

PAOLO BALDI (*), STEFANO CAMPANA (**), PAOLO DURANTE (*)
& CRISTINA FELICI (**)

MAGNETOMETRIA E GPR INDAGINE INTEGRATA NELL'AREA TEST «BOSCO DELLA CITTÀ»

Abstract - PAOLO BALDI, STEFANO CAMPANA, PAOLO DURANTE, CRISTINA FELICI - Magnetometry and GPR: an integrated survey in «Bosco della Città» test area.

GPR and Magnetic methods are two of the most employed geophysical techniques for shallow round surveying for anthropic structures of both archaeological and environmental interest. Both methodologies were used in «Bosco della Città» test-area with the aim of improving the knowledge on their potential and limit by investigating the instrumental responses of the targets buried in the area. A GPS survey was also carried out in order to georeferenced the acquired data.

Key words: GPR, Magnetometry, GPS, Test Area.

Riassunto - PAOLO BALDI, STEFANO CAMPANA, PAOLO DURANTE, CRISTINA FELICI - Magnetometria e GPR: indagine integrata nell'area test «Bosco della Città».

Le tecniche di indagine GPR e Magnetica rappresentano due tra le più diffuse metodologie per la prospezione dei primi metri di sottosuolo nella ricerca di strutture di origine antropica di interesse archeologico e/o ingegneristico-ambientale. L'indagine eseguita nell'Area Test «Bosco della Città» ha rappresentato un valido strumento per la validazione delle tecniche sopra citate, mettendone in luce, attraverso le risposte fornite da ciascun target presente nell'area, pregi e limiti applicativi. Un rilievo GPS dell'intero settore ha completato l'indagine consentendo la georeferenziazione delle misure acquisite.

Parole chiave: GPR, Magnetometria, GPS, Area Test.

(*) Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Fisica.

(**) Laboratorio di Archeologia dei Paesaggi e Telerilevamento (LAP&T).

1. INTRODUZIONE

L'esperienza condotta presso l'Area Test «*Bosco della Città*» rientra in un progetto di ricerca più ampio che ha per oggetto l'applicazione ed integrazione di differenti metodologie di prospezione geofisica (GPR, Geoelettrica e Magnetometria) in campo archeologico ed ambientale; in questo ambito è stata attivata una collaborazione tra il Dipartimento di Fisica-Settore Geofisica dell'Università di Bologna ed il Laboratorio di Archeologia dei Paesaggi e Telerilevamento dell'Università di Siena.

L'esperienza effettuata ha consentito il confronto tra misure magnetiche ed elettromagnetiche eseguite durante un rilievo effettuato nell'area test, prendendo in considerazione le risposte fornite dai differenti target presenti nell'area.

Il vantaggio dell'esecuzione di misure eseguite su un'area test è stato quello di disporre di un'ampia serie di bersagli di differente natura, circoscritti in un perimetro di circa 250 m² ed aventi caratteristiche dimensionali e profondità di interro note.

La strumentazione utilizzata è rappresentata da un magnetometro Overhauser in assetto gradiometrico di GEM System per la misura magnetica e dal Georadar SIR-3000 con antenna da 400 MHz, prodotto dalla Geophysical Survey System, Inc., per l'indagine radar.

La scelta delle due metodologie, Magnetica e GPR, si fonda sulla rapidità di esecuzione delle misure, combinata ad una buona risoluzione visiva delle immagini relative ai target sepolti.

Attraverso un accurato rilievo GPS sono stati definiti i contorni dell'area di indagine, la topografia e l'ubicazione delle griglie di misura.

Dall'analisi integrata delle due metodologie di indagine è stato possibile ricostruire la planimetria dell'area test riferita ad una profondità approssimabile a quella di interro delle strutture (0.60 m), la presenza di elementi non indicati in carta, consentendo inoltre di definire vantaggi e svantaggi relativi alle due tecniche di prospezione.

2. GPS

Il GPS (*Global Position System*) è un sistema di posizionamento basato sulla ricezione di segnali radio emessi da 24 satelliti posizionati in orbite a circa 20000 km di altezza: la configurazione attuale permette la visibilità di almeno 4 satelliti in ogni istante e luogo del pianeta. Le coordinate di un punto sulla superficie terrestre possono essere determinate attraverso la misura della distanza fra osservatore e satellite, distanza che viene calcolata misurando il ritardo temporale o la differenza di fase tra il segnale ricevuto ed un clone generato dal ricevitore.

Il valore ottenuto in realtà, è alterato da parecchie cause di errore (quali la non perfetta sincronia degli oscillatori, rifrazione troposferica e ionosferica, interferenze elettromagnetiche, variazione del centro di fase dell'antenna, percorsi multipli, riflessioni, ecc.) complicando le procedure di analisi necessarie per il posizionamento.

Il posizionamento GPS può essere eseguito nelle modalità assoluta, relativa e differenziale e le misure effettuate in maniera statica o cinematica. Nel posizionamento relativo si riescono a raggiungere le precisioni maggiori (alcuni millimetri): vengono determinate le componenti del vettore linea-di-base che unisce due vertici GPS eliminando o, comunque, riducendo gli errori sistematici da cui sono affette le misure nelle due stazioni. I posizionamenti assoluto e differenziale, invece, forniscono le coordinate di un vertice in un sistema di riferimento globale; nel secondo caso, viene applicata una correzione differenziale alle distanze satellite-ricevitore, calcolate da una stazione di riferimento, per migliorare la precisione delle coordinate.

La differenza tra una applicazione statica e cinematica, come si può intuire dai nomi stessi, è che, nel primo caso, si permane sui punti di stazione per un certo intervallo di tempo mentre, nel secondo, il ricevitore è in continuo movimento.

Nelle applicazioni statiche l'uso dell'osservabile fase consente di raggiungere precisioni sub-centimetriche nel posizionamento relativo di punti posti anche a grande distanza.

Nel caso cinematico, dove le coordinate del ricevitore mobile variano nel tempo, è necessario utilizzare specifiche procedure di inizializzazione e di trattamento dei dati (BEUTLER *et al.*, 1995). In questo caso è ancora possibile determinare la posizione istantanea dell'osservatore mobile con accuratze centimetriche.

2.1 Caratteri del Rilievo GPS

Nell'area di studio è stato eseguito un rilievo GPS in modalità cinematica con passo di campionamento di 1 secondo. L'antenna è stata montata su uno zaino e, tenuta in posizione verticale, è stata trasportata lungo il perimetro dell'area di indagine, disegnando inoltre sul terreno le geometrie delle griglie del rilievo geofisico, secondo uno schema precedentemente progettato.

Le coordinate dei punti sono riferite ad una stazione GPS di riferimento posizionata in corrispondenza del vertice di NO dell'area di indagine.

Tale rilievo ha permesso oltre all'ubicazione delle misure effettuate in seguito, anche la determinazione dell'andamento altimetrico dell'Area Test (Fig. 1a-1b).

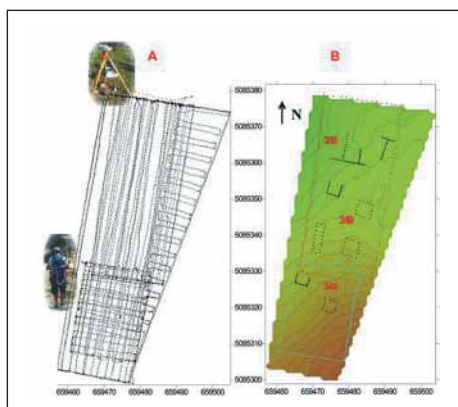


Fig. 1 - a) Percorso del rilievo GPS; b) ricostruzione topografia ed ubicazione delle griglie di misura e dei target.



Fig. 2 - Magnetometro a protoni Overhauser.

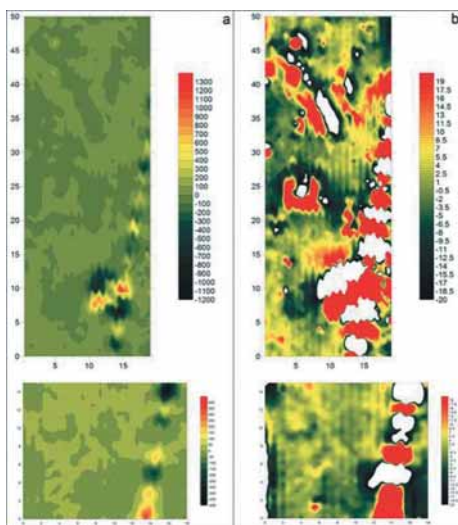


Fig. 3 - Mappa delle anomalie magnetiche.

3. INDAGINE MAGNETICA

Il metodo magnetometrico risulta essere quello maggiormente utilizzato per prospezioni in aree archeologiche già a partire dal 1950 (BELSCHE, 1957; AITKEN *et al.*, 1958). La metodologia è basata sulla misura delle variazioni spaziali del

campo magnetico terrestre dovute alla presenza nel sottosuolo di corpi aventi differenti caratteristiche magnetiche legate a processi di smagnetizzazione e ri-magnetizzazione che hanno interessato «l'oggetto».

3.1 Caratteri del Rilievo Magnetometrico

L'acquisizione è stata effettuata il giorno 17 novembre 2004 nelle ore comprese tra le 9.00 e le 13.00. La strumentazione è rappresentata da un magnetometro a protoni Overhauser di GEM System montato in assetto gradiometrico con sensori posti a 105 cm di distanza (Fig. 2).

Sono stati acquisiti dati relativi a due griglie di misura contigue, una di 50×20 m e l'altra di 15×18 m con passo di campionamento di 0.50 m in direzione Est-Ovest e di 0.5 sec in direzione Nord-Sud (corrispondenti in media a 0.30 m).

La realizzazione delle misure è avvenuta seguendo un metodo diffuso per l'acquisizione speditiva di dati in assetto continuo. Come riferimento è stata utilizzata una corda lungo la quale sono stati apposti dei segni ogni 10 m che consentono di isolare in n sessioni di misura l'acquisizione dei dati lungo l'asse y, migliorandone l'accuratezza della collocazione spaziale. Il rilievo topografico delle griglie è stato realizzato dall'Università di Bologna tramite la misurazione dei vertici con GPS in modalità differenziale.

3.2 Elaborazione dati e risultati

L'elaborazione dei dati è stata effettuata attraverso il software Surfer 8 che ha consentito di graficare l'andamento delle anomalie magnetiche riscontrate.

Il primo passo è stata la generazione del file *grid* con il metodo di interpolazione Kriging; la rappresentazione grafica del file a causa della presenza di valori molto elevati (+1300 nT/m, -1200 nT/m) consente quasi solo il riconoscimento della rete elettrosaldata (Fig. 3a).

Al fine di ottenere una visualizzazione migliore dei dati le misure sono state stirate (non filtrate) privilegiando i valori compresi tra +20 nT/m e -20 nT/m (fig. 3b).

Il confronto tra i bersagli e i dati magnetici è stato effettuato a monitor in ambiente GIS a seguito della georeferenziazione della cartografia tecnica (messa a disposizione dal Museo Civico di Rovereto) e della restituzione grafica dei dati gradiometrici (Fig. 4).

Target 1-Muro di sassi a secco con tratto riempito con bentonite. L'oggetto sepolto risulta sostanzialmente invisibile all'indagine magnetica. In corrispondenza del target il segnale è piuttosto elevato e la restituzione grafica mostra un dipolo con andamento NO-SE, quasi opposto al bersaglio, e valori compresi tra

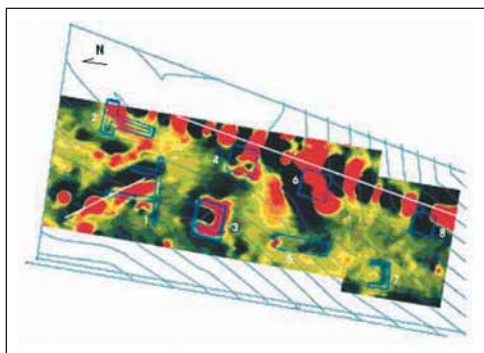


Fig. 4 - Sovrapposizione dei target alla mappa delle anomalie magnetiche.

+55 nT/m, -68 nT/m e +11 nT/m e -12 nT/m. Considerato che non mancano corrispondenze tra misura magnetica e bersagli riteniamo improbabile imputare il risultato ad un errore strumentale. L'ipotesi è a nostro parere la presenza nel terreno di elementi magnetici estranei agli oggetti riportati nella planimetria dell'area test che forse coprono il segnale del target.

Target 2-Muro di sassi malta e intonaco. La visibilità del bersaglio con forma a T, come tutti i target situati lungo il lato Est dell'area test, è influenzata dalla presenza di una fortissima anomalia, con valori compresi tra +238 nT/m, -378 nT/m e +134 nT/m, -87 nT/m, costituita da una serie di dipoli allineati in direzione NNE-SSO ed estesi per 52 m; questa anomalia può essere ritenuta imputabile alla presenza (non denunciata) di un tubo metallico. Nel caso specifico il target non è visibile.

Target 3-Muro in mattoni di argilla con malta. Come era prevedibile la presenza del laterizio ha dato una risposta positiva. Il magnetometro ha registrato la presenza di un dipolo con valori medi oscillanti tra +50 nT/m, -40 nT/m. In corrispondenza del bersaglio la restituzione grafica dei dati magnetici mostra una ottima correlazione con la forma a ferro di cavallo.

Target 4-Platea di cemento. Nonostante la vicinanza con il già citato elemento di disturbo, la parte Ovest della platea di cemento risulta approssimativamente percepibile per via della variazione dei valori di suscettività compresi tra +63 nT/m, +11 nT/m e -16 nT/m, -4 nT/m.

Target 5-Strada di sassi e cemento. I segnali registrati dai sensori in corrispondenza della strada sono piuttosto labili. È percepibile una minima variazione di valori con un intervallo compreso tra +11 nT/m, +2 nT/m e -23 nT/m, -3 nT/m. La costanza dei suddetti valori consente, nella rappresentazione grafica dei dati, la visualizzazione di una leggera variazione tonale di forma rettangolare in corrispondenza del target.

Target 6-Platea di cemento con rete elettrosaldata. Come era lecito aspettarsi la presenza della rete metallica comporta la visibilità eccezionale del target che, nonostante la sovrapposizione lungo il margine Est con la presunta tubatura, restituisce valori massimi di + 955 nT/m e minimi di -859 nT/m.

Target 7-Fossa di argilla limosa lacustre. In seguito alla stiratura dei valori (fra + 8 nT/m e - 6 nT/m) la rappresentazione grafica delle misure mostra chiaramente la corrispondenza tra anomalia e target.

Target 8-Vuoto riempito con polistirolo. L'impatto è condizionato dalla forte anomalia prodotta dall'elemento di disturbo. Ad una osservazione più attenta si può notare che la parte più esterna verso Ovest del polo negativo dell'anomalia prodotta dall'elemento di disturbo sembra sovrapporsi ad una seconda anomalia di forma quadrata di circa 2 m di lato di cui è ben visibile la parte ovest che coincide con la fossa riempita da polistirolo.

4. INDAGINE GPR

La tecnica di prospezione GPR (*Ground Probing Radar*) è basata sulla propagazione nel terreno di onde elettromagnetiche per la localizzazione ed identificazione delle strutture in esso presenti, attraverso la determinazione delle variazioni delle proprietà elettriche e magnetiche del mezzo indagato. L'onda viene irradiata dall'antenna trasmittente in un range di frequenze che va da 10 MHz a 1000 MHz e viaggia attraverso il mezzo ad una velocità che è funzione delle proprietà elettromagnetiche del mezzo stesso (REYNOLDS, 1997).

Il parametro che influenza la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche è la permittività, capacità dei materiali di immagazzinare energia elettrica. Il rapporto tra la permittività del materiale e quella dello spazio libero è noto come costante dielettrica relativa (ϵ_r) e la velocità di propagazione dell'onda risulta dunque essere inversamente proporzionale alla radice quadrata di ϵ_r . Come chiara conseguenza di questa proporzionalità risulta che la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nei mezzi (ANNAN & DAVIS, 1977) che costituiscono la terra siano spesso notevolmente inferiori alla velocità di propagazione nell'aria (Tab.1).

Qualora lungo il cammino l'onda incontri delle variazioni delle proprietà elettriche dei materiali, subisce una riflessione e torna in superficie dove viene catturata dall'antenna ricevente (RX), molto spesso accoppiata a quella trasmittente (TX).

Diretta conseguenza è rappresentata dalle difficoltà che la tecnica di misura radar incontra in indagini su terreni aventi alti valori di conduttività dovuti spesso alla presenza di minerali argillosi e fluidi interstiziali (Tab. 2).

Materiale	Permittività Relativa ϵ_r	Velocità m/ns	Conduttività mS/m
Aria	1	0.3	0
Acqua dolce	81	0.033	0.10-30
Acqua di mare	81	0.033	400
Sabbia (asciutta)	4-6	0.15-0.12	0.0001-1
Sabbia (bagnata)	25	0.0055	0.1-1
Silt (bagnato)	10	0.095	1-10
Argilla (bagnata)	8-12	0.106-0.087	100-1000
Ghiaccio puro	4	0.15	0.1-10
Permafrost	4-8	0.15-0.106	0.01-10
Granito (dry)	5	0.134	0.00001
Calcere (dry)	7-9	0.113-0.1	0.000001
Cemento	5-10	0.134-0.095	—
Asfalto	3-5	0.173-0.134	—

Tab. 1 - Proprietà elettromagnetiche di alcuni materiali.

Material	Loss at 100MHz	Loss at 1000MHz
Clay (moist)	5-300 dB m ⁻¹	50-3000 dB m ⁻¹
Loamy soil (moist)	1-60 dB m ⁻¹	10-600 dB m ⁻¹
Sand (dry)	0.01-2 dB m ⁻¹	0.1-2 dB m ⁻¹
Ice	0.1-5 dB m ⁻¹	1-50 dB m ⁻¹
Fresh water	0.1 dB m ⁻¹	1 dB m ⁻¹
Sea water	100 dB m ⁻¹	1000 dB m ⁻¹
Concrete	0.5-2.5 dB m ⁻¹	5-25 dB m ⁻¹
Brick	0.3-2.0 dB m ⁻¹	3-20 dB m ⁻¹

Tab. 2 - *Loss factor* per differenti materiali a 100 MHz e 1 GHz (da Daniels, 2004).

Ulteriori parametri che entrano in gioco nella tecnica di prospezione radar sono l'attenuazione α , causa fondamentale della perdita di energia e funzione complessa delle proprietà elettriche e dielettriche del mezzo attraverso in cui l'onda viaggia, ed il suo reciproco δ ($\delta=1/\alpha$) che rappresenta la profondità alla quale il segnale decresce in ampiezza di $1/e$ ($= 37\%$) rispetto al suo valore iniziale (REYNOLDS, 1997; DANIELS, 2004).

La misura può essere effettuata dalla superficie della terra, in fori eseguiti nel terreno, da aerei e satelliti; resta comunque l'alta risoluzione verticale ed orizzontale del metodo rispetto alle altre tecniche di prospezione geofisica. Antenne a frequenza differente possono essere utilizzate per ottimizzare la misura al tipo di indagine richiesta. Le frequenze più basse garantiscono una più profonda penetrazione con una risoluzione minore, le frequenze più alte consento-

no una minor penetrazione del segnale ma una risoluzione nettamente maggiore. Una risoluzione di pochi centimetri può dunque essere ottenuta utilizzando antenne con frequenze di 1 GHz, mentre antenne a frequenza più bassa (10 MHz) permettono di ottenere una risoluzione di 1 m a grandi profondità (MUSSETT & KHAN, 2003). La miglior risoluzione verticale ottenibile è comunque pari ad $\frac{1}{4} \lambda$ (SHERIFF & GELDARD, 1982). La risoluzione orizzontale è funzione della distanza tra le stazioni di misura e/o dal passo di campionamento, dalla velocità di avanzamento e dalla frequenza dell'antenna. La tecnica di prospezione radar risulta pertanto di notevole aiuto in applicazioni quali identificazione della stratificazione del terreno, studi sul flusso delle acque nel sottosuolo, individuazione di inquinanti, mappature del bedrock, determinazione della profondità della tavola d'acqua ed in tutte quelle situazioni che necessitano di conoscere le caratteristiche del sottosuolo in maniera rapida e precisa (DANIELS, 2004). Per questo motivo il sistema GPR trova notevole spazio in prospezioni in campo archeologico ed ambientale ed una eventuale integrazione con altre tecniche di indagine riduce notevolmente ogni eventuale incertezza nella caratterizzazione dell'area oggetto di studio (AITKEN, 1974).

4.1 Caratteri del rilievo GPR

La campagna di misura è stata eseguita nelle giornate del 29-30 luglio 2004 e 17 novembre 2004. Il sistema GPR utilizzato è il Georadar Sir-3000 con antenna da 400 MHz, capace di garantire una penetrazione del segnale fino a circa 3m di profondità in condizioni litologiche favorevoli (Fig. 5).

Sono stati acquisiti dati relativi a due griglie di misura posizionate in corrispondenza delle precedenti già sfruttate per il rilievo magnetico ed aventi dimensioni di 50×20 m e 25×18 m. Le linee di acquisizione radar (transetti) sono stati spaziati 1 m e registrati con un numero di 50 scan/m, disposti in direzione Nord-Sud (X) e Est-Ovest (Y).



Fig. 5 - Sistema Georadar SIR-3000 della GSSI.

4.2 Dati e risultati

La conoscenza della posizione e delle profondità di interro delle strutture presenti nell'area test ha favorito la fase di taratura dei parametri caratteristici dell'indagine radar, consentendo in una seconda fase del processo di elaborazione di effettuare una stima dei parametri idrologici caratteristici del terreno incassante. Per questo motivo è stato stabilito a priori di effettuare le misure nell'area test in due periodi differenti dell'anno.

La presenza ad una profondità variabile ma prossima alla superficie del bedrock ha in alcuni casi inficiato la risposta dei target, simulando la presenza di strutture alla medesima profondità.

A differenza di quanto avvenuto per l'indagine gradiometrica non si sono verificati problemi nell'acquisizione dei dati relativi al settore Est dell'area di indagine per via della presenza della fonte di disturbo; la prospezione GPR è stata in grado di definire l'esatta posizione e geometria del target non dichiarato. I dati sono stati interpolati ed è stato possibile effettuare una ricostruzione 3D dell'intero settore di indagine.

Target non dichiarato (Fig. 6). In corrispondenza del margine Est dell'area di indagine è stata individuata la presenza di un elemento metallico, probabilmente un tubo che in corrispondenza del target 6 (platea in cemento con maglia metallica elettrosaldata) è interessato da una perdita d'acqua, che ne avrebbe mascherato la risposta all'indagine.

L'ipotesi ha trovato riscontro nei dati presentati al Workshop in Geofisica tenutosi presso il Museo Civico di Rovereto, relativi ad un'altra metodologia di indagine.

L'immagine sottostante mostra inoltre lineamenti relativi alla fratturazione del bedrock in risalita nel settore Est dell'area di indagine.

Dall'interpolazione delle risposte che i bersagli hanno offerto all'indagine radar, è stato possibile ricostruire la pianta dell'intera area test (Fig.7). L'elemento metallico sopra citato è facilmente individuabile in corrispondenza del target 8 mentre è meno visibile in corrispondenza delle progressive metriche 20-40 m, dove però se ne hanno evidenze sul radargramma di figura 5. Di un certo impatto visivo risulta l'anomalia estesa (Figg. 7-8) individuata nel settore meridionale dell'area, ascrivibile a del materiale depositatovi in fase di allestimento o in una fase precedente alla sua realizzazione.

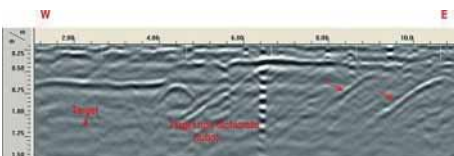


Fig. 6 - Radargramma mostrandone il target non dichiarato e l'andamento del *bedrock*.

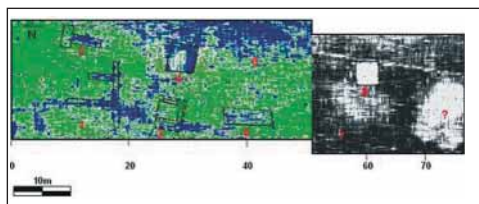


Fig. 7 - Ricostruzione in pianta dell'Area Test attraverso l'interpolazione delle risposte dei differenti target.

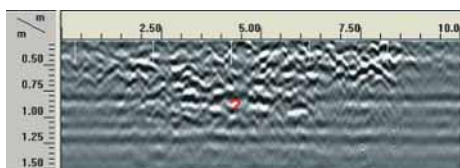


Fig. 8 - Radargramma dell'anomalia ubicata nel margine meridionale dell'Area Test.

Di seguito sono riportati i radargrammi relativi ad alcuni dei target presenti nell'area test e che hanno fornito la risposta migliore all'indagine GPR.

Target 1-Muro di sassi a secco con tratto riempito con bentonite (Fig.9). Il target è posto ad una profondità di circa 0.60 m dal piano campagna; la sua visibilità è abbastanza buona nonostante il radargramma appartenga ad una serie di misure effettuate registrando il segnale con un numero di soli 50 scan/m.

Sembra comunque esservi un'evidenza del passaggio, in seno alla struttura, tra il tratto in semplice muro in pietra ed il tratto riempito con bentonite.

È chiaro che la resa potrà essere superiore impostando un numero maggiore di scan/m; tale parametro non ha comunque influenzato negativamente il risultato della ricostruzione tridimensionale in pianta del target che mostra chiaramente i contorni della struttura a forma di pettine.

Il settore in cui è ubicato il target 1 mostra inoltre chiare evidenze della risalita del bedrock o comunque della presenza di una litologia differente da quella che interessa lo strato superficiale per i primi 0.60m.

Target 4-Platea in cemento (Fig. 10). La platea in cemento è assieme al vuoto (target 8) il target che meglio viene localizzato dall'indagine radar. Anche in questo caso il numero di scan/m è di 50 ma il più netto contrasto nei valori dei parametri elettromagnetici offerti dal cemento rispetto al materiale costituente il target 1 hanno favorito la migliore visibilità della struttura.

Target 5-Strada di sassi e cemento (Fig. 11). La presenza del cemento utilizzata come legante nella realizzazione della struttura che simula una massicciata stradale ha migliorato sicuramente la visibilità del target all'indagine, rispetto alla risposta del target 1.

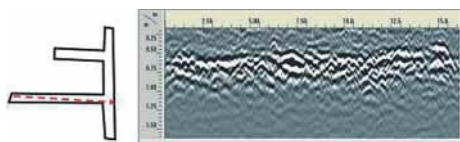


Fig. 9 - Radargramma ed ubicazione dello stesso rispetto al target 1.

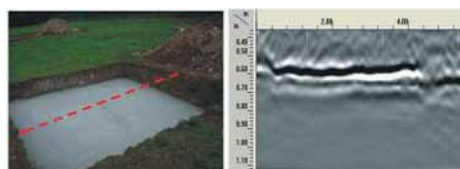


Fig. 10 - Radargramma ed ubicazione dello stesso rispetto al target 4 (Foto del Museo Civico di Rovereto).

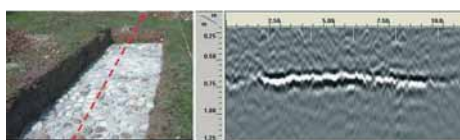


Fig. 11 - Radargramma ed ubicazione rispetto al target 5 (Foto del Museo Civico di Rovereto).

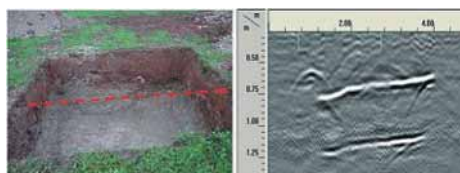


Fig. 12 - Radargramma ed ubicazione rispetto al target 8 (Foto del Museo Civico di Rovereto).

Target 8-Vuoto riempito con polistirolo (Fig. 12). Nel caso del vuoto simulato riempiendo la cavità con del polistirolo il numero di scan è stato incrementato passando a 100 scan/m; in tal senso salta subito all'occhio la miglior risoluzione da un punto di vista grafico dell'immagine. La particolare geometria individuabile sul radargramma deriva dal valore di costante dielettrica relativa ϵ_r , che caratterizza il polistirolo è che vale circa 2.5-3 molto prossima a quella del vuoto ($\epsilon_r = 1$).

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'indagine ha permesso di stabilire l'esatta posizione delle strutture presenti nell'area test attraverso una correlazione dei risultati ottenuti dalle due differenti metodologie di prospezione, grazie alla copertura totale che la tecnica Magnetica e GPR hanno offerto.

I limiti maggiori sono stati riscontrati dalla magnetometria a causa della presenza nel settore Est dell'area test, di un elemento metallico (tubo); ciò ha reso

pressoché invisibili i target localizzati su tale settore ad esclusione dei target 4 e 6, rispettivamente platea in cemento e platea in cemento con rete elettrosaldata. L'indagine nel settore Ovest dell'area test ha consentito di individuare senza alcun disturbo apportato da fonti esterne i target 3 e 7: il primo costituito da un muro in mattoni in argilla con malta ed il secondo rappresentato da una fossa riempita di argilla limosa lacustre. I restanti target relativi al settore Ovest hanno però dato solo delle labili risposte all'indagine magnetica per via della presenza, almeno nell'estremità di Nord-Ovest, di un dipolo magnetico ascrivibile ad una risalita del bedrock o ad una struttura di natura ignota.

Attraverso la tecnica di prospezione GPR, probabilmente più adatta, visti i risultati, alla situazione simulata nell'area test, è stato possibile identificare gran parte dei bersagli ad esclusione proprio dei target 3 e 7, assolutamente invisibili all'indagine; non sono stati riscontrati problemi relativi al bersaglio non dichiarato presente nel settore Est, facilmente individuato in tutta la sua estensione e profondità di interro pressoché simile a quella delle strutture.

È stato possibile osservare una sensibile variazione dei valori di ϵ_r relativa ai due periodi in cui sono state effettuate le misure GPR, stabilendo un rapporto di 1:2 tra luglio e dicembre.

Ultima considerazione va fatta in merito all'interessante ed estesa anomalia presente nel settore a sud dei target 7 e 8, probabilmente da imputare a del materiale di riporto e che comunque sarà oggetto di studio in una prossima campagna di indagine.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il prof. Salvatore Piro e per il prezioso aiuto il dr. Filippo Zani-boni e la dr.ssa Fabiana Loddo.

ELENCO BIBLIOGRAFICO

- AITKEN M.J., 1974 - Physics and Archeology, Clarendon Press, Oxford.
- AITKEN M.J., WEBSTER G., and REES A., (1958) - Magnetic prospecting: *Antiquity* 32, 270-271.
- ANNAN A.P. & DAVIS J.L., 1977 - Radar range analysis for geological materials. GSC Paper 77-1B. Current Research Part B: 117-124.
- BELSHE J.C. (1957) - Recent magnetic investigations at Cambridge University. *Advances in Physics* 6,192193.
- BEUTLER G., HEIN G.W., MELBOURNE W.G. and SEEBER G. (1995) - GPS trends in pre-

- cise terrestrial, airborne, and spaceborn applications, *Int. Asoc. Geod. Symp.*, 115, 275-338.
- DANIELS D.J., 2004 - Ground Penetrating Radar. 2nd Edition, 19-36.
- MUSSETT A.E. & KHAN M.A., 2003 - Esplorazione geologica del sottosuolo, Zanichelli Bologna, 212-216.
- REINOLDS J.M., 1997 - An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 682-749.
- SHERIFF R.E. & GELDARD R.E., 1982 - Exploration Seismology, Volume 1: History, Theory and Data Acquisition, Cambridge University Press, New York, 253 pp.