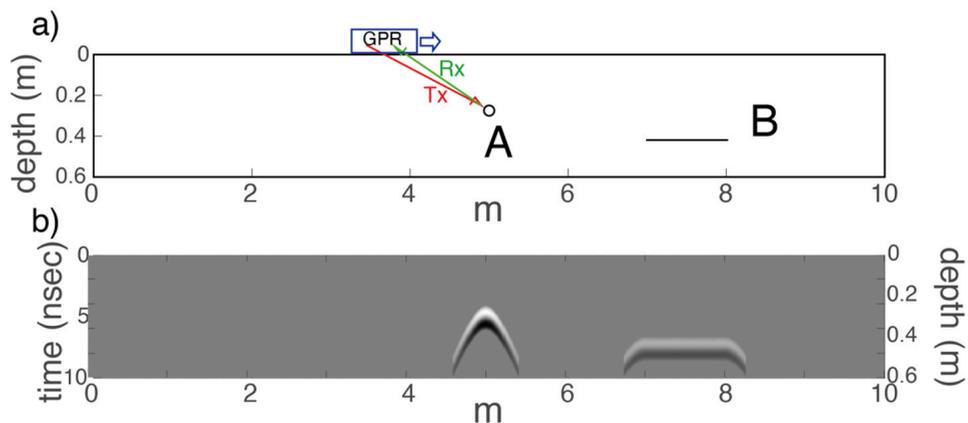


Fig. 2
Schematizzazione della procedura di acquisizione dati GPR con scansione lineare dell'antenna su una superficie piana (a) e radargramma sintetico (b) prodotto da due riflettori con simmetria puntiforme (A) e lineare (B).

Fig. 3
Georadar C-Thru XS (a) ed esempio dell'impulso trasmesso e registrato dall'antenna ricevente (blu) mantenendo il georadar sospeso in aria, senza che quindi ci siano riflessioni da parte di superfici esterne. La traccia rossa è ottenuta come la blu ma interponendo un blocco di polistirolo (vedi Figura 6).

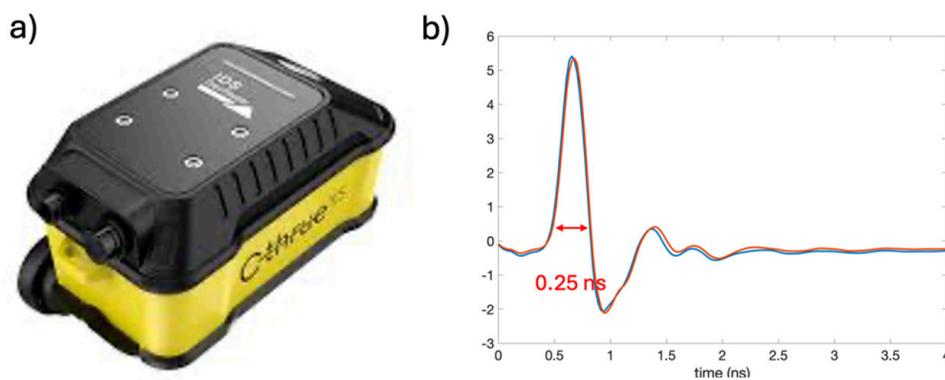
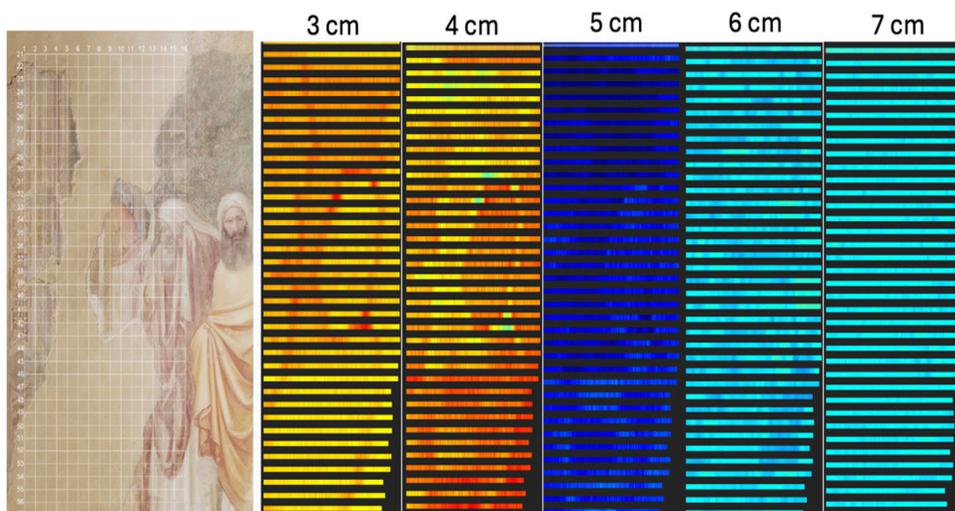


Fig. 4
Esempio di acquisizione a griglia con C-Thru XS su una porzione della pittura muraria e indagine tomografica corrispondente (realizzata con il software IQmaps), che ben evidenzia la lacuna (fino a 4 cm di profondità dalla superficie della parete) e la muratura omogenea oltre 6 cm di profondità.



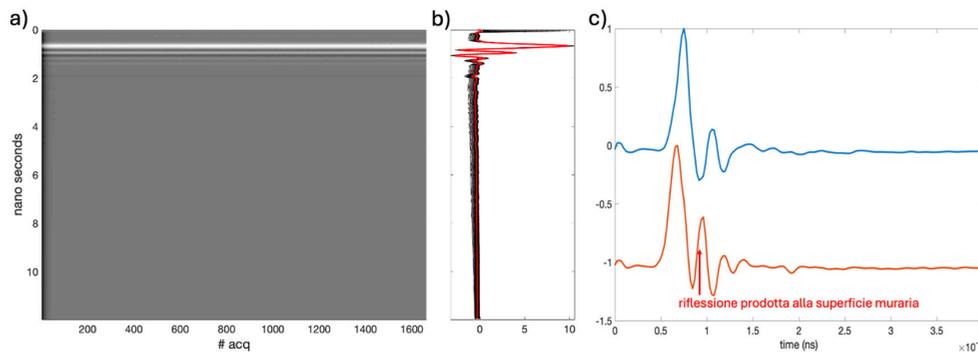
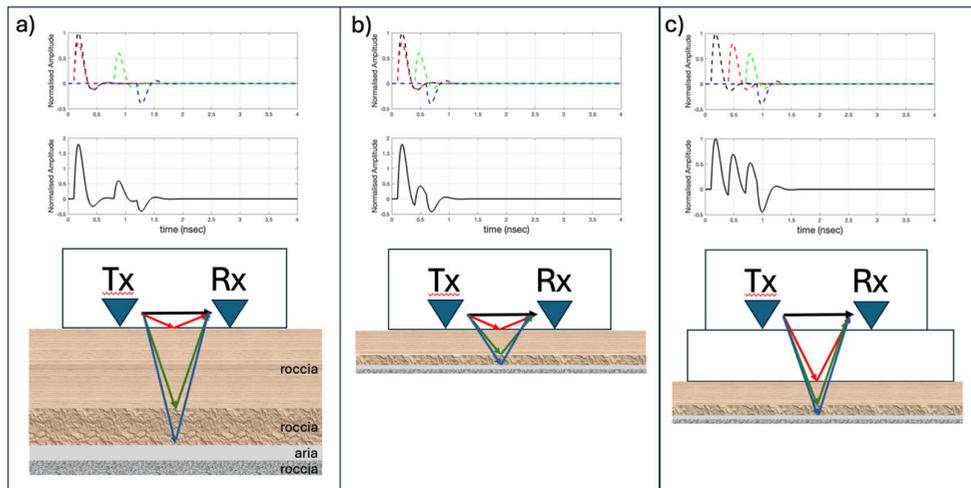
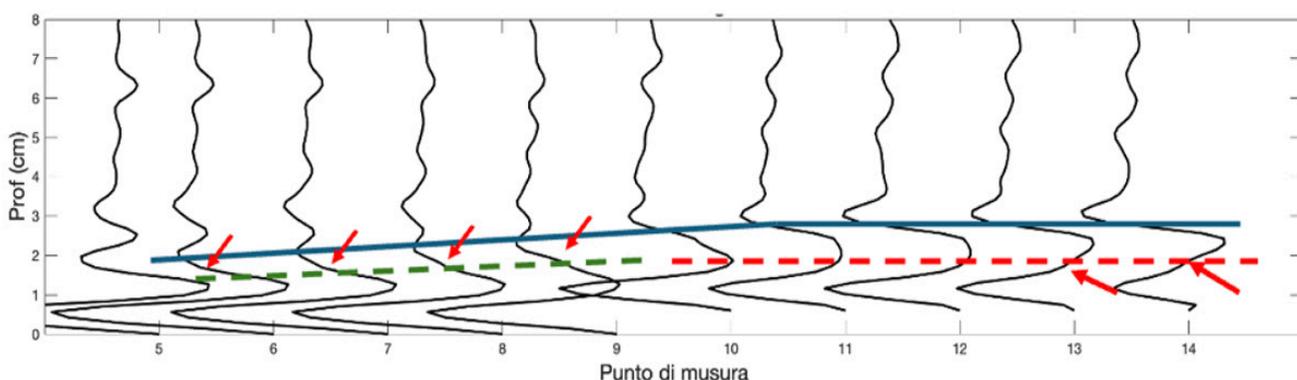


Fig. 5
Schematizzazione dei vari impulsi di riflessione (tracciati tratteggiati in alto) e del tracciato risultante (traccia nera) in relazione a varie stratigrafie e interponendo un blocco di polistirolo tra georadar e superficie da analizzare (c).

Fig. 6
Esempio di acquisizione prolungata in uno stesso punto (a) e calcolo del segnale medio (b, rosso) come media dei singoli tracciati acquisiti (nero). c) Tracciato medio acquisito con (rosso) e senza (blu) polistirolo interposto tra il radar e la superficie.

La Figura 5 rappresenta una schematizzazione del problema e della soluzione proposta. Nei tre esempi si propone una stratigrafia che determina 3 riflessioni, dalla superficie (rosso tratteggiato), da un contatto tra due tipologie di materiale (ad esempio intonaco/intonaco, verde tratteggiato) e da un contatto tra materiale ed aria (blu tratteggiato) che potrebbe rappresentare un'intercapedine nel supporto e che determina in termini di onda elettromagnetica un'inversione nella polarità del segnale riflesso. In tutti i casi il segnale risultante (traccia nera) risulta dalla somma dell'impulso diretto (nero tratteggiato) e gli impulsi riflessi. Nel caso rappresentato in Figura 5a, dove gli strati sono sufficientemente spessi, le due riflessioni sono sufficientemente chiare a rimuovere l'impulso diretto (Dewow) non determinerebbe perdita di informazione. Nel caso descritto in Figura 5b, dove si considerano spessori ridotti, si osserva come le riflessioni si perdano dentro l'impulso diretto, mostrando come la sua rimozione determinerebbe una significativa perdita di informazione e precluderebbe la possibilità di ricostruire la stratificazione reale. Questo risulterebbe invece possibile se si interponesse tra il georadar e la superficie uno spessore noto di materiale trasparente alle onde elettromagnetiche (Figura 5c). Per lo studio sperimentale dei supporti murari alle pitture murali di Giotto nella Cappella Bardi della Basilica di Santa Croce a Firenze abbiamo quindi utilizzato un blocco di polistirolo dello spessore di 4 cm, interposto tra il radar e la muratura. Test preliminari mostrano infatti come questo non modifichi l'impulso principale, suggerendo che possa essere considerato trasparente per l'onda elettromagnetica (Figura 3b).

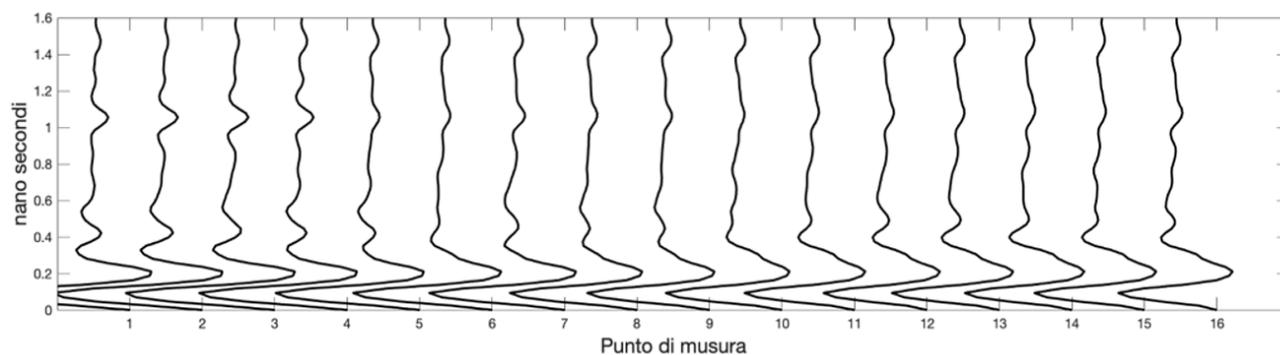
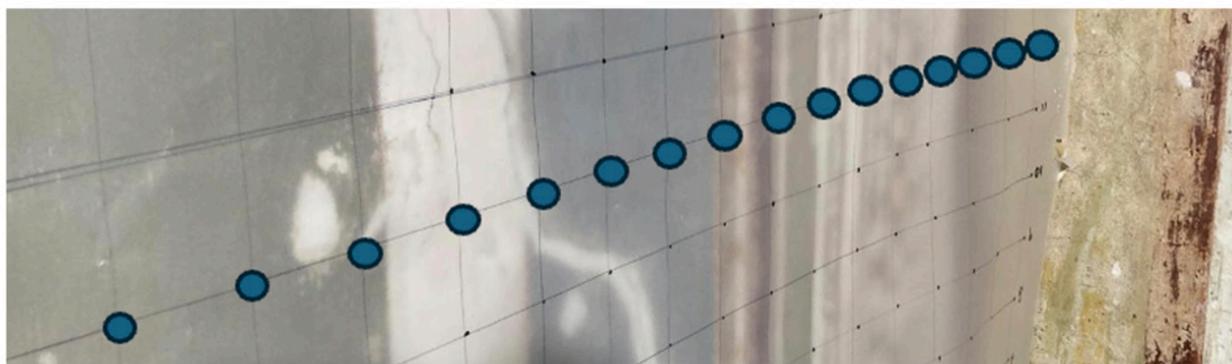


Inoltre, per massimizzare il rapporto segnale rumore abbiamo effettuato misure puntuali, svincolate dall'encoder a ruota, acquisendo dati nello stesso punto per un intervallo di tempo di 10 sec (Figura 6a) e ottenuto il tracciato medio come somma dei singoli tracciati acquisiti (Figura 6b).

Dall'analisi di Figura 6 è evidente come il segnale medio permetta di migliorare il rapporto segnale rumore per essere quindi maggiormente rappresentativo della stratigrafia. Inoltre, il confronto tra dato acquisito nello stesso punto con (rosso) e senza polistirolo (blu), mostra come i due tracciati siano diversi e come solo disaccoppiando l'antenna sia possibile identificare la riflessione da parte della superficie (picco secondario identificato dalla freccia in Figura 6c) e di conseguenza rimuovere l'impulso diretto e avere una rappresentazione più rappresentativa della stratigrafia superficiale.

Questo approccio, una volta applicato su alcuni punti del supporto murario della parete 3 della cappella (Figura 7) mostra come il segnale, corretto per la geometria della parete, sia diverso da punto e punto, e permetta di identificare un ispessimento dell'intonaco per passare alla murature (linea blu), dove il segnale riflesso è omogeneo su tutta l'area, mostri dei flessi che suggeriscono la presenza di un secondo impulso che potrebbe rappresentare la sovrapposizione di due intonaci (linea verde tratteggiata) e, nei punti 10.11 e successivi, mostri un flesso compatibile con un impulso a polarità inversa che determina un aumento della durata del picco negativo e potrebbe suggerire la presenza di un'intercapedine.

Fig. 7
Esempio di acquisizione: 10 punti della parete 3 a cavallo di una lacuna e relativi tracciati medi (tracce nere). Ai tracciati, acquisiti con polistirolo per disaccoppiare l'antenna, è stato rimosso l'impulso diretto, sono stati convertiti in profondità assumendo una velocità di 12 cm/ns, e corretti per la geometria della superficie di acquisizione.



² Si ringraziano i colleghi e collaboratori che hanno reso possibile questa ricerca e la sua positiva conclusione: in particolare si ringrazia il Prof. Massimo Coli per il coordinamento della ricerca e i continui scambi, la Dott.ssa Alessia Francesca Napoli per le analisi e le acquisizioni del dato, i dott. Paolo Papeschi e Davide Morandi per il supporto tecnico nelle procedure di analisi ed elaborazione e la dott. ssa Mariarosa Lanfranchi per gli aspetti legati al restauro e le critiche attente e costruttive. Si ringrazia l'Opera di Santa Croce per il supporto logistico e l'accesso al sito. Le ricerche sono state effettuate nell'ambito del progetto Heritage Ground Penetrating Radar, CUP B55F21007810001, finanziato all'interno del Bando di Ateneo per il finanziamento di Progetti di ricerca a carattere "Problem-driven" da svolgersi attraverso la costituzione di partenariati pubblico-privati nell'ambito delle tematiche PNRR, a valere sulle risorse di cui al DM 737/2021, che si inserisce nelle iniziative finanziate dall'Unione Europea - Next Generation EU.

Un'acquisizione analogha effettuata sulla parete 1 in un'area apparentemente omogenea della pittura muraria (Figura 8), mostra un ispessimento progressivo dell'intonaco da sinistra a destra e un flesso nel picco negativo nei punti di acquisizione da 10 in poi, che indica la sovrapposizione di due impulsi e quindi una superficie di discontinuità nel supporto murario, presumibilmente imputabile a due livelli di intonaci sovrapposti. Tale interpretazione è compatibile con l'andamento degli intonaci che si osserva poco più in basso nella stessa area in corrispondenza di una lacuna e in accordo con indagini effettuate sulla parete attraverso la tecnica interferometrica DHSPI, che evidenzia nella porzione destra dell'acquisizione uno spostamento legato alla presenza di possibili fratture (Chaban A. et al. 2025).

Considerazioni finali

La caratterizzazione degli intonaci e delle murature è un aspetto essenziale per la manutenzione e il restauro di pitture murarie. Tuttavia, a causa dei ridotti spessori investigati, il GPR vede ancora solo poche applicazioni. In questo contributo si è presentata una nuova procedura di acquisizione che mira a migliorare la rappresentatività del dato per fornire indicazioni su riflessioni da parte di superfici, anche capillari nei primi centimetri di spessore. Le prime acquisizioni sperimentali effettuate nella Cappella Bardi a Firenze sono promettenti suggerendo un'applicazioni più diffusa di detta metodologia².

Bibliografia

- MOUHOUBI, K., DETALLE, V., VALLET, J.-M., BODNAR, J.-L. 2019, *Improvement of the Non-Destructive Testing of Heritage Mural Paintings Using Stimulated Infrared Thermography and Frequency Image Processing*, «J. Imaging», vol. 5, n. 72, DOI:10.3390/jimaging5090072.
- FREIRE-LISTA D.M., VÁZQUEZ, E., BARREIRO CASTRO, P., SALAVESSA, E., COSTA M.D.R., MOREIRA, R., AND LÓPEZ, A.J. 2023, *Mural Paintings Characterisation Using X-ray Fluorescence and Raman Spectroscopy – A Case Study: Nossa Senhora das Neves Chapel, Vilar de Perdizes, Galicia – North Portugal Euroregion*, «Heritage», n. 6, pp. 7277-7292, DOI:10.3390/heritage6120382.
- SFARRA S., IBARRA-CASTANEDO C., TORTORA M., ARRIZZA L., CERICHIELLI G., NARDI I., MALDAGUE X. 2016, *Diagnostics of wall paint-ins: A smart and reliable approach*, «Journal of Cultural Heritage», n. 18, pp. 229-241, DOI:10.1016/j.culher.2015.07.011.
- ORTEGA-RAMÍREZ J., BANO M., VILLA ALVARADO L.A., MEDELLÍN MARTÍNEZ D., RIVERO-CHONG R., MOTOLINÍA-TEMOL C.L. 2021, *High-resolution 3-D GPR applied in the diagnostic of the detachment and cracks in pre-Hispanic mural paintings at “Templo Rojo”, Cacaxtla, Tlaxcala, Mexico*, «Journal of Cultural Heritage», n. 50, pp. 61-72, DOI:10.1016/j.culher.2021.06.008.
- JOL H.M. 2009 (Ed.), *Ground penetrating radar theory and application*, Elsevier Science, The Boulevard, Oxford, DOI:10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4.
- SEYFRIED D., SCHOEDEL J. 2015 *Detection capability of a pulsed Ground Penetrating Radar utilizing an oscilloscope and Radar-gram Fusion Approach for optimal signal quality*, «Journal of Applied Geophysics», n. 118, pp. 167-174, DOI:10.1016/j.jappgeo.2015.03.029.
- TILLARD S., DUBOIS J.C. 1995, *Analysis of GPR data: wave propagation velocity determination*, «Journal of Applied Geophysics», vol. 33, nn. 1-3, pp. 77-91, [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90031-4](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90031-4).
- FROSININI C., MONCIATTI A. 2011, *Il progetto di studio della tecnica e dello stato di conservazione delle pitture murali di Giotto nella Basilica di Santa Croce, finanziato dalla Getty Foundation*, «OPD Restauro», n. 23, pp. 215-220.
- MAIERHOFER C., LEIPOLD S. 2001, *Radar investigation of masonry structures*, «NDT & E International», vol. 34, n. 2, pp. 139-157.
- CHABAN A., TORNARI V., ANDRIANAKIS M., LANFRANCHI M.R., ROCCO A., BERTASA M., STRIOVA, J. 2025, *Digital Holographic Speckle Pattern Interferometry in Support of Ongoing Conservation: The Case of Giotto’s Wall Paintings in the Bardi Chapel, Florence*, <https://ssrn.com/abstract=5276099>.

pagina a fronte

Fig. 8

Esempio di acquisizione: 16 punti della parete 1 a cavallo di una frattura e relativi tracciati medi (tracce nere). Ai tracciati, acquisiti con polistirolo per disaccoppiare l'antenna, è stato rimosso l'impulso diretto.