

Indagini geofisiche all'ex chiesa di Sant'Andrea Ferrara.

Silvana Onofri, Nasser Abu Zeid, Samuel Bignardi, Giovanni Santarato

INTRODUZIONE

In via Campo Sabbionario a Ferrara, nelle adiacenze della scuola media "Dante Alighieri" si trovano, in una situazione di grave degrado, i resti della chiesa di S. Andrea, che faceva parte di uno dei complessi conventuali più importanti e prestigiosi della città, quello degli Agostiniani.

La chiesa, cara agli Estensi e consacrata da Papa Eugenio IV nel 1438, era stata edificata inglobando l'antica parrocchiale del XII secolo e, nel corso del tempo, si era arricchita di preziosi arredi e di importanti opere d'arte. Dell'originale, maestoso corpo di fabbrica (Fig. 1) rimangono ora solo i ruderi del lato destro dell'edificio invasi dalla vegetazione: i resti delle nove cappelle laterali, della cantoria, con ancora tracce d'affreschi, dell'aleottiana cappella del Sacramento, in cui, nell'intercapedine tra due muri, è cresciuto un albero, frammenti marmorei del bel portale ogivale trecentesco sparsi per terra, pochi pilastri in alzato, di altri il solo basamento sormontato dal capitello e, infine, parte della facciata privata di ogni decorazione.

Il lento degrado del complesso di S. Andrea ebbe inizio in epoca napoleonica, quando il complesso conventuale fu trasformato in caserma, prima di essere completamente distrutto. La chiesa, chiusa al culto nel 1866 e adibita a magazzino dei carri di artiglieria e a stalla, fu acquistata dal Comune nel 1936 e sottoposta a lavori di consolidamento che non ne impedirono il rovinoso crollo di tutta la copertura, avvenuto nel 1938. Ulteriormente danneggiata dai bombardamenti aerei nel 1944, il Comune, nel 1965, ne fa abbattere tutta la navata sinistra, per costruire la Scuola Media Dante Alighieri e nel 1967, in conseguenza del terremoto, anche abside e campanile.

A ricordo della navata distrutta è rimasto il disegno della pavimentazione del porticato della Dante Alighieri, porticato in cui è stata posta, dalla Ferrariae Decus, una lapide commemorativa del luogo di sepoltura di Biagio Rossetti.

Col decreto napoleonico del 1797 ebbe inizio anche la spoliazione della chiesa e molti capolavori sono andati perduti; nel XIX secolo molti marmi vennero riutilizzati per restauri di edifici religiosi, come l'Istituto dei Gesuiti e la chiesa di S. Francesco o, nel corso degli anni, asportati da comuni cittadini per abbellire case e giardini. Fortunatamente molti quadri, affreschi e sculture sono ora in musei cittadini; il coro ligneo è nella chiesa di San Cristoforo alla Certosa. Anche le lapidi tombali che coprivano il pavimento di S. Andrea sono state asportate; molte sono nel

chostro di S. Maria in Vado, una nel lapidario del Palazzo di Renata di Francia, mentre delle altre si sono perse le tracce.

Fig. 1: Pianta della Chiesa di Sant'Andrea in C. Barotti, *Iscrizioni sepolcrali e civili nelle chiese di Ferrara*, Ferrara 1760. Il piede ferrarese corrisponde a 40,04 cm.

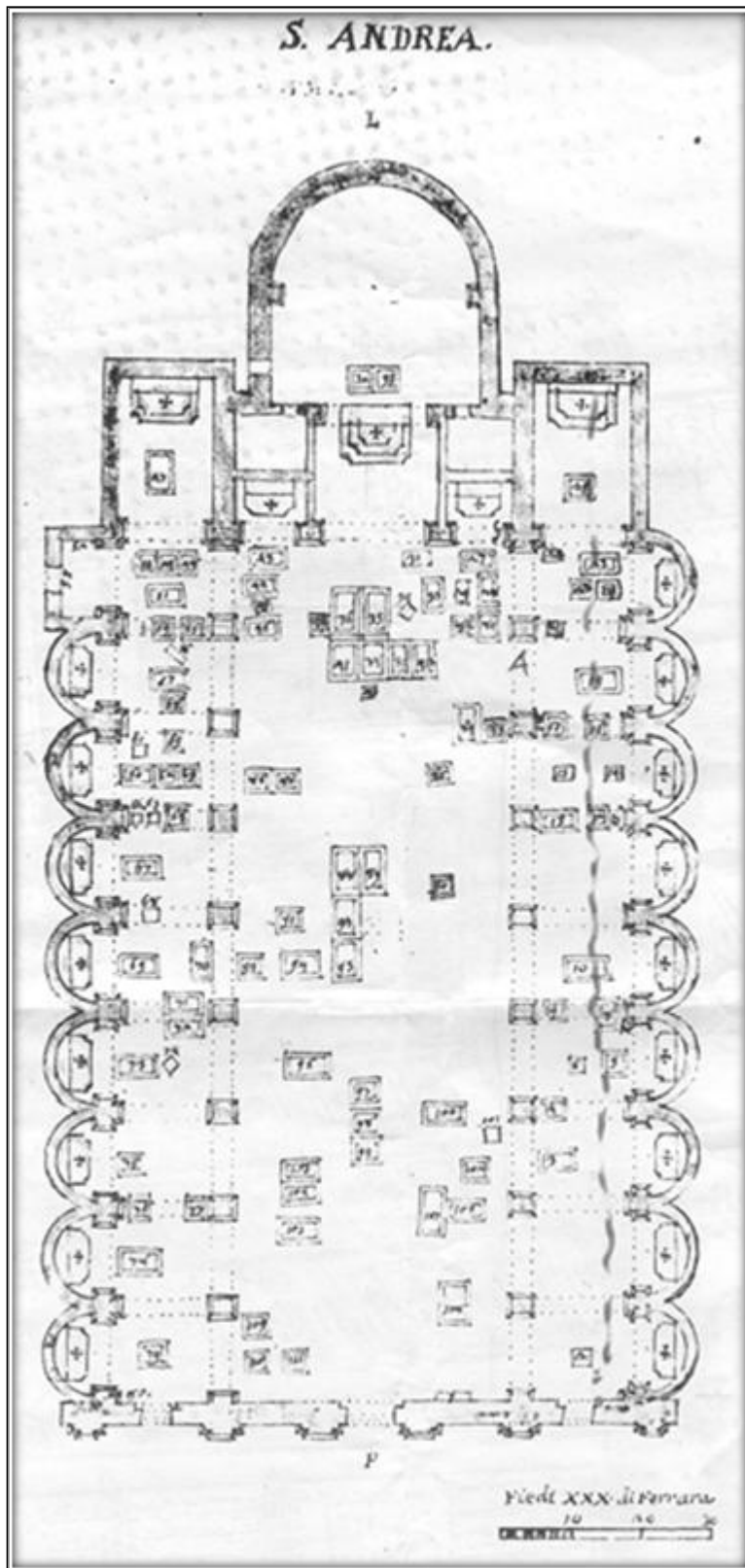
Il Liceo Classico L. Ariosto e Arch'è Associazione Culturale Nereo Alfieri, in collaborazione con il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara, con i Musei Civici di Arte Antica e con la Soprintendenza ai Beni Archeologici dell'Emilia Romagna, hanno effettuato un primo studio storico-archeologico e archeometrico sui ruderi fuori terra e sul sottosuolo di sedime agibile, allo scopo di acquisire nuovi dati conoscitivi relativi alle due chiese.

Sono stati coinvolti studenti di V A del Liceo L. Ariosto (Percorso integrato per l'Istruzione Liceale "Archeologia Urbana I: l'esempio di Sant' Andrea") e studenti frequentanti un laboratorio promosso da Arch'è.

Per quanto concerne lo studio del sottosuolo, gli obiettivi di maggior interesse sono due:

1. la definizione/conferma di quanto rimane delle sepolture documentate da Cesare Barotti nel 1760 (Fig. 1);
2. l'eventuale identificazione delle fondazioni della chiesa del XII secolo, su cui nel Rinascimento venne impostata quella attuale di impronta rossettiana.

Per raggiungere questi obiettivi, i suddetti enti, avvalendosi delle idonee attrezzature in dotazione all'unità di Geofisica Applicata del suddetto Dipartimento di Scienze della Terra, hanno progettato una campagna di indagini geofisiche non invasive a piccola profondità, da intendersi come intervento iniziale di riconoscimento e taratura.



Per quanto se ne sa, le sepolture dovrebbero consistere in semplici inumazioni, prive di corredo; anche la cassa di legno, per il tempo trascorso, si può considerare ormai distrutta. Per parte loro le fondazioni di un edificio precedente dovrebbero essere state largamente costruite con mattoni, come tradizione nell'edilizia ferrarese.

Un'indagine geofisica non invasiva per le sepolture deve dunque riconoscere le eventuali piccole differenze delle proprietà fisiche tra il terreno naturale che nella zona, a margine dell'insediamento medievale di Ferrara, è a matrice prevalentemente limosa, e lo stesso terreno smosso dallo scavo e rimesso in posto all'atto del riempimento della fossa. Queste fosse sono inoltre di piccole dimensioni e non troppo profonde (< 2 m). Per le fondazioni, l'indagine deve basarsi sul contrasto di proprietà tra il terreno naturale ed il materiale utilizzato.

Tra le proprietà fisiche investigabili in via indiretta (cioè dalla superficie), quella che ha la maggiore probabilità di fornire risultati nelle condizioni suddette è la resistività elettrica, in quanto l'attuale sviluppo della tecnologia strumentale e di stima della distribuzione di questa proprietà nel sottosuolo ha la più alta probabilità di esito positivo tra le varie tecniche geofisiche disponibili, ovviamente nell'ipotesi di una qualche differenziazione misurabile della proprietà fisica scelta tra il terreno in posto e lo stesso terreno smosso. All'uopo infatti si sono scartate le altre usuali proprietà fisiche, oggetto d'indagine in Geofisica Applicata per l'Archeologia: la densità perchè trattasi dello stesso materiale, ormai raddensatosi, la suscettività magnetica perchè sedimenti sciolti hanno capacità di magnetizzazione trascurabili e per altro verso le misure sarebbero pesantemente alterate dalla presenza di corpi ferrosi (recinti, strutture in cemento armato, automezzi, ...) nelle immediate vicinanze, la velocità delle onde sismiche perchè le frequenze da usare per la risoluzione richiesta non sono compatibili con l'attuale pratica commerciale.

Al rilievo della distribuzione della resistività elettrica è stata aggiunta anche l'indagine col geo-radar, per l'elevata velocità di acquisizione dei dati con questo strumento, nell'ipotesi che il terreno di riempimento delle fosse e le eventuali fondazioni abbiano una risposta sufficientemente diversa, da attribuirsi comunque ad alterazioni della tessitura e dell'eventuale stratificazione naturale preesistente allo scavo.

CENNO SUI METODI D'INDAGINE

Per facilitare la comprensione della natura e del significato dei dati raccolti e qui presentati, presentiamo una rapida descrizione dei metodi utilizzati.

Il metodo del geo-radar

Detto anche GPR, acronimo di "Ground Probing Radar", è forse il metodo non invasivo più noto e per questo più usato anche da personale non professionale

Il principio del metodo si basa sulla propagazione nel sottosuolo delle onde elettromagnetiche (e.m.), generate artificialmente da un'opportuna antenna, a frequenze tali che le correnti di spostamento prevalgano su quelle di conduzione. Tale condizione, che è necessaria per poter parlare di "propagazione di un'onda e.m.", è sufficientemente soddisfatta, nelle condizioni usuali di lavoro, a partire da qualche decina di MHz. Le antenne commerciali emettono infatti impulsi a frequenze in genere comprese tra 50 e 2000 MHz.

La propagazione delle onde e.m. nei mezzi materiali è però condizionata dal cosiddetto effetto pelle, quantificato dalla profondità pelle δ , data da:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ metri}$$

dove μ è la permeabilità magnetica assoluta, σ la conducibilità elettrica del mezzo ed infine ω è la frequenza angolare della sorgente. δ è la distanza, in m, alla quale l'ampiezza dell'onda si riduce a $1/e$ (e : numero di Nepero). L'attenuazione è infatti esponenziale e rappresenta l'assorbimento, tramite effetto Joule, dell'energia e.m..

La semplificazione della seconda eguaglianza deriva dalle seguenti considerazioni:

1. la permeabilità magnetica μ dei terreni e delle rocce più comuni è, salvo le rare eccezioni della presenza di minerali o elementi ferromagnetici (il Fe ed alcuni suoi minerali), praticamente uguale a quella del vuoto ($=4\pi \cdot 10^{-7}$ Henry/m);
2. la frequenza f (in Hz) è data da $f=\omega/(2\pi)$;
3. la resistività elettrica ρ è il reciproco della conducibilità σ : $\rho=1/\sigma$.

Questo assorbimento è quindi proporzionale sia alla frequenza che alla conducibilità elettrica. Ciò significa che: a) data un'onda ad una certa frequenza, un mezzo più conduttore la assorbe più rapidamente di uno più resistivo e b) nello stesso mezzo conduttore un'onda a frequenza minore viene assorbita di meno (e dunque può indagare più in profondità).

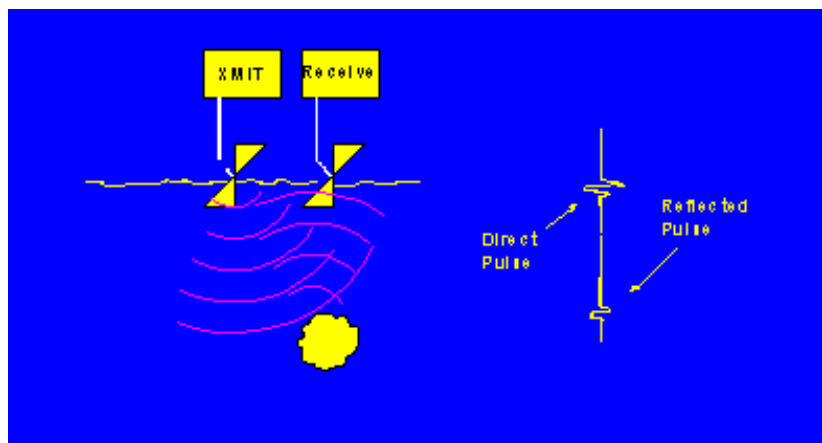
Si arriva come si vede ad una contraddizione insuperabile in quanto profondità di indagine e potere risolutivo, inteso come la capacità di vedere distinti due oggetti, es. due superfici riflettenti (che è proporzionale alla frequenza), sono esigenze opposte: si avrà la massima profondità d'indagine alla minima frequenza utilizzabile e la massima risoluzione spaziale alla massima frequenza.

Qualche esempio numerico può meglio esemplificare il problema. Tenendo conto che l'attuale generazione di strumenti è in grado di registrare impulsi riflessi a profondità fino a 10 profondità pelle, supponiamo di avere un mezzo di conducibilità $\sigma=10^{-3} (\Omega\text{m})^{-1}$ (una sabbia asciutta, un calcare) ed un'antenna a 400 MHz. In questo caso, con rapidi calcoli, risulta $\delta=0.8$ m. Per la stessa frequenza, ma con $\sigma=10^{-1} (\Omega\text{m})^{-1}$ (un'argilla satura in acqua dolce), $\delta=0.08$ m soltanto, cioè la profondità pelle si riduce di un fattore 10. Nel primo caso si ottengono informazioni utili da profondità fino a 8-10 m, nel secondo non si arriva a 1 m.

Le indagini mediante georadar possono essere eseguite, in dipendenza dalle condizioni operative e dalle esigenze di progetto, sia per riflessione che per trasmissione. Nel primo caso l'antenna ricevente registrerà gli echi, o riflessioni, alle superfici di discontinuità della velocità v delle onde e.m., o che è lo stesso, della permittività dielettrica (infatti $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$, dove c è la

velocità della luce nel vuoto ed ϵ_r è la permittività dielettrica relativa del mezzo investigato), mentre nel secondo caso si misurerà il tempo di percorrenza dell'onda tra l'antenna trasmittente e l'antenna ricevente, ad es. tra le due facce di un muro. Nella Tabella 1 sono indicate la permittività dielettrica relativa e la conseguente velocità delle onde e.m. nei materiali più comuni. Ne seguono due percorsi di elaborazione dei dati e rappresentazione dei risultati del tutto diversi.

Fig. 2: principio del georadar (dal sito <http://www.georadar.com/>) per "riflessione" (oggetto localizzato).



materiale	ϵ_r	v (cm/ns)
aria	1	30
Acqua dolce	80	3.3
Sabbia secca	4-6	12-15
Sabbia satura d'acqua	30	5.5
Argilla satura d'acqua	8-12	9-11
ghiaccio	3-5	13-17
granito	5	13
Rocce carbonatiche (calcari, dolomie)	7-9	10-11
cemento	6.4	12

Tabella 1: permittività dielettrica relativa ϵ_r e velocità v di propagazione delle onde e.m. in alcuni mezzi materiali.

Nel primo caso, infatti, le riflessioni vengono rappresentate, come ottenute sul campo, in un grafico distanza-tempo, detto radargramma (Figg. 2 e 3b,c). Nei casi più semplici e quando non è richiesta una valutazione precisa delle profondità degli orizzonti riflettenti, ciò può bastare. In casi più complessi e/o quando si desidera una corretta distribuzione delle geometrie delle superfici riflettenti, occorre un'analisi più approfondita della velocità di propagazione dell'impulso e.m. all'interno dei vari mezzi attraversati. L'uso del georadar nella prospezione del sottosuolo deve dunque essere attentamente valutato a tavolino in funzione del problema posto e delle conduttività elettriche o presenza di acqua.

Le indagini per trasmissione, o, meno propriamente, per trasparenza, vengono invece eseguite secondo il principio della "tomografia". Nel presente lavoro sono state eseguite indagini solo di "riflessione".

Lo strumento, dopo aver inviato l'impulso all'antenna trasmittente, inizia immediatamente la registrazione degli "echi", per una durata prefissata, legata alla profondità d'indagine, tenendo conto della velocità stimata delle formazioni presenti nel sottosuolo (v. tabella 1). Sempre in riferimento all'esempio della prospezione con un'antenna a 400 MHz, se la profondità d'indagine di progetto è stimata in 1 m e la velocità delle onde e.m. in 10 cm/ns (corrispondente ad una velocità di 10^8 m/s e ad una costante dielettrica relativa ϵ_r di 9: v. tabella 1), il tempo di registrazione sarà $T=100 \text{ cm}/(10 \text{ cm/ns}) = 10 \times 2 = 20 \text{ ns}$ (la moltiplicazione per 2 è dovuta alla somma dei tempi di andata e ritorno -tempi doppi-). Un impulso successivo che, essendo la frequenza 400 MHz, durerà (circa) 2.5 ns, può essere emesso alla fine della registrazione, cioè dopo almeno 20 ns. Possono quindi essere emessi e registrati milioni di impulsi in un secondo. Sul radargramma, cioè sulla registrazione delle misure, una singola traccia sarà la somma di migliaia di eventi di trasmissione e ricezione elementari, con ciò migliorando di molto il rapporto segnale/rumore. Avremo comunque la possibilità di acquisire migliaia di tracce "somma" al secondo, il che permette di acquisire i dati con l'antenna in movimento, anche a velocità considerevole.

Trascinando l'antenna sul terreno con continuità, per esempio camminando (Fig. 3a), si potrà acquisire un radargramma "continuo", dove tutte le molte migliaia di tracce somma vengono affiancate, in modo quasi indistinguibile l'una dall'altra (sono cioè molto "affollate"), così permettendo di inseguire visualmente, anche con una certa facilità, un orizzonte riflettente (Figg. 3b e 3c).

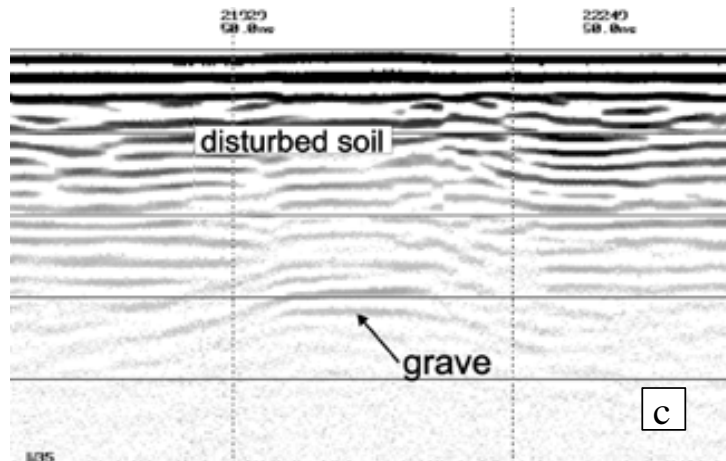
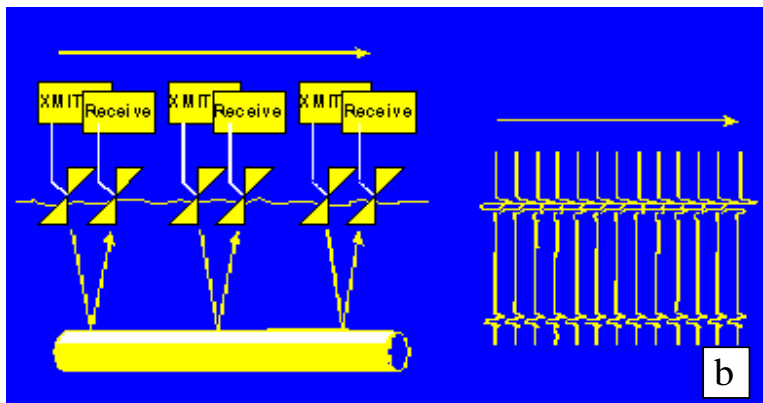
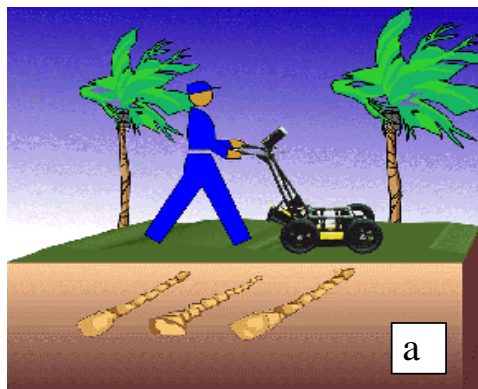


Fig. 3 (dai siti <http://www.georadar.com/> e <http://www.senssoft.on.ca>): a: modalità di acquisizione sul terreno; b: formazione del radargramma con mezzo riflettente esteso; c: radargramma professionale. La caratteristica forma a strisce viene ottenuta annerendo le semionde positive e cancellando le semionde negative, nonché la stessa traccia quando è piatta. Nelle rappresentazioni a colori permangono le semionde negative, colorate in tinta diversa (es.: rosso/blu).

È stata proprio questa apparente facilità di interpretazione dei risultati del georadar che ha portato alla sua ampia diffusione ed alla sua notorietà.

Permane una difficoltà. Il radargramma ha in ascissa la distanza lungo il profilo ed in ordinata ha il tempo, orientato positivamente verso il basso, proprio per suggerire fin da subito la struttura del sottosuolo. Quindi il radargramma è una sezione “in tempo”, più precisamente “in tempo doppio” (all’inglese t.w.t., two way time), per l’andata ed il ritorno dell’impulso riflesso.

La profondità, o distanza dalla superficie, è funzione non solo del tempo di transito, ma anche della velocità v del (dei) mezzo (i) attraversato (i). La velocità si stima per esempio ricorrendo alla tabella 1 o direttamente dai dati in modi la cui descrizione è troppo complicata per questa sede. La profondità z di un orizzonte riflettente sarà data allora semplicemente da: $z=vt/2$, se t è il tempo d’arrivo dell’impulso (tempo doppio).

Il metodo della “tomografia della resistività elettrica”

Il metodo geofisico dal quale trae origine la “tomografia della resistività elettrica” è conosciuto anche come “geoelettrica”. Questo metodo ricava la distribuzione della resistività

elettrica nel sottosuolo, elettricamente disomogeneo, iniettando una corrente continua mediante due elettrodi infissi nel terreno, detti convenzionalmente A, B, e misurando contemporaneamente la differenza di potenziale (d.d.p.), associata al campo elettrico generato, tra due elettrodi distinti dai primi, detti convenzionalmente M, N.

Variando la distanza tra gli elettrodi A e B, o tra M e N, o tra AB e MN, e misurando ogni volta la corrente I immessa agli elettrodi A, B e la differenza di potenziale (d.d.p.) ΔV risultante agli elettrodi M, N, si ottiene la resistività detta apparente (espressa in Ωm), secondo la nota formula:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

dove k è un fattore geometrico (espresso in m) che dipende dalle posizioni reciproche dei 4 elettrodi.

La resistività apparente varia in funzione della posizione reciproca degli elettrodi A, B, M e N, (quadripolo elettrico) in quanto vengono investigate dal passaggio della corrente e dalla misura della risposta in termini di d.d.p. parti diverse del sottosuolo. La pratica geofisica ha privilegiato, per la loro maggiore convenienza in termini di tempi di esecuzione delle misure, alcune combinazioni dei 4 elettrodi A, B, M e N, come ad esempio quella di Fig. 4, detta quadripolo "Wenner", dove gli elettrodi sono equidistanziati e sullo stesso asse.

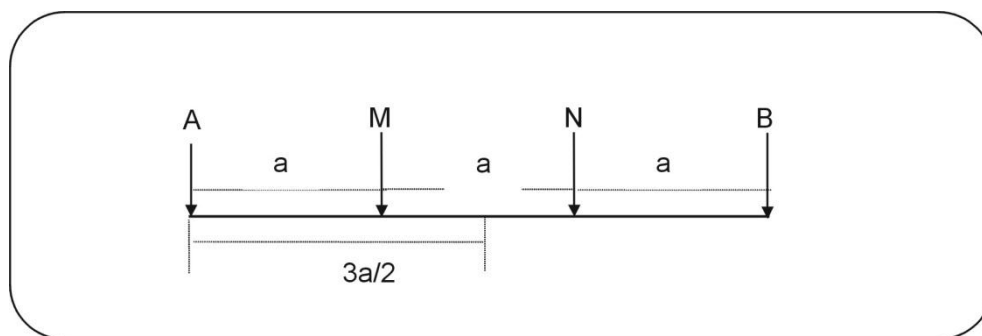


Fig. 4 disposizione degli elettrodi del quadripolo "Wenner"

Un'importante innovazione si è avuta all'inizio degli anni '80 con l'introduzione, grazie alla diffusione della microelettronica, dei "georesistivimetri multielettrodo", i quali, mediante un numero elevato di elettrodi disposti sul terreno e tutti simultaneamente collegati allo strumento, permettono l'acquisizione automatizzata della resistività apparente da ogni quaterna possibile di elettrodi (v. Fig. 5).

Con tale tecnica si ottiene quindi l'evoluzione sia verticale che laterale della resistività apparente, che è uso rappresentare in forma di pseudo sezione, per un'indagine 2D, con molte pseudo sezioni affiancate per un'indagine 3D: cioè come una matrice di valori organizzati in un piano dove le colonne rappresentano la distanza sul terreno e le righe rappresentano un parametro associato alla larghezza complessiva del quadripolo: ad es., nel caso del dispositivo Wenner tale parametro è solitamente la distanza AM. Si ottiene un grafico nel quale tutti i punti di eguale resistività apparente vengono collegati da una curva detta iso-resistiva. Eventualmente si può adottare una opportuna scala cromatica per colorare le aree poste tra le varie iso-resistive.

Questo insieme di dati deve però essere opportunamente elaborato, in modo cioè da poter ricavare dalle resistività apparenti la distribuzione dei valori della resistività reale. Questo procedimento, detto "inversione", si realizza mediante un algoritmo di regressione, che minimizza lo scarto tra le resistività apparenti calcolate nei punti di misura da un modello 2D o 3D di prova (tramite un procedimento agli elementi finiti od alle differenze finite, v. Fig. 6), e le resistività

apparenti misurate. Solitamente, ma non necessariamente, tale scarto è la somma dei quadrati delle differenze (minimi quadrati).

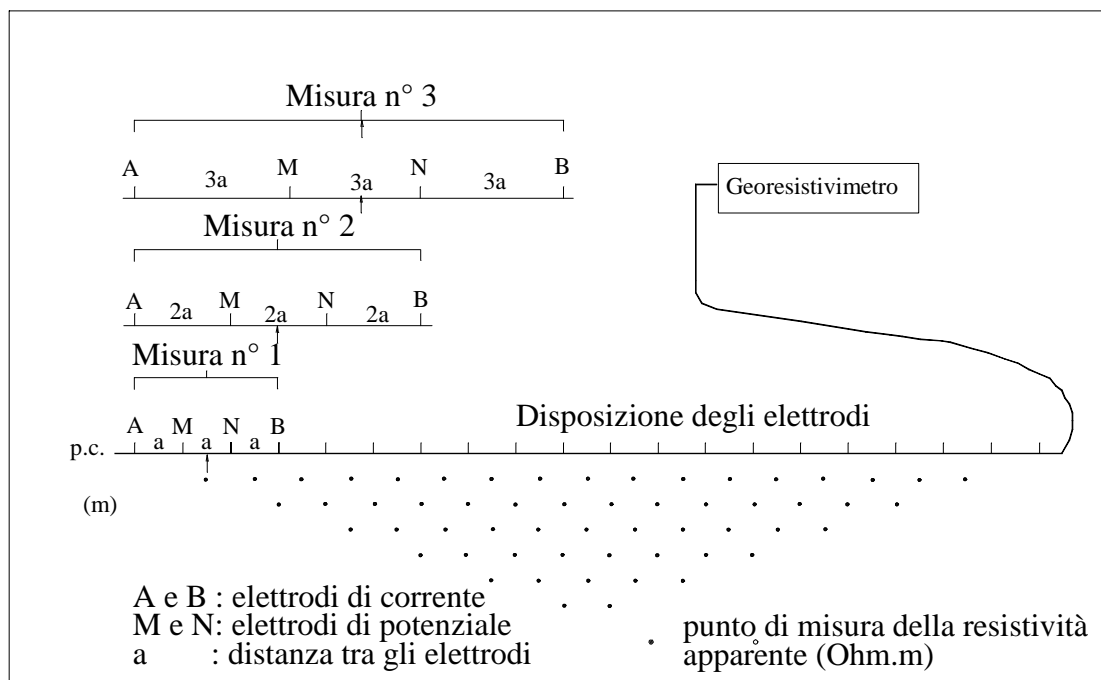


Fig. 5: modalità "tomografica" della raccolta dati con dispositivo Wenner.

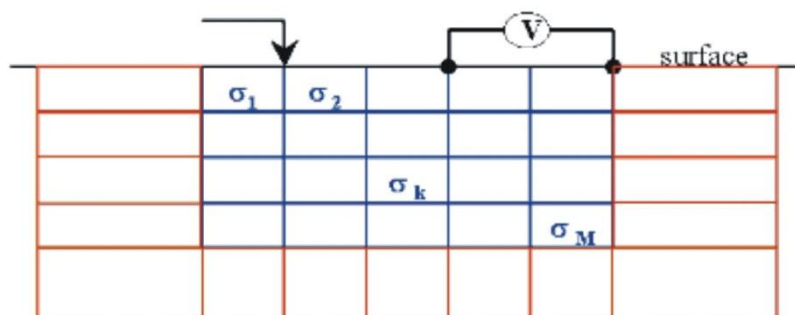


Fig. 6: Griglia per il calcolo della risposta del modello di resistività col metodo degli elementi finiti (σ_i : conducibilità della singola cella).

LE MISURE

L'indagine, con l'attiva collaborazione sul campo degli alunni del Liceo L.A., è stata eseguita nei giorni 28 e 30 aprile e 13 maggio 2008. Per motivi di sicurezza, l'area effettivamente disponibile è risultata di fatto soltanto quella dell'abside e della parte esterna immediatamente prospiciente. La disposizione delle misure è riportata nella Fig. 7, in rosso i profili GPR (GPR I, 1, 2, 3) ed in blu i profili ERT (ERT da 1 a 5). L'area pentagonale (zona absidale) circondata con lati rossi è stata indagata mediante un'indagine areale col GPR

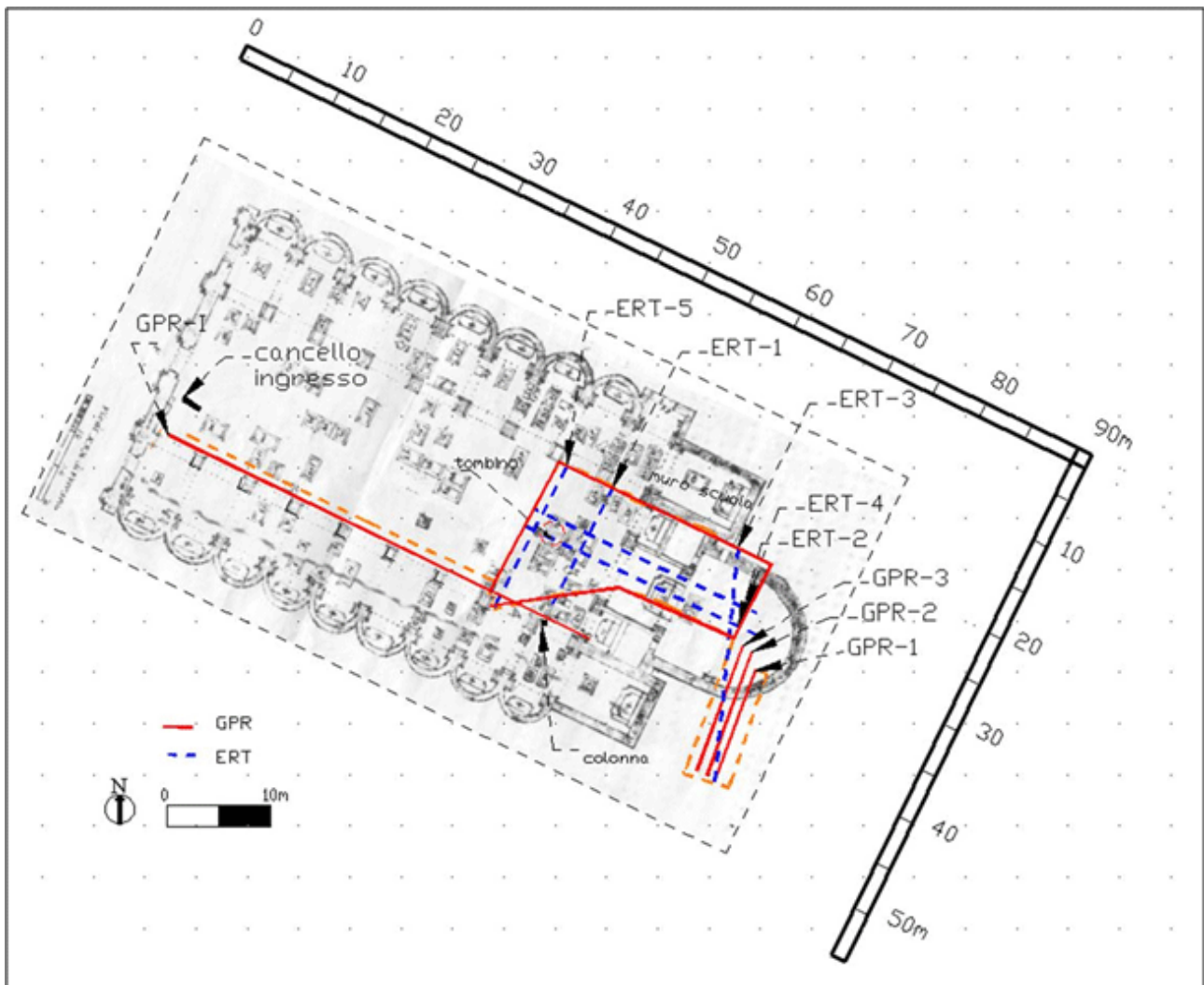


Fig. 7: Ubicazione delle indagini geofisiche effettuate nell'area della Chiesa di S. Andrea a Ferrara (FE)

Metodo georadar

Le misure di campagna sono state eseguite utilizzando lo strumento mod. RIS+ dell'azienda IDS S.p.A. (Pisa, Italia) i giorni 28 aprile e 13 maggio 2008, con antenna da 400 MHz in modalità monostatica (Fig. 7). La frequenza dell'antenna è stata scelta sulla base della valutazione della resistività media del terreno in loco, stimata intorno a $50 \Omega\text{m}$. La profondità d'indagine prevista è pertanto di almeno 2 m.

Fig. 8: Immagine dello strumento RIS+ utilizzato per le misure, montato su carrello e completo di antenna.



L'indagine areale nella zona absidale è stata ottenuta affiancando i profili distanziati di 1 m l'uno dall'altro, disposti lungo l'asse longitudinale della chiesa.

Metodo ERT

Nell'area disponibile per l'indagine sono stati effettuati 5 profili di ERT, disponendo gli elettrodi a 1 m di distanza l'uno dall'altro. La strumentazione utilizzata è il georesistivimetro multielettrodo mod. SAS4000/ES464, costruito da ABEM (Svezia). Per ottimizzare il potere risolutivo laterale di questo tipo d'indagine, è stato utilizzato il dispositivo quadripolare cosiddetto dipolo-dipolo polare.

I RISULTATI

Metodo georadar. 1) Profili

Nella Fig. 9 è riportato il profilo GPR I per intero, lungo circa 40 m. Nelle successive Figg. 10, 11, 12 e 13 sono riportati i singoli spezzoni consecutivi di 10 m ciascuno, nei quali sono stati evidenziati con linee nere tratteggiate gli eventi di riflessione ritenuti significativi. È ben noto che la specifica natura dell'anomalia rinvenuta dall'indagine può essere fornita soltanto dalla verifica diretta nei punti e nelle aree indicati, in quanto l'indagine fornisce soltanto un'immagine delle superfici riflettenti. Il segnale radar si presenta di sufficiente qualità fino a circa 50 ns (tempi doppi), riportati nella scala delle ordinate di sinistra. Supponendo, sulla base di informazioni desunte dalla letteratura, una velocità media delle onde e.m. di circa 12 cm/ns nel sottosuolo investigato, la scala delle ordinate di destra è in m di profondità presunta degli orizzonti riflettenti. Le immagini GPR si presentano in genere molto ricche di riflessioni, anche multiple. Ciò in genere accade quando il sottosuolo è fortemente rimaneggiato e contiene materiale solido disperso (mattoni, pietre, in qualche caso metalli).

I profili georadar nel retro dell'abside (GPR1, 2 e 3) sono riportati rispettivamente nelle Figg. 14, 15 e 16. In ciascuna sezione sono state rimarcate le anomalie significative come sopra. Mentre però i profili GPR-1 e 2 si presentano movimentati come il profilo GPR-I, il profilo GPR-3 non presenta eventi di riflessione oltre 40 ns. Ciò in genere avviene in presenza di materiale molto assorbente elettricamente, come in genere avviene in presenza di argilla.

2) Indagine areale

Nelle Figg. da 17 a 24 sono riportate le sezioni orizzontali dell'indagine areale eseguita nell'abside della chiesa, distanziate tra loro di circa 6-8 ns (twt) che, nell'ipotesi di una velocità media di 12 cm/ns corrispondono a livelli distanziati di circa 30-40 cm. Le riflessioni più intense sono colorate in rosso, mentre l'assenza di riflessioni è rappresentata con colorazione blu. Queste Figg. costituiscono una scelta, ritenuta significativa, tra le numerose sezioni orizzontali ottenute.

Nella Fig. 17 sono evidenti soltanto le strutture superficiali superstiti (resti della pavimentazione), peraltro limitate alla parte alta dell'immagine.

Nella Fig. 18, corrispondente ad una profondità di circa 70 cm, scompaiono le strutture superficiali della parte alta (verso WNW) e si presenta una certa strutturazione delle riflessioni nella parte bassa (verso ESE). Si notino le intense riflessioni nella parte in alto a sinistra, che permarranno, seppure variando la struttura, in molte delle Figg. seguenti.

Nella Fig. 19 (profondità indicativa di circa 1.2 m) si notano varie riflessioni sparse in tutta l'area, con andamenti prevalenti longitudinale e trasversale all'asse della chiesa. L'immagine di questa Fig. prelude ai notevoli cambiamenti che si noteranno a partire dalla successiva.

Nella Fig. 20 (profondità indicativa di circa 1.5 m) infatti le riflessioni più intense tornano a concentrarsi nella parte alta dell'immagine, mentre sbiadiscono le riflessioni della parte bassa.

Nella Fig. 21 (profondità indicativa di circa 1.8 m) la rappresentazione della Fig. 20 è ulteriormente sottolineata.

Nella Fig. 22 (profondità indicativa di circa 2.3 m) la grande riflessione che occupava quasi tutta la parte superiore destra si limita drasticamente verso il centro dell'area indagata, scompaiono le due forti riflessioni nella parte alta, sopra l'ordinata 14, mentre ne compare un'altra sulla destra, centrata intorno alle coordinate (8, 14 m). Compare inoltre una forte riflessione allungata in senso longitudinale in basso a destra tra le coordinate (0,5) e le coordinate (2, 5).

Quest'ultima riflessione compare più sfumata nella successiva Fig. 23 (profondità indicativa di circa 2.6 m); scompare completamente l'estesa riflessione centrata sulle coordinate (6,8), mentre permane la riflessione centrata intorno alle coordinate (8,14).

La successiva Fig. 24 (profondità indicativa di circa 2.9 m), con i suoi colori molto più attenuati rispetto alle Figg. precedenti, indica semplicemente che si è superata la massima profondità d'indagine del metodo.

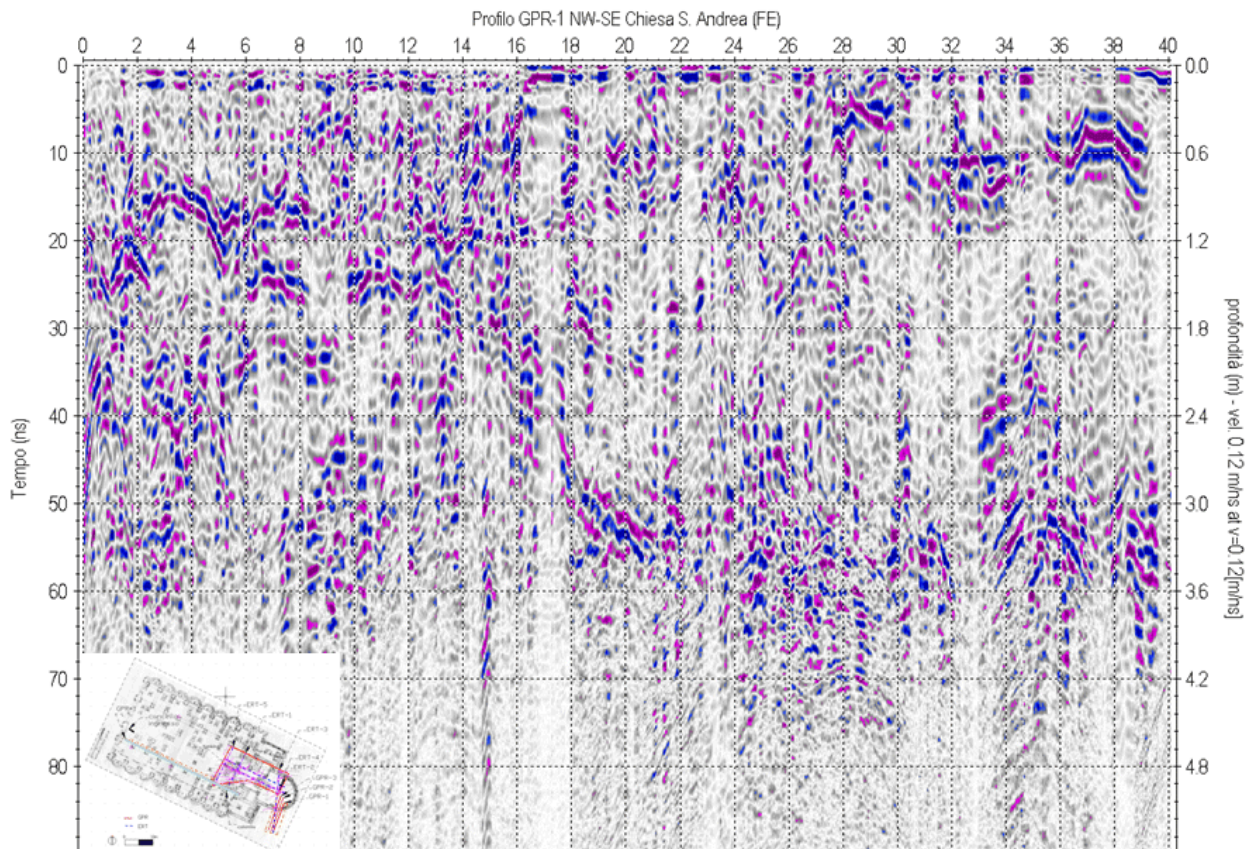


Fig. 9: Profilo GPR-I completo

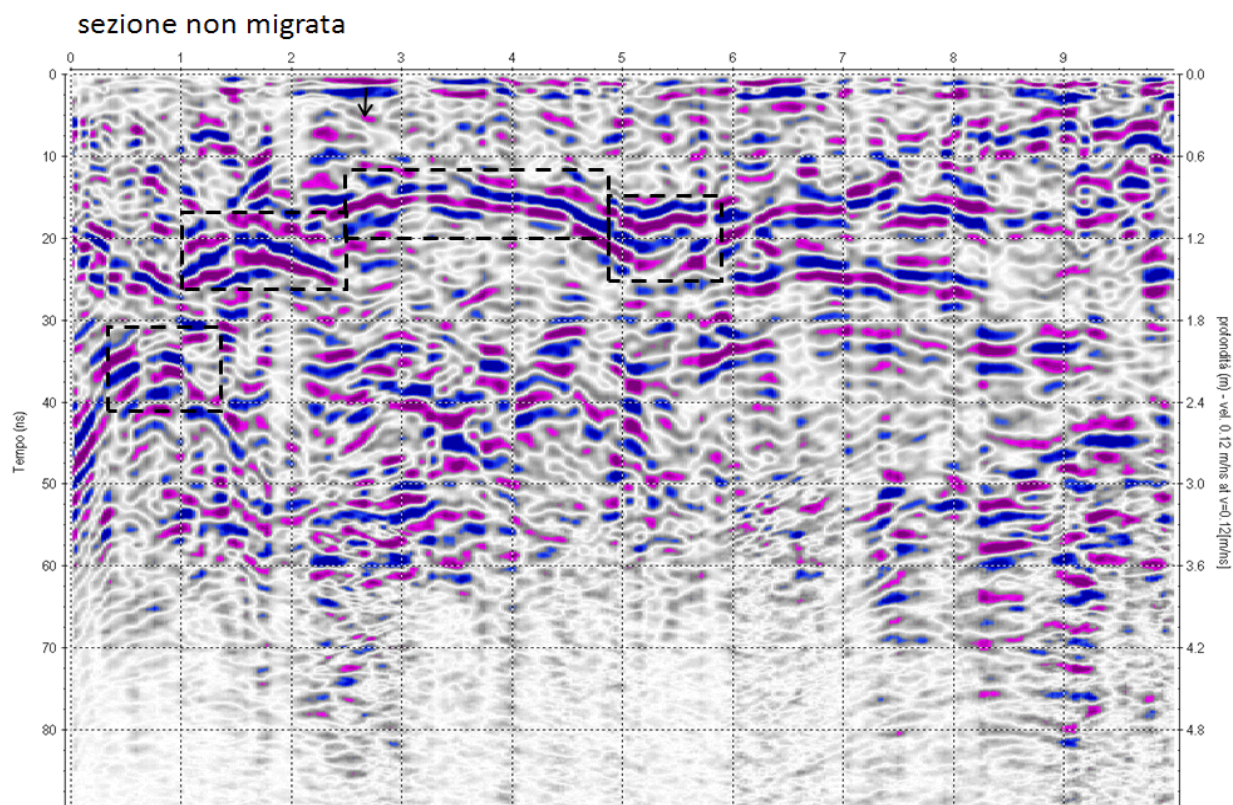


Fig 10: Profilo GPR-I: primi 10 m a partire da NWN

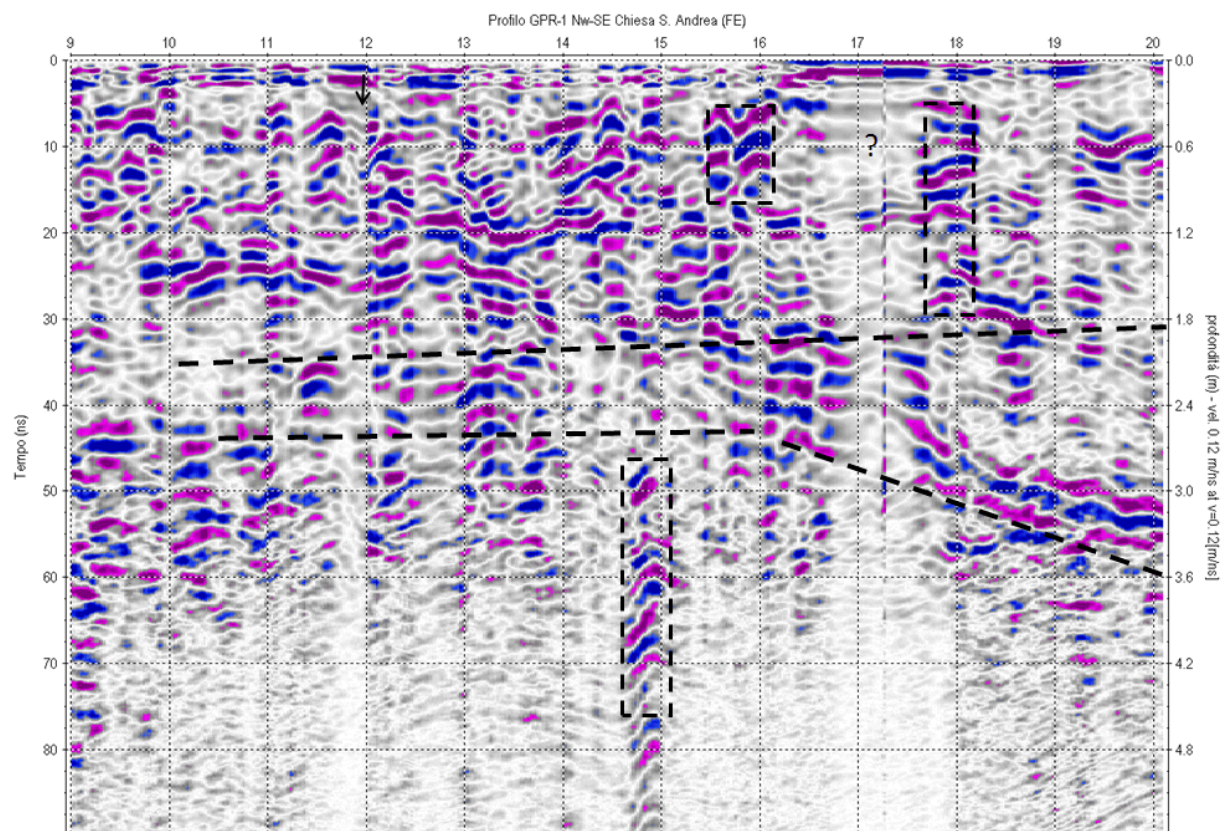


Fig. 11: Profilo GPR-I: da 10m a 20 m

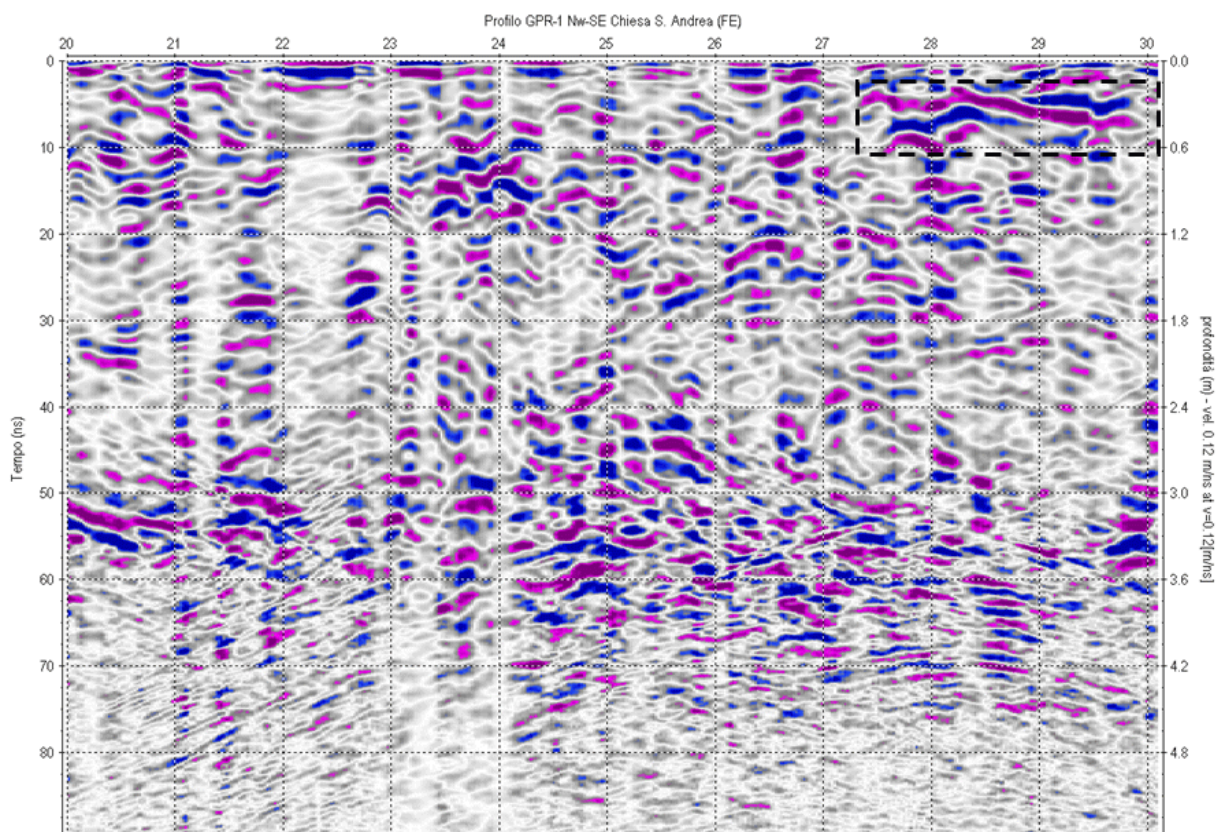


Fig. 12: Profilo GPR-I: da 20m a 30 m

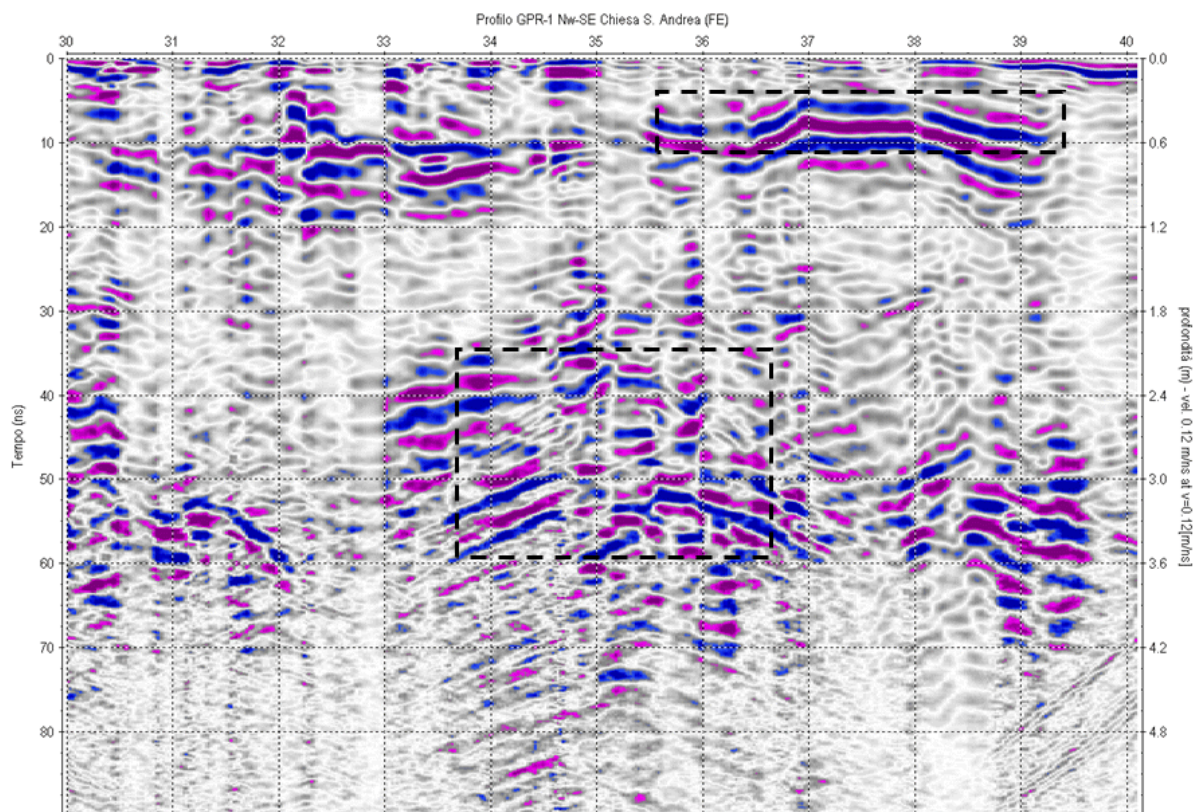


Fig. 13: Profilo GPR-I: da 30m a 40 m

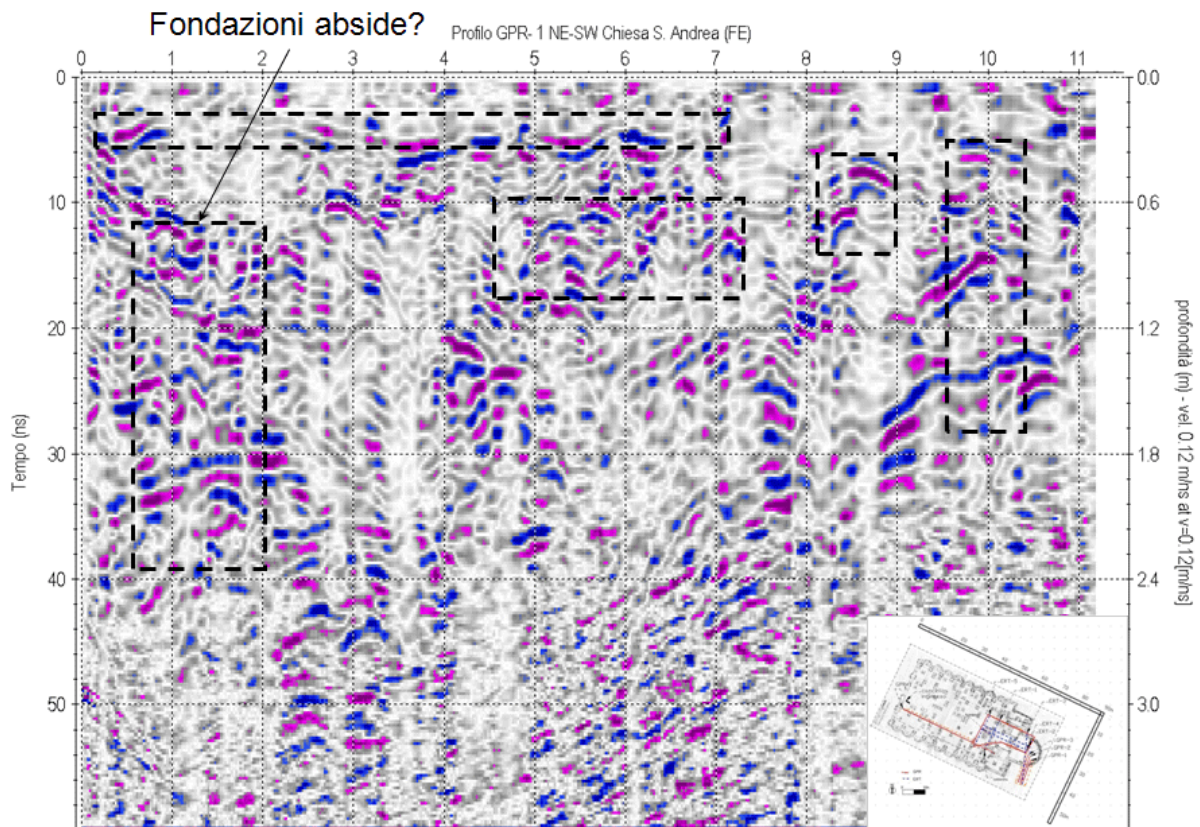


Fig. 14: Profilo GPR-1

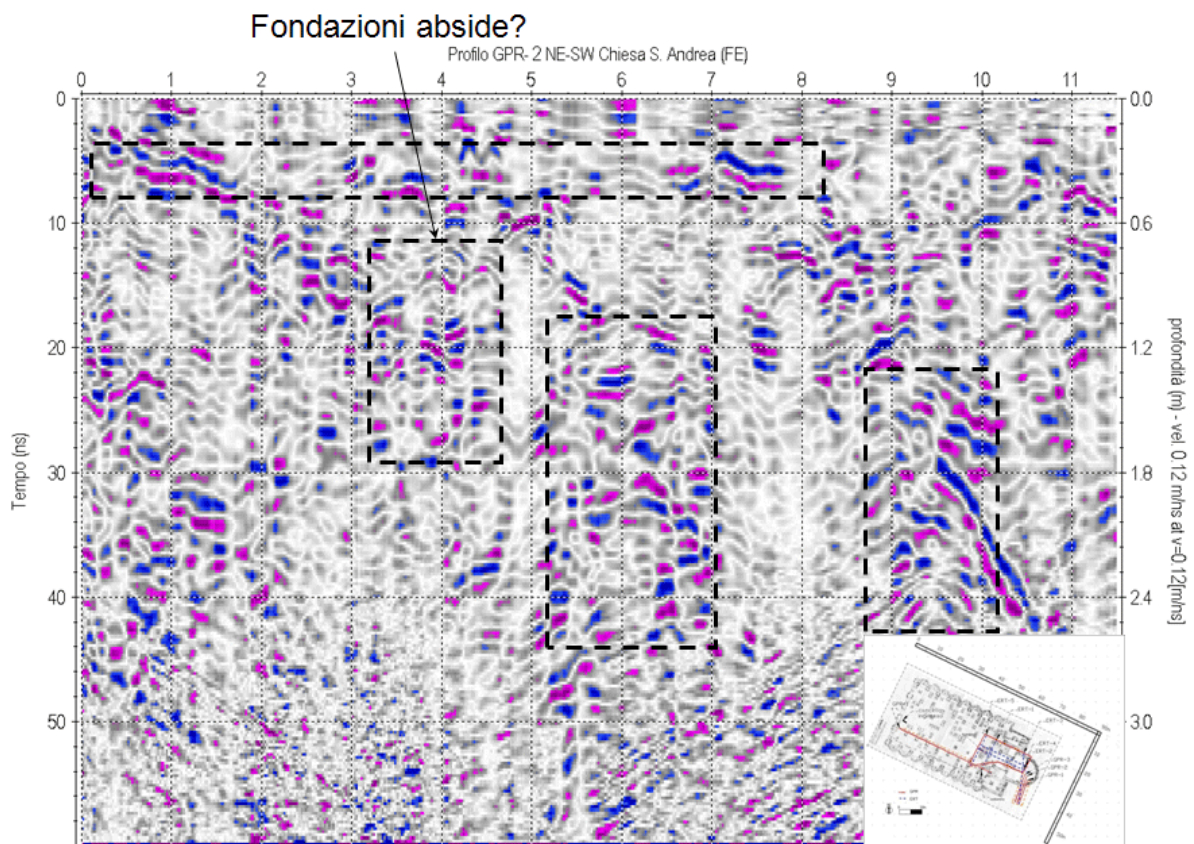


Fig. 15: Profilo GPR-2

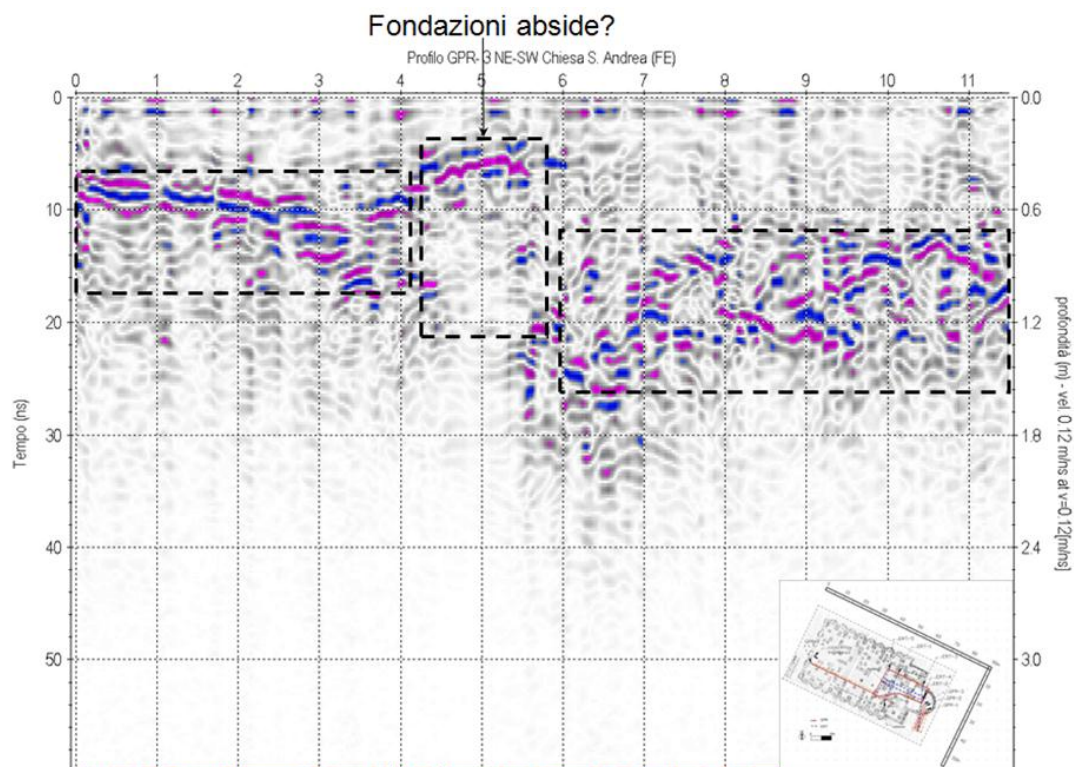


Fig. 16: Profilo GPR-3

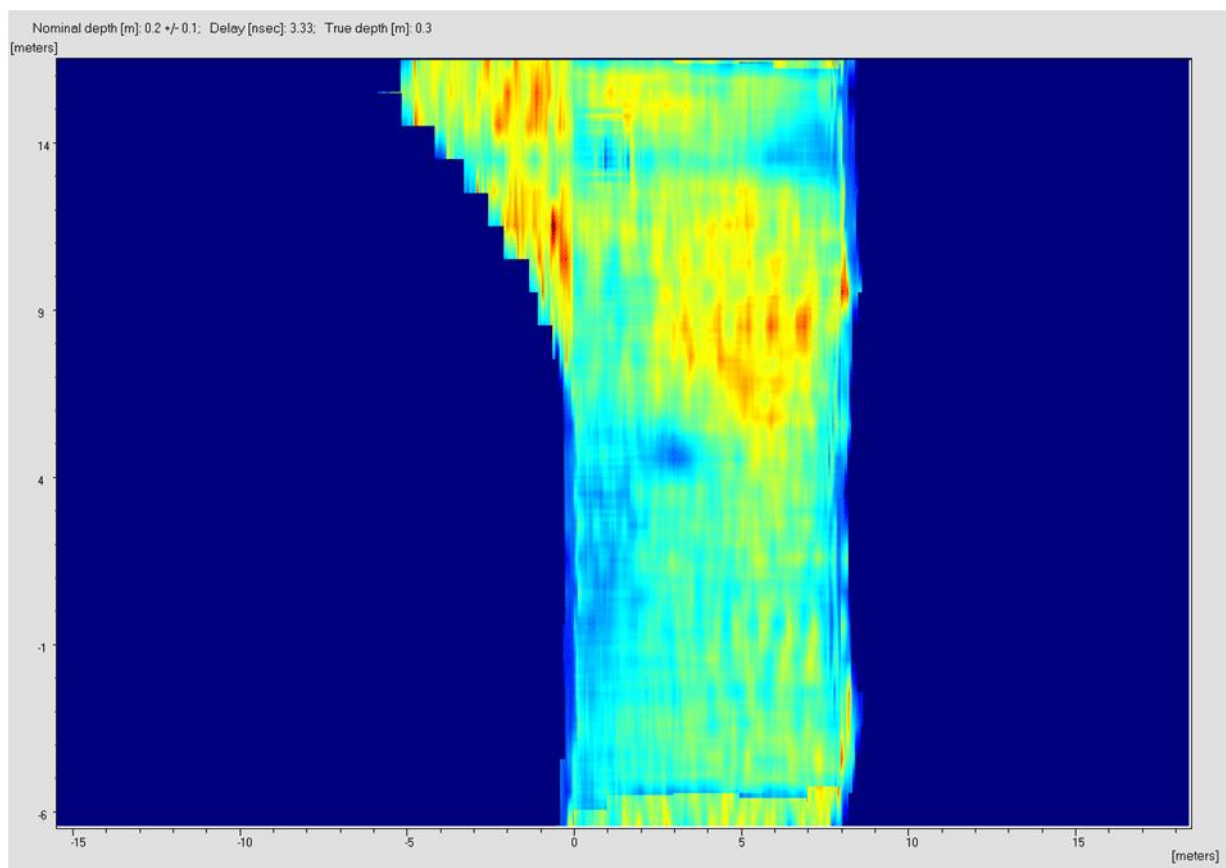


Fig. 17: Sezione tempi orizzontale della mappa GPR a 3.3 ns (tempi doppi)

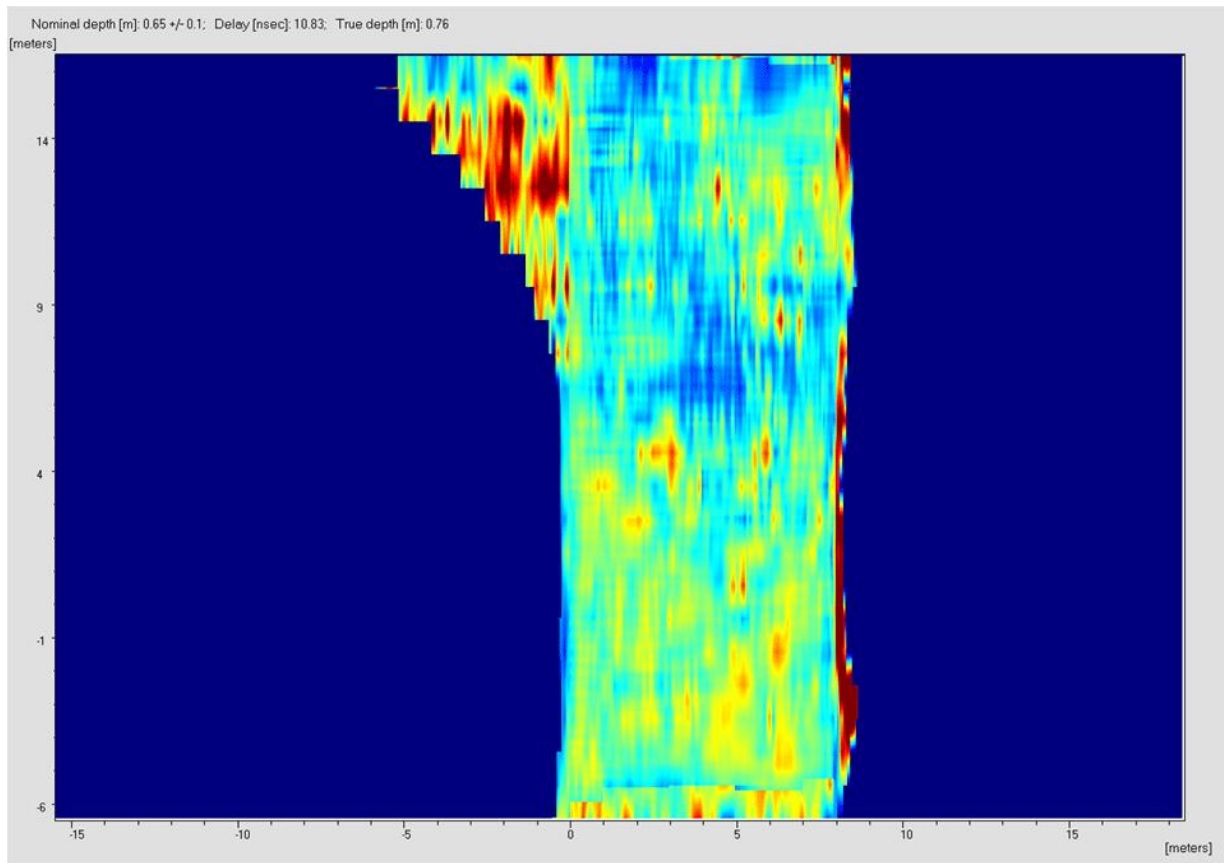


Fig. 18: Sezione tempi orizzontale della mappa GPR a 10.8 ns (tempi doppi)

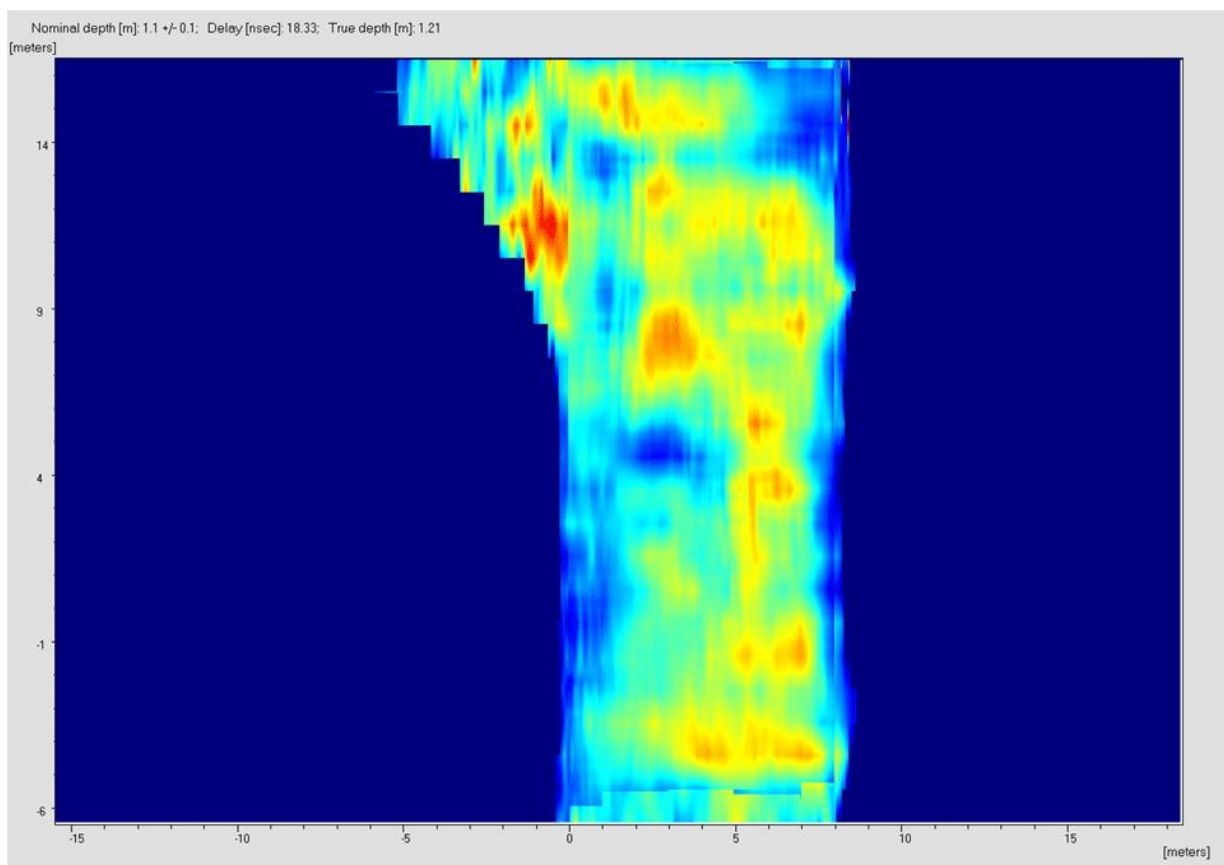


Fig. 19: Sezione tempi orizzontale della mappa GPR a 18.3 ns (tempi doppi)

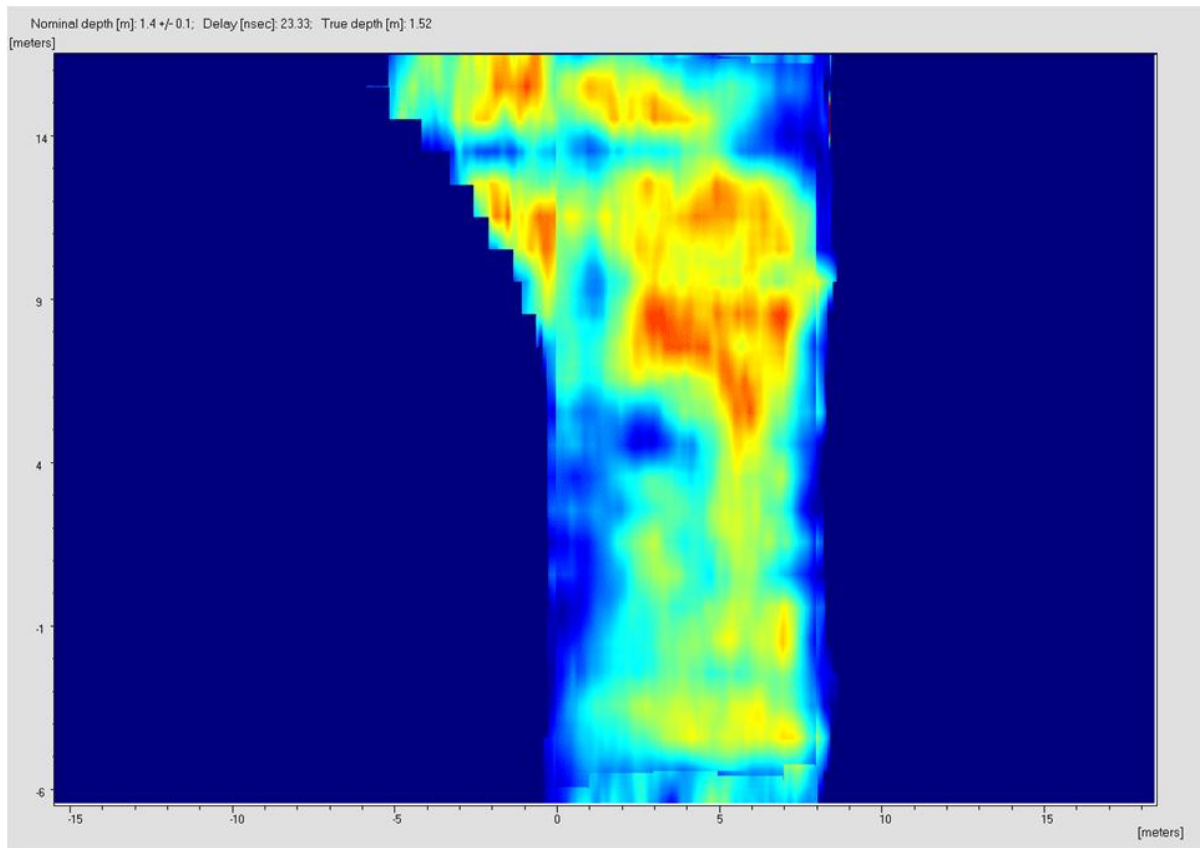


Fig. 20: Sezione tempi orizzontale della mappa GPR a 23.3 ns (tempi doppi)

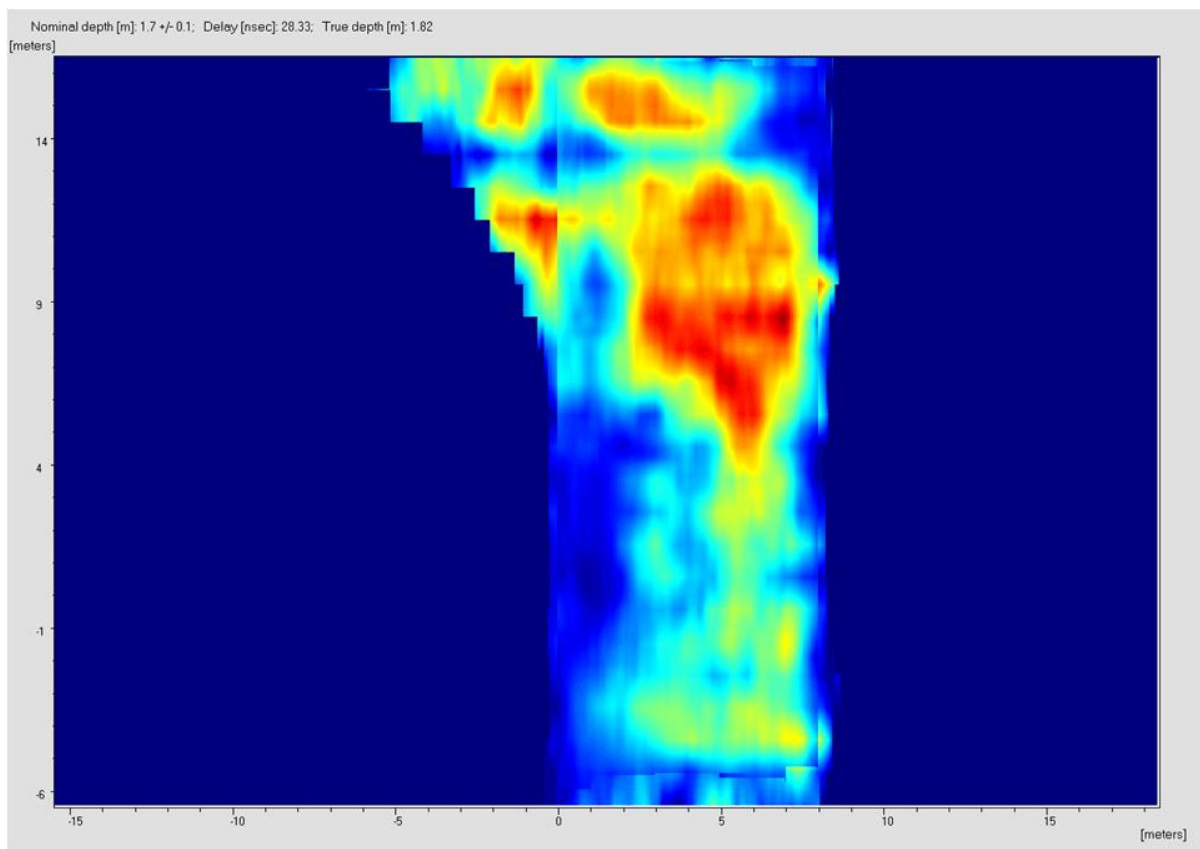


Fig. 21: Sezione tempi orizzontale della mappa GPR a 28.3 ns

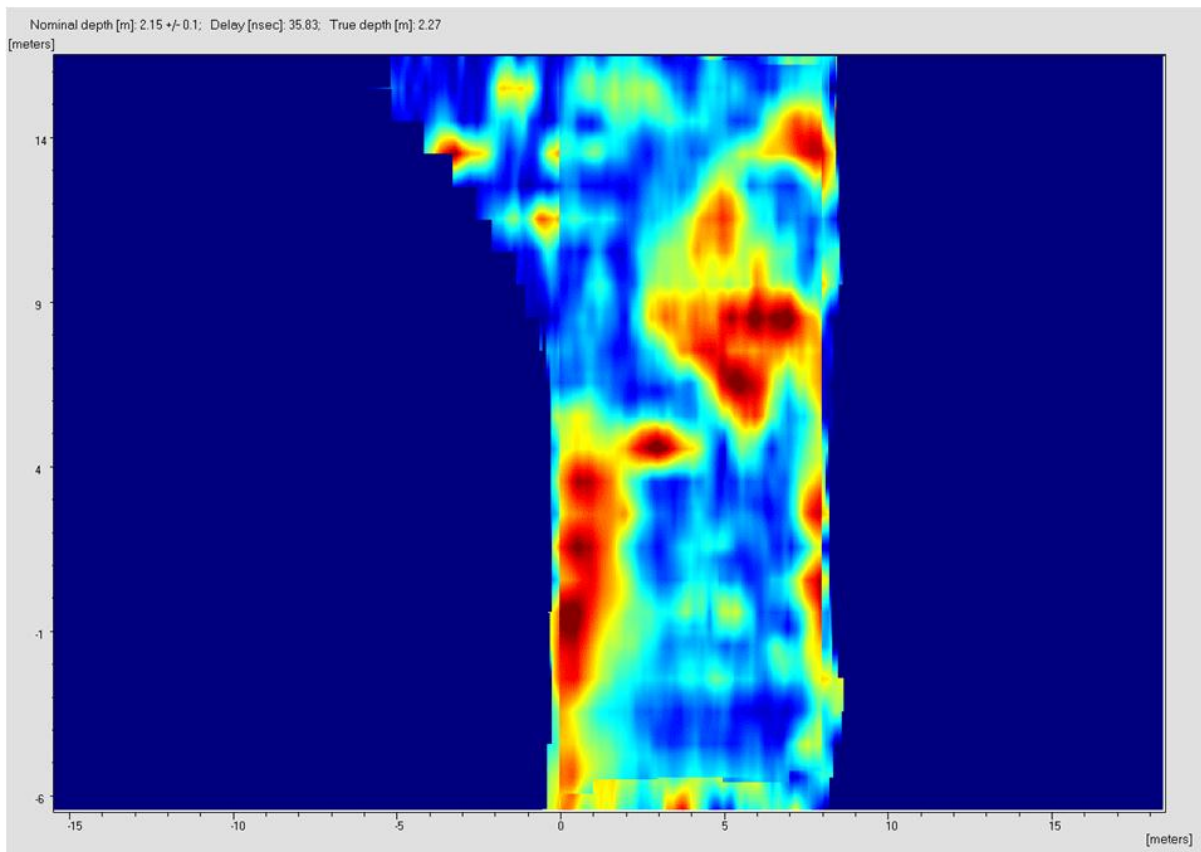


Fig. 22: Sezione tempi orizzontale della mappa GPR a 35.8 ns

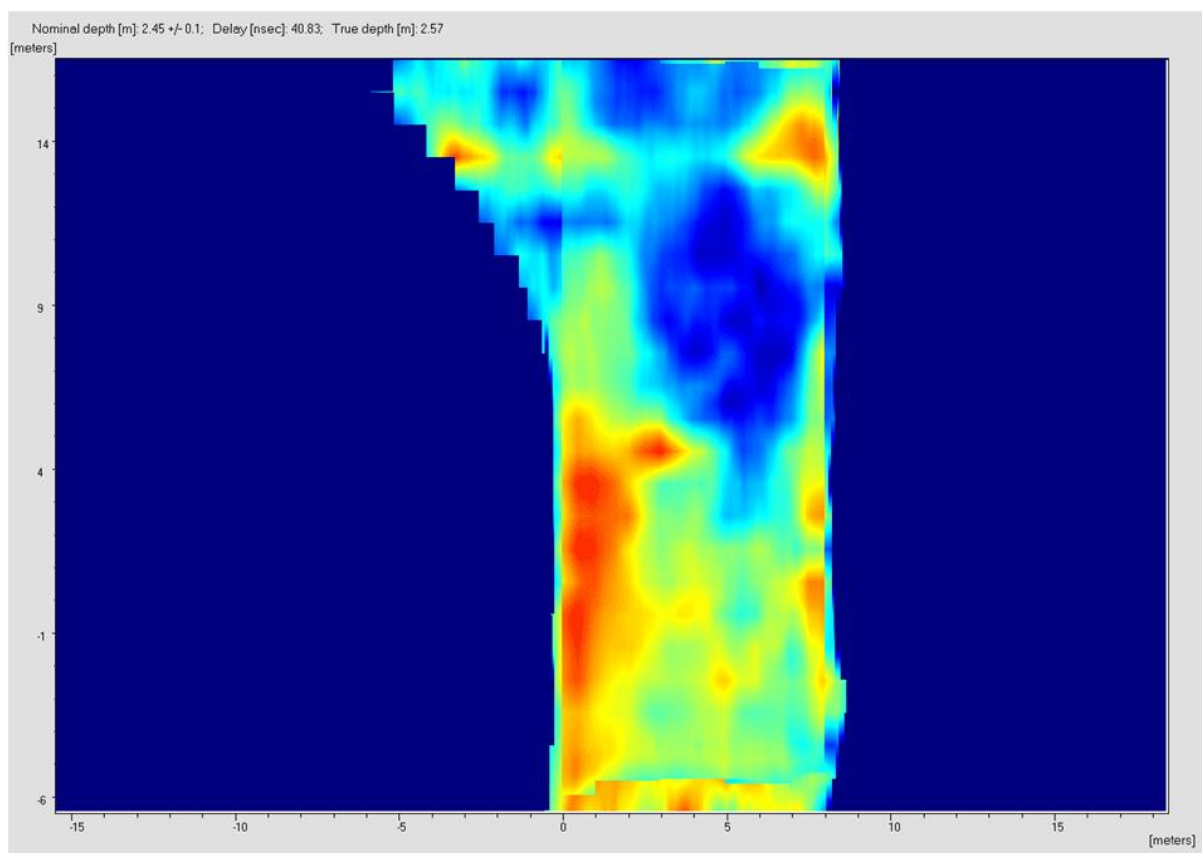


Fig. 23: Sezione tempi orizzontale della mappa GPR a 40.8 ns

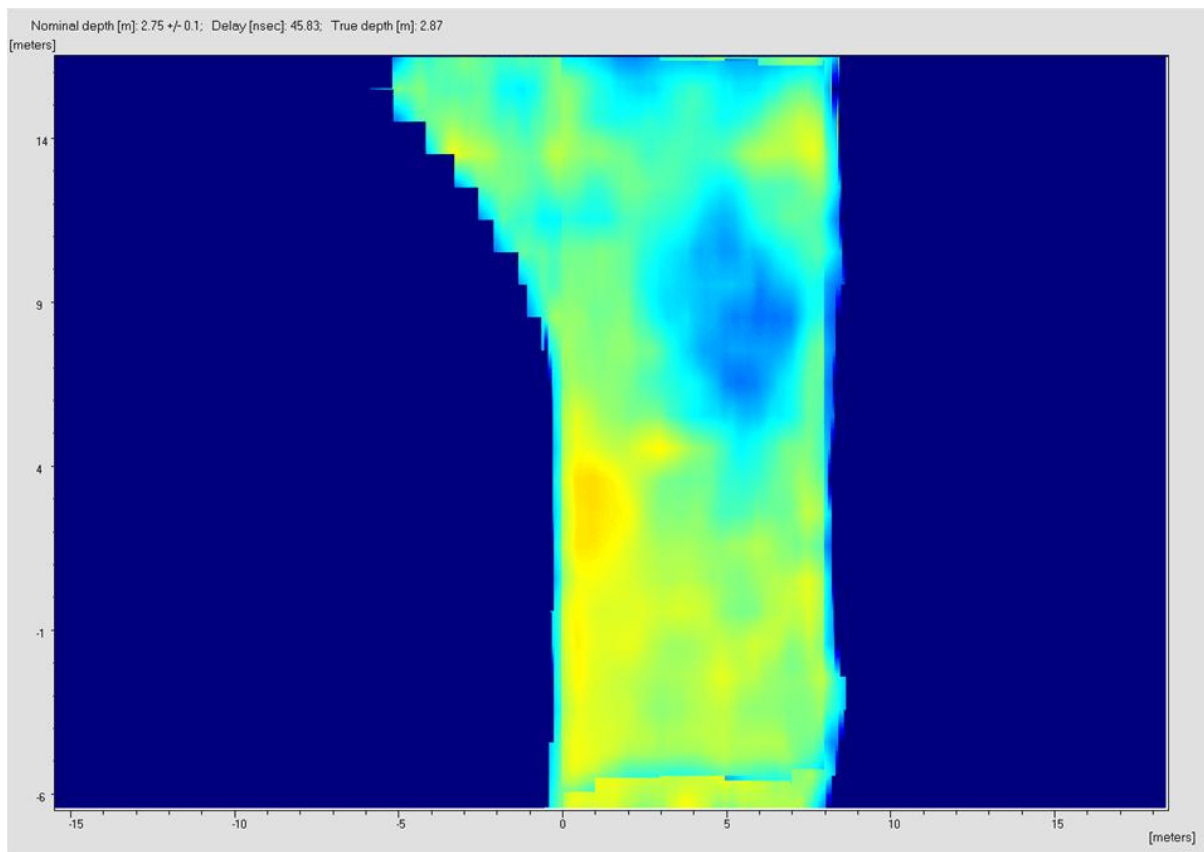


Fig. 24: Sezione tempi orizzontale della mappa GPR a 45.83 ns

Metodo ERT

Nelle Figg. 25 e 26 sono riportati i modelli di resistività stimati sotto i profili ERT1, 2, 3, 4 e 5, invertendo i dati di resistività apparente misurati su ciascun profilo tomografico. Al fine dell'omogeneità della rappresentazione, tutti i modelli sono stati graficati nella stessa scala di resistività da 0 a 500 Ωm . Per l'identificazione litologica dei valori della resistività, occorrerebbero "tarature" locali, cioè la verifica in punti scelti dell'effettiva litologia del sottosuolo investigato e la conseguente definizione della corrispondenza locale resistività-formazione. Questa corrispondenza viene poi estesa all'intera area investigata; in questo modo il modello geofisico diventa modello geo-litologico.

In considerazione del carattere sperimentale dell'indagine, quindi dell'assenza di qualsiasi informazione diretta locale, si può ipotizzare la summenzionata corrispondenza sulla base dell'esperienza accumulata dagli scriventi nella caratterizzazione geofisica sia del sottosuolo del territorio ferrarese che della risposta elettrica dei materiali da costruzione.

Si possono pertanto ipotizzare, in linea di massima, le seguenti corrispondenze, per le comuni litologie ferraresi (sature in acqua dolce):

1. argille: da 5 a 20 Ωm ;
2. limi: da 20 a 50 Ωm ;
3. sabbie: da 50 a 150 Ωm .

Per quanto riguarda il costruito tipico ferrarese:

1. muratura di mattoni asciutta: oltre 3000 Ωm ;
2. muratura di mattoni saturi (acqua di falda): 300-1000 Ωm ;
3. muratura di mattoni saturi con presenza di efflorescenze saline: <100 Ωm .

Nella Fig. 25 sono rappresentati i profili ERT 1 (trasversale) e ERT 2 (longitudinale). La caratteristica saliente di ERT 1 è l'anomalia fortemente resistiva al centro del profilo. Altre anomalie resistive sono presenti tra le progressive 9 e 11 m ed in superficie. All'anomalia resistiva centrale corrisponde nella mappa storica una sepoltura. Le anomalie superficiali sono invece da attribuire a residui della pavimentazione, che emergono alla semplice scorticatura. Le altre anomalie resistive non hanno corrispondenze altrettanto evidenti. Nel profilo ERT 2 si nota una discontinuità, ad andamento irregolare, che separa la parte superficiale, più resistiva, dal substrato, più conduttivo, ad una profondità media di 1 m. Si può presumere che la parte superficiale rappresenti i volumi rimaneggiati nella costruzione della fabbrica ed il substrato il terreno in posto, a matrice limoso-sabbiosa, come emerge anche dalle informazioni geomorfologiche disponibili. L'anomalia resistiva oltre 23 m è probabilmente da associare a costruzione recente interrata.

Nella Fig. 26 sono rappresentati i profili ERT 3, ERT4 ed ERT5, eseguiti nel retro dell'abside. Il profilo ERT 3 ha una struttura relativamente semplice. Innanzitutto si nota con chiarezza una stratificazione sub-orizzontale, che separa la parte superficiale, più resistiva ed irregolare, dal substrato, ad una profondità variabile, intorno a 1.7 m. La parte superficiale presenta quattro volumi più resistivi, tra le progressive 6-9 m e 12-15 m.

Il profilo ERT 4 presenta una forte anomalia resistiva all'estremo sinistro, ed altre anomalie resistite, ma più deboli delle precedenti, confinate entro circa 1.7 m di profondità.

Il profilo ERT5 è notevolmente diverso: esso presenta una sostanziale stratificazione, a partire dalla progressiva 5 m, tra una parte superficiale resistiva ed un substrato più conduttivo. Tra le progressive 0 e 5 m si evidenzia una forte anomalia resistiva.

Nella Fig. 27 è stato riassunto infine il quadro delle anomalie resistite riscontrate con l'indagine ERT. Ad alcune di queste nelle precedenti Figg. 25 e 26 è stata attribuita una possibile causa, ogniqualevolta questa sembrava plausibile (coincidenza con una tomba mappata, vicinanza al basamento di una colonna o di una costruzione moderna sotterranea...)

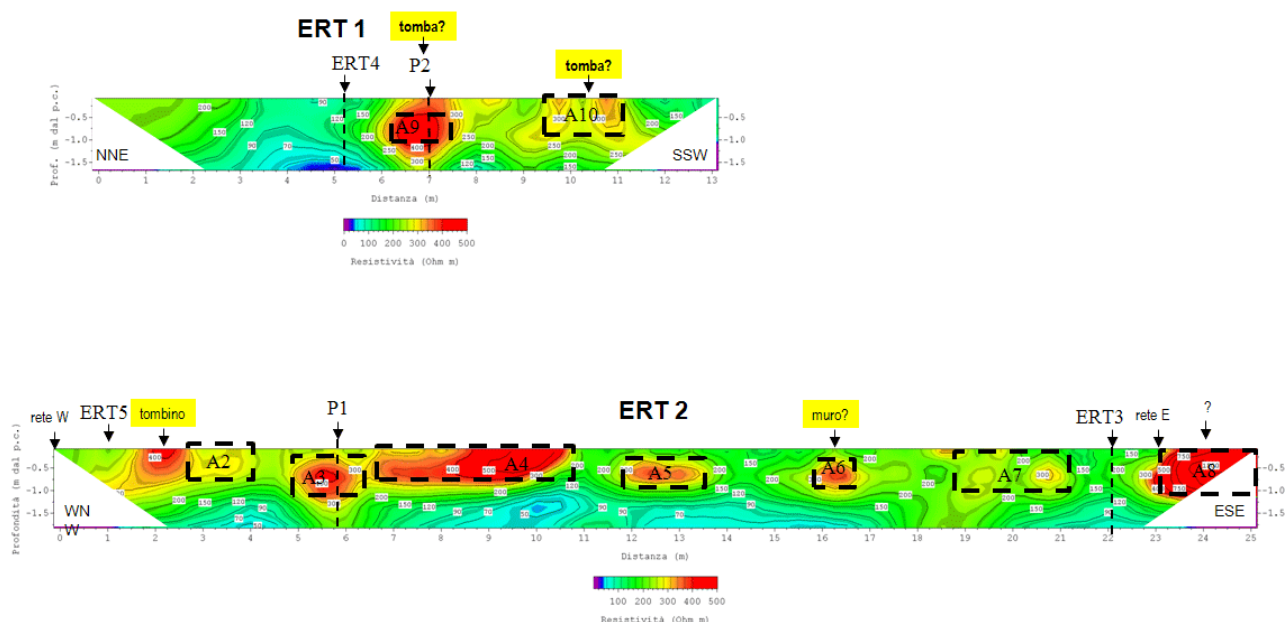


Fig. 25: Profili ERT-1 e ERT-2

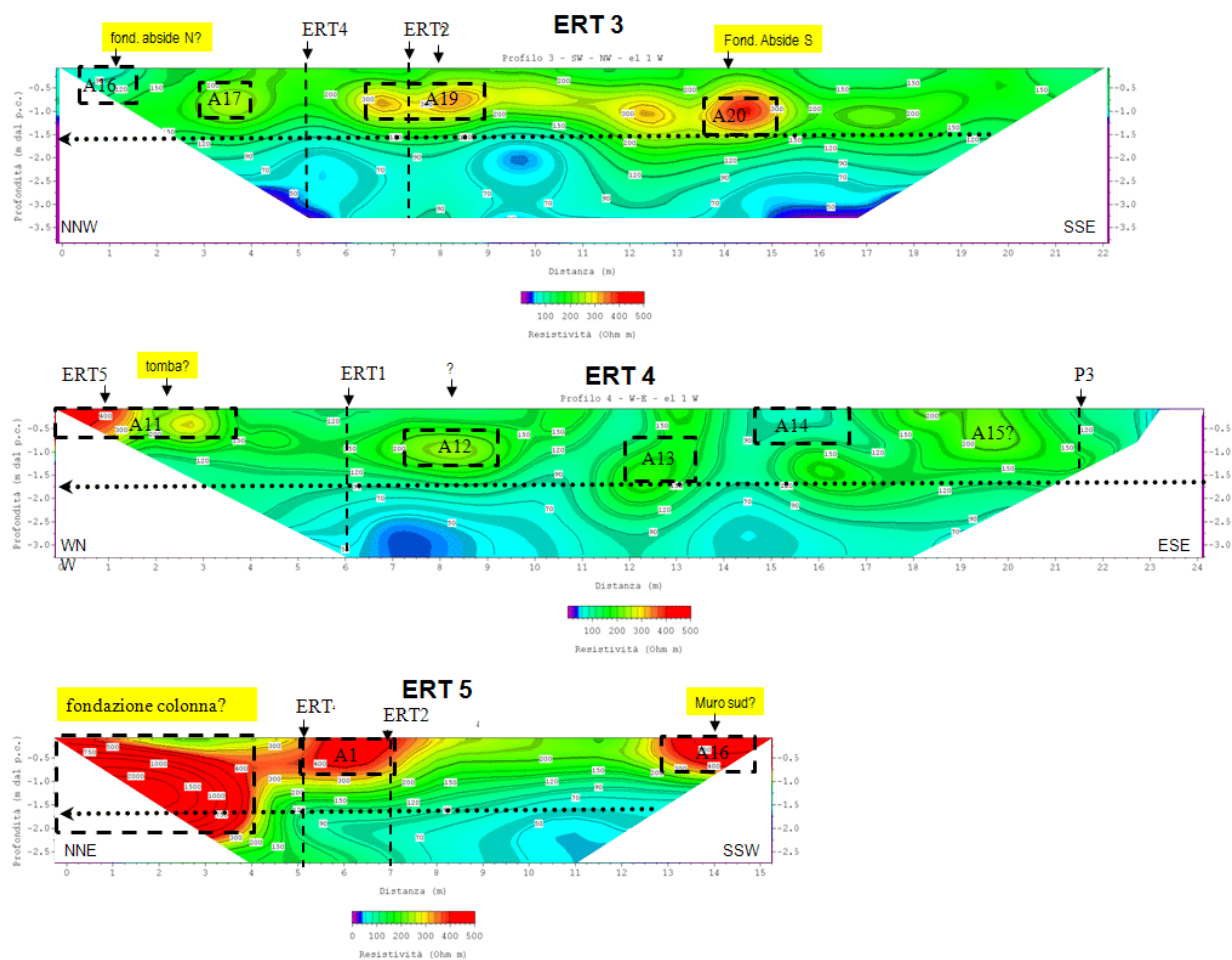


Fig. 26: Profili ERT-3, ERT-4 ed ERT-5

Molte altre anomalie sono state rivelate sia dall'indagine GPR che dall'indagine ERT, le cui cause sono evidentemente da accertare con indagini dirette.

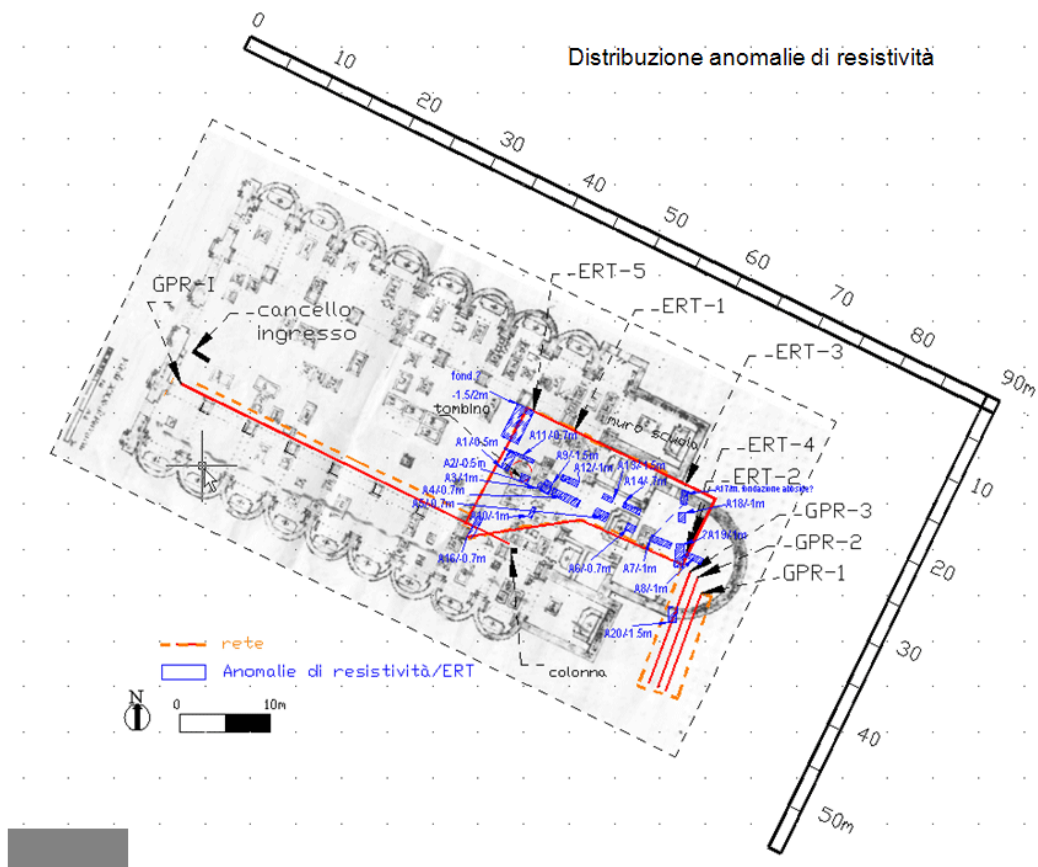


Fig. 27: Quadro riassuntivo delle anomalie resistive riscontrate con l'indagine ERT