

INDAGINI GEOFISICHE PER LO STUDIO DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DELLA STATUA LIBERALITÀ DI PALAZZO MADAMA A TORINO

IL DIRETTORE

DOTT.SSA COSTANZA MILIANI

IL RESPONSABILE SCIENTIFICO

DR GIOVANNI LEUCCI

LUGLIO 2023



PREMESSA

Le indagini sono state realizzate mediante metodologie non distruttive con apparecchiature in dotazione al Laboratorio di Geofisica Applicata ai Beni Archeologici e Monumentali della sede del CNR-ISPC di Lecce.

Allo scopo di individuare difetti strutturali eventualmente presenti all'interno della statua Liberalità, situata presso Palazzo Madama a Torino, è stata impiegata la metodologia di indagine geofisica denominata georadar.

E' stato impiegato il GPR Impulsato Hi Mod (IDS) dotato di antenne da 2000MHz e 900MHz.

Le indagini geofisiche sono state effettuate in data 19 Luglio 2023. Le indagini sul campo sono state realizzate dal Dr Giovanni Leucci, dalla Dott.ssa Lara De Giorgi, dal Dott. Ivan Ferrari, dal Dott. Francesco Giuri e dalla Dott.ssa Dora Francesca Barbolla. Le elaborazioni dei dati geofisici sono a cura del Dott. Giovanni Leucci con la collaborazione della Dott.ssa Lara De Giorgi.

1. PROSPEZIONI GEORADAR

Il georadar è una tecnica di indagine indiretta e non invasiva che consente l'individuazione di anomalie elettromagnetiche a diversa profondità. Il sistema impulsato utilizzato per queste indagini è equipaggiato con due antenne di frequenze centrali nominali 2000 MHz e 900 MHz. Per la elaborazione dei dati è stato utilizzato il software GPRSLICE. La fase di elaborazione ed interpretazione dati è principalmente basata sull'individuazione di riflettori, sul calcolo della loro posizione in profondità e delle loro dimensioni. Essa è generalmente preceduta da una fase di elaborazione durante la quale una serie di filtri applicati ai dati consente il miglioramento del rapporto segnale/rumore. Successivamente, tenendo in considerazione gli scopi dell'indagine, ogni profilo viene trattato in modo da mettere in maggior risalto le informazioni richieste.

In caso quindi di indagini finalizzate all'individuazione di target di piccole dimensioni, i dati verranno filtrati in modo da rimuovere le riflessioni a profondità costante evidenziando principalmente le variazioni laterali del segnale. Una volta ottenuta la sezione radar relativa ad ogni profilo, viene effettuata la sua conversione dalla scala verticale dei tempi alla scala delle profondità. Quest'ultima fase richiede la stima della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche che può essere effettuata utilizzando il metodo denominato "riflessione da un punto sorgente".



Di seguito vengono elencate le fasi di elaborazione dei dati GPR:

- 1) rimozione della traccia media: questo tipo di filtro permette la rimozione della banda orizzontale visibile nelle sezioni radar, che può rappresentare riflessioni da oggetti che si mantengono a distanza costante dall'antenna. L'algoritmo, basandosi su un semplice processo aritmetico, che somma tutte le ampiezze delle riflessioni generate allo stesso tempo lungo il profilo e divide per il numero delle tracce sommate, permette di rimuovere la traccia media e di esaltare, così, gli eventi non orizzontali presenti nelle sezioni radar;
- 2) normalizzazione dell'ampiezza (declipping): per eliminare locali saturazioni nell'ampiezza delle tracce. Si sceglie un fattore di scala (0.6 nel nostro caso) per il quale saranno moltiplicati tutti i valori dell'ampiezza: una procedura di interpolazione che utilizza un polinomio di terzo ordine permetterà la ricostruzione delle forme d'onda saturate.
- 3) migrazione: una tecnica che permette di eliminare distorsioni introdotte nei dati registrati. una sezione GPR non contiene informazioni unidirezionali a causa del lobo conico di radiazione dell'energia per cui alcune riflessioni presenti possono essere generate anche da oggetti posti lateralmente rispetto alla posizione dell'antenna. Questo carattere multidirezionale della registrazione delle riflessioni GPR si manifesta nella generazione di iperboli che possono causare seri problemi nell'interpretazione. La migrazione risolve questo problema di immagine riportando l'energia al suo vero punto di riflessione.
- 4) filtro passa basso: consente di eliminare la componente di rumore ad alta frequenza (effetto nebbia) presente nelle sezioni radar.

La planimetria dei profili ha consentito di correlare spazialmente, in modo 3D, le anomalie presenti su ciascuna sezione utilizzando l'analisi dell'ampiezza degli eventi riflessi entro assegnati intervalli di tempo e costruendo le time slices o depth slices (per ulteriori informazioni si veda l'appendice allegata a questa relazione).

Come è noto, l'ampiezza degli eventi riflessi è direttamente correlabile con il contrasto tra le caratteristiche dielettriche dei mezzi presenti nel sottosuolo, pertanto la visualizzazione tridimensionale, per intervalli di ampiezza, della distribuzione degli eventi riflessi consente la localizzazione spaziale delle strutture che determinano le riflessioni stesse. Ogni time slice corrisponde ad uno strato di terreno la cui profondità ed il cui spessore dipendono, oltre che dai valori assunti per il tempo, dalla velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel



sottosuolo.

Il tipo di analisi precedentemente descritto applicato alle aree in studio ha dato risultati soddisfacenti. Il colore blu indica debole ampiezza del segnale riflesso (materiale sostanzialmente omogeneo); i colori dal celeste al rosso più intenso indicano ampiezze via via crescenti del segnale riflesso e quindi presenza di discontinuità elettromagnetiche significative. Le variazioni di ampiezza (quindi di colore) in una stessa slice sono indice di variazioni orizzontali nelle caratteristiche elettromagnetiche del terreno. E' stata presa in considerazione anche la visualizzazione 3D attraverso le iso superfici di ampiezza del segnale elettromagnetico

1.1 RISULTATI

Tutti i profili sono stati acquisiti con 512 campioni/traccia; gli altri parametri di acquisizione sono stati ottimizzati in loco e tenuti costanti per tutti i profili. Per ragioni di sicurezza connesse a garantire l'integrità della statua, le operazioni di acquisizione sono state effettuate senza alcun tipo di contatto fra la strumentazione e le superfici della statua, avendo cura di mantenere una distanza costante di circa 2 cm (Fig. 1).

Per tentare di eliminare una componente di rumore dovuta alla irregolarità della superficie e consentire la interpretazione, sia pure parziale, dei dati stessi, è stata realizzata un'elaborazione i cui passi sono sopra elencati.

1.1.1 Antenna da 900MHz

Sono stati acquisiti 19 profili la cui ubicazione è mostrata in Fig. 2.

In questo caso l'analisi dei dati ha messo in evidenza (Figg. 3,..., 7):

- una buona penetrazione del segnale che consente di delimitare lo spessore della statua;
- una serie di eventi riflessi, indicati dalle linee gialle tratteggiate e denominati F, che probabilmente possono essere interpretate come relative alla presenza di fessure interne;
- una serie di eventi riflessi indicati con S legati alla probabile presenza di un materiale diverso rispetto a quello costituente la statua;
- una serie di eventi riflessi indicati da linee rosse tratteggiate che probabilmente possono essere interpretate come fessurazioni sub-verticali;
- alcune riflessioni (M) dovute alla presenza di elementi metallici.



Le anomalie indicate con A (Figg. 6 e 7) rappresentano punti di divisione dei blocchi costituenti la statua.

La planimetria dei profili ha consentito l'analisi attraverso le depth slices (Fig. 8).

A profondità tra 21 cm e 56 cm si distinguono chiaramente alcune anomalie principali (F), riferibili, alla probabile presenza di fessure interne alla statua. Tali fessure si distribuiscono in maniera evidente nelle parti periferiche.

La visualizzazione 3D tramite le isosuperfici di ampiezza (Fig. 9) individua meglio (in modo 3D) le anomalie riferibili alle fessure.

1.1.2 Antenna da 2 GHz

Sono stati acquisiti 34 profili la cui ubicazione è mostrata in Fig. 10. In questo caso l'analisi dei dati ha messo in evidenza, con una maggiore risoluzione, (Figg. 11,..., 19):

- una serie di eventi riflessi, indicati dalle linee gialle tratteggiate e denominati F, relativi alla probabile presenza di fessure interne;
- una serie di eventi riflessi indicati con S legati alla probabile presenza di un materiale diverso rispetto a quello costituente la statua;
- una serie di eventi riflessi indicati da linee rosse tratteggiate che probabilmente possono essere interpretate come fessurazioni sub-verticali;
- alcune riflessioni (M) dovute alla presenza di elementi metallici.

Le anomalie indicate con A (Figg. 17,..., 19) rappresentano punti di divisione dei blocchi costituenti la statua.

In questo caso sono state evidenziate forme fessurali di piccole dimensioni grazie alla risoluzione elevata dell'antenna da 2 GHz rispetto all'antenna da 900 MHz

L'analisi attraverso le depth slices (Fig. 20) evidenzia a profondità tra 5 cm e 46 cm alcune anomalie principali (F), riferibili, alla probabile presenza di fessure interne alla statua. Tali fessure si distribuiscono in maniera evidente nelle parti periferiche. Si distingue anche la strutture (S) che rappresenta un tipo di materiale diverso dal materiale costituente la statua.

La visualizzazione 3D tramite le isosuperfici di ampiezza (Fig. 21) individua meglio (in modo 3D) le anomalie riferibili alle fessure.



2. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il tipo non invasivo delle indagini effettuate ha consentito di avere informazioni sulla struttura interna della statua. È stata realizzata una sorta di “TAC” che da la possibilità di identificare lo stato di degrado della statua. Riassumendo i risultati ottenuti con l’utilizzo delle due antenne si evidenzia un grado di fessurazione avanzato nelle parti estreme della statua (evidentemente quelle più esposte agli eventi atmosferici). Le fessure, probabilmente originatesi dalla umidità ed infiltrazioni di acqua, hanno spessore inferiore al millimetro. L’esposizione agli eventi atmosferici potrebbero portare ad un aggravamento dello stato fessurativo. La visualizzazione in depth slices e in isosuperfici di ampiezza rendono chiaro l’entità del danno ed evidenziano le condizioni di fragilità della statua. Di fatto l’umidità e quindi l’acqua che penetra nelle fessure potrebbe congelarsi nei periodi invernali e coseguentemente aumentare di volume provocando man mano con il passare del tempo l’allargamento delle fessure e il conseguente peggioramento della stabilità della statua.



FIGURE

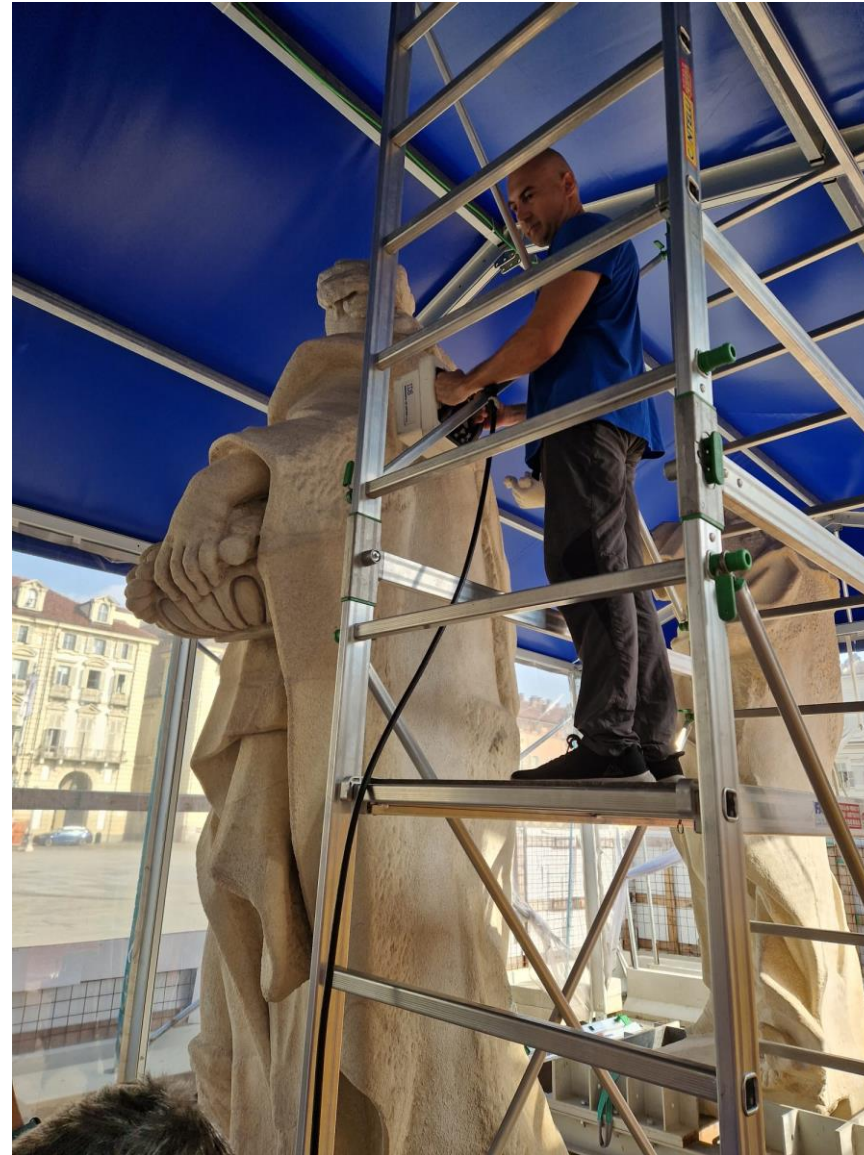


Fig. 1: Statua Liberalitá

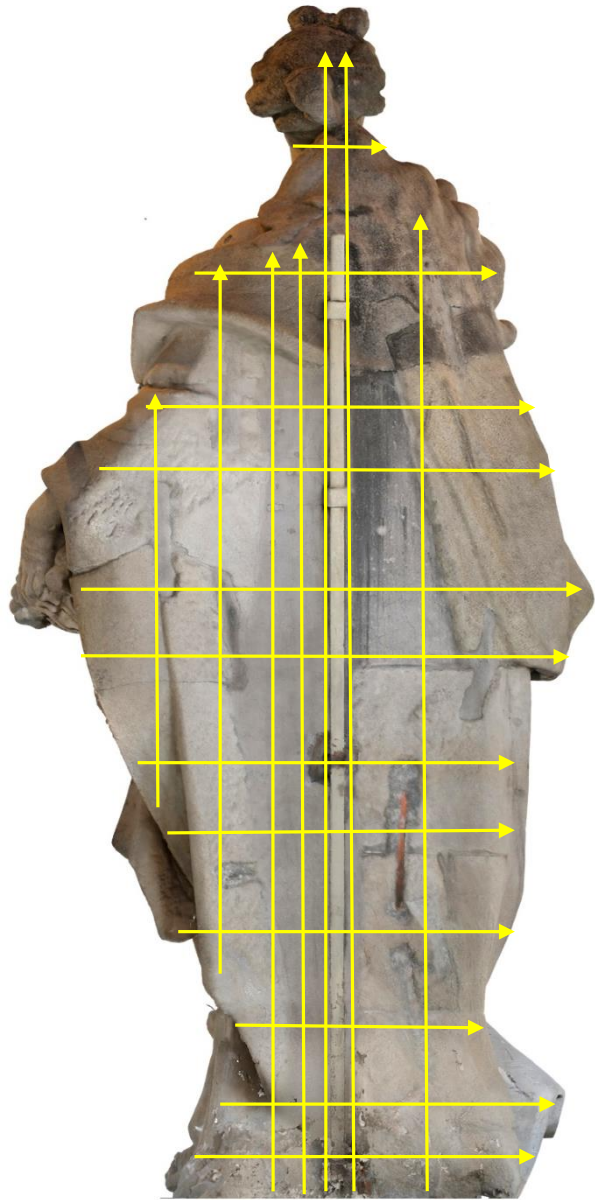


Fig. 2: Statua Liberalità: ubicazione dei profili acquisiti con l'antenna da 900 MHz

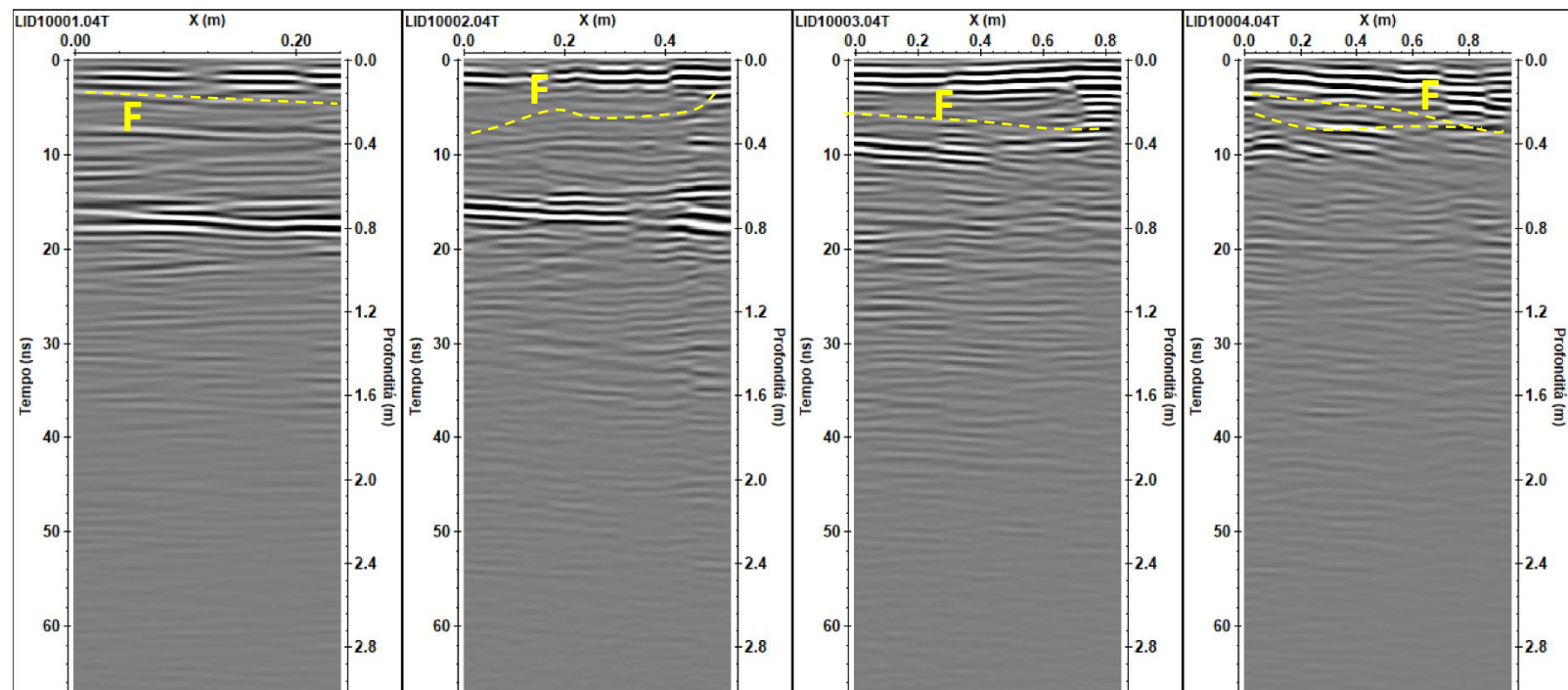
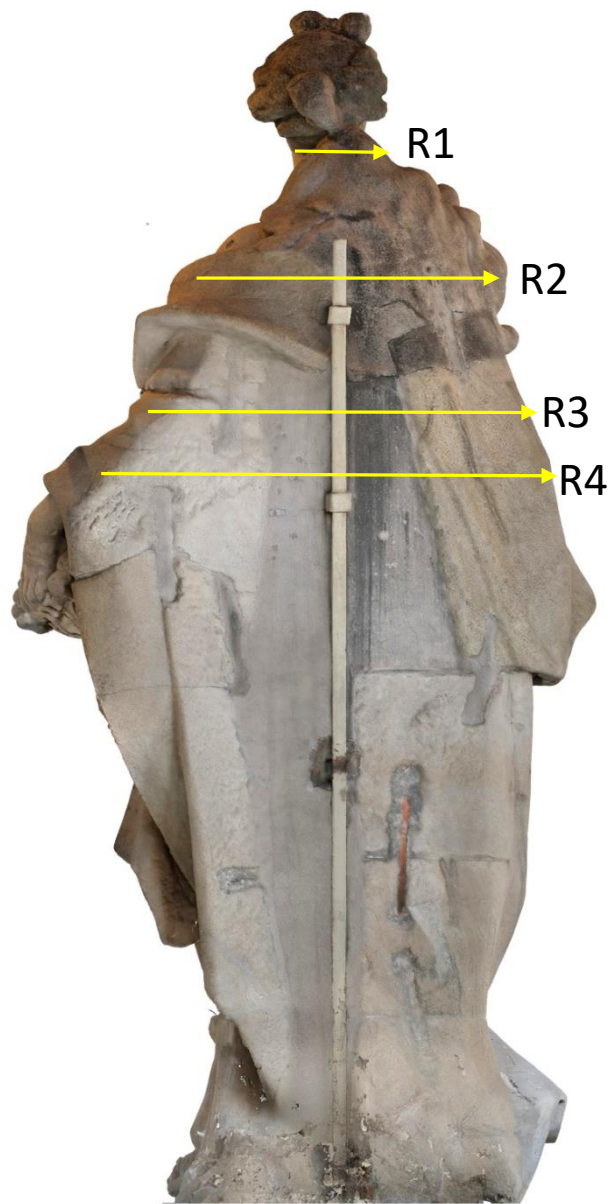


Fig. 3: Statua Liberalità: antenna da 900 MHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R1,..., R4. F: fessura interna

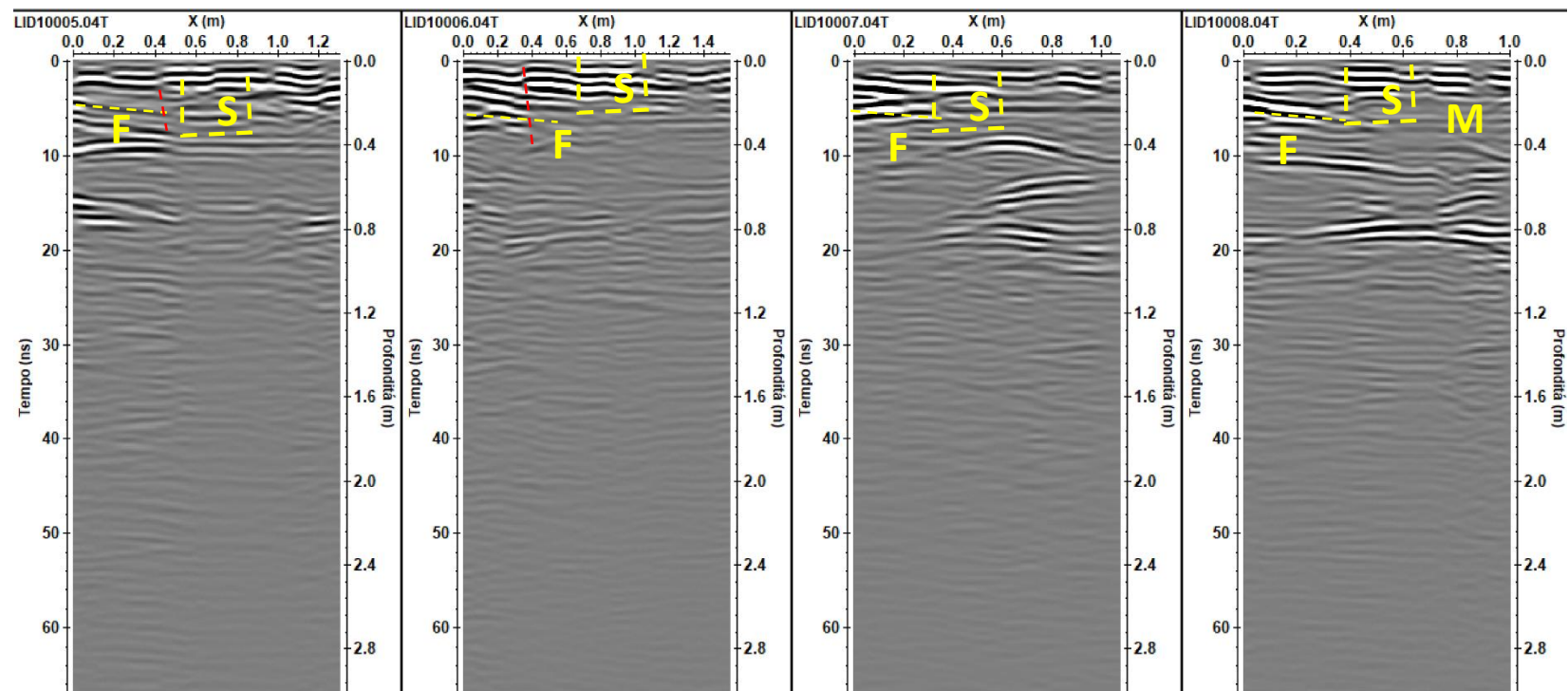
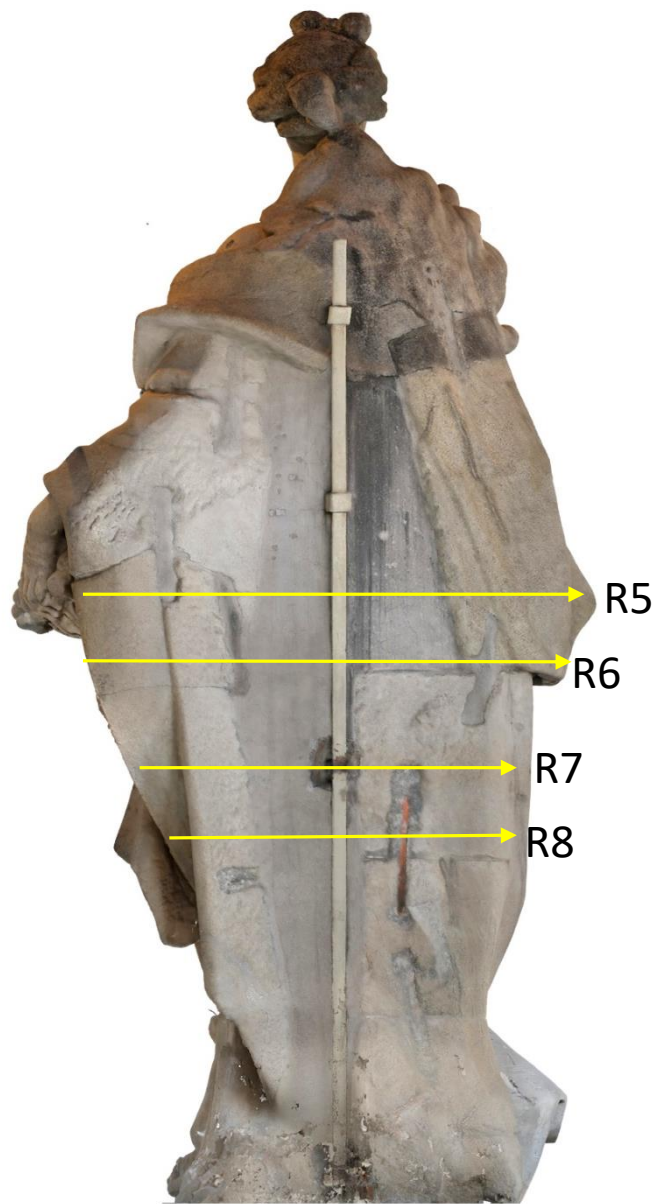


Fig. 4: Statua Liberalità: antenna da 900 MHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R5,..., R8. F: fessura interna; S: strato di diverso materiale; M: metallo

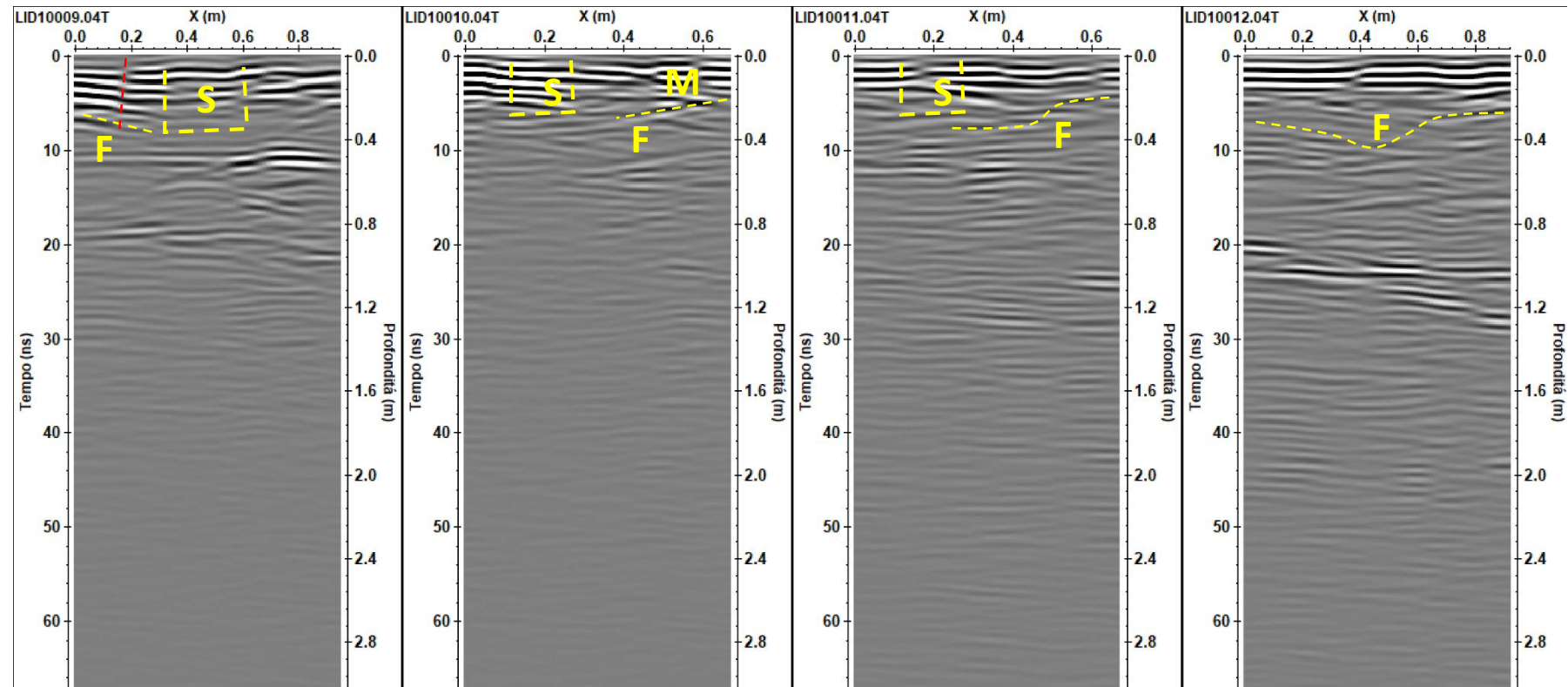


Fig. 5: Statua Libertá: antenna da 900 MHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R9,..., R12. F: fessura interna; S: strato di diverso materiale; M: metallo

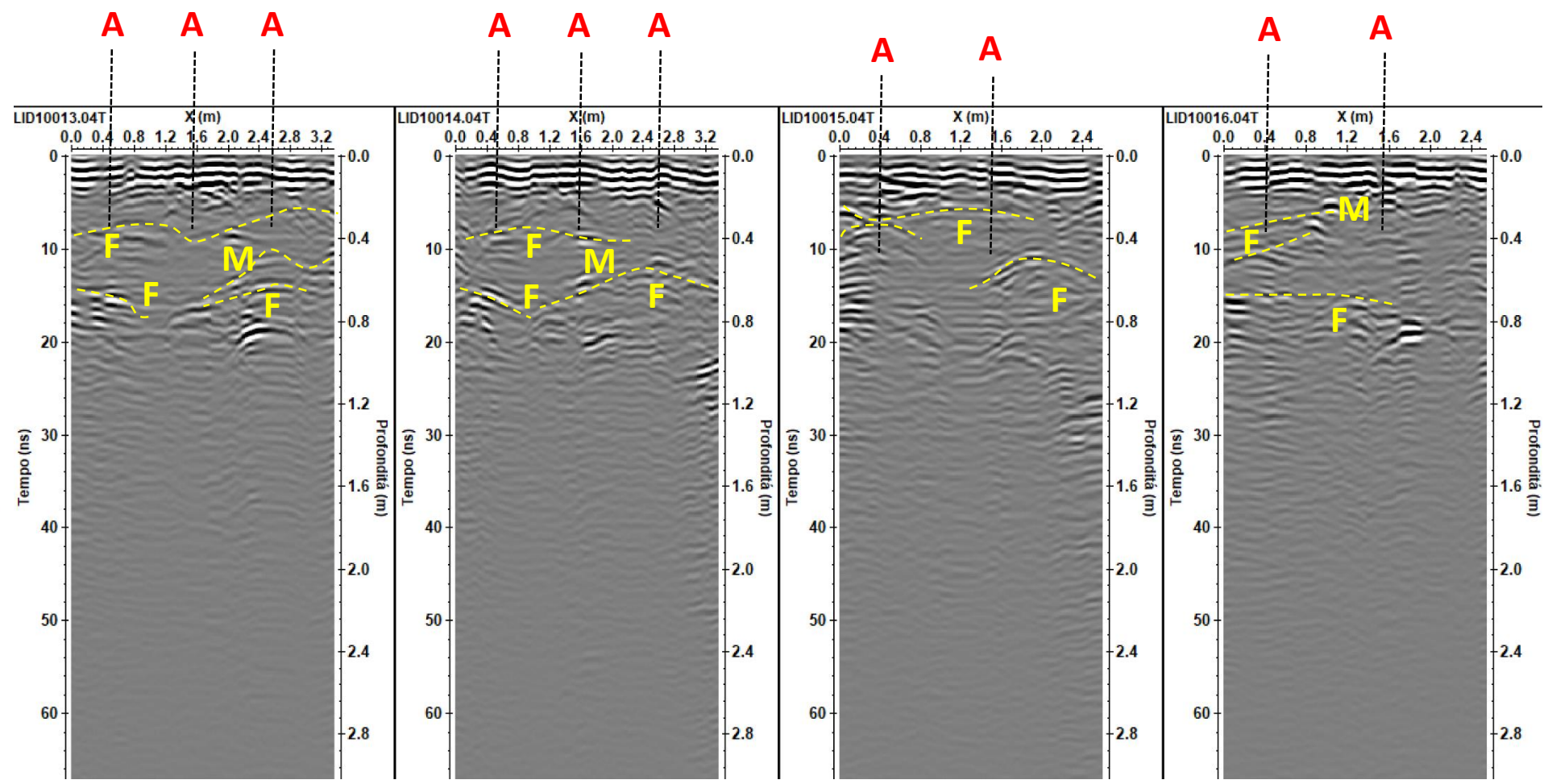
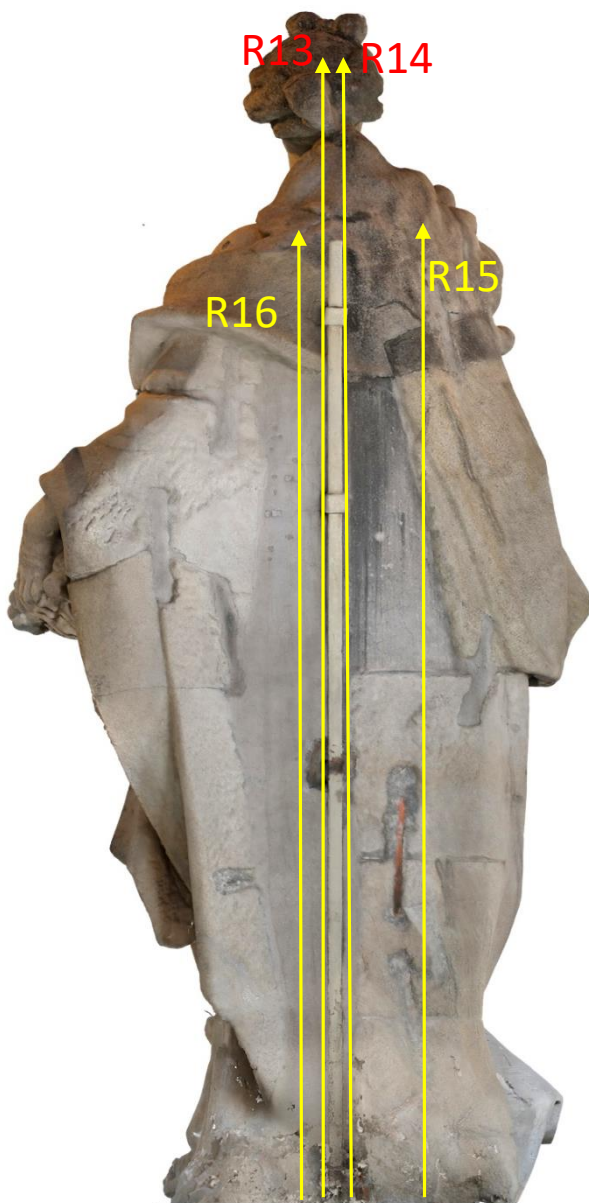


Fig. 6: Statua Liberalità: antenna da 900 MHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R13,..., R16. F: fessura interna; S: strato di diverso materiale; M: metallo; A: punti di divisione dei blocchi

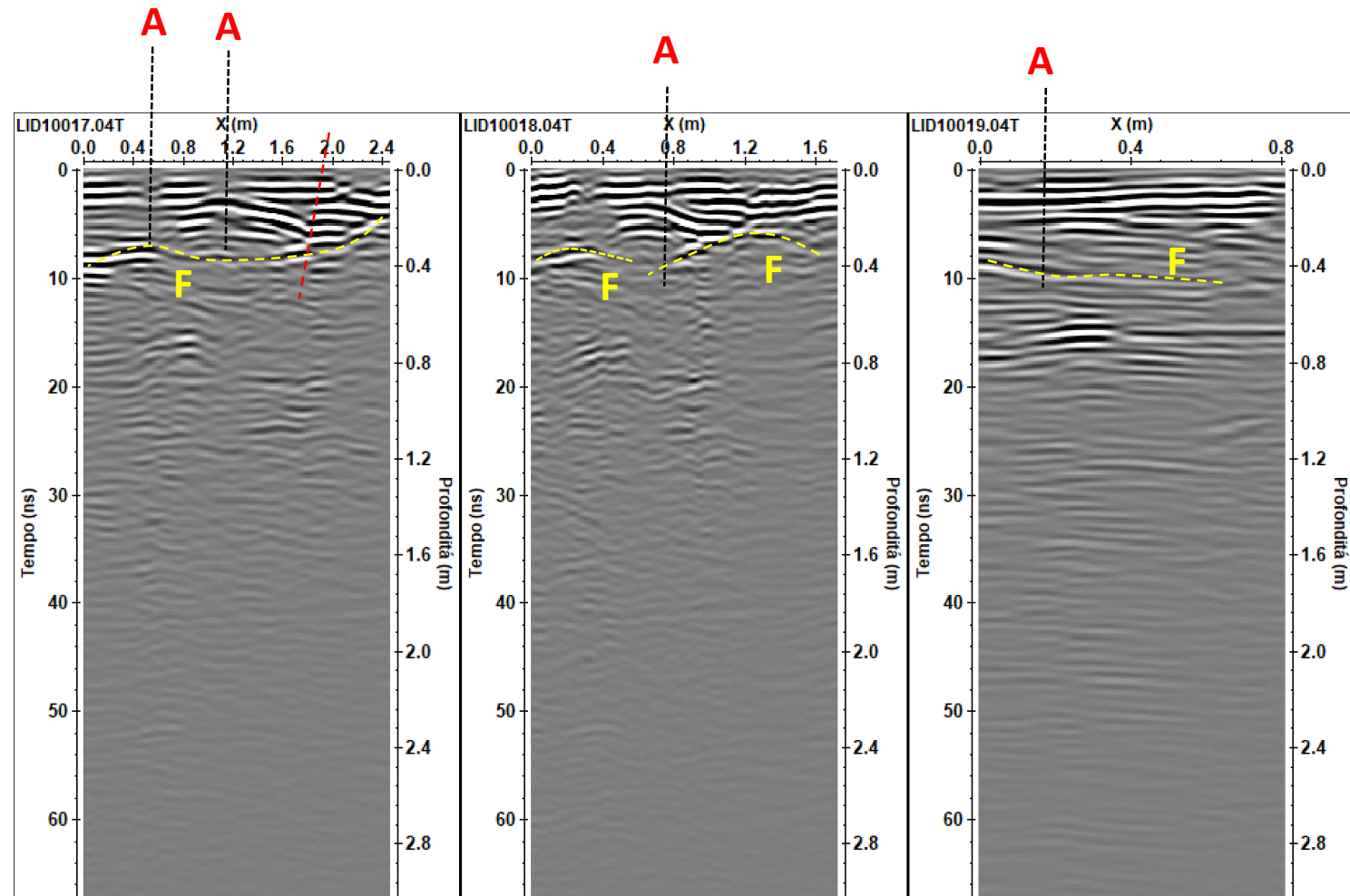
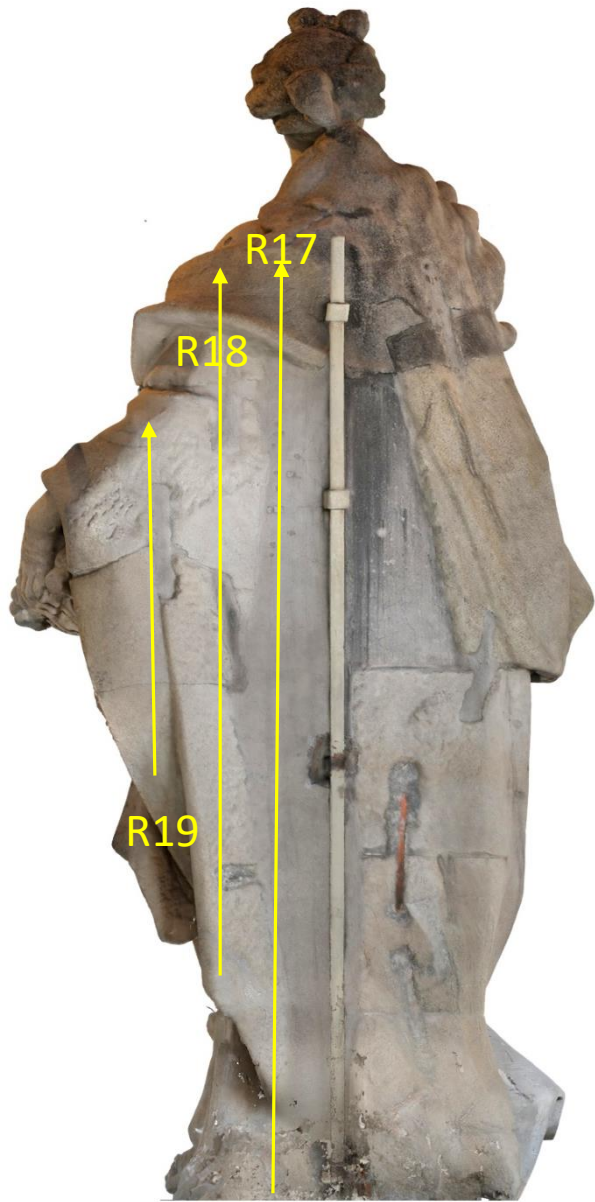


Fig. 7: Statua Liberalità: antenna da 900 MHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R17,..., R19. F: fessura interna; S: strato di diverso materiale; M: metallo; A: punti di divisione dei blocchi

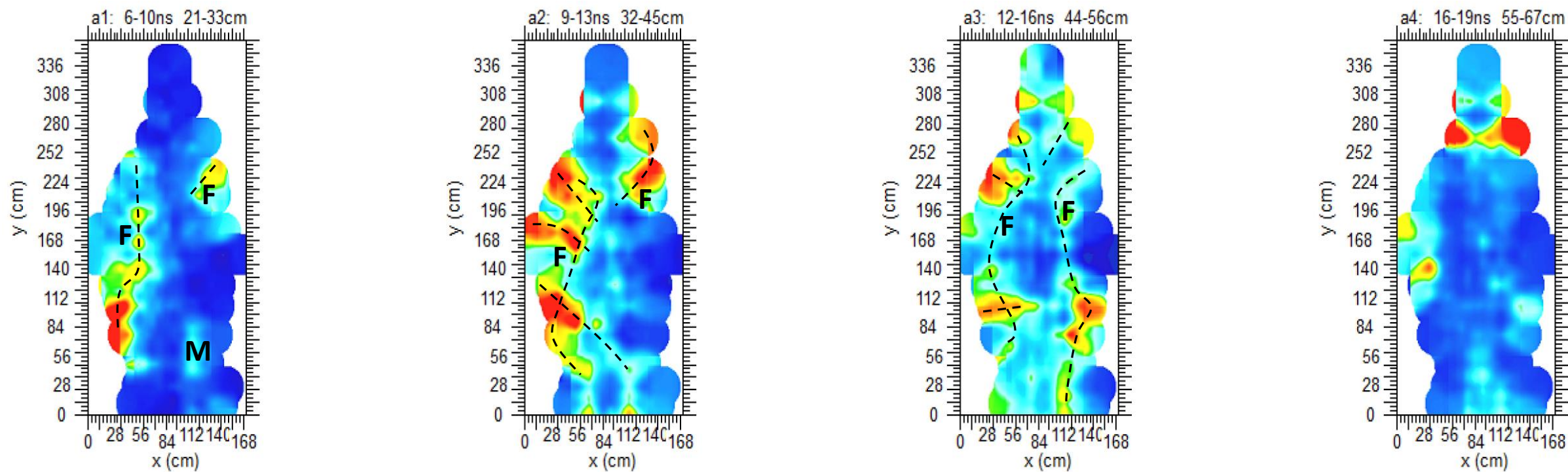


Fig. 8: Statua Liberalitá: antenna da 900 MHz: Depth slices. F: fessura interna; M: metallo.

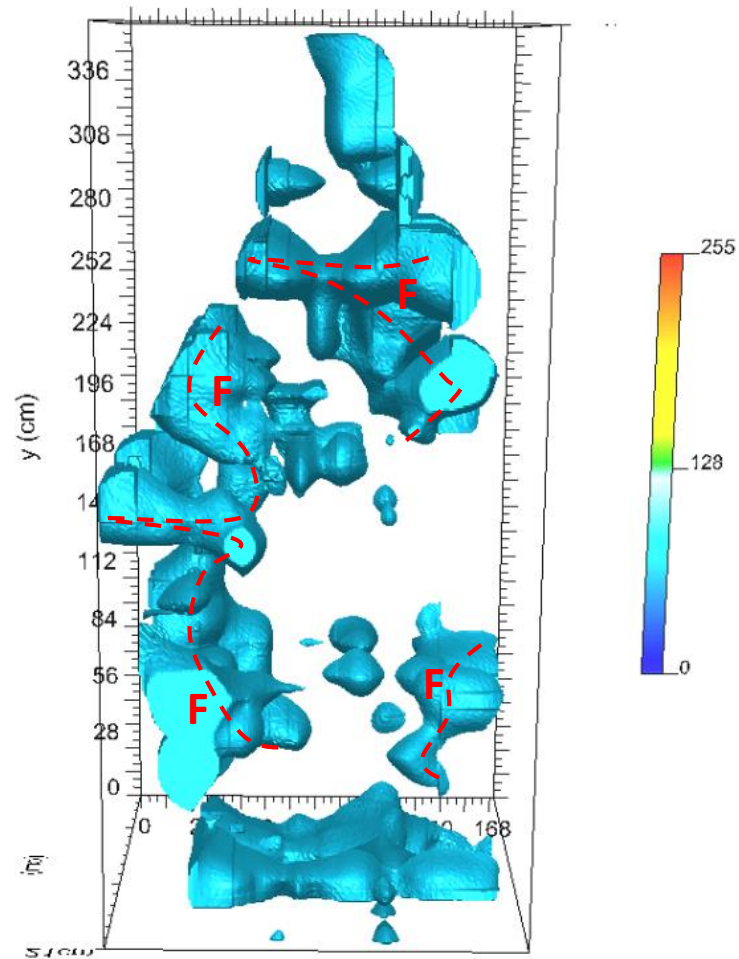


Fig. 9: Statua Libertá: antenna da 900 MHz: Isosuperficie di ampiezza dell'onda elettromagnetica.
F: fessura interna.

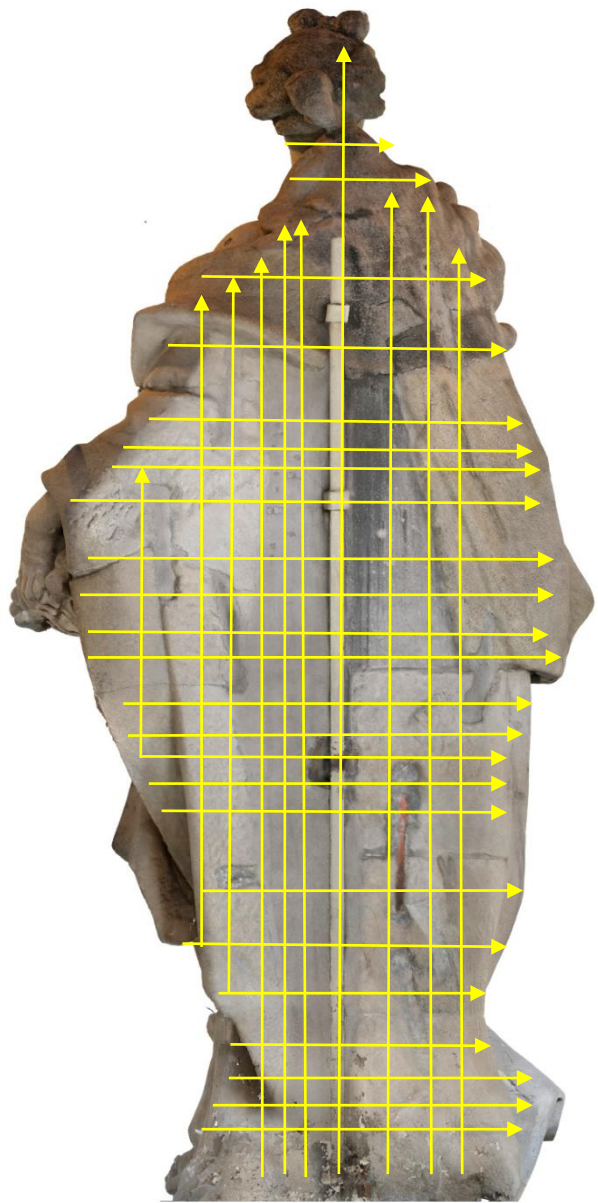


Fig. 10: Statua Liberalità: ubicazione dei profili acquisiti con l'antenna da 2 GHz

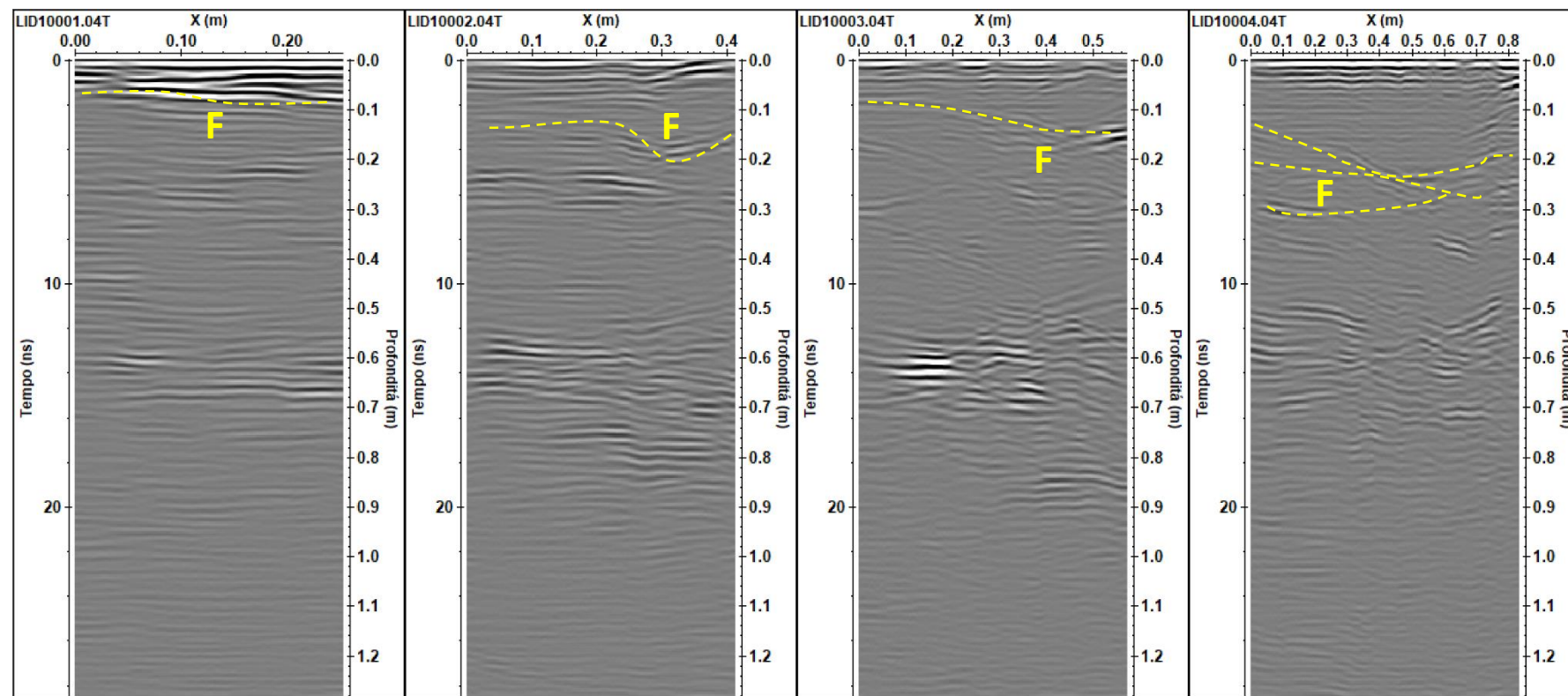
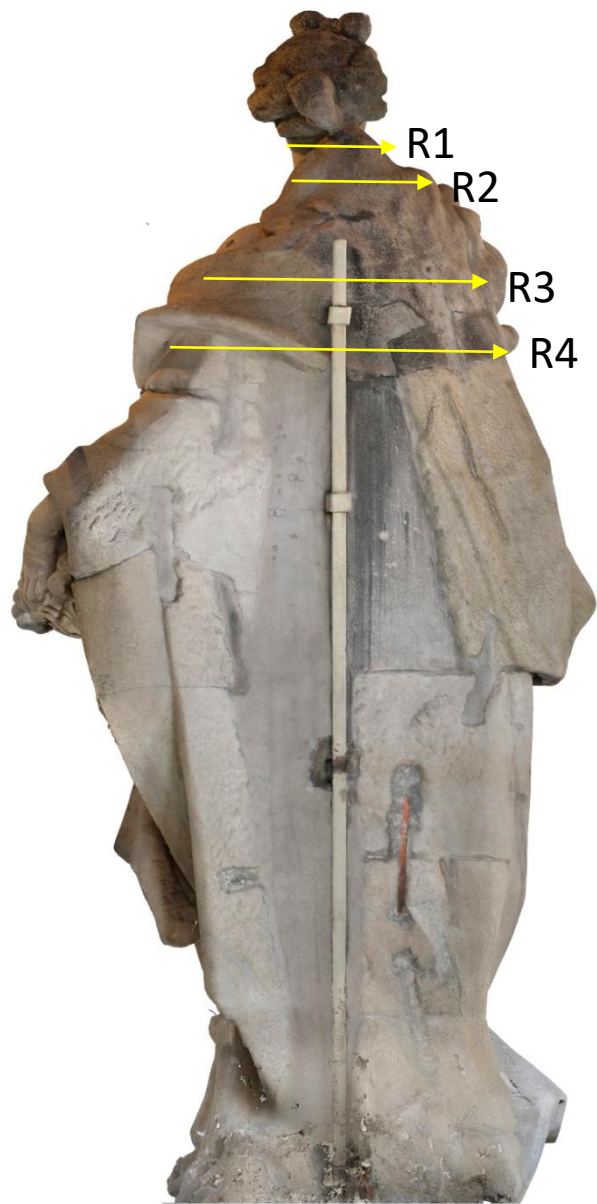


Fig. 11: Statua Libertá: antenna da 2 GHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R1,..., R4. F: fessura interna

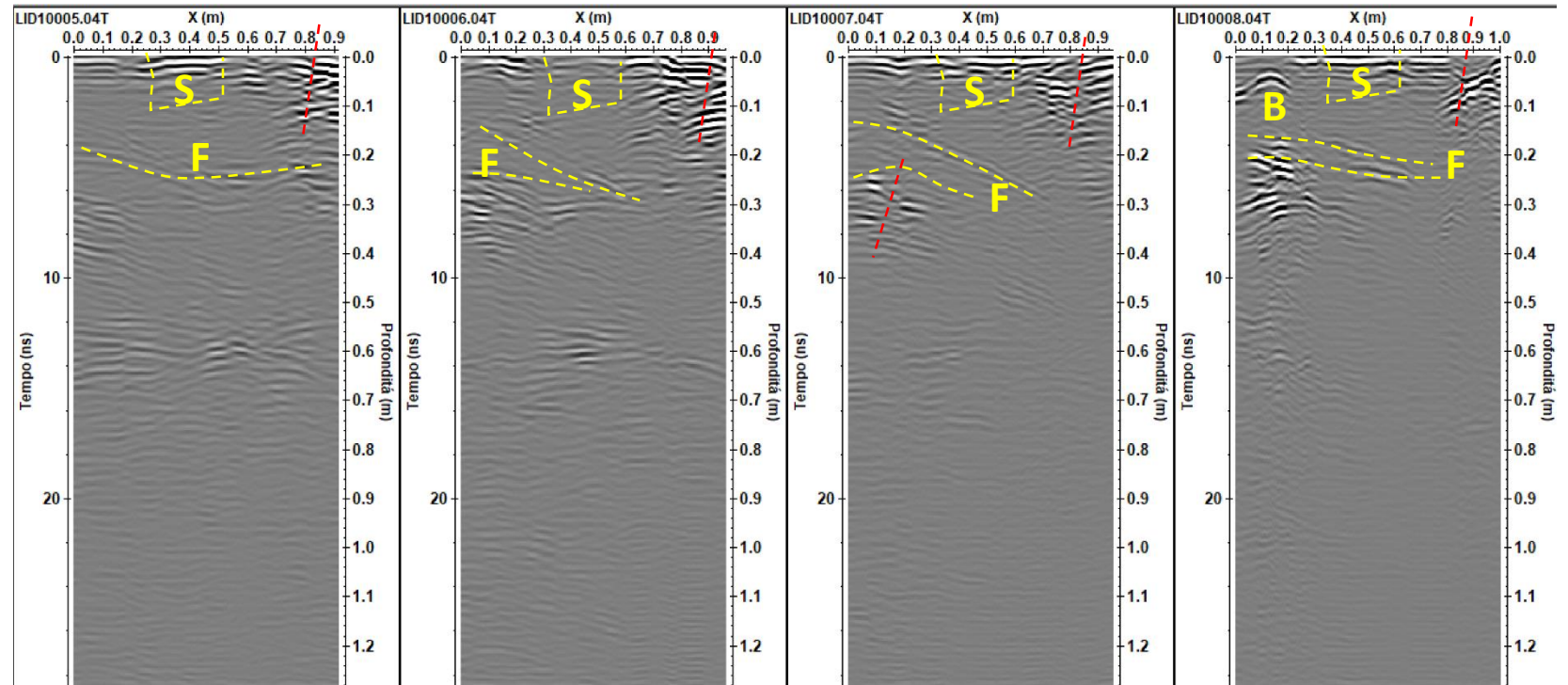
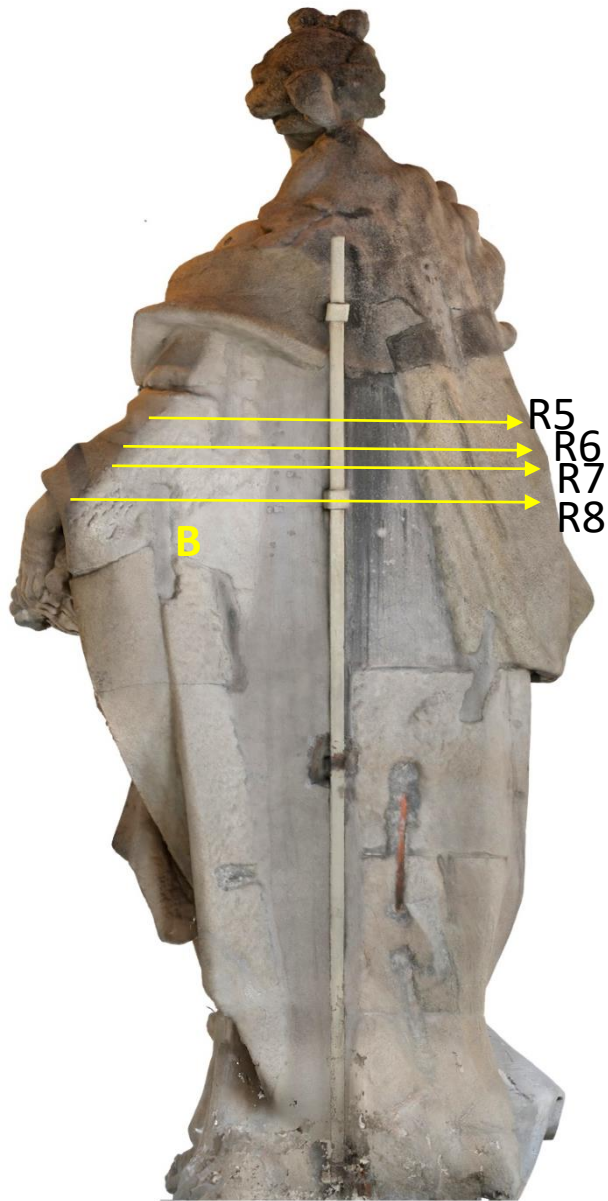


Fig. 12: Statua Libertá: antenna da 2 GHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R5,..., R8. F: fessura interna; S: strato di diverso materiale; B: anomalia superficiale visibile

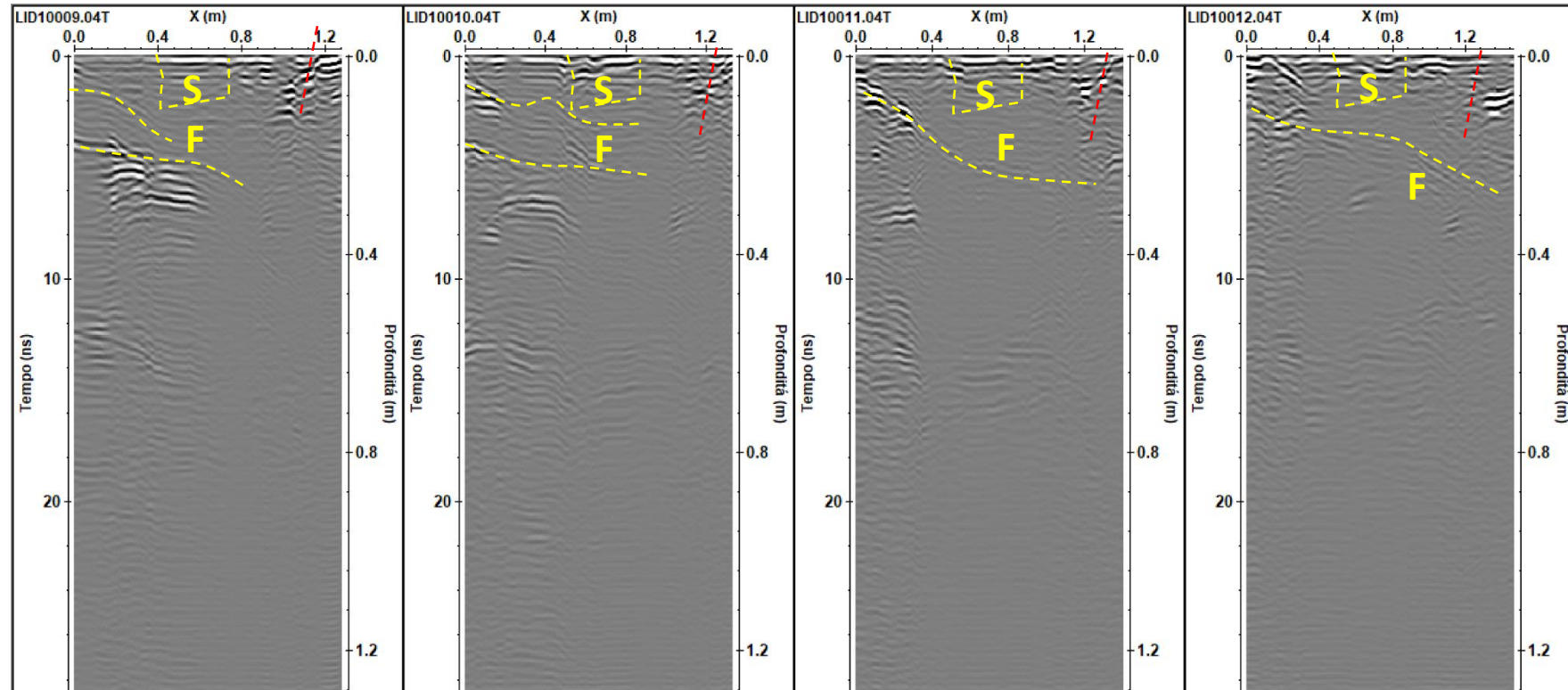
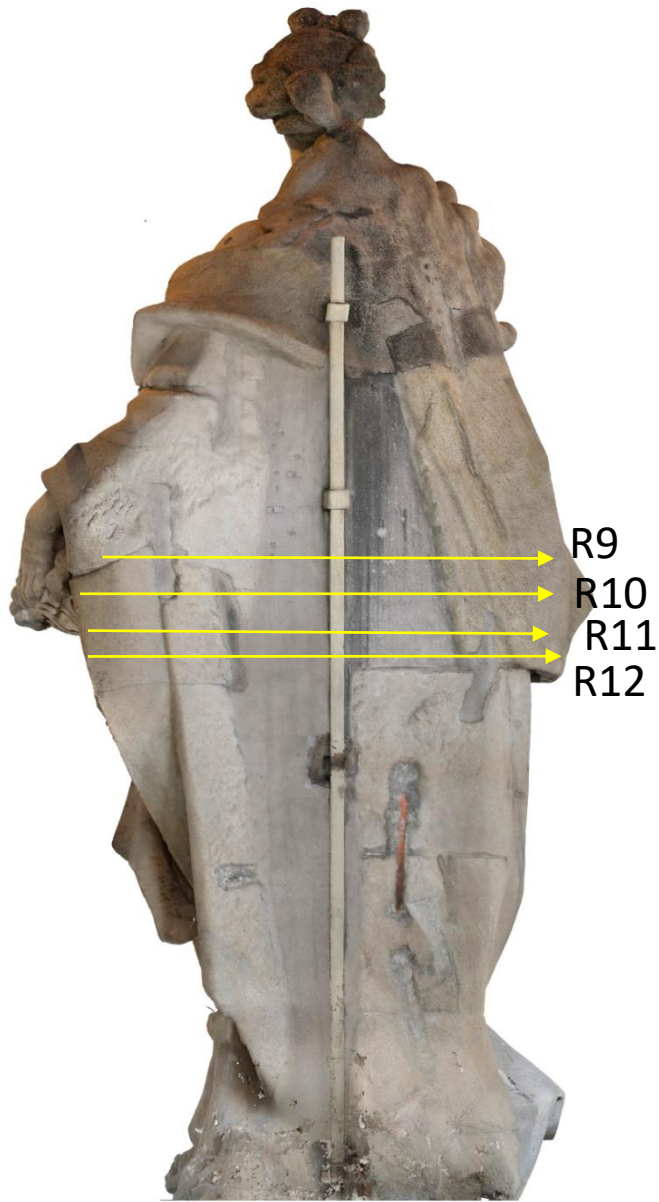


Fig. 13: Statua Libertá: antenna da 2 GHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R9,..., R12. F: fessura interna; S: strato di diverso materiale.

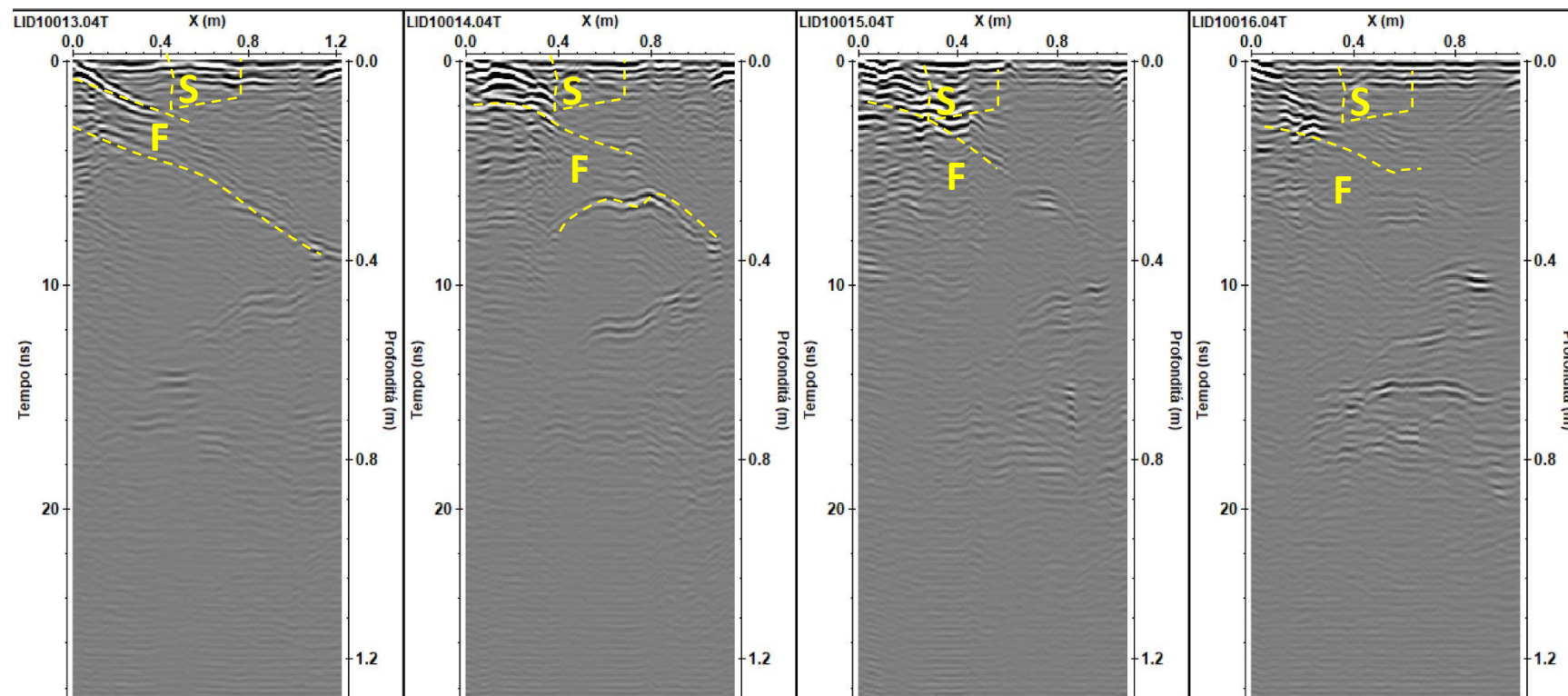
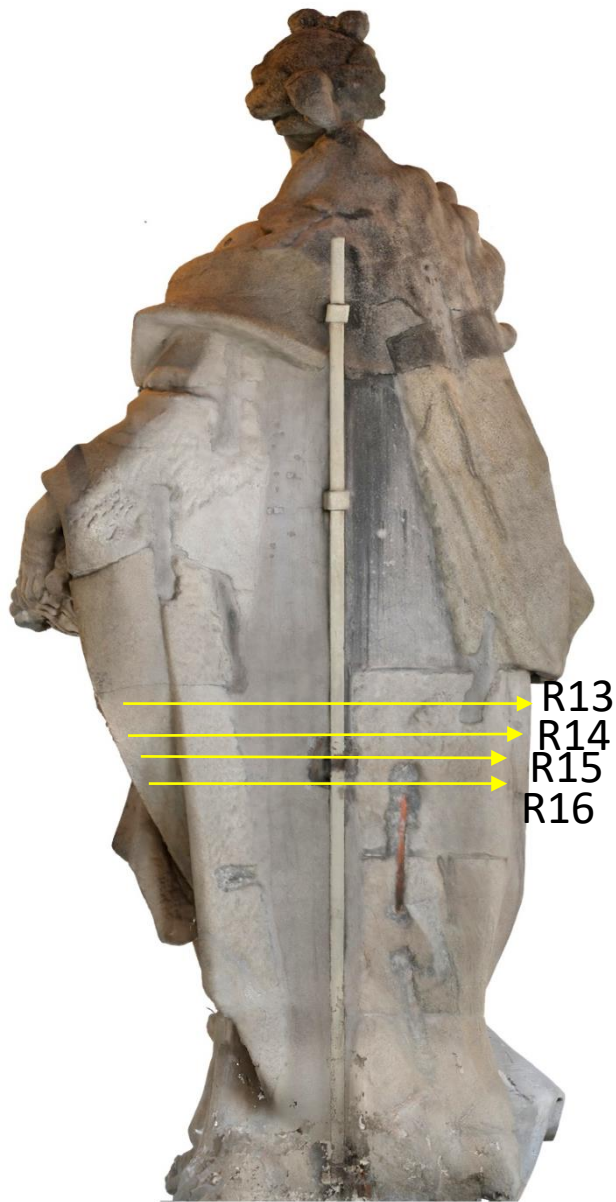


Fig. 14: Statua Libertá: antenna da 2 GHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R13,..., R16. F: fessura interna; S: strato di diverso materiale.

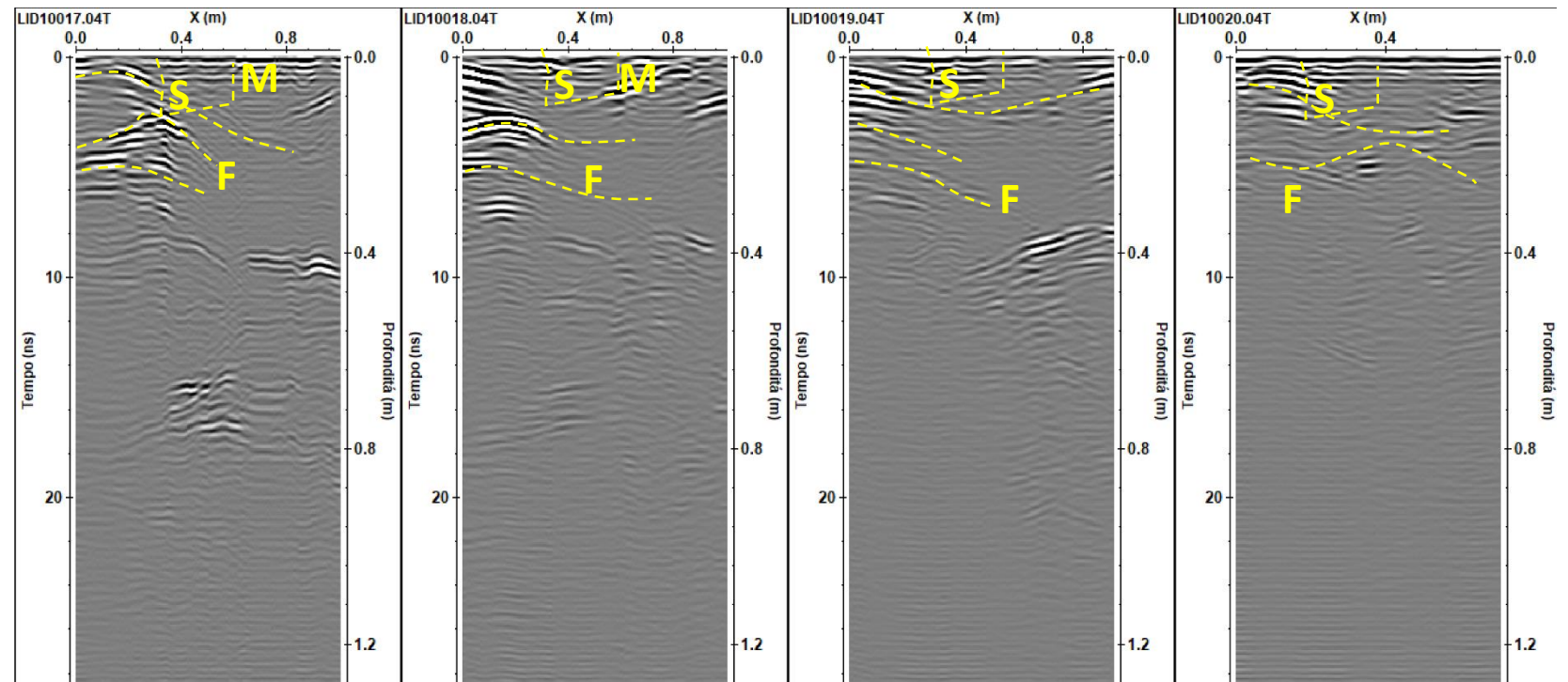


Fig. 15: Statua Liberalità: antenna da 2 GHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R17,..., R20. F: fessura interna; S: strato di diverso materiale; M: metallo.

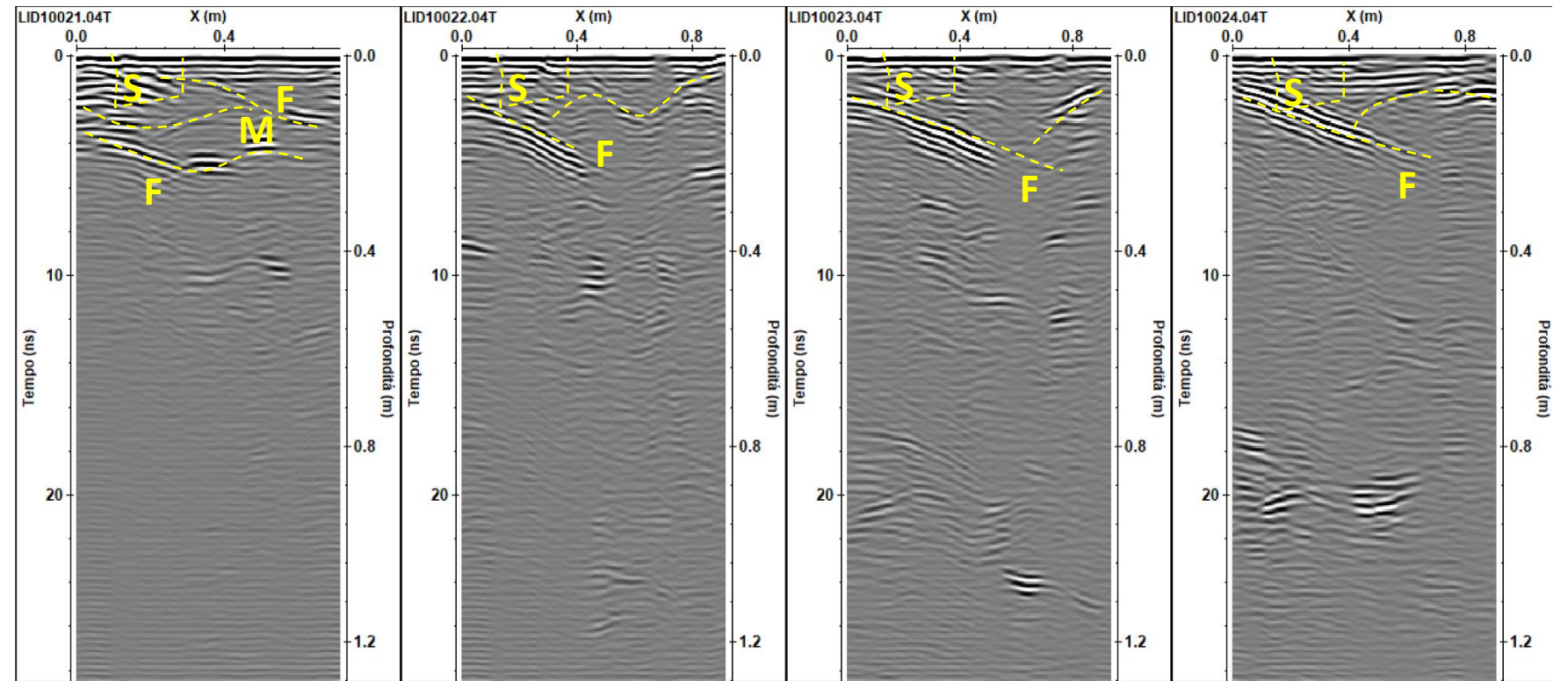


Fig. 16: Statua Liberalità: antenna da 2 GHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R21,..., R24. F: fessura interna; S: strato di diverso materiale.

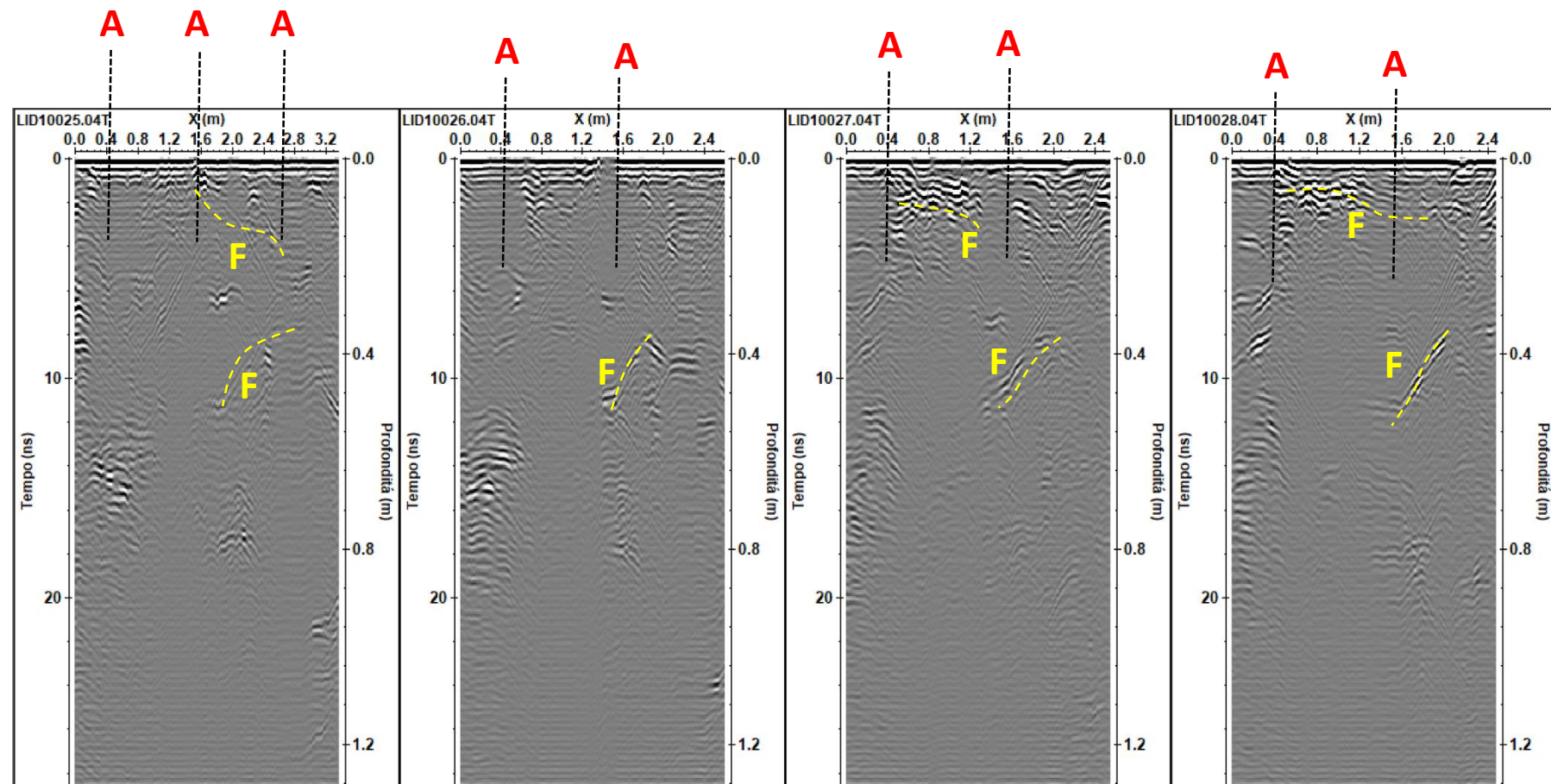


Fig. 17: Statua Liberalità: antenna da 2 GHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R25,..., R28. F: fessura interna; A: punti di divisione dei blocchi.

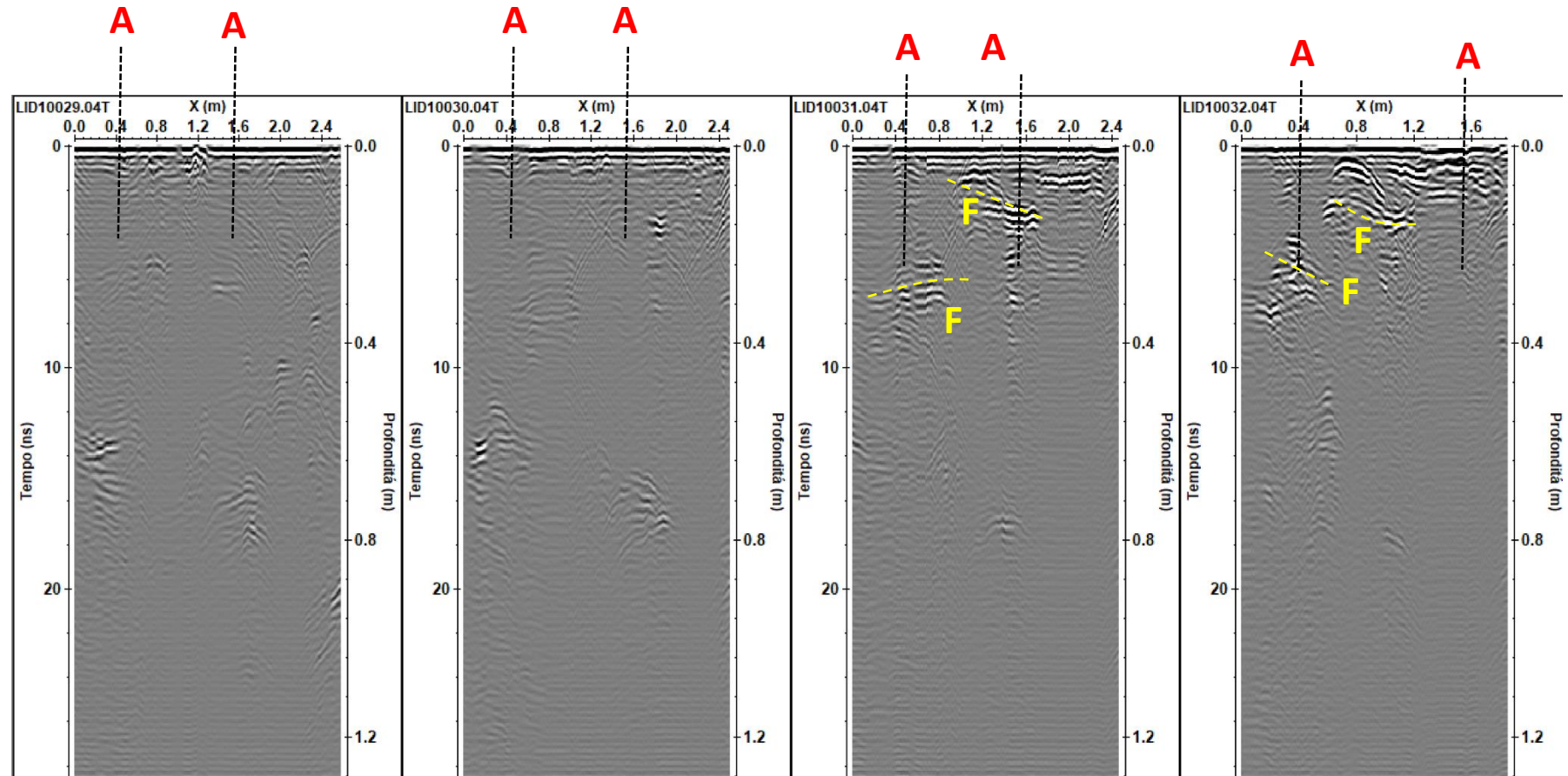


Fig. 18: Statua Liberalità: antenna da 2 GHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R29,..., R32. F: fessura interna; A: punti di divisione dei blocchi.

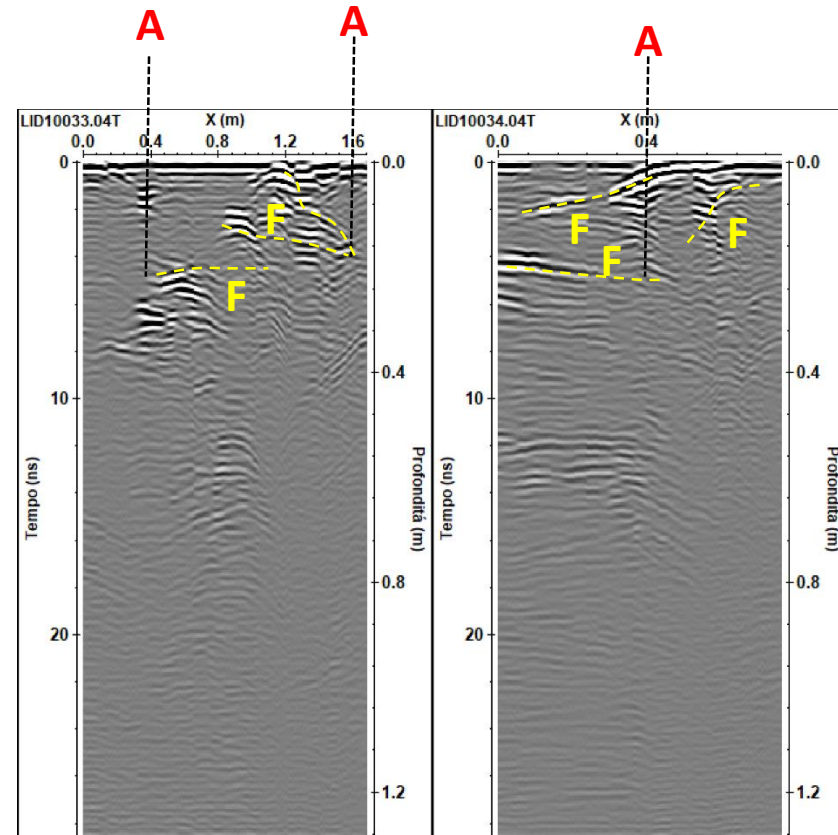
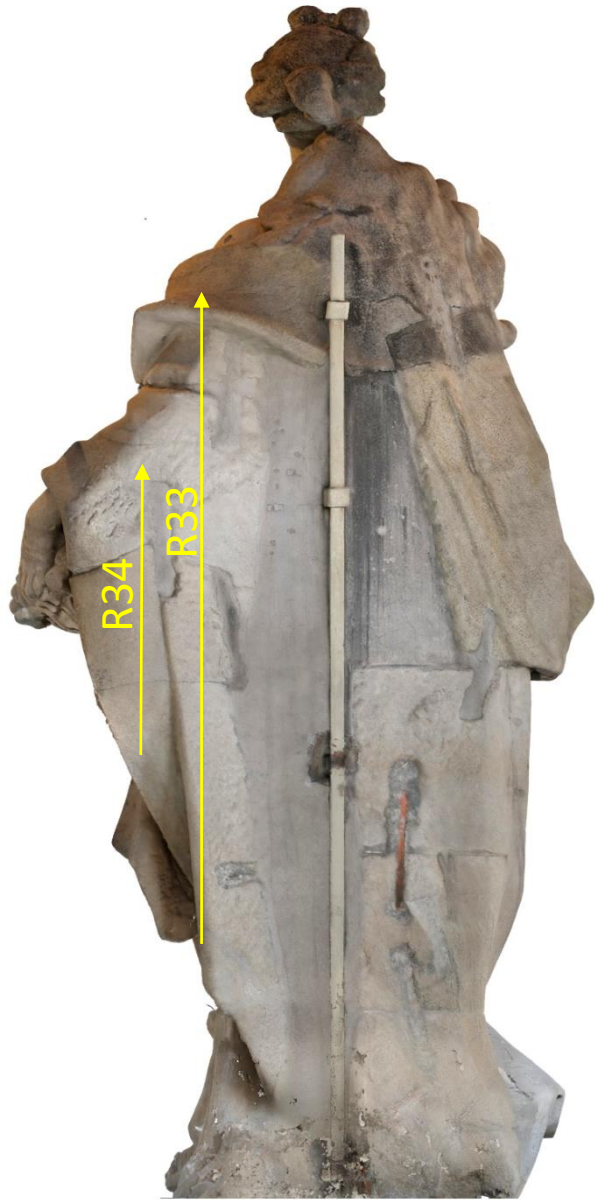


Fig. 19: Statua Libertá: antenna da 2 GHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R33 e R34. F: fessura interna; A: punti di divisione dei blocchi.

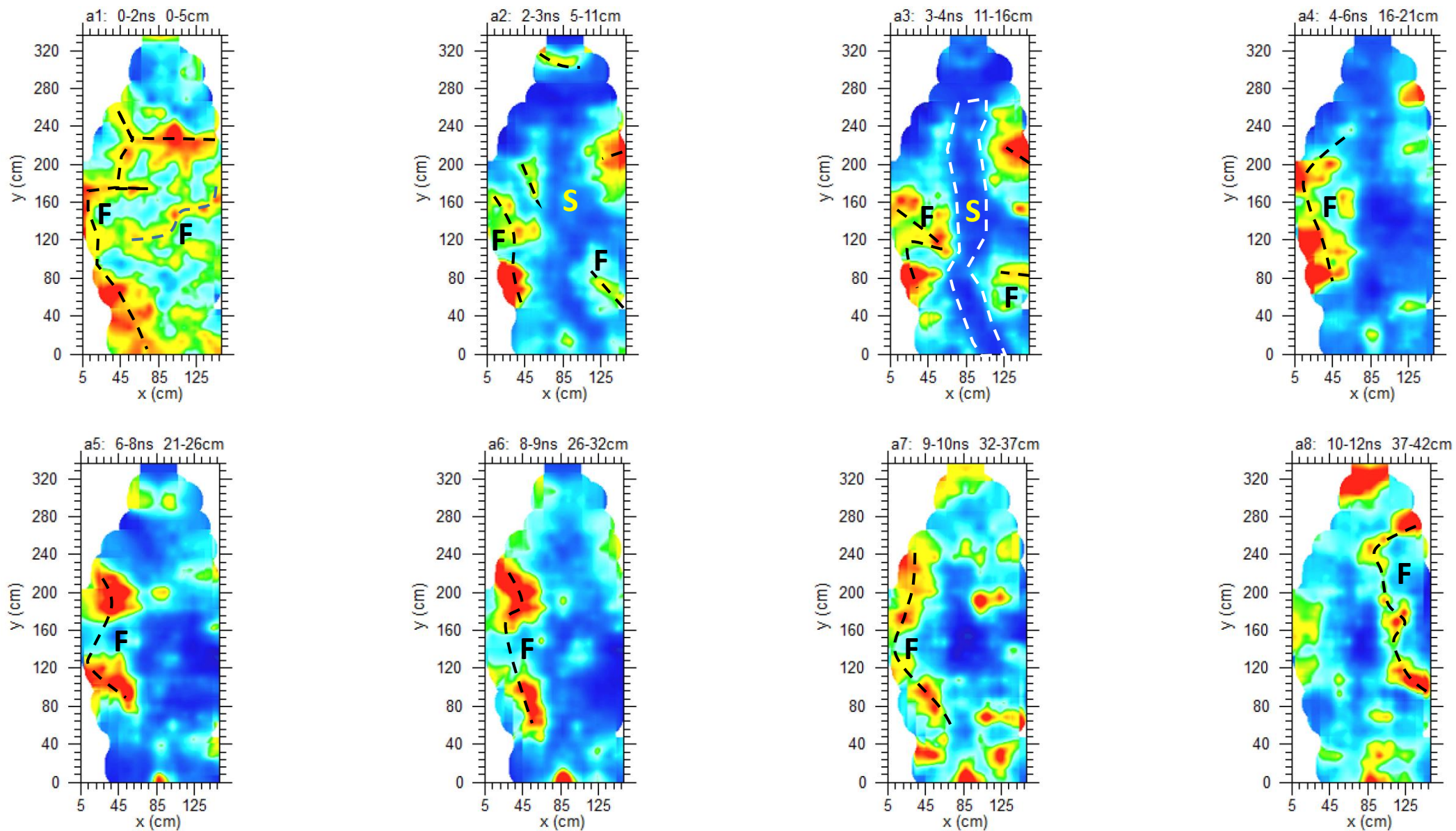


Fig. 20: Statua Liberalitá: antenna da 2 GHz: Depth slices. F: fessura interna; S: strato di diverso materiale.

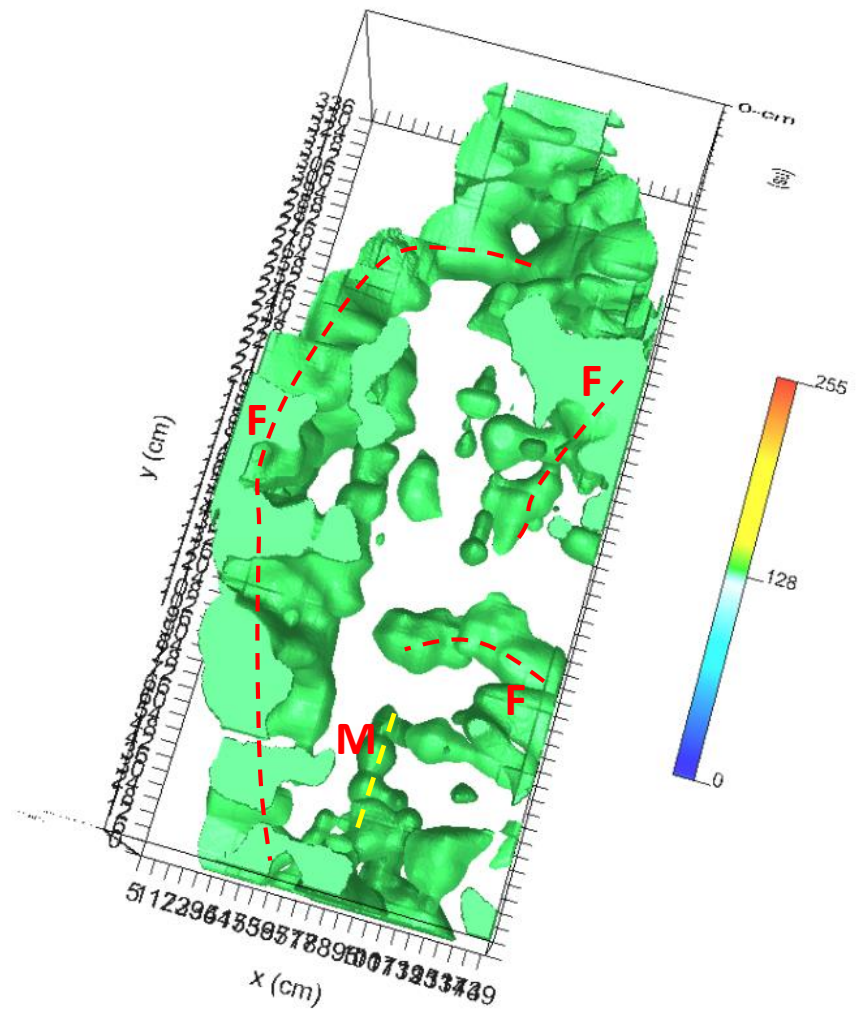


Fig. 21: Statua Liberalità: antenna da 2 GHz: Isosuperficie di ampiezza dell'onda elettromagnetica. F: fessura interna; M: metallo.

APPENDICE

1. I metodi geofisici impiegati nelle campagne di misura

1.1 Metodo georadar

Il metodo georadar (conosciuto anche con il nome anglosassone Ground Penetrating Radar – GPR) è una tecnica ad elevata risoluzione che consente di raccogliere una grande quantità di informazioni su vaste aree nei primi metri del sottosuolo, riferibili alla presenza di corpi sepolti, cavità, strutture di interesse archeologico, stratificazioni del sottosuolo, ecc. Un apparato radar strumentale opera mediante la generazione di onde impulsive ad elevata frequenza (tipicamente tra 10 MHz a qualche GHz), che vengono trasmesse nel sottosuolo mediante un'opportuna “ antenna trasmittente ” disposta sulla superficie del terreno. Il segnale elettromagnetico si propaga nel mezzo e subisce delle riflessioni se incontra un mezzo con discontinuità dei parametri elettromagnetici. L'onda riflessa che torna in superficie viene registrata da una “ antenna ricevente ”. Il segnale captato viene poi trasmesso all'unità di controllo che provvede ad amplificarlo e registrarlo in formato digitale.

Misurando l'intervallo di tempo impiegato dall'impulso a radiofrequenza per

- i) arrivare alla discontinuità sepolta,
- ii) riflettersi,
- iii) ritornare al ricevitore,

si può risalire alla posizione della struttura riflettente se è nota la velocità di propagazione.

Le modalità d'impiego del georadar sono due:

1) *Monostatico*, se si utilizza una sola antenna che funziona sia da trasmittente che da ricevente (Fig. 1a), ovvero essa trasmette l'impulso radar e subito dopo si pone in ricezione per captare l'energia riflessa da un eventuale bersaglio.

2) *Bistatico*, se vengono adoperate due antenne distinte (una per trasmettere Tx e una per ricevere Rx) che vengono tenute ad una distanza fissa l'una dall'altra mentre si esegue il rilievo (Fig. 1b).

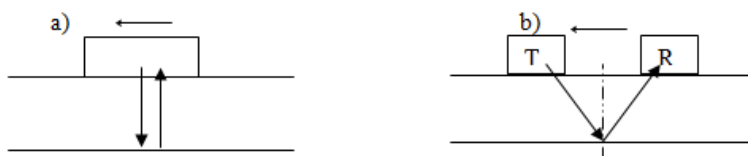


Figura 1- Illustrazione del sistema del sistema di acquisizione a) monostatico e b) bistatico

La tecnica di acquisizione può inoltre essere “ *in continuo* ”, ovvero con il sistema di antenne è mosso in modo continuo sulla superficie del terreno lungo un profilo ben definito, oppure “ *per* ”

punti". Nella modalità in continuo, le antenne sono trascinate manualmente o mediante dei veicoli con velocità costante e anche l'energia radar è trasmessa nel sottosuolo costantemente e ad un ritmo fissato. Nella modalità per punti, una o entrambe le antenne vengono spostate ad intervalli spaziali discreti consentendo l'acquisizione dei dati solo in determinati punti. L'acquisizione per punti (molto più onerosa in termini di tempo) viene utilizzata solo in particolari situazioni; ad esempio quando la presenza di asperità sul terreno rende difficoltoso il trascinamento delle antenne.

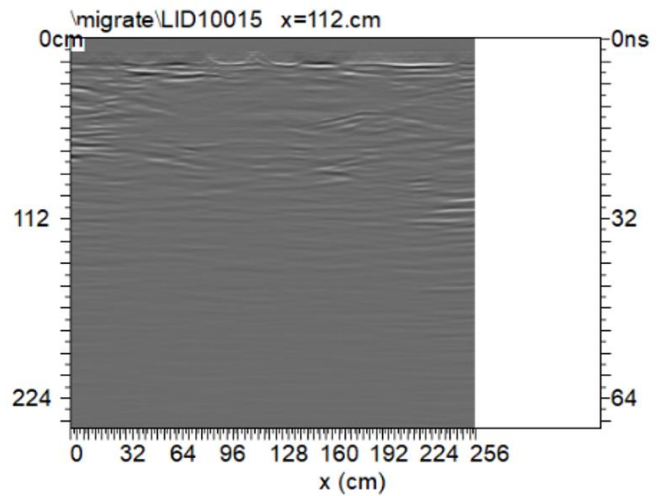
1.1.1 Le operazioni sul campo

Le indagini elettromagnetiche impulsive sono state eseguite con strumentazione georadar modello Ris Hi-mod dotato di antenne da 2GHz e 900 MHz.

La scelta della frequenza dell'antenna è strettamente legata allo scopo specifico dell'indagine. Le ricerche indirette, basate sull'individuazione di difetti strutturali come lesioni, fratture, vuoti, etc., hanno come obiettivo anomalie di piccole dimensioni (dal mm a qualche cm) poste a profondità che possono variare da decine di centimetri a qualche metro. In questo caso la configurazione strumentale, è costituita da: antenna da 2 GHz e tempo di fondo scala pari a 32 ns (nanosecondi); antenna da 900 MHz e tempo di fondo scala pari a 70 ns (nanosecondi). Ovviamente la configurazione proposta rappresenta uno standard e deve essere, in ogni caso, ottimizzata tramite prove di taratura preliminari all'indagine in situ. In Fig. 2(a) viene riportato il sistema GPR utilizzato nella campagna di misure costituito da: i) antenne; ii) unità di controllo; iii) computer, che consente la visualizzazione, in tempo reale, del risultato grezzo e la memorizzazione dello stesso.



a



b

Fig. 2: (a) esempio di acquisizione dati col metodo del profilo continuo; sezioni radar in rappresentazione linescan (b).

Il risultato è una “sezione radar” (Fig. 2b) in cui sull’asse delle ascisse è riportata la distanza (in cm) percorsa dall’antenna lungo il profilo e sull’asse delle ordinate è riportato il tempo doppio di viaggio dell’onda elettromagnetica nel sottosuolo, cioè il tempo che l’onda elettromagnetica impiega per andare dall’antenna trasmittente alla superficie di contatto tra due mezzi con caratteristiche elettromagnetiche distinte, essere riflessa e tornare indietro all’antenna ricevente.

1.1.2 Il metodo georadar: caratteristiche e limiti

La metodologia elettromagnetica impulsiva, comunemente conosciuta con il nome anglosassone Ground Penetrating Radar (GPR), utilizza impulsi elettromagnetici di breve durata per l’esplorazione del sottosuolo. Attraverso un’analisi degli impulsi riflessi da superfici di discontinuità dei parametri elettromagnetici è possibile risalire alle strutture presenti nel sottosuolo. Tale metodo ha il vantaggio di fornire in tempo reale una descrizione dettagliata del sottosuolo indagato. Il GPR trova ottimi impieghi in terreni resistivi (spazi vuoti, ghiaie, sabbie sciolte, etc..), consentendo di individuare strutture con “caratteristiche elettromagnetiche” differenti rispetto all’ambiente circostante, mentre risulta praticamente “cieco” in terreni con alta conduttività, in cui l’assorbimento dell’energia da parte

del materiale stesso ne limita la profondità di indagine (ad esempio in caso di strati di argilla, falde freatiche, umidità nel sottosuolo).

I parametri fisici che influenzano la propagazione delle onde elettromagnetiche nel mezzo (in questo nel sottosuolo) sono:

- la *conducibilità elettrica* σ (S/m). Essa è una caratteristica del mezzo e rappresenta la sua capacità di veicolare una corrente elettrica. Un buon conduttore è caratterizzato da alti valori di σ .
- la *permittività dielettrica* ϵ . Essa rappresenta la capacità del materiale di polarizzarsi elettricamente in risposta all'applicazione di un campo elettrico esterno. Un dielettrico perfetto è rappresentato dallo spazio vuoto in cui $\sigma = 0$. La permittività dielettrica del vuoto è $\epsilon_0 = 8,857 \times 10^{-12}$ (Farad/m). La permittività relativa al vuoto è chiamata costante dielettrica $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ ed è un numero puro.
- la *permeabilità magnetica* μ . Essa rappresenta la capacità del materiale di magnetizzarsi per effetto di un campo magnetico esterno. La permeabilità magnetica del vuoto è $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/m). La permeabilità relativa al vuoto $\mu_r = \mu/\mu_0$ è un numero puro. Per materiali geologici $\mu_r \approx 1$ e quindi è di solito un parametro poco significativo nelle indagini GPR.

La propagazione di un campo elettromagnetico in un mezzo materiale è governata dalle equazioni di Maxwell.

L'ampiezza dell'onda elettromagnetica (EM) subisce un'attenuazione man mano che si propaga in profondità nel sottosuolo.

La prima causa è lo smorzamento geometrico: l'ampiezza dell'onda EM diminuisce infatti all'aumentare della distanza dal punto sorgente in modo proporzionale all'inverso della distanza.

La seconda causa è legata al tipo di materiale che l'onda EM attraversa, e in particolare alle sue perdite per conducibilità e/o (caso più raro) per isteresi.

Se il mezzo attraversato dall'onda EM ha un'elevata conducibilità elettrica, l'ampiezza dell'onda EM viene attenuata molto rapidamente. Mezzi molto conduttivi sono quelli che contengono acqua, argilla, sali disciolti o elettroliti. Elevati valori di conducibilità si rilevano anche nei suoli agricoli saturi di azoto e potassio o nei suoli umidi impregnati di carbonato di calcio. La costante dielettrica varia in base alla composizione chimica, alla struttura fisica, alla quantità di umidità e alla temperatura del campione roccioso. Tanto più la differenza di ϵ_r tra due materiali del sottosuolo è grande, tanto più aumenta l'ampiezza delle riflessioni generate e l'ampiezza stessa è tanto più pronunciata, quanto più la distanza tra la discontinuità e le antenne è piccola.

Nella tabella 1 sono riportati i valori tipici della costante dielettrica relativa ϵ_r , della conducibilità elettrica σ , della velocità v e dell'attenuazione α , osservati per diversi materiali ad una frequenza di 100 MHz:

Tabella 1 : Valori di ϵ_r , σ , v , α per alcuni materiali

Materiale	$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$	σ (mS/m)	V(m/ns)	α (dB/m)
Aria	1	0	0.30	0
Acqua distillata	80	0.01	0.033	$2 \cdot 10^{-3}$
Acqua dolce	80	0.5	0.033	0.1
Acqua salata	80	$3 \cdot 10^4$	0.01	10^3
Sabbie asciutte	3-5	0.01	0.15	0.01
Sabbie sature	20-30	0.1-1	0.06	0.03-0.3
Calcare	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Argillite	5-15	1-100	0.09	1-100
Limo	5-30	1-100	0.07	1-100
Argilla	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granito	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Sale asciutto	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1

Un'altra causa di attenuazione sono i fenomeni di *riflessione e rifrazione* che si verificano quando l'onda incide su una superficie di separazione tra due mezzi con differenti proprietà elettromagnetiche.

Riflessioni e trasmissioni possono inoltre manifestarsi in maniera pronunciata generando riflessioni multiple o fenomeni di *scattering* che disperdono ancora di più l'energia radar.

Le antenne utilizzate nei sistemi radar hanno un "range di frequenze" che va da 10MHz a circa 3GHz. Esse hanno generalmente una larghezza di banda di due ottave, cioè le frequenze variano tra 1/2 e 2 volte la frequenza dominante o frequenza di centro banda f_0 . In realtà, anche se un'antenna radar è identificata da una segnata frequenza di centro banda, non necessariamente l'energia che si propaga nel sottosuolo è esattamente centrata su quella frequenza, poiché il suolo ha un effetto di carico sull'antenna. Inoltre nel sottosuolo le alte frequenze vengono assorbite più rapidamente delle basse e ciò provoca uno spostamento della frequenza centrale verso le basse frequenze.

L'energia radar non penetra nei metalli. Un oggetto metallico largo rispetto alla lunghezza d'onda incidente rifletterà il 100% dell'energia radar che lo colpisce e oscurerà ogni cosa al di sotto di esso. La scelta delle antenne da adoperare in un rilievo va fatta in base alle dimensioni geometriche degli oggetti di interesse e della profondità a cui essi presumibilmente dovrebbero trovarsi.

Le onde elettromagnetiche prodotte dalle antenne standard, irradiano energia radar nel terreno secondo un cono ellittico il cui apice è al centro dell'antenna trasmittente. Il lobo di radiazione nel sottosuolo permette così di "guardare" non solo direttamente sotto l'antenna ma anche di fronte, in

dietro e ai lati man mano che l'antenna viaggia sul terreno. Parliamo così di risoluzione orizzontale. La stima del lobo di radiazione è importante specialmente quando si progetta la spaziatura tra le linee di una griglia, in modo da rendere evidenti tutti i bersagli di una certa importanza nel sottosuolo, cioè in modo tale che questi ultimi siano colpiti dall'energia radar trasmessa e che perciò possano generare riflessioni. In generale, l'angolo del cono è definito dalla costante dielettrica relativa del materiale attraversato dalle onde e dalla frequenza centrale di emissione dell'antenna.

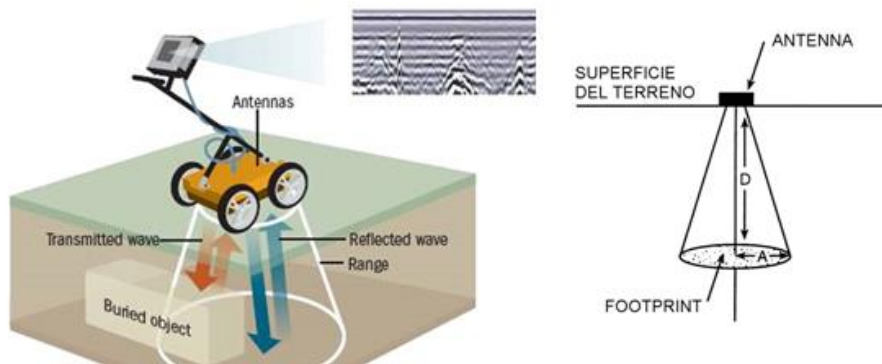


Figura 3 – Cono ellittico della penetrazione GPR nel terreno

Un'equazione che può essere usata per stimare la larghezza del fascio di trasmissione a varie profondità (il footprint) è la seguente (Leucci, 2015; Leucci, 2019; Leucci 2020):

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r + 1}}$$

dove A sono le dimensioni approssimate del raggio del footprint, λ è la lunghezza d'onda dell'impulso elettromagnetico in aria, D è la profondità a cui si trova l'oggetto riflettente e ϵ_r è la costante dielettrica relativa del mezzo attraversato.

Una volta scelta la frequenza da utilizzare nell'indagine geofisica bisogna conoscere la velocità di propagazione nel mezzo che ci consente di stimare la profondità (D) delle riflessioni: questa si può misurare dagli stessi dati georadar. A parità di velocità, all'aumentare della frequenza aumenta il potere risolutivo verticale e orizzontale. È anche noto però che all'aumentare della frequenza aumenta il potere di assorbimento del mezzo e diminuisce quindi la profondità di penetrazione.

All'interfaccia aria-suolo si crea una prima rifrazione che provoca un cambiamento di direzionalità del fascio radar; la maggiorparte dell'energia è incanalata al di sotto dell'antenna e si propaga in un cono.

Più alta è la costante dielettrica relativa ϵ_r del materiale di cui è costituito il terreno, più bassa è la velocità dell'onda radar trasmessa, e più focalizzato è il cono di trasmissione delle onde che si propagano nel terreno.

L'espansione del cono di energia sotto l'antenna, permette di "vedere" un bersaglio non soltanto quando l'antenna gli passa effettivamente sopra, ma anche prima e subito dopo, generando le classiche "iperboli" che spesso si notano nei tracciati radar.

Alcune antenne non sono schermate e irradiano in tutte le direzioni. Le antenne non schermate, possono registrare riflessioni generate dallo stesso operatore che trascina l'apparecchiatura radar lungo il profilo, o da alcuni oggetti vicini, come per esempio un albero o una macchina, case e linee elettriche. Queste riflessioni rendono ovviamente più difficoltosa l'analisi dei dati, e per questo è consigliabile prendere nota degli oggetti presenti in superficie in prossimità del profilo radar eseguito. Superfici sepolte, che contengono avvallamenti o creste, possono focalizzare o diffondere l'energia radar secondo la loro orientazione rispetto all'antenna in superficie. Se per esempio una superficie ha una convessità verso l'alto, molta dell'energia radar sarà riflessa lontano dall'antenna e non sarà registrata alcuna riflessione significativa. Questo è il cosiddetto "*scattering radar*".

Se invece la superficie sepolta ha una concavità verso l'alto, allora l'energia sarà focalizzata verso l'antenna e sarà registrata una riflessione più intensa.

Inoltre, poiché nel vuoto non si hanno perdite per assorbimento, una discreta quantità di energia può restare intrappolata all'interno di una cavità e l'onda può "rimbalzare" più di una volta da una parete all'altra, generando ogni volta delle riflessioni, che sulla sezione radar sono identificate come "*riflessioni multiple*".

Molto importante è, dunque, la scelta dell'antenna da adoperare poiché è legata alla capacità di risolvere corpi sepolti e alla profondità che si vuole raggiungere. I fattori che devono essere considerati sono soprattutto le dimensioni e la profondità dell'oggetto che si vogliono rendere evidenti e inoltre occorre esaminare accuratamente l'area d'indagine, allo scopo di individuare la presenza di ostruzioni o impedimenti sulla superficie, linee elettriche, ripetitori, radio, ecc. che possono limitare o impedire l'utilizzo di alcune antenne.

Antenne ad alta frequenza (> 500 MHz) forniscono elevate risoluzioni spaziali, ma limitate profondità di penetrazione, quindi sono adatte per investigare spessori modesti (in genere minori di un metro). Al contrario, antenne a bassa frequenza consentono una penetrazione superiore, ma la risoluzione spaziale diminuisce. La banda di frequenza, normalmente utilizzata dai sistemi GPR, va da circa 10 MHz fino a superare 1 GHz (la profondità di penetrazione, in quest'ultimo caso, si riduce drasticamente). Inoltre le antenne a bassa frequenza sono più lunghe, più pesanti e meno maneggevoli rispetto alle antenne a frequenza maggiore.

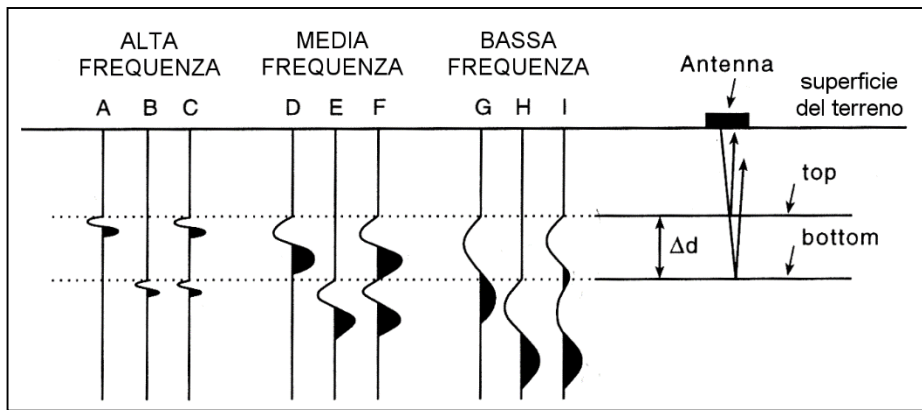


Figura – 4 Riflessione dal top, dal bottom e riflessione totale da due strati separati da una distanza Δd , corrispondenti a impulsi di diversa lunghezza d’onda (da Leucci, 2015).

Considerando due superfici di discontinuità pressoché parallele il segnale ricevuto si relaziona grossomodo alla riflessione dalla parte superiore e dalla parte inferiore di un oggetto sepolto. Affinché le due riflessioni siano distinguibili è necessario che la distanza fra le superfici stesse, sia maggiore o uguale ad una lunghezza d’onda; infatti se la distanza è minore (caso G, H e I in Fig. 4), allora le onde riflesse risultanti dalla sommità e dal fondo dell’anomalia sepolta non saranno riconoscibili in quanto sovrapposte l’una all’altra, mentre se è maggiore si individuano due riflessioni distinte e l’oggetto può essere risolto (vedere le riflessioni A, B e C in Fig. 4).

Generalmente, nel caso del metodo radar, la risoluzione verticale si considera idealmente tra $\lambda/4$ e $\lambda/2$ dove $\lambda = v/f_0$ è la lunghezza d’onda nel terreno corrispondente alla frequenza centrale dell’antenna (Leucci, 2015).

Tabella 2 - Valori della lunghezza d’onda λ al variare della frequenza e della velocità di propagazione dell’onda elettromagnetica.

Freq. (MHz)	P(ns)	λ (m) a $v=c$	λ (m) $v=(1/3)c$	λ (m) $v=(1/6)c$
1	1000	300	100	50
10	100	30	10	5
30	33	10	3.3	1.65
100	10	3	1	0.5
300	3.3	10	3.3	1.65
500	2	0.6	0.2	0.1
1000	1	0.3	0.1	0.05
2000	0.5	0.15	0.05	0.025
3000	0.33	0.1	0.03	0.015

La fase più delicata dell’indagine GPR è la stima della velocità media con cui l’impulso elettromagnetico si propaga all’interno del terreno oggetto dell’indagine. Una buona conoscenza di

questo importantissimo parametro, permette all'operatore di stabilire approssimativamente la profondità a cui si trovano gli oggetti responsabili delle riflessioni osservate nelle sezioni radar.

Le velocità che si riscontrano nelle prospezioni GPR sono comprese tra 30 cm/ns dell'aria e circa 1 cm/ns per l'acqua salata.

Le tecniche di acquisizione dati, per le misure di velocità, sono essenzialmente due: WARR (riflessione e rifrazione a grande angolo) e CMP o CDP (punto medio comune o punto profondo comune). Entrambe richiedono l'utilizzo di due antenne separabili fra loro.

La tecnica di acquisizione WARR prevede che un'antenna, in genere la trasmittente, sia tenuta fissa mentre l'altra si muove lungo il profilo scelto ad una velocità molto bassa e il più possibile costante. Il problema delle misure di velocità, è comune per i due metodi di prospezione GPR e sismico ed infatti il WARR si ispira concettualmente agli schemi di acquisizione dei dati sismici "common-source" o "common-receiver" a seconda se, a rimanere fissa, sia rispettivamente l'antenna trasmittente o la ricevente.

Nel CDP, le antenne devono essere spostate, di una uguale distanza, lungo versi opposti rispetto ad un punto medio che resta fermo. Entrambi i metodi prevedono che il riflettore venga individuato preliminarmente dall'analisi dei profili radar eseguiti precedentemente sul sito. La grande difficoltà di spostare entrambe le antenne alla stessa velocità, per la registrazione in continuo, porta ad eseguire il CDP soltanto per punti.

Il WARR necessita di un riflettore orizzontale mentre il CDP può essere utilizzato anche con riflettori debolmente inclinati.

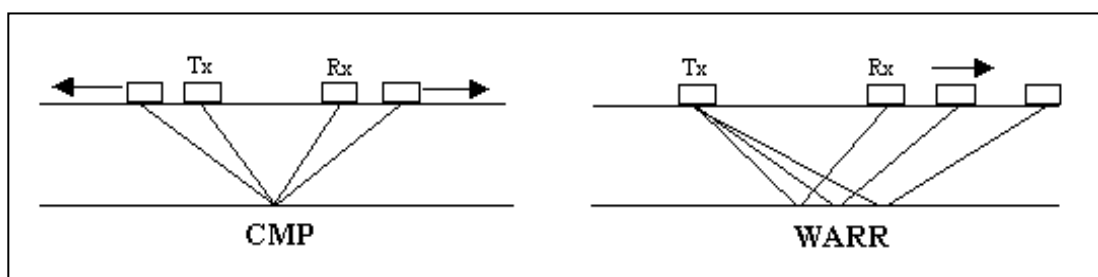


Figura 5 - Tecniche radar di acquisizione per la determinazione delle stime di velocità.

Sono disponibili diversi metodi per la stima della velocità delle onde elettromagnetiche. Ognuno di questi presenta vantaggi e svantaggi nelle applicazioni pratiche.

Metodo 1 - Localizzazione di oggetti a profondità conosciuta: Il tempo doppio di viaggio è il tempo che occorre ad un'onda EM per percorrere il tragitto, nel terreno, dall'antenna trasmittente fino all'oggetto e ritorno al ricevitore. Denotando la profondità dell'oggetto conosciuto con Z_{noto} e la

velocità dell'onda e.m. con v , il tempo doppio di viaggio per una configurazione monostatica dell'antenna è dato da:

$$t = \frac{2z_{\text{noto}}}{v}$$

Poiché la profondità dell'oggetto è conosciuta, si può piccare il tempo doppio di viaggio da una sezione radar e esprimere la velocità dell'onda EM usando l'equazione sopra. L'accuratezza di questa velocità, dipende dall'errore t_{err} con cui conosciamo il tempo doppio di viaggio piccato.

Denotando con t_{picc} il tempo doppio di viaggio piccato, questo può essere espresso come una funzione del tempo doppio di viaggio accurato e dell'errore introdotto tramite la relazione:

$$t_{\text{picc}} = t \pm t_{\text{err}}$$

Per cui il range della velocità dell'onda EM stimata può essere espresso da:

$$v = \frac{2z_{\text{noto}}}{t_{\text{picc}} \pm t_{\text{err}}}$$

oppure

$$\frac{2z_{\text{noto}}}{t_{\text{picc}} + t_{\text{err}}} \leq v \leq \frac{2z_{\text{noto}}}{t_{\text{picc}} - t_{\text{err}}}$$

Più è alto l'errore sul tempo doppio di viaggio e più è alta l'imprecisione sulla velocità. Assumendo la velocità dell'onda EM come costante nell'area vicino l'oggetto noto, la profondità di un oggetto sconosciuto nelle vicinanze dell'oggetto noto può essere facilmente calcolata usando la velocità ottenuta.

Metodo 2 – Riflessione da un punto sorgente: Questo è un metodo veloce per la stima della velocità e si basa sul fenomeno che un piccolo oggetto, per esempio la sezione d'urto di un tubo, riflette le onde radar in quasi tutte le direzioni (Fig. 6)

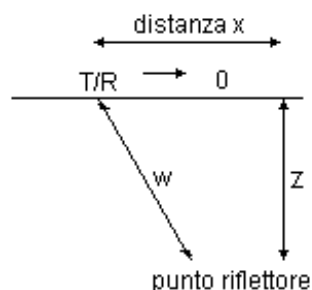


Figura 6 - Geometria del punto riflettore

Denotando la profondità dell'oggetto ancora con z e la distanza laterale dell'antenna monostatica dall'oggetto con x , la lunghezza w del cammino dell'onda può essere semplicemente espressa da

$$w^2 = 4(x^2 + z^2)$$

e dunque la funzione del tempo doppio di viaggio con

$$t(x) = \frac{w}{v} = \frac{2\sqrt{x^2 + z^2}}{v}$$

Denotando con t_0 il tempo doppio di viaggio, sulla verticale all'oggetto, si ha

$$t_0 = \frac{2z}{v}$$

l'equazione che definisce $t(x)$ può essere riscritta come:

$$t(x) = \sqrt{\frac{4x^2}{v^2} + t_0^2}$$

che è la formula per la cosiddetta “*diffrazione iperbolica*”.

Poiché conosciamo, dalla sezione radar, per ogni posizione x , il corrispondente tempo doppio di viaggio $t(x)$, la velocità può essere calcolata invertendo l'equazione sopra.

La forma dell'iperbole è governata dalla velocità dell'onda nel terreno e dalla geometria dell'oggetto sepolto. L'inclinazione dei suoi asintoti è una funzione solo della velocità media. Il tempo di viaggio al suo vertice è funzione sia della profondità dell'oggetto che della velocità dell'onda nel terreno.

Se l'oggetto riflettore è più allargato e di diametro circolare, come per esempio un cilindro, il vertice dell'iperbole rappresenta il top del cilindro, mentre la forma è identica a quella di un punto diffrattore sepolto al centro del cilindro.

Metodo 3 – Registrazione di un semplice CDP: Il percorso di un'onda EM dal trasmettitore al riflettore e da questo al ricevitore, può essere espresso come una funzione della distanza x tra il trasmettitore e il ricevitore (Fig. 7) nella forma:

$$w^2 = x^2/4 + z^2$$

e la funzione del tempo doppio di viaggio come

$$t(x) = \frac{2w}{v} = \frac{2\sqrt{\frac{x^2}{4} + z^2}}{v}$$

Denotando la distanza zero del tempo doppio (distanza nulla tra le antenne) di viaggio con t_0 , allora

$$t_0 = t(x = 0) = \frac{2z}{v}$$

L'equazione di $t(x)$ può essere riscritta come

$$t(x) = \sqrt{\frac{x^2}{v^2} + t_0^2}$$

Può essere stimata la velocità di propagazione dell'onda e.m. nel mezzo.

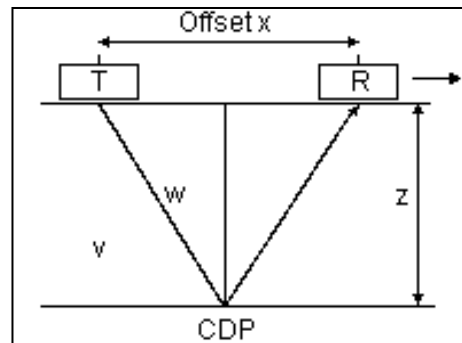


Figura 7 - Configurazione Trasmettitore / Ricevitore per una semplice registrazione CDP.

2. IL TRATTAMENTO DEI DATI GEOFISICI

2.1 Il metodo Georadar

La fase di elaborazione ed interpretazione dati è principalmente basata sull'individuazione di riflettori, sul calcolo della loro posizione in profondità e delle loro dimensioni.

La presenza di colui che interpreterà i dati durante la fase di acquisizione è sicuramente consigliata per una corretta integrazione dei risultati con i vari fattori ambientali.

Una valutazione preliminare dei risultati può essere effettuata già in fase di acquisizione favorendo le eventuali correzioni della configurazione strumentale al fine di ottimizzare la qualità dei dati in funzione dello scopo dell'indagine.

La fase di elaborazione è generalmente preceduta da una di filtraggio durante la quale una serie di filtri applicata ai dati consente il miglioramento del rapporto segnale/rumore. Successivamente, tenendo in considerazione gli scopi dell'indagine, ogni profilo viene trattato in modo da mettere in maggior risalto le informazioni richieste.

In caso quindi di indagini finalizzate all'individuazione di target di piccole dimensioni, i dati verranno filtrati in modo da rimuovere le riflessioni a profondità costante evidenziando principalmente le variazioni laterali del segnale. Una volta ottenuta la sezione radar-stratigrafica relativa ad ogni profilo, viene effettuata la sua conversione dalla scala verticale in tempo alla scala in profondità. Quest'ultima fase richiede la stima della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche che può essere effettuata utilizzando uno dei metodi sopra elencati. Nel caso in studio è stato utilizzato il metodo denominato "riflessione da un punto sorgente".

L'elaborazione dei dati GPR è stata molto complessa ed i passi del "processing" sono di seguito elencati:

1) rimozione della traccia media: questo tipo di filtro permette la rimozione della banda orizzontale visibile nelle sezioni radar, che può rappresentare riflessioni da oggetti che si mantengono a distanza

costante dall'antenna. L'algoritmo, basandosi su un semplice processo aritmetico, che somma tutte le ampiezze delle riflessioni generate allo stesso tempo lungo il profilo e divide per il numero delle tracce sommate, permette di rimuovere la traccia media e di esaltare, così, gli eventi non orizzontali presenti nelle sezioni radar;

2) normalizzazione dell'ampiezza (*declipping*): per eliminare locali saturazioni nell'ampiezza delle tracce. Si sceglie un fattore di scala (0.6 nel nostro caso) per il quale saranno moltiplicati tutti i valori dell'ampiezza: una procedura di interpolazione che utilizza un polinomio di terzo ordine permetterà la ricostruzione delle forme d'onda saturate.

3) migrazione: una tecnica che permette di eliminare distorsioni introdotte nei dati registrati. una sezione GPR non contiene informazioni unidirezionali a causa del lobo conico di radiazione dell'energia per cui alcune riflessioni presenti possono essere generate anche da oggetti posti lateralmente rispetto alla posizione dell'antenna. Questo carattere multidirezionale della registrazione delle riflessioni GPR si manifesta nella generazione di iperboli che possono causare seri problemi nell'interpretazione. La migrazione risolve questo problema di immagine riportando l'energia al suo vero punto di riflessione.

4) filtro passa basso: consente di eliminare la componente di rumore ad alta frequenza (effetto nebbia) presente nelle sezioni radar.

La planimetria dei profili ha consentito di correlare spazialmente, in modo 3D, le anomalie presenti su ciascuna sezione utilizzando l'analisi dell'ampiezza degli eventi riflessi entro assegnati intervalli di tempo e costruendo le isosuperfici di ampiezza.

La planimetria dei profili ha consentito di correlare spazialmente, in modo 3d, le anomalie presenti su ciascuna sezione utilizzando l'analisi dell'ampiezza degli eventi riflessi entro assegnati intervalli di tempo (*time slices*) (Fig. 13).

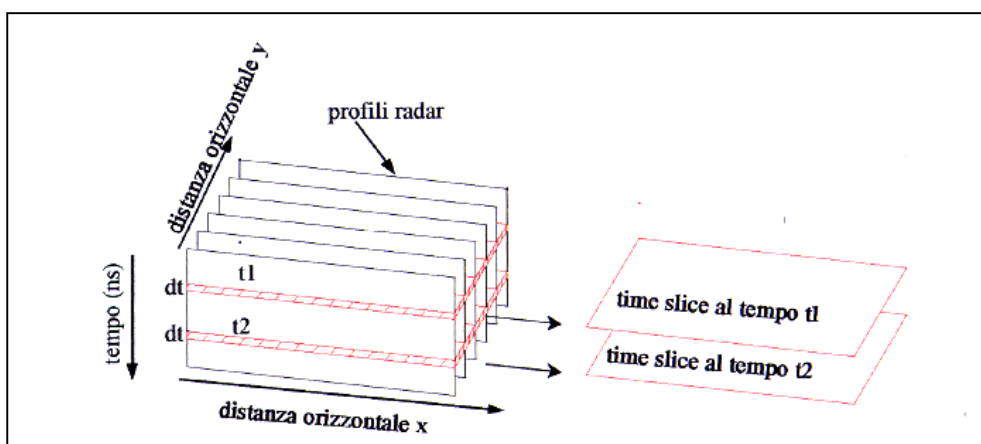


Figura 13: schema di costruzione delle time slices; l'ampiezza visualizzata nelle time slices rappresenta la media dei quadrati delle ampiezze degli eventi riflessi nella finestra temporale dt

Come è noto, l'ampiezza degli eventi riflessi è direttamente correlabile con il contrasto tra le caratteristiche elettriche dei mezzi presenti nel sottosuolo, pertanto la visualizzazione tridimensionale, per intervalli di ampiezza, della distribuzione degli eventi riflessi consente la localizzazione spaziale delle strutture che determinano le riflessioni stesse. Ogni *time slice* corrisponde ad uno strato di terreno la cui profondità ed il cui spessore dipendono, oltre che dai valori assunti per il tempo, dalla velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo.

Il colore blu indica debole ampiezza del segnale riflesso (sottosuolo costituito da materiale sostanzialmente omogeneo); i colori dal celeste al rosso più intenso indicano ampiezze via via crescenti del segnale riflesso e quindi presenza di discontinuità elettromagnetiche significative. Le variazioni di ampiezza (quindi di colore) in una stessa slice sono indice di variazioni orizzontali nelle caratteristiche elettromagnetiche del terreno.

Bibliografia

Leucci G., 2015. Geofisica Applicata all'Archeologia e ai Beni Monumentali. Dario Flaccovio Editore, Palermo.

Leucci G., 2019, Nondestructive Testing for Archaeology and Cultural Heritage: A practical guide and new perspective. Springer editore pp 217, ISBN 978-3-030-01898-6

Leucci G., 2020, Advances in Geophysical Methods Applied to Forensic Investigations: New Developments in Acquisition and Data Analysis Methodologies. Springer editore, pp 200, ISBN 978-3-030-46241-3